



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.15.18.17-TDI

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA A EXTRAÇÃO DE  
CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DO CAMPO  
MAGNÉTICO DA COROA SOLAR UTILIZANDO A  
TRANSFORMADA DE HOUGH**

Claudinei Walker da Silva

Tese de Doutorado em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Reinaldo Roberto Rosa, e Joaquim Eduardo Rezende Costa, aprovada em 17 de maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DTFMGP>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.15.18.17-TDI

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA A EXTRAÇÃO DE  
CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DO CAMPO  
MAGNÉTICO DA COROA SOLAR UTILIZANDO A  
TRANSFORMADA DE HOUGH**

Claudinei Walker da Silva

Tese de Doutorado em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Reinaldo Roberto Rosa, e Joaquim Eduardo Rezende Costa, aprovada em 17 de maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DTFMGP>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Si38n Silva, Claudinei Walker da.  
Uma nova abordagem para a extração de características das linhas do campo magnético da coroa solar utilizando a transformada de Hough / Claudinei Walker da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2013.  
xxx + 126 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.15.18.17-TDI)

Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Reinaldo Roberto Rosa, e Joaquim Eduardo Rezende Costa.

1. transformada de Hough. 2. extração de características. 3. reconhecimento de padrões. 4. visão computacional. 5. física solar. I.Título.

CDU 004.932.72

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Computação Aplicada**


Dr. Ezzat Selim Chalhoub

  
Presidente / INPE / SJC Campos - SP


Dr. Reinaldo Roberto Rosa

  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

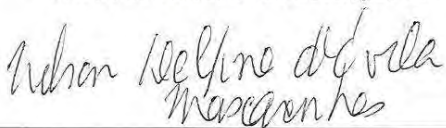
Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa

  
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

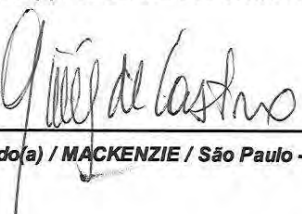
Dra. Corina da Costa Freitas

  
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Nelson Delfino D'Ávila Mascarenhas

  
Convidado(a) / UFSCAR / São Carlos - SP

Dr. Carlos Guilherme Giménez de Castro

  
Convidado(a) / MACKENZIE / São Paulo - SP

**Este trabalho foi aprovado por:**

( ) maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Claudinei Walker da Silva**



*“Ah! Querem uma luz melhor que a do Sol!  
Querem prados mais verdes do que estes!  
Querem flores mais belas do que estas  
que vejo!*

*A mim este Sol, estes prados, estas flores contentam-me.*

*Mas, se acaso me descontentam,*

*O que quero é um sol mais sol  
que o Sol,*

*O que quero é prados mais prados  
que estes prados,*

*O que quero é flores mais estas flores  
que estas flores.*

*Tudo mais ideal do que é do mesmo modo e da mesma maneira!*

ALBERTO CAEIRO, HETERÔNIMO DE FERNANDO PESSOA  
em “*Poemas Inconjuntos*”, 1925





*A Raquel e à Júlia por compreenderem minhas ausências e,  
apesar disto, acreditarem, trilhando comigo este caminho.*



## AGRADECIMENTOS

É sempre muito difícil defrontar o espaço em branco de uma página e iniciar uma lista de agradecimentos, quando tantas pessoas contribuíram direta ou indiretamente para uma empreitada como esta que se materializa agora. Uns tantos agradecem aos pais, outros aos filhos, outros ainda à esposa, em geral pela compreensão oferecida por estes aos momentos de ausência do acadêmico, que de fato, antes de tudo, é um ausente.

Falta com a verdade aquele que diz que ao mirar a referida página em branco não a viu como um portal para o passado, conduzindo-o à sua jornada pela vida escolar: os primeiros cadernos, as primeiras tarefas, os trabalhos escolares, a ansiedade pelo primeiro dia de aula na escola nova. Os funcionários da administração, da lanchonete, da limpeza. Todos aqueles que se deram através do trabalho para que fosse possível ao acadêmico, depois de anos, obter seu título.

Neste cenário penso e sinto de forma verdadeira, e me deixo conduzir às origens da minha vida escolar enquanto escrevo estas linhas. Percebi então que eu somente seria justo e honesto se fizesse repousar meu sincero e afetuoso agradecimento em meus professores. Todos eles. De todos os tipos. À querida professora Maria Cristina de Barros, do infantil, que provavelmente pegou em minha mão e me ensinou as primeiras letras; à professora Marjorie Pereira Lopes, que com criatividade, música e paixão ensinou as primeiras palavras que aprendi da língua inglesa; à professora Clélia Maria Branco, que apesar da severidade ensinou matemática de uma forma que jamais esqueci, e me fez ter os primeiros lampejos de paixão por esta disciplina; a professora Mari Bazani Plaza, que mostrou a importância de conhecermos nossa história; aos professores da graduação em Ciências da Computação na UNESP de Bauru, como a professora Vanilda Miziara Mello Chueiri, de cálculo numérico e métodos computacionais, e especialmente ao professor José Remo Brega, por dar um norte ao meu trabalho de conclusão de curso, minha primeira experiência verdadeiramente acadêmica; à professora Maria Aparecida Gonçalves Martinez, que encorajou um graduado em computação a se atrever a entrar no mundo de Maxwell e suas equações; os professores do CRAAM/Mackenzie, e finalmente aos professores do curso de Computação Aplicada do INPE, especialmente meus orientadores o prof. Reinaldo Roberto Rosa (LAC) e Joaquim Eduardo Rezende Costa (DAS) por tudo, e principalmente por sua paciência. Tenho uma dívida de gratidão imensa com estes e todos os outros professores que não nomeei aqui, e que deram sua contribuição para a minha formação. Meu sincero muito obrigado a todos. Vocês foram minha

inspiração e contribuíram diretamente na minha formação como ser humano.

Eu não poderia encerrar estas páginas de agradecimentos sem citar meus primeiros e verdadeiros professores: meus pais, que tanto desejaram para os filhos aquilo que não tiveram para si próprios, e finalmente às minhas duas professoras de toda uma existência: Júlia Molino, minha filha, por compreender tão docemente minha falta, minhas ausências, sem esperar nada em troca, e à Raquel Molino, a mulher da minha vida, por sua paciência, por sua persistência e esperança em acreditar que eu poderia ser uma pessoa melhor a cada dia.

## RESUMO

A área de Visão Computacional vem apresentando grande evolução nos últimos anos, não apenas sob o aspecto da tecnologia, com o surgimento de novos dispositivos de aquisição, mas também sob o aspecto da pesquisa científica, com o desenvolvimento de trabalhos apresentando novas metodologias, o que naturalmente se reflete no aumento da quantidade e variedade de aplicações. Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de uma nova metodologia baseada no reconhecimento de padrões estruturais das linhas de campo magnético presentes em imagens da coroa solar, utilizando a Transformada de Hough para a detecção destas linhas nas imagens, extraindo suas características. Nossos resultados mostraram que foi possível detectar automaticamente linhas de campo magnético em imagens da coroa solar com sinal maior do que três vezes o desvio-padrão do ruído. A importância deste estudo surge da necessidade fundamental de confrontar os modelos dos campos magnéticos coronais solares com as observações, auxiliando na compreensão de fenômenos que ocorrem na alta atmosfera solar, como as explosões solares, o que certamente pode contribuir para o estudo das relações Sol-Terra.



# A NEW APPROACH FOR THE FEATURES EXTRACTION FROM SOLAR CORONAL MAGNETIC FIELD LINES USING THE HOUGH TRANSFORM

## ABSTRACT

The area of Computer Vision have been great development in recent years, not only from the aspect of technology, with the emergence of new acquisition devices, but also from the aspect of scientific research, with the development of works introducing new methodologies, which naturally reflected in the increased number and variety of applications. This works presents the development of a new methodology based on structural pattern recognition of magnetic field lines present in the images of solar corona using the Hough Transform, in order to detect field lines in images and extract features of these lines. Our results showed that it was possible to automatically detect magnetic field lines in the coronal solar images with signal greater than three times of standard deviation of the noise. The importance of this study arises from the need to confront the models of solar coronal magnetic fields with observations, aiding on the understanding of phenomena that occurs in the upper solar atmosphere, such as solar bursts, which can certainly contribute to research of the Sun-Earth relationship.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Estrutura interna e superfície do Sol. . . . .	5
1.2 Superfície do Sol observada no visível, onde é possível verificar a presença dos grânulos, evidenciando o comportamento convectivo desta região. . .	6
1.3 Disco solar observado no visível. Nesta imagem podemos notar o escurecimento do limbo solar. . . . .	7
1.4 Perfil de temperatura e pressão da atmosfera solar. Podemos notar claramente o aumento da temperatura entre $10^3$ km e $10^4$ km na chamada região de transição. . . . .	8
1.5 Mosaico de imagens do disco solar em diferentes comprimentos de onda do ultravioleta extremo (EUV). Em sentido horário, iniciando no canto superior esquerdo, $1 \text{ M}^\circ\text{C}$ ( $171 \text{ \AA}$ ), $1,5 \text{ M}^\circ\text{C}$ ( $195 \text{ \AA}$ ), $60.000 - 80.000 \text{ }^\circ\text{C}$ ( $304 \text{ \AA}$ ) e $2,5 \text{ M}^\circ\text{C}$ ( $286 \text{ \AA}$ ). . . . .	10
1.6 Diagrama mostrando a estrutura dos campos magnéticos solares. Destacamos que a ocorrência de manchas solares na fotosfera evidencia a presença de campos magnéticos. Estes campos se estendem até a alta coroa solar, formando arcos cujas terminações se encontram exatamente na região das manchas. . . . .	12
1.7 Magnetograma em alta-resolução do disco solar. Nesta figura podemos destacar a presença de várias regiões ativas, onde a polaridade dos campos magnéticos é evidenciada pelas tonalidades clara e escura. Estas regiões correspondem às manchas solares observadas no visível. . . . .	13
1.8 O algoritmo de segmentação de Strous parte de uma imagem da coroa solar em tons de cinza (esquerda), destaca a parte mais brilhante das linhas (centro e direita), porém não distingue os pixels provenientes destas estruturas daqueles provenientes de ruído. . . . .	16
1.9 Resultado do método de conexão (direita) aplicado à um conjunto de linhas de campo gerado sinteticamente (esquerda). . . . .	17
1.10 Contornos ativos no passo inicial (esquerda) e após a determinação do menor valor da função objetivo nível de energia para o primeiro conjunto de nós (direita) em uma simulação. . . . .	19
1.11 Aplicação do método a uma região ativa de 10/04/2001. O erro médio é de 3,8 e 2,6 pixel para os contornos superior e inferior respectivamente. .	20

2.1	Mosaico de imagens obtidas pelo instrumento TRACE na faixa espectral do ultravioleta extremo, nos comprimentos de onda de 171 Å, 195 Å e 284 Å. . . . .	28
3.1	Diagrama de blocos do método da Transformada de Hough para Imagens Fragmentadas ( <i>HTFI - Hough Transform for Fragmented Images</i> ). O método é dividido em quatro grandes estágios e suas etapas: o pré-processamento das imagens, a segmentação, a extração de características e uma avaliação dos resultados. . . . .	34
3.2	Imagem em cores falsas obtida pelo satélite TRACE em 18/10/1999 na banda espectral de 171 Å (ultravioleta extremo) mostrando as linhas de força do campo magnético na coroa solar sobre uma região ativa. Notamos o baixo brilho e contraste, falta de nitidez e a presença de artefatos, o que demanda um pré-processamento para a sua posterior utilização. . . .	35
3.3	Imagem original obtida pelo satélite TRACE em 28/08/2000 15:41:32 UT na banda espectral de 171 Å . Podemos notar a presença de ruído <i>salt and pepper</i> na forma de pontos claros e escuros. . . . .	37
3.4	Imagem da figura 3.3 após o processamento do filtro da mediana descrito na equação 3.1 com $s_m = 3$ . Verificamos que o filtro contribuiu com a remoção dos pixels claros e escuros verificados na imagem anterior. . . .	38
3.5	Resultado da imagem original após a remoção do ruído com o filtro de mediana e após o processamento utilizando o filtro passa-altas descrito pela expressão 3.2, com $s_u = 17$ . . . . .	39
3.6	Resultado final da etapa de pré-processamento após o melhoramento do contraste da imagem apresentada na figura 3.5. Nesta imagem foi utilizada inicialmente um filtro de mediana e posteriormente uma máscara de nitidez. . . . .	40
3.7	Resultado final da etapa de pré-processamento após o melhoramento do contraste da imagem apresentada na figura 3.5. Nesta imagem inicialmente foi utilizada a máscara de nitidez e posteriormente uma filtragem usando a mediana. . . . .	41
3.8	Detalhe de uma linha de campo mostrando a variação de intensidade dos pixels próximos a sua borda contra o fundo da imagem. . . . .	42
3.9	Deteção de bordas da imagem da figura 3.7. À esquerda utilizamos o método de Roberts, na imagem central o método de Sobel e à direita o método de Prewitt. . . . .	44

3.10	O algoritmo de Strous compara o pixel processado com seus vizinhos, considerando quatro direções. A variação 1 do algoritmo acrescenta o valor 1 a um acumulador caso o pixel processado seja simultaneamente maior que seus vizinhos, enquanto que a variação 2 compara o pixel processado com a média dos pixels vizinhos. . . . .	46
3.11	Resultado da imagem 3.7 processada com o algoritmo de Strous. À esquerda vemos o resultado da variação 1 do algoritmo, que utiliza o valor máximo como critério de comparação entre os valores dos pixels. À direita o resultado da variação 2, que compara os pixels através da média. . . .	47
3.12	Diagrama apresentando o processo de fragmentação da imagem. À esquerda temos uma linha de campo em uma imagem de 1024 x 1024 pixels dividida em 1024 fragmentos numerados sequencialmente de 0 a 1023. Destacamos à direita o fragmento 851, com dimensões de 32 x 32 pixels. Uma das premissas do nosso método é a aproximação de um segmento de linha de campo magnético por um segmento de reta obtido pela Transformada de Hough. . . . .	49
3.13	Pontos $P_1$ , $P_2$ e $P_3$ no espaço da imagem cujas perpendiculares são retas-suporte de ângulo $\theta$ e respectivas distâncias $\rho_1$ , $\rho_2$ e $\rho_3$ a partir do eixo $x$ podem ser representados no espaço de Hough através da transformação definida pela equação 3.13, gerando um conjunto de curvas periódicas onde o cruzamento define o ponto de coordenadas $\theta$ e $\rho$ que representa uma reta que passa pelos pontos $P_1$ , $P_2$ e $P_3$ no espaço da imagem. . . .	51
3.14	Resultados obtidos com a Transformada de Hough. Uma imagem ruidosa, que aparentemente contém pixel alinhados definindo uma reta (à esquerda) é processada pela Transformada de Hough, que gera um espaço de parâmetros (centro) onde identifica-se maior contagem de valores para os parâmetros $\theta$ e $\rho$ , que quando retornados ao espaço da imagem (direita) permitem o reconhecimento das retas. . . . .	52
3.15	Exemplo de fragmento utilizado em nosso algoritmo. Vemos aqui os principais dados obtidos para cada fragmento após seu processamento: seu identificador (851 neste exemplo), os parâmetros $\theta$ e $\rho$ obtidos pela Transformada de Hough, e os parâmetros locais relacionados com a posição do segmento de reta: as extremidades $(x_0, y_0)$ , $(x_1, y_1)$ e o ponto central $(x_c, y_c)$ . A partir do tamanho dos fragmentos definido no algoritmo, do identificador do fragmento e das coordenadas das extremidades da linha é possível obter os valores globais destas coordenadas nas dimensões da imagem completa. . . . .	54

3.16	Diagrama apresentando a utilização da Transformada de Hough no método HTFI. Em cada fragmento da imagem pré-segmentada pelo algoritmo de Strous onde há um segmento de linha de campo magnético, a Transformada de Hough recupera um segmento de reta que aproxima o segmento de linha de campo. Os principais parâmetros desta reta são armazenados: $\theta$ , $\rho$ , $x_0, y_0$ , $x_1, y_1$ , $x_c, y_c$ e os valores de $a$ e $b$ calculados pelas expressões 3.16 e 3.17. . . . .	55
3.17	Diagrama mostrando exemplos de diferentes posições relativas dos fragmentos e segmentos de retas na avaliação do critério de conexão. O pequeno quadrado cinza define uma área de $dL^2$ pixels. Caso as extremidades dos segmentos de linhas estejam dentro desta área, considera-se que os segmentos estão conectados. . . . .	57
3.18	A implementação da Transformada de Hough utilizada trata de forma particular o valor dos ângulos dos segmentos de reta dos fragmentos, conforme a figura. Segmentos em uma posição relativa próxima da vertical podem ser considerados conectados mesmo que apresentem diferença numérica maior do que o limite estabelecido, o que dependerá apenas do ângulo relativo entre eles. . . . .	59
3.19	Exemplo de um trecho de imagem com 9 fragmentos em uma estrutura 3 x 3 mostrando os 3 critérios utilizados para estabelecer a conexão entre os segmentos de reta de cada fragmento. . . . .	60
3.20	Para um dado fragmento o algoritmo de sequenciamento analisa seus vizinhos que tem segmentos de retas, e utiliza os critérios de conexão para avaliar se estes segmentos estão conectados. Neste exemplo vemos que os fragmentos 670, 702, 701, 733 e 732 compõem uma linha de campo. Para cada segmento de reta é possível identificar um ponto central $(x_c, y_c)$ utilizado como referência na etapa seguinte para a interpolação e obtenção da linha detectada. . . . .	64
3.21	Estrutura utilizada para armazenar os dados das linhas de campo detectadas. . . . .	66
3.22	Diagrama representando uma imagem de linha de campo magnético reconstruída após a fragmentação e o processamento para a extração dos descritores. O algoritmo de sequenciamento estabeleceu a sequência dos 44 fragmentos indicados e cada um deles contribuiu com um ponto $(x_c, y_c)_{global}$ para a interpolação de toda a linha. . . . .	67

4.1	Teste de extração de características com uma linha sintética. A partir do canto superior esquerdo, a imagem 1 mostra a linha de campo original e sua versão negativa na imagem 2. A imagem 3 mostra a figura pré-processada (seção 3.1), a imagem 4 mostra a linha de campo pré-segmentada pela Transformada de Strous (seção 3.2), a figura 5 mostra a linha de campo processada pela Transformada de Hough após a fragmentação da imagem, e finalmente a imagem 6 mostra a linha interpolada.	76
4.2	Resultado final da extração de características de uma linha de campo. A linha em vermelho indica a parte da linha de campo original cujos descritores foram obtidos através da nossa metodologia, neste caso, a linha na íntegra.	77
4.3	Extração de características de uma imagem obtida pelo instrumento TRACE no ultravioleta extremo em 14/07/2000 09:22:16 UT. A partir do canto superior esquerdo, a imagem original (1) e sua versão negativa em 2. Na imagem 3 vemos o resultado do pré-processamento (seção 3.1), a imagem 4 mostra a imagem pré-segmentada pela Transformada de Strous (seção 3.2), na imagem 5 temos o resultado da aplicação da Transformada de Hough após a fragmentação da imagem, e finalmente a imagem 6 mostra as linhas detectadas e interpoladas.	82
4.4	Imagem original TRACE obtida em 14/07/2000 09:22:16 UT sobreposta pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI.	83
4.5	Magnetograma obtido pelo instrumento MDI/SOHO em 14/07/2000 09:36:01 UT sobreposta pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI.	84
4.6	Observamos no canto inferior esquerdo o espaço de Hough do fragmento 10 de uma imagem hipotética. Os picos representam diferentes contagens de "votos" no espaço de Hough. Notamos que o segmento de reta detectado na imagem corresponde a um ponto de coordenadas $(\theta_i, \rho_i)$ de maior contagem no espaço de Hough, em vermelho, o que passamos a considerar como o <i>signal</i> . O <i>ruído</i> (em azul) por sua vez corresponde aos valores menores do que o valor máximo. A média destes valores foi quantificada como o valor do <i>ruído</i> no fragmento analisado.	86
4.7	Resultado da análise sinal-ruído para a imagem obtida no ultravioleta extremo do evento " <i>Bastille Day Flare</i> ". Verificamos que o sinal (vermelho) apresentou média $s_{1\mu} = 18,06$ enquanto que o ruído (azul escuro) médio foi de $n_{1\mu} = 2,21$ em unidades de contagem no espaço de Hough. Para toda a imagem o sinal detectado permaneceu acima de $3n_{1\mu}$ do ruído.	87

4.8	Mapa do sinal detectado pelo algoritmo que implementa nossa metodologia. As regiões mais claras correspondem às maiores contagens no espaço de Hough, valores associados às linhas detectadas. . . . .	88
4.9	Extração de características de uma imagem obtida pelo instrumento TRACE no ultravioleta extremo em 19/05/1998 22:27:15 UT. A partir do canto superior esquerdo, a imagem original (1) e sua versão negativa em 2. Na imagem 3 vemos o resultado do pré-processamento (seção 3.1), a imagem 4 mostra a imagem segmentada pela Transformada de Strous (seção 3.2), na imagem 5 temos o resultado da aplicação da Transformada de Hough após a fragmentação da imagem, e finalmente a imagem 6 mostra as linhas detectadas e interpoladas. . . . .	90
4.10	Imagem original TRACE obtida em 19/05/1998 22:27:15 UT sobreposta pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI. . . . .	91
4.11	Magnetograma obtido pelo instrumento MDI/SOHO em 19/05/1998 22:24:04 UT sobreposto pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI. . . . .	92
4.12	Resultado da análise sinal-ruído para a imagem obtida no ultravioleta extremo do evento de 19/05/1998 22:27:15 UT. O sinal médio (vermelho) apresentou valor de $s_{2\mu} = 19,84$ enquanto que o ruído (azul escuro) médio foi de $n_{2\mu} = 1,94$ em unidades de contagem no espaço de Hough. O sinal detectado permaneceu acima de $3n_{2\mu}$ do ruído. . . . .	92
4.13	Mapa do sinal detectado pelo algoritmo que implementa nossa metodologia. As regiões mais claras correspondem às maiores contagens no espaço de Hough, valores associadas às linhas detectadas. . . . .	93
4.14	Tela inicial da aplicação desenvolvida em IDL onde o método HTFI foi implementado. . . . .	95
4.15	Magnetograma do disco solar, destacando a região ativa que será processada. . . . .	96
4.16	Ampliação da região ativa cuja imagem no EUV da mesma região será processada. . . . .	96
4.17	Imagem no ultravioleta extremo mostrando a estrutura de linhas de campo. . . . .	97
4.18	Imagem anterior pré-processada pelo algoritmo para destacar as linhas de campo. . . . .	97
4.19	Resultado da fragmentação da imagem e aplicação da Transformada de Hough em cada fragmento. . . . .	98
4.20	Imagem anterior sobreposta ao magnetograma, mostrando que há correlação entre os segmentos de retas detectados pela Transformada de Hough e as manchas solares no magnetograma. . . . .	98

4.21	Resultado da extração das linhas após a interconexão dos fragmentos detectados. . . . .	99
4.22	Resultado final da detecção automática de linhas de campo. . . . .	99
A.1	Resultado da extrapolação de linhas utilizando o método LFFF em algoritmo desenvolvido pelo grupo de Astrofísica do INPE. . . . .	126





## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Relação de parâmetros gerais do algoritmo de extração de linhas. . . . .	70
4.2 Relação entre o tamanho dos fragmentos e o tamanho das imagens no método HTFI. O método trata sempre imagens com o mesmo tamanho em $x$ e $y$ . . . . .	71
4.3 Relação de parâmetros funcionais do algoritmo de extração de linhas. . .	72
4.4 Parâmetros utilizados no teste. . . . .	74
4.5 Dados da linha de campo obtidas no teste detalhado na figura 4.1. . . . .	75
4.6 Parâmetros utilizados na imagem do " <i>Bastille Day Flare</i> ". . . . .	78
4.7 Parâmetros utilizados na imagem de 19/05/1998 22:27:15 UT. . . . .	88
4.8 Parâmetros utilizados para gerar as imagens de 4.14 a 4.22. . . . .	94



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CME	–	Coronal Mass Ejection
DAS	–	Divisão de Astrofísica
EUV	–	Extreme UltraViolet
FFT	–	Fast Fourier Transform
FITS	–	Flexible Image Transport System
HTFI	–	Hough Transform for Fragmented Image
IA	–	Inteligência Artificial
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LFFF	–	Linear Force-Free Field
MHD	–	Magnetohydrodynamics
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
PCHIP	–	Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial
SDO	–	Solar Dynamics Observatory
SOHO	–	Solar and Heliospheric Observatory
TRACE	–	Transition Region and Coronal Explorer
IdFrag	–	Identificador de um fragmento
IdLine	–	Identificador de uma linha de campo
QtFrag	–	Quantidade de fragmentos que contém segmentos de reta
LCOL	–	Índice local da coluna de um fragmento
LROW	–	Índice local da linha de um fragmento
GCOL	–	Índice global da coluna de um fragmento
GROW	–	Índice global da linha de um fragmento



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>E</b>	– Campo elétrico
<b>B</b>	– Campo magnético
<b>j</b>	– Corrente elétrica
$\alpha$	– Termo de proporcionalidade no modelo do campo livre de forças
$\mu$	– Permeabilidade magnética
$\eta$	– Difusividade magnética
$c$	– Velocidade da luz no vácuo
$f(x, y)$	– Imagem original
$f_m(x, y)$	– Imagem filtrada com o filtro da mediana
$f_u(x, y)$	– Imagem filtrada com a máscara de nitidez
$f_{sq}(x, y)$	– Imagem filtrada com uma função raiz quadrada
$s_m$	– Tamanho da janela para o filtro da mediana
$s_u$	– Tamanho da janela para o filtro da máscara de nitidez
$a_n(x, y)$	– Acumulador horizontal utilizado pelo algoritmo de Strous
$a_v(x, y)$	– Acumulador vertical utilizado pelo algoritmo de Strous
$a_{d_1}(x, y)$	– Acumulador diagonal 1 utilizado pelo algoritmo de Strous
$a_{d_2}(x, y)$	– Acumulador diagonal 2 utilizado pelo algoritmo de Strous
$a(x, y)$	– Acumulador total utilizado pelo algoritmo de Strous
$H(\theta, \rho)$	– Espaço de Hough
$\delta$	– Função Delta de Dirac
$\theta$	– Ângulo de alinhamento de um segmento de reta
$\rho$	– Distância entre um segmento de reta e a origem do sistema de coordenadas
$k$	– Índice genérico de um fragmento
$k + n$	– Índice genérico de um fragmento contíguo a $k$
$cdL$	– Critério de conexão pela área na extremidades de segmentos de retas
$cdL_H$	– Critério de conexão horizontal para $cdL$
$cdL_V$	– Critério de conexão vertical para $cdL$
$cdL_{D1}$	– Critério de conexão da diagonal 1 para $cdL$
$cdL_{D2}$	– Critério de conexão da diagonal 2 para $cdL$
$cd\theta$	– Critério de conexão angular
$\Delta\theta$	– Diferença absoluta na inclinação entre segmentos de reta
$r_\theta$	– Limite máximo admitido para $\Delta\theta$
$cd\rho$	– Critério de distância do segmento de reta à origem do sistema
$\Delta\rho$	– Diferença absoluta na distância entre segmentos de reta
$cd$	– Critério geral de conexão
$N_L$	– Quantidade de linhas de campo detectadas
$L_{max}$	– Tamanho em pixel da maior linha detectada
$L_{min}$	– Tamanho em pixel da menor linha detectada
$\bar{x}_L$	– Tamanho médio da linha de linhas de campo detectada
$\sigma_L$	– Desvio-padrão no tamanho da linha de campo detectada



# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Conceitos, abordagens, caracterização do problema e motivações . . . . .	1
1.1.1 Conceitos Computacionais . . . . .	1
1.1.2 O problema . . . . .	3
1.1.2.1 Breve contexto histórico . . . . .	3
1.1.2.2 Estrutura Solar . . . . .	4
1.1.2.3 O problema da detecção automática dos campos magnéticos da coroa solar . . . . .	10
1.1.3 Algumas abordagens . . . . .	15
1.1.3.1 Um método baseado na conectividade de pixels . . . . .	15
1.1.3.2 Um método baseado em contornos ativos . . . . .	18
1.1.4 Motivação . . . . .	20
1.2 Objetivos e metas . . . . .	21
1.2.1 Objetivos . . . . .	21
1.2.2 Metas . . . . .	22
1.3 Estrutura da tese . . . . .	22
<b>2 UMA VISÃO SOBRE OS DADOS UTILIZADOS</b> . . . . .	<b>25</b>
2.1 Imagens de regiões ativas solares obtidas no Ultravioleta Extremo (EUV) . . . . .	25
2.2 Magnetogramas . . . . .	28
2.3 Dados sintéticos . . . . .	29
<b>3 A DETECÇÃO AUTOMÁTICA DAS LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO</b> . . . . .	<b>31</b>
3.1 Pré-processamento . . . . .	35
3.2 Segmentação . . . . .	42
3.2.1 O Algoritmo de Strous . . . . .	43
3.2.2 A Transformada de Hough como método de segmentação . . . . .	48
3.2.2.1 Fragmentação da imagem . . . . .	48
3.2.2.2 O método da Transformada de Hough para Imagens Fragmentadas . . . . .	49
3.3 Extração de Características . . . . .	54
3.3.1 A reconstrução das linhas de campo magnético . . . . .	55
3.3.1.1 Conexão dos fragmentos . . . . .	56

3.3.1.2	Sequenciamento dos fragmentos . . . . .	62
3.3.1.3	Interpolação . . . . .	65
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO E RESULTADOS . . . . .</b>	<b>69</b>
4.1	Ensaio . . . . .	69
4.2	Extração de características em imagens de regiões ativas . . . . .	76
4.2.1	Observação de 14 de julho de 2000 . . . . .	77
4.2.2	Observação de 19 de maio de 1998 . . . . .	87
4.3	Sobre o código desenvolvido e utilizado nas aplicações . . . . .	93
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>101</b>
5.1	Síntese . . . . .	102
5.2	Comentários finais e trabalhos futuros . . . . .	103
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE A - OS CAMPOS MAGNÉTICOS CORONAIS SOLA-</b>	
	<b>RES . . . . .</b>	<b>117</b>
A.1	Introdução . . . . .	117
A.2	A física dos campos magnéticos solares . . . . .	118
A.3	Um modelo de extrapolação das linhas de campo magnético . . . . .	121



# 1 INTRODUÇÃO

Apresentaremos ao longo das próximas páginas um dos resultados da nossa pesquisa sobre reconhecimento de padrões estruturais em imagens, cuja principal aplicação se deu na detecção das estruturas dos campos magnéticos presentes em imagens da coroa solar. O trabalho explora uma nova abordagem até o momento não encontrada na literatura para este tipo de problema, e por isto mesmo não pretende solucionar todas as questões de tal empreitada, mas propõe alternativas, discute sua abrangência e sugere caminhos que podem ser utilizados para a evolução da pesquisa, utilizando os métodos e ferramentas da Ciência da Computação de forma aplicada na área de Física Solar.

## 1.1 Conceitos, abordagens, caracterização do problema e motivações

### 1.1.1 Conceitos Computacionais

O computador, como dispositivo capaz de ser programado com uma sequência de instruções lógicas e aritméticas e executar estas instruções sequencialmente com o objetivo de solucionar uma tarefa, trouxe uma nova perspectiva para o tratamento de problemas que exigem uma grande quantidade de cálculos, ou que precisam armazenar durante muito tempo os dados utilizados, ou ambos. Balística de precisão, fluidodinâmica, criptografia e cálculo estrutural para aviação são exemplos de problemas complexos que puderam ser abordados de forma mais simples com a utilização dos computadores. Além das aplicações militares para as quais os primeiros computadores foram utilizados na década de 1940, institutos de pesquisa e universidades começaram a usufruir da capacidade de processamento destas máquinas em pesquisas científicas, o que deu surgimento a uma série de novas áreas de pesquisa que ao longo do tempo consolidaram o que hoje chamamos de Ciências da Computação.

A recém criada área de Inteligência Artificial (IA), cujo termo teria sido cunhado por John McCarthy em uma conferência no Dartmouth College, EUA, em 1956 (RUSSELL; NORVIG, 2003), foi uma daquelas que contribuíram para este processo de consolidação. O trabalho de Alan Turing, os estudos sobre Neurologia e sobre Teoria da Informação estimularam um grupo de pesquisadores a considerar seriamente a possibilidade de um computador executar tarefas que normalmente seriam atribuídas a um ser humano. Destas tarefas podemos destacar o Processamento de Linguagem Natural, a Representação do Conhecimento, o Aprendizado de Máquina e a Percepção de Máquina (RUSSELL; NORVIG, 2003).

No contexto da IA, mas não exclusivamente associado a ele, Percepção de Máquina tornou-se nos últimos anos um ramo de pesquisa cujo objetivo é dotar um computador da capacidade de interpretar dados de forma similar a um ser humano (TURK, 2000). Recebendo dados externos através de sensores de diferentes tipos, um sistema computacional seria capaz de fazer a aquisição destes dados, processá-los, dando tratamento adequado de modo a destacar aqueles de maior interesse, extrair características mais importantes dos dados segundo algum critério e classificar estas informações.

Para um ser humano tarefas associadas à percepção são muito simples: reconhecer o som de um sino, quando comparado ao som emitido por um pássaro, por exemplo, o número "5" escrito por diferentes pessoas, ou os sabores doce e amargo dos alimentos, são tarefas bastante naturais desde os primeiros anos de uma criança. Estes são problemas de percepção típicos e muito difíceis de serem solucionados por computadores pois cada um dos padrões apresentados nestes exemplos carrega grande quantidade de informação, ou melhor dizendo, são problemas que apresentam alta dimensionalidade estrutural de forma instrínseca, quase imperceptível no conjunto de dados.

Sendo assim, a questão que se surge para que este tipo de tarefa possa ser tratada por um sistema computacional é a redução da dimensionalidade estrutural dos problemas de percepção. Esta é uma questão que geralmente se enfrenta subdividindo o problema em partes menores, menos complexas, e solucionando cada uma delas. Uma das soluções que pode ser adotada é a busca de autocorrelação nos dados, com o objetivo de verificar a existência de estruturas repetitivas, ou a correlação entre os dados e algum modelo pré-estabelecido para identificar características específicas. A busca por padrões em conjuntos de dados ficou conhecida de forma geral como *Reconhecimento de Padrões*, e poderia ser genericamente definida como *qualquer percepção de regularidades significativas em um ambiente complexo ou ruidoso* (DUDA; HART, 1973). Esta definição nos diz que há três elementos que quase sempre estão presentes em um problema de reconhecimento de padrões: uma definição do que seja as *regularidades* que buscamos no conjunto de dados, um critério que defina o quão *significativas* ou não estas regularidades devem ser para que sejam reconhecidas, e um conjunto de informações acerca da natureza do *ambiente ruidoso* a partir do qual obtemos os dados. Problemas abordados pela área de Reconhecimento de Padrões poderiam ser por exemplo a identificação de impressões digitais, o reconhecimento automático da fala e o reconhecimento de faces. Este último é um típico exemplo das aplicações que unem o reconhecimento de padrões e as tecnologias de imageamento,

temas frequentemente abordados na área de Visão Computacional.

Visão Computacional pode ser definida como um ramo da área de Inteligência Computacional que intersecciona as áreas de Aprendizado de Máquina e Reconhecimento de Padrões cujo interesse principal é dotar os sistemas computacionais da capacidade de *descrever* uma cena capturada por um dispositivo de aquisição. O uso do termo *descrever* aqui está associado à construção de estruturas que possam armazenar dados capazes de categorizar ou classificar determinados atributos de objetos em uma imagem. Uma definição de Visão Computacional comumente encontrada na literatura é *"a construção de descrições explícitas e significativas sobre objetos físicos presentes em imagens. Compreensão de imagens é algo muito diferente de processamento de imagens, que estuda transformações de imagem-para-imagem, não fazendo descrições explícitas. Descrições são pré-requisitos para o reconhecimento, manipulação e análise de objetos"* (BALLARD; BROWN, 1982). Um exemplo recente de aplicação na área de Visão Computacional são os modernos sistemas de segurança (*video surveillance*) capazes de rastrear uma mesma pessoa durante todo o seu percurso em um ambiente aberto, mesmo com a presença de outras pessoas, automóveis, obstáculos e a ocorrência de oclusões (FORNACIARI et al., 2011).

Neste trabalho de Visão Computacional desenvolvemos uma nova abordagem para o Reconhecimento de Padrões de estruturas em imagens, aplicando-a em imagens da coroa solar. Discutiremos as características específicas da nossa metodologia, suas vantagens e limitações.

## 1.1.2 O problema

### 1.1.2.1 Breve contexto histórico

Durante toda a história o Sol sempre despertou grande interesse da humanidade. Reverenciado como um deus por algumas civilizações, sempre manteve lugar de destaque nos altares da antiguidade. Há registros de que os povos da Índia, Babilônia e China observavam o Sol por uma série de razões, sendo uma das principais acompanhar a passagem do tempo: os ciclos de claro-escuro ocorriam com uma regularidade que fazia com que os mesmos fossem utilizados para contar o tempo em diferentes escalas, o que era muito favorável para regular os períodos de plantio e colheita.

Estes mesmos povos também foram pioneiros nas observações de eclipses. Durante toda a história quase sempre os eclipses foram associados a eventos cataclísmicos, a maus presságios, pragas e pestes, de forma que ter a capacidade de prever sua

ocorrência era uma grande vantagem para os governantes da antiguidade. Ainda que a motivação não tenha sido científica, muitos "estudiosos dos céus" dos antigos reis e imperadores dataram eclipses, a ocorrência de manchas solares e o ciclo solar. Registros históricos incluem a China e a Grécia antiga como civilizações onde foram feitas observações das manchas solares e acompanhamento dos ciclos das manchas. Na baixa idade média monges beneditinos também fizeram observações semelhantes, mas que muitas vezes foram interpretadas incorretamente como o trânsito de Mercúrio ou Vênus, o que Galileu veio corrigir com suas observações de 1612 (GALILEI et al., 1613), (GALILEI et al., 2010). Estudos recentes em dados de estratigrafia (STRATIGRAPHY, 2013) mostraram que camadas de rocha sedimentária apresentavam ciclos mais ou menos regulares na alteração de sua espessura, com períodos aproximados de 11 anos, o que sugere que em intervalos de grande atividade solar ocorreram alterações na atmosfera da Terra suficientes para deixar o registro dos ciclos solares nas rochas do solo terrestre (WILLIAMS, 1985).

#### 1.1.2.2 Estrutura Solar

O Sol é uma estrela com estrutura quase esférica onde o plasma se mantém confinado nesta configuração devido ao equilíbrio entre as forças de atração gravitacional que tendem a manter toda a matéria compactada, e à pressão interna, que tende a expandir a matéria. Sua composição química consiste na maior parte de hidrogênio, hélio e outros elementos, como por exemplo o ferro (STIX, 2004). Estudos de heliosismologia mostraram que o Sol é composto por uma série de camadas internas, onde cada uma exerce influência na transferência da energia produzida. A figura 1.1 apresenta a estrutura interna do Sol.

O núcleo do Sol ocupa de 20% a 25% do raio solar, e é nesta região que a energia é gerada através de processos de fusão nuclear, onde o hidrogênio é convertido em hélio, liberando um excedente de energia que é transportado para as camadas mais externas. Dados da missão SOHO mostraram há alguns anos que o núcleo solar apresenta rotação mais rápida em relação ao restante da camada radiativa (GARCIA et al., 2007).

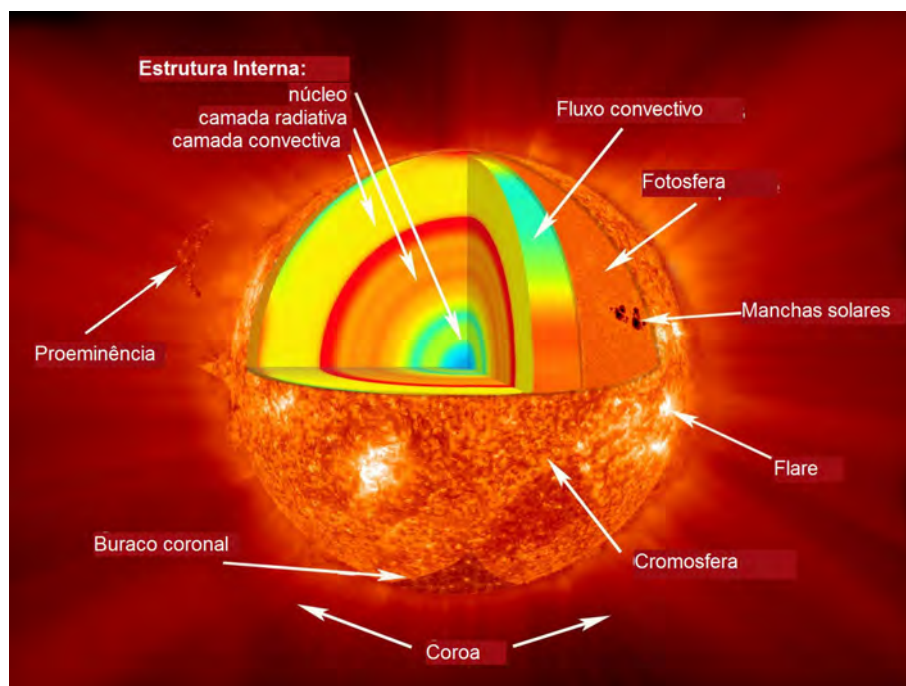


Figura 1.1 - Estrutura interna e superfície do Sol.  
 Fonte: NASA/MSFC (1999)

A camada radiativa se estende até cerca de 70% do raio solar. Nesta região a energia é transportada para as regiões mais externas do Sol pelo processo de radiação, onde fótons são emitidos por íons de hidrogênio e hélio, viajam pequenas distâncias e em seguida são reabsorvidos. Neste processo repetitivo a energia leva milhares de anos para ser transportada do núcleo até a superfície solar. Na região limítrofe entre a camada radiativa e a convectiva existe uma fina camada chamada *tacoclina*. A *tacoclina* apresenta espessura da ordem de  $10^4$  m, e nesta região há uma alteração no regime de rotação das estruturas internas do Sol. O núcleo e a camada radiativa apresentam rotação uniforme, como a de um corpo sólido, diferentemente da camada convectiva, que apresenta rotação diferencial, onde a velocidade de rotação na região equatorial é maior do que a velocidade de rotação nas regiões próximas aos pólos. Esta alteração no regime de rotação uniforme para o diferencial verificado na *tacoclina* é a base do modelo de dínamo solar, e seria responsável pela formação dos intensos campos magnéticos solares (CHARBONNEAU et al., 1999).

Na região que se estende de cerca de 70% do raio solar até sua superfície, o plasma já não é mais tão denso e quente o suficiente para transportar a energia por radiação. Assim, o material aquecido no topo da camada radiativa sobe pela camada convectiva em colunas térmicas. Ao diminuir sua temperatura, no topo da camada

convectiva, o plasma aquecido retorna à base desta camada e é aquecido novamente. Este movimento de circulação, característico dos processos de convecção, transporta a energia térmica da base da camada convectiva para seu topo. As colunas térmicas de plasma aquecido no interior da camada convectiva formam na superfície solar um padrão granular que pode ser observado em imagens de alta resolução, conforme a figura 1.2.

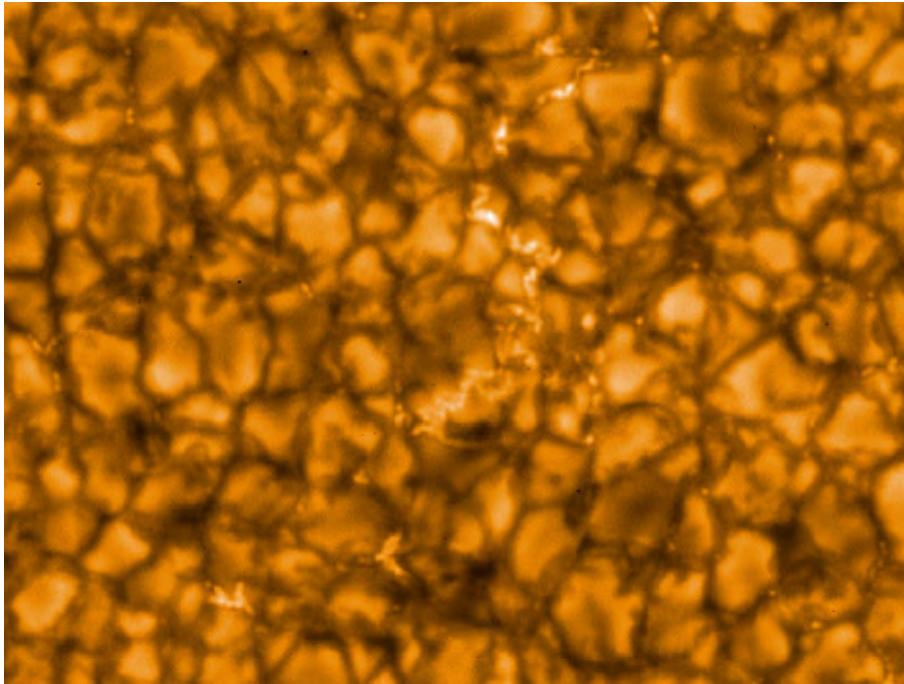


Figura 1.2 - Superfície do Sol observada no visível, onde é possível verificar a presença dos grânulos, evidenciando o comportamento convectivo desta região.  
Fonte: NASA/Hinode (2001)

O Sol não possui uma superfície sólida como os planetas rochosos, pois toda sua estrutura é composta de gases aquecidos a diferentes valores de temperatura, densidade e pressão. Acima da camada convectiva observa-se uma região fina, de aproximadamente 300 km, a partir da qual não é possível observar o interior solar na faixa da luz visível do espectro eletromagnético. Toda a luz proveniente do Sol que observamos na faixa do visível flui a partir desta camada, que por esta razão foi chamada de fotosfera. A fotosfera é a camada do Sol que conseguimos enxergar a olho nu, e nela é possível, por exemplo, visualizar as manchas solares. Ao observar uma imagem do Sol na faixa do espectro eletromagnético correspondente à luz visível, notamos que a região central do disco é mais brilhante em relação às bordas, ou ao limbo solar.



Este efeito, chamado de *escurecimento do limbo solar* ocorre devido à diferença de temperatura entre a região mais baixa e mais alta da fotosfera solar. Ao observar o centro do disco solar, estamos enxergando uma região mais quente, com temperaturas da ordem de 6400 K, e que portanto emitem muita radiação na forma de luz. Ao observar o limbo, estamos enxergando as camadas mais altas da fotosfera, cujas temperaturas são mais baixas, da ordem de 5000 K, emitindo uma menor quantidade de radiação luminosa nas mesmas unidades de tempo e espaço, o que leva ao escurecimento desta região nas imagens. Análises detalhadas desta variação de brilho levaram à determinação aproximada da espessura da fotosfera, estabelecida em aproximadamente 500 km. A figura 1.3 mostra uma imagem do disco solar, onde é possível observarmos o escurecimento do limbo.

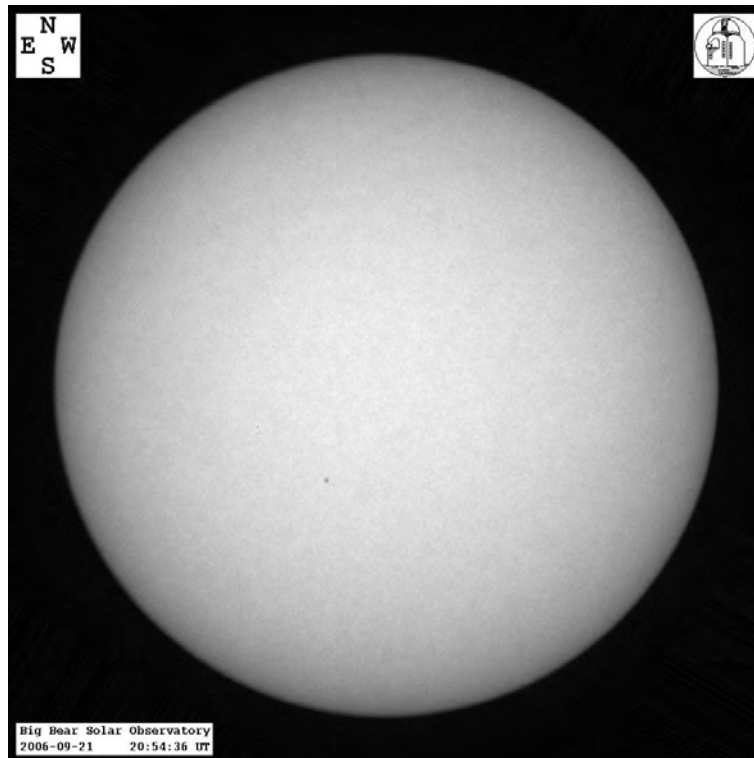


Figura 1.3 - Disco solar observado no visível. Nesta imagem podemos notar o escurecimento do limbo solar.

Fonte: NASA/Big Bear Observatory (1996)

A região localizada acima da superfície do Sol é chamada de atmosfera solar e é constituída por cinco camadas: a *região de mínima temperatura*, a *cromosfera*, a *região de transição*, a *coroa solar* e a *heliosfera*. A temperatura e a densidade desempenham papel fundamental na atmosfera solar, e ao contrário do que seria natural imaginarmos, a partir da superfície solar a temperatura apresenta relativa queda mas depois aumenta cerca de 100 vezes. Discutiremos esta questão mais à frente. A figura 1.4 mostra o perfil de temperatura e densidade da atmosfera solar.

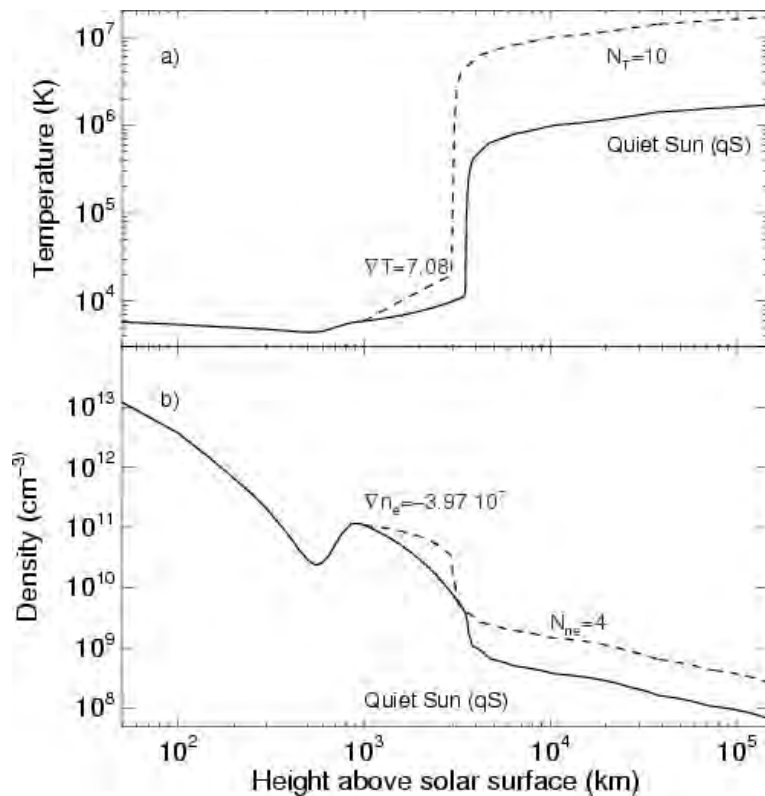


Figura 1.4 - Perfil de temperatura e pressão da atmosfera solar. Podemos notar claramente o aumento da temperatura entre  $10^3$  km e  $10^4$  km na chamada região de transição.

Fonte: Selhorst et al. (2008)

A região mais fria da atmosfera solar é a *região de mínima temperatura*, localizada a cerca de 500 km acima da fotosfera, onde a temperatura é de aproximadamente 4100 K. A *cromosfera* é a região localizada logo acima da fotosfera e da região de mínima temperatura, a partir da qual a temperatura aumenta gradativamente atingindo cerca de 20.000 K. Nesta região é possível obter imagens do disco solar em  $H\alpha$ , onde destacam-se as *praias*, regiões brilhantes encontradas ao redor das manchas solares,



evidenciando campos magnéticos intensos.

Na *cromosfera* a temperatura vai aumentando gradativamente, de 20.000 K chegando a atingir valores próximos de 1.000.000 K em um intervalo de apenas 1.000 km. Esta é a chamada *região de transição*, onde a temperatura dá um salto, e a densidade do gás diminui consideravelmente.

Acima da cromosfera encontramos a *coroa solar*, a camada mais extensa da atmosfera solar. De sua base até as regiões mais altas há grande variação na temperatura. Observam-se na coroa solar uma série de fenômenos de interesse para os estudos em Astrofísica Solar, como as explosões solares e as ejeções de massa coronal. Supõe-se que estes fenômenos tem estreita relação com os campos magnéticos presentes nesta região, e por esta razão este tema tem sido intensivamente investigado nas últimas décadas. A coroa solar pode ser observada a olho nu durante um eclipse total do Sol, aparecendo como uma tênue camada brilhante ao redor do disco solar. A temperatura na coroa solar pode atingir valores da ordem de milhões de graus Kelvin, e por esta razão o ferro é altamente ionizado. Diferentes valores de temperatura provocam diferentes níveis de ionização do ferro, emitindo radiação em diferentes comprimentos de onda. Este fato possibilitou nas últimas décadas que os detectores a bordo de satélites pudessem obter imagens da coroa solar em diferentes altitudes, como pode ser observado da figura 1.5. A coroa solar é a região onde ocorre um fenômeno que permanece como um problema em aberto na área de Física Solar: o problema do *Aquecimento Coronal*. Os fundamentos da termodinâmica mostram que o calor não pode fluir de uma região mais fria para uma mais quente sem que haja algum mecanismo de transporte de energia entre estas duas regiões. Mas é aparentemente isto que se verifica no Sol: próximo de sua superfície, sua temperatura é da ordem de 6.000 K, diminuindo um pouco e depois aumentando para valores cerca de 100 vezes maiores, da ordem de 1 MK em pouco mais de 1.000 km. Uma boa analogia é imaginarmos que uma lâmpada incandescente acesa apresenta baixa temperatura próximo a seu bulbo mas é extremamente quente longe deste, o que aparentemente é paradoxal. Nos últimos anos foram propostos alguns modelos que tentam explicar esta questão, como o modelo de reconexão e o modelo de propagação de ondas (BREKKE et al., 2001).

Acima da coroa solar encontramos a *heliosfera*, uma camada dominada por partículas carregadas originadas no Sol e que se estende praticamente até os limites do Sistema Solar. Esta emissão de partículas, chamada de *vento solar*, é constituída basicamente de prótons e elétrons que foram ionizados na coroa solar. Ao interagir

com a magnetosfera terrestre o vento solar provoca uma série de fenômenos, como as tempestades geomagnéticas e as auroras.

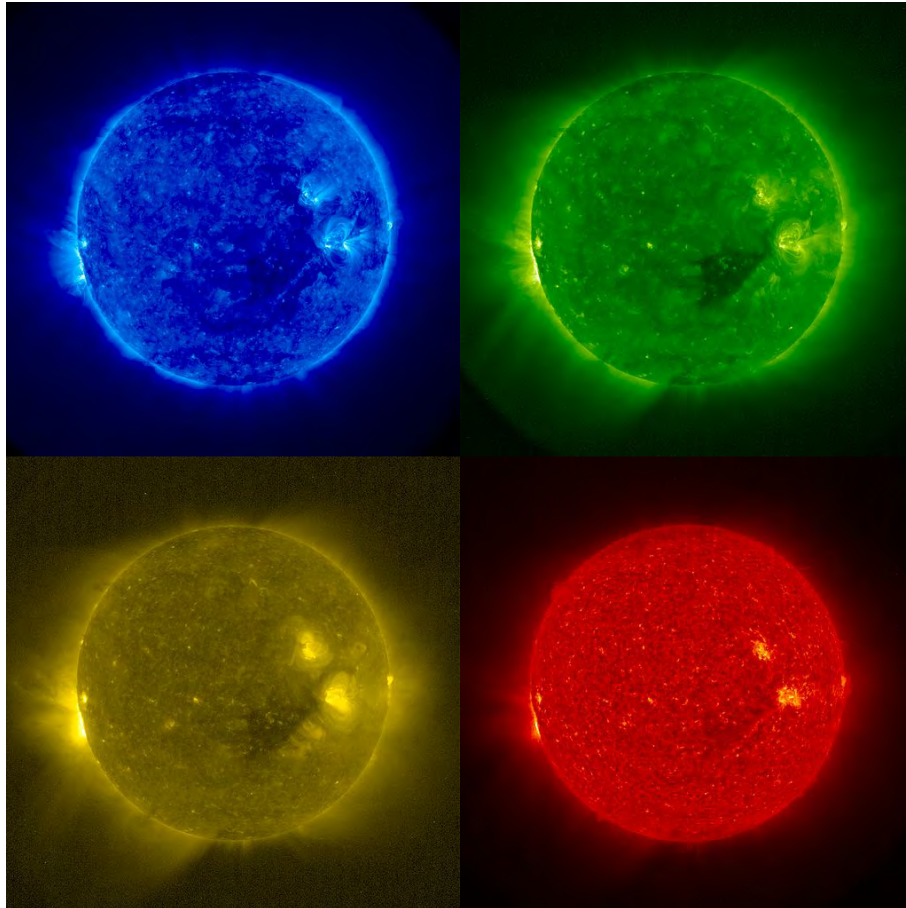


Figura 1.5 - Mosaico de imagens do disco solar em diferentes comprimentos de onda do ultravioleta extremo (EUV). Em sentido horário, iniciando no canto superior esquerdo, 1 M<sup>o</sup>C (171 Å), 1,5 M<sup>o</sup>C (195 Å), 60.000 - 80.000 °C (304 Å) e 2,5 M<sup>o</sup>C (286 Å).

Fonte: NASA/STEREO-A SECCHI (2006)

### 1.1.2.3 O problema da detecção automática dos campos magnéticos da coroa solar

Ao contrário do que pode parecer a um observador desatento, a superfície solar tem comportamento bastante dinâmico, onde verifica-se uma série de fenômenos. Com o auxílio de um binóculo ou telescópio devidamente protegidos com filtros apropriados, podemos observar na fotosfera solar a presença de manchas, catalogadas ao longo do tempo e em diferentes locais. Observações sistemáticas mostraram que

a quantidade de manchas solares aumenta e diminui ciclicamente em períodos de aproximadamente 11 anos, intervalo de tempo conhecido como *ciclo solar*. Do ponto de vista físico, as manchas solares correspondem a regiões da fotosfera solar onde a intensidade dos campos magnéticos é bem maior do que a intensidade média da região ao redor da mancha. Os campos magnéticos muito intensos inibem a ocorrência do processo convectivo na fotosfera solar, de forma que o material da camada convectiva na região das manchas passa a apresentar temperatura mais baixa, em torno de 4.500 K, do que a temperatura do material ao seu redor, em torno de 5.800 K, emitindo menor quantidade de energia, e portanto, em contraste com a região que envolve a mancha, aparecendo como regiões escuras.

Os diferentes regimes de rotação entre o núcleo e a camada convectiva fazem com cargas em movimento presentes no plasma gerem correntes elétricas que induzem campos magnéticos no interior solar. Devido à *rotação diferencial*, estes campos magnéticos atravessam a fotosfera solar, que devido à intensidade dos campos tem o processo convectivo inibido, o que causa o aparente escurecimento da região, favorecendo o surgimento de manchas solares que atuam como a "assinatura" da presença de campos magnéticos intensos. Estas regiões são conhecidas como *regiões ativas*. Os modelos físicos mostram que as linhas de campo magnético surgem na forma de arcos, e que as manchas solares seriam os "pés" (*footpoints*) destes arcos magnéticos, também conhecidos como arcos coronais ou *magnetic loops*. Imagens da coroa solar mostram que estas suposições estavam corretas. O diagrama apresentado na figura 1.6 ilustra este cenário.

Se as manchas solares são regiões onde os campos magnéticos apresentam maior intensidade, medir a variação de intensidade em relação às outras regiões da superfície solar é tarefa de extrema importância. A medida vetorial da variação de intensidade dos campos magnéticos presentes na fotosfera solar ao longo de todo o disco solar permite a geração de uma representação gráfica chamada *magnetograma*, que mostra regiões claras e escuras, correspondendo às diferentes orientações do campo magnético em uma região ativa. Muitas vezes estas regiões claras e escuras aparecem aos pares, representando a direção do campo magnético e a polaridade das manchas (positiva/negativa ou norte/sul). A figura 1.7 mostra um magnetograma com um conjunto de regiões ativas, mostrando as diferentes polaridades dos conjuntos de manchas em diferentes regiões ativas.

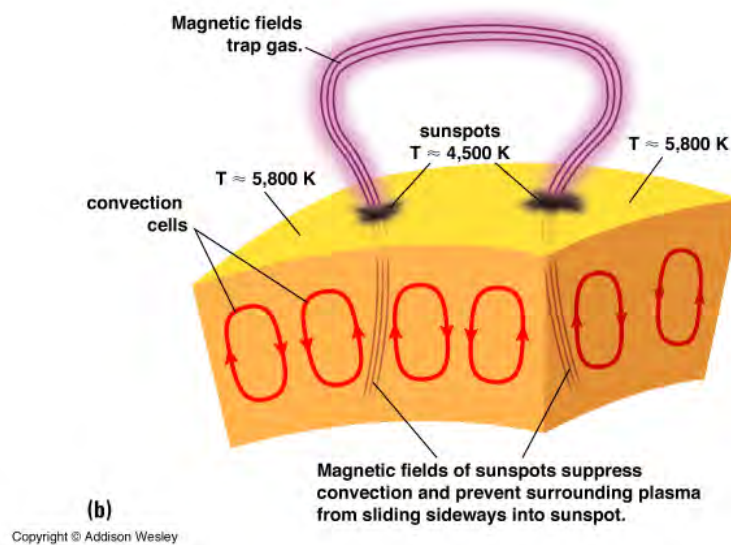


Figura 1.6 - Diagrama mostrando a estrutura dos campos magnéticos solares. Destacamos que a ocorrência de manchas solares na fotosfera evidencia a presença de campos magnéticos. Estes campos se estendem até a alta coroa solar, formando arcos cujas terminações se encontram exatamente na região das manchas.  
 Fonte: Addison Wesley (2001)

Os estudos realizados em Física Solar no último meio século tem relacionado a ocorrência de fenômenos como explosões solares e ejeções de massa coronal com a presença de campos magnéticos na coroa do Sol. A ausência de imagens desta região da atmosfera solar motivou o desenvolvimento de uma série de modelos físicos dos campos magnéticos coronais. O objetivo principal destes modelos era o de poder inferir qual seria a estrutura magnética da atmosfera solar, e a partir dela realizar estudos que ampliassem a compreensão sobre a ocorrência dos fenômenos citados. Uma das abordagens para o desenvolvimento dos modelos de campos magnéticos solares, baseado em uma série de pesquisas na área de física solar, considera que os campos magnéticos nas regiões ativas do Sol são livres de força, o que significa que a pressão gerada pelo plasma é muitas vezes menor do que a pressão gerada pelo campo magnético, desconsiderando-se portanto as forças geradas pelo plasma. Isto simplifica o modelo físico de forma que uma abordagem linear pôde ser utilizada para solucionar o problema, o que levou ao desenvolvimento do modelo do Campo Linear Livre de Forças, ou *Linear Force-Free Field* (LFFF). O modelo *Linear Force Free Field* é um modelo relativamente simples, está fundamentado em equações rotacionais do campo magnético e parte dos valores de intensidade apresentados pelo magnetograma de uma região ativa e das condições de contorno do sistema.

Resolvendo-se as equações do modelo é possível obter a configuração espacial dos campos magnéticos na coroa solar. A literatura apresenta uma série de abordagens para a solução das equações deste modelo, sendo uma das mais utilizadas um método de resolução utilizando Transformadas de Fourier (NAKAGAWA; RAADU, 1972).

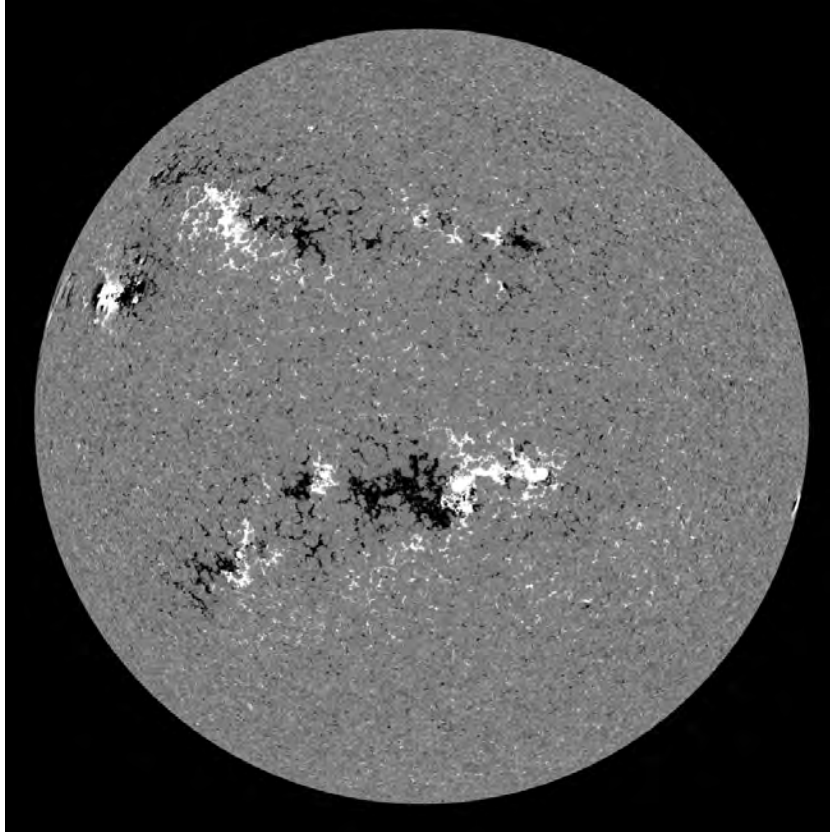


Figura 1.7 - Magnetograma em alta-resolução do disco solar. Nesta figura podemos destacar a presença de várias regiões ativas, onde a polaridade dos campos magnéticos é evidenciada pelas tonalidades clara e escura. Estas regiões correspondem às manchas solares observadas no visível.

Fonte: NASA/SDO-HMI (2011)

Durante muitos anos, na indisponibilidade de imagens, os métodos de extrapolação dos campos magnéticos na coroa solar foram utilizados como ferramenta para se obter uma estimativa da estrutura destes campos baseada em modelos físicos. Um exemplo da utilização dos resultados dos métodos de extrapolação pode ser verificado no estudo da ocorrência de explosões solares, e outro exemplo reside na validação dos modelos físicos.

Somente a partir dos anos de 1980 foram enviadas ao espaço missões com o objetivo

de obter imagens do disco solar em diferentes comprimentos de onda. Satélites como o *Orbiting Solar Observatory* (OSO-1 a OSO-8) foram lançados entre 1962 e 1975. A estação espacial *Skylab*, que mantinha a bordo sensores especialmente construídos para a observação solar, funcionou de 1973 a 1979. Somente em 1980 foi lançada a primeira missão totalmente dedicada à observação solar, desenvolvida para operar durante todo um ciclo solar. Uma iniciativa importante foi a da missão *Solar Maximum Mission*, lançada em fevereiro de 1980 e que operou até dezembro de 1989. O SMM levava a bordo instrumentos que operavam em  $H\alpha$ , Ultravioleta Extremo (EUV), raios-X moles e raios-X duros.

Na década de 1990 foram enviados ao espaço satélites transportando instrumentos com resolução sem precedentes para a época. As missões CGRO (raios-X duros), SOHO/EIT ( $H\alpha$  e EUV) e TRACE (EUV) obtiveram imagens de ótima qualidade para a época, contribuindo de forma decisiva para os estudos dos campos magnéticos coronais.

As imagens geradas pela missão TRACE foram utilizadas por muitos grupos de pesquisa dando suporte a muitos trabalhos. Em nosso estudo utilizamos as imagens desta missão. Mantendo a iniciativa de obter imagens com resoluções cada vez melhores, há cerca de três anos a NASA lançou a missão *Solar Dynamics Observatory* (SDO), um satélite contendo instrumentos que operam em várias faixas do espectro eletromagnético: luz visível, ultravioleta, EUV e instrumentos que geram magnetogramas. O SDO é capaz de obter imagens de todo o disco solar em alta resolução, gerando um volume de aproximadamente 45 TB de dados por mês (DAVEY et al., 2010).

Com o advento das imagens da coroa solar em alta resolução obtidas no ultravioleta extremo, finalmente foi possível investir no desenvolvimento de metodologias que pudessem fazer a comparação das linhas de campo magnético com aquelas geradas pelo modelo de extrapolação das linhas de campo. Estas metodologias de comparação tem grande importância em física solar pois permitiriam que os parâmetros dos modelos físicos pudessem ser alterados, gerando um novo conjunto de linhas sintéticas, e a cada novo conjunto, um novo teste contra as linhas imageadas, de forma a obter a melhor correlação entre as linhas geradas pelo modelo e aquelas observadas. O apêndice A deste trabalho mostra que no estudo dos campos magnéticos coronais solares o parâmetro  $\alpha$  da equação rotacional  $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$  determina a torção das linhas de campo. Se  $\alpha = 0$ , temos que  $\nabla \times \mathbf{B} = 0$ , o que define espacialmente a estrutura de um dipolo magnético. Obter a partir das imagens descritores com da-



dos das linhas de campo magnético poderia permitir a comparação dos dados destes descritores com aqueles gerados por um modelo de extrapolação de linhas de campo. Esta seria uma forma de, por exemplo, avaliar o valor do parâmetro  $\alpha$ , e com isto fornecer subsídios para os estudos que tratam da ocorrência de explosões solares e ejeções de massa coronal. Estes estudos tem ganhado destaque nos últimos anos, pois com a crescente dependência de tecnologia, fica claro que obter maiores e melhores informações sobre eventos solares é de grande importância para o refinamento de um modelo de previsão de atividades solares, contribuindo com a sociedade na prevenção nos cortes em comunicações via satélite, na proteção de sistemas de telefonia celular, na preservação de estruturas de produção e transmissão de energia elétrica entre outros. Estes fatores relacionam nossa pesquisa com a temática das Relações Sol-Terra e o Clima Espacial. Neste contexto fica claro que obter dados a partir do reconhecimento das linhas de campo magnético das imagens da coroa solar e compará-los com os modelos físicos é algo de grande importância no cenário atual da Física Solar. Tal tarefa evidencia a necessidade do uso de técnicas de Reconhecimento de Padrões e Extração de Características em imagens, inserindo este trabalho no contexto da *Visão Computacional*.

### **1.1.3 Algumas abordagens**

O problema do reconhecimento das linhas de campo magnético vem sendo tratado de diferentes formas nos últimos anos, mas ainda não há uma metodologia totalmente automática capaz de identificar em uma imagem os arcos coronais solares. Várias iniciativas estão em andamento, mas de forma geral os métodos não são totalmente automatizados e dependem de complementação manual. As idéias propostas geralmente passam por remover o ruído de fundo para destacar as linhas de campo para em seguida identificar as linhas utilizando métodos baseados na geometria dos arcos coronais, na busca pixel-a-pixel dos pontos mais brilhantes da imagem ou na aproximação de funções polinomiais que representem as linhas de campo.

Apresentaremos dois exemplos do desenvolvimento atual dos métodos de reconhecimento das linhas de campo magnético a partir das imagens obtidas no EUV, segundo duas abordagens diferenciadas.

#### **1.1.3.1 Um método baseado na conectividade de pixels**

As imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta extremo mostram que os arcos coronais apresentam uma variedade de configurações, desde aquelas mais isoladas, finas e alongadas, até aquelas mais agrupadas, ocupando uma pequena porção da

imagem. Vimos anteriormente que os campos magnéticos coronais solares são campos livres de força, já que a pressão exercida pelo plasma é muitas vezes menor do que a pressão exercida pelo campo magnético (ASCHWANDEN, 2005). Desta forma, vimos que a expressão  $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$  modela as linhas de campo coronal solar em uma situação onde o termo magnético tem maior relevância. Sabemos que  $\alpha$  é um termo que está associado à corrente presente no sistema magnético, e que se  $\alpha = 0$  a equação torna-se  $\nabla \times \mathbf{B} = 0$ , ou seja, o sistema se comporta como um dipolo simples. Esta característica foi utilizada como um critério de orientação para a construção de um algoritmo de reconhecimento de linhas de campo baseado na busca sequencial de pixels.

Em um trabalho realizado em 2006 (LEE et al., 2006), as imagens da coroa solar obtidas no EUV passavam por uma etapa de pré-processamento onde diminuía-se o ruído e melhorava-se a nitidez através de filtros apropriados. Após isto era utilizado um algoritmo de segmentação baseado no gradiente de brilho das linhas (STROUS, 2007). Este algoritmo gerava imagens binárias permitindo distinguir-se com destaque algumas linhas de campo, mas não tratava adequadamente a identificação entre os pixels que pertencem às linhas de campo e pixels provenientes de ruído, como pode ser observado na figura 1.8.

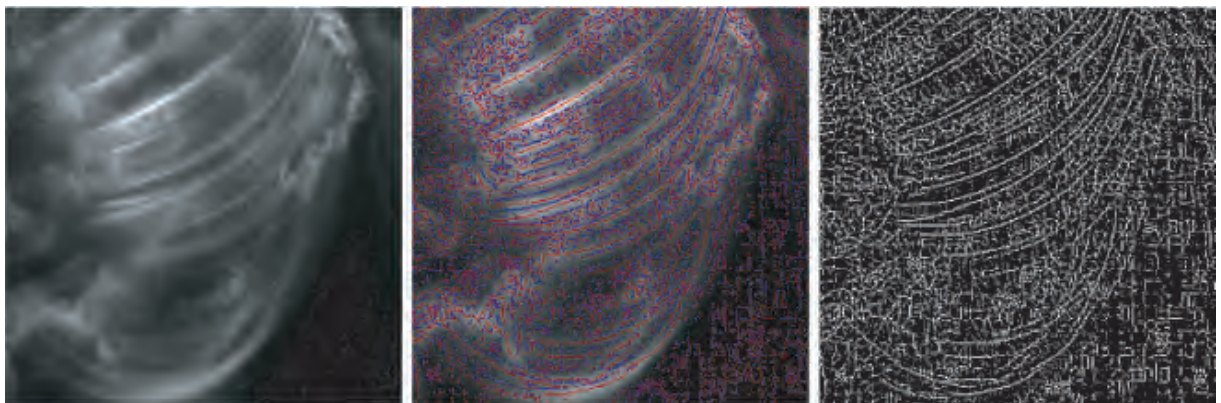


Figura 1.8 - O algoritmo de segmentação de Strous parte de uma imagem da coroa solar em tons de cinza (esquerda), destaca a parte mais brilhante das linhas (centro e direita), porém não distingue os pixels provenientes destas estruturas daqueles provenientes de ruído.

Fonte: Strous (2007)

No trabalho citado o algoritmo de Strous foi utilizado como o passo inicial para o reconhecimento das linhas de campo, de forma que a partir de uma posição na ima-



gem determinada pelas manchas solares no magnetograma, o algoritmo calculava as componentes  $B_x$  e  $B_y$  do campo magnético a partir de um modelo magnético de dipolo simples ( $\alpha = 0$ ). Dentro de um certo raio de avaliação determinado pela soma vetorial das componentes do campo magnético e por um conjunto de critérios que determinava se um dado pixel poderia pertencer a uma linha de campo ou não (por exemplo, a similaridade na intensidade de brilho), o algoritmo avaliava os outros pixels no raio determinado, selecionando o próximo candidato. Este procedimento era repetido sequencialmente até que não fossem encontrados mais pixels que atendessem aos critérios de seleção, ou que não houvessem mais pixels a serem avaliados. Um procedimento de pós-processamento era aplicado aos resultados, utilizando polinômios para unificar os segmentos de linhas ainda desconexos.

Os resultados deste trabalho foram aplicados a arcos coronais gerados sinteticamente, mostrando a extração das características de algumas linhas, mas ainda persistiam os problemas no caso de linhas de campo que se cruzavam, linhas descontínuas ou fracas, e regiões onde há um acúmulo de linhas, como na base dos arcos coronais. A figura 1.9 mostra um destes resultados.

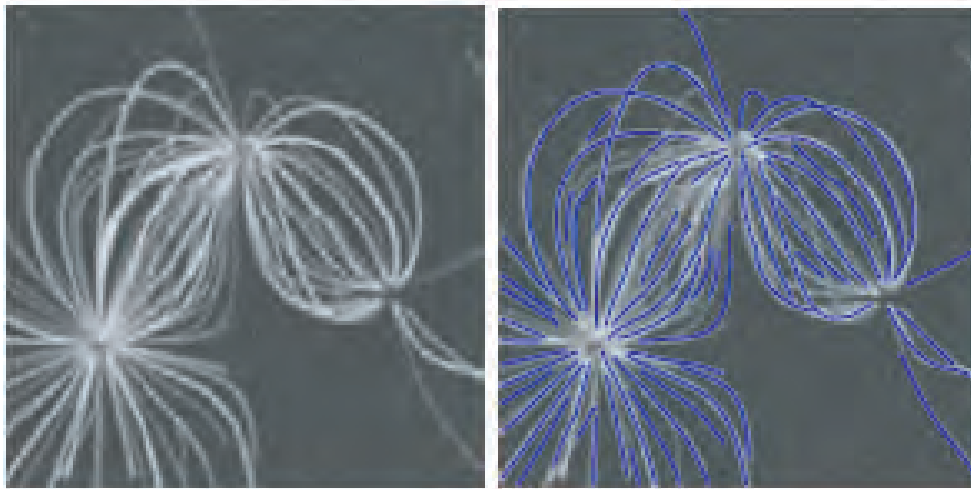


Figura 1.9 - Resultado do método de conexão (direita) aplicado à um conjunto de linhas de campo gerado sinteticamente (esquerda).

Fonte: Lee et al. (2006)

Este método trabalha com a informação da posição das manchas solares a partir do modelo de dipolo simples, mas poderia gerar melhores resultados se ao contrário de utilizar a informação local da orientação do campo magnético baseado em um dipolo simples utilizasse a informação global do magnetograma, com a orientação

dada pelas linhas de campo magnético que partem de uma das manchas solares e chegam em outra mancha de polaridade oposta. Outro ponto importante a destacar é que a utilização de um procedimento de ajuste de curvas por polinômios favoreceu a completude dos segmentos de linhas de campo ainda desconectados, mas não solucionou a questão de arcos que se cruzam. Novamente, a abordagem que poderia contribuir para a solução deste problema seria utilizar a informação global do campo magnético pois o ajuste de curvas poderia ser guiado pela configuração magnética do sistema, dada globalmente pelo magnetograma.

### 1.1.3.2 Um método baseado em contornos ativos

Uma abordagem que também pode ser utilizada para extrair as características das linhas de campo magnético a partir das imagens obtidas no EUV é o fato natural de que as estruturas magnéticas solares são dinâmicas, e tem sido observadas em sequências de imagens. Ao analisar estas sequências de imagens é possível muitas vezes obter informações novas, frequentemente associadas à variação da geometria das estruturas ao longo do tempo. A utilização de técnicas de segmentação de imagens à aproximação de curvas tem sido utilizada em alguns trabalhos para a caracterização de elementos presentes na coroa solar. Um exemplo desta abordagem é a utilização de contornos ativos para monitorar a presença de explosões solares.

Em um trabalho de 2010 (GILL et al., 2010) os autores utilizaram a técnica de contornos ativos (também conhecida na literatura como *snakes*) em imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta e EUV para monitorar a dinâmica das explosões solares. Para isto os autores trabalharam com a descrição original de contornos ativos (KASS et al., 1988) como um polinômio do tipo *spline* que é alterado a cada passo de processamento, onde uma função de energia associada a este polinômio deveria ser minimizada até um valor de referência definido previamente. Em seu algoritmo, inicialmente (GILL et al., 2010) fizeram um pré-processamento da imagem, eliminando ruídos de diferentes tipos, utilizando o *framework* computacional *Solar Soft* para pré-processar as imagens (BENTELY; FREELAND, 1998). Após isto aplicaram à imagem um método de detecção de bordas com o objetivo de definir a borda mais externa das estruturas para utilizá-las como ponto de partida dos contornos ativos. Nas extremidades destes contornos o algoritmo criava uma sequência de nós separados a uma distância de 5 pixels um do outro. O conjunto de nós formava o contorno ativo inicial. A partir daí o algoritmo calculava uma função objetivo de cada nó e os movia para as posições de menor valor, utilizando um algoritmo de minimização. O passo inicial deste processamento pode ser observado na figura 1.10.

Um exemplo de aplicação do método é apresentado na figura 1.11, onde a partir de uma posição inicial nas extremidades da imagem, os contornos ativos buscaram a posição que minimizava a função objetivo calculada no algoritmo. Avaliações mostram que para casos satisfatórios os menores erros ficam em torno de 0,5 a 0,8 pixel.

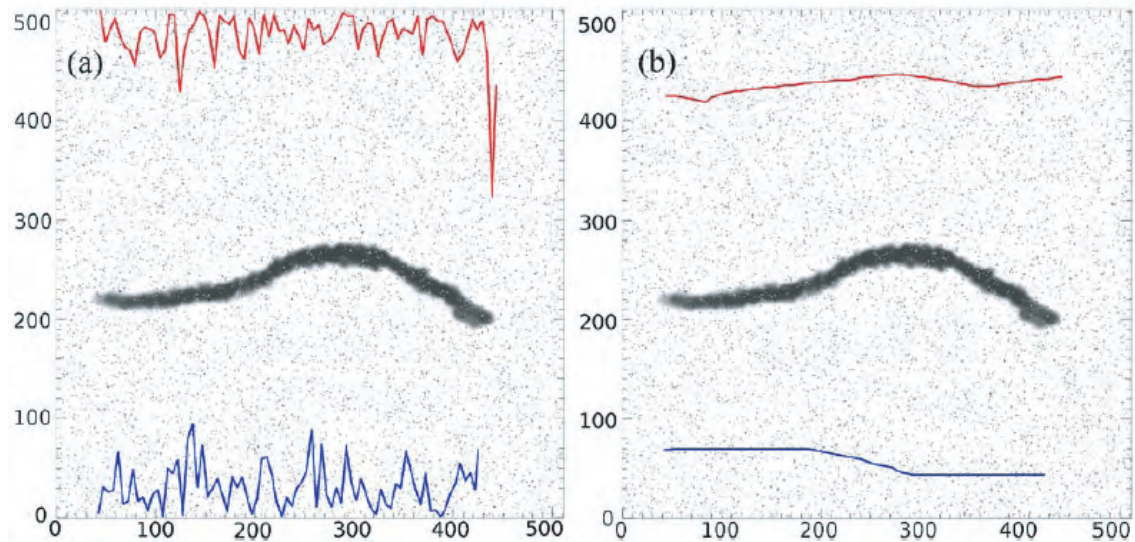


Figura 1.10 - Contornos ativos no passo inicial (esquerda) e após a determinação do menor valor da função objetivo nível de energia para o primeiro conjunto de nós (direita) em uma simulação.

Fonte: Gill et al. (2010)

Esta abordagem é interessante pois utiliza tanto informações de baixo nível, como a posição dos pixels que compõem a borda das regiões estudadas, quanto possibilita a inserção de informação *a priori*, de conteúdo semântico mais elevado, como por exemplo a formulação de funções-padrão das estruturas que estão sendo investigadas como condição para a determinação da função objetivo do método, de forma que o processamento leve os contornos ativos ao valor de mínimo da função. Segundo os autores, a utilização de contornos ativos se mostrou uma possibilidade para monitorar e acompanhar estruturas curvilíneas em imagens da coroa solar, porém apenas para imagens em condições ideais: baixo nível de ruído, presença de estruturas bem definidas e contínuas nas imagens, e sequências temporalmente curtas. Fora destas condições o método apresenta desempenho bastante inferior ao de uma inspeção visual realizada por um técnico. O desafio então seria otimizar o método de forma que estas limitações pudessem ser eliminadas e o mesmo pudesse então ser aplicado a uma maior variedade de situações.

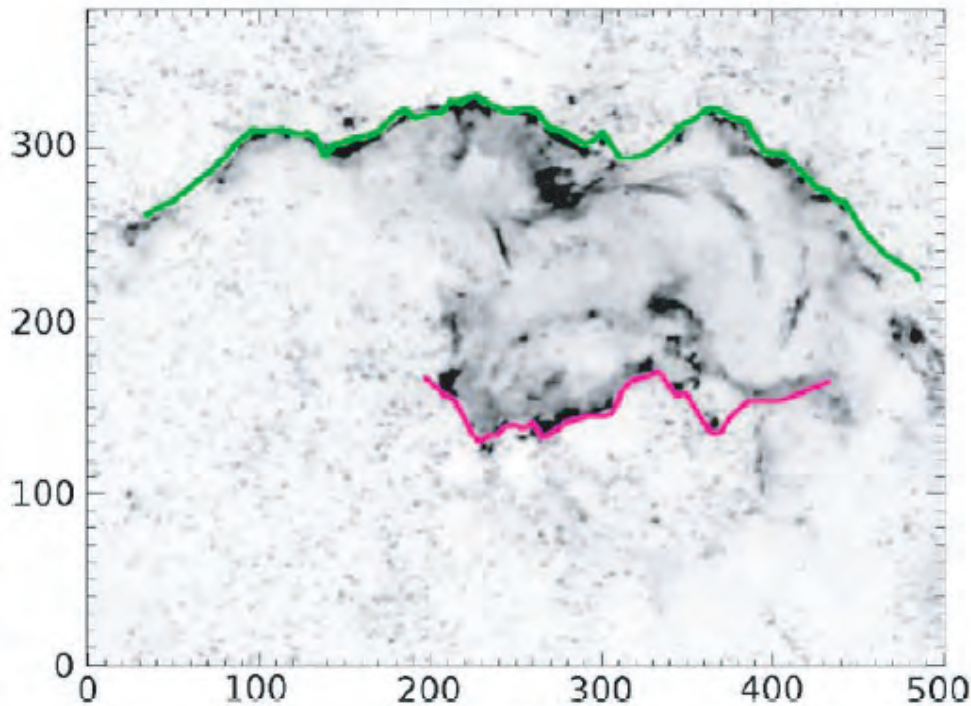


Figura 1.11 - Aplicação do método a uma região ativa de 10/04/2001. O erro médio é de 3,8 e 2,6 pixel para os contornos superior e inferior respectivamente.  
 Fonte: Gill et al. (2010)

#### 1.1.4 Motivação

Como visto anteriormente e detalhado no apêndice A, a partir de magnetogramas da fotosfera solar, condições de contorno devidamente estabelecidas a utilização de métodos de resolução das equações do modelo de campos livres de força é possível gerar sinteticamente a distribuição espacial das linhas de campo da região ativa ancoradas no magnetograma fornecido. Esta metodologia é conhecida como extrapolação das linhas de campo. A implementação desta metodologia foi realizada pelo grupo de Física Solar da Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DAS/INPE) e foi utilizada com sucesso em vários trabalhos (SELHORST et al., 2005). O algoritmo recebe como dado um magnetograma do disco solar onde deve ser selecionada uma região de interesse, normalmente uma região ativa. Em seguida solicita alguns parâmetros de entrada, sendo um deles o valor de  $\alpha$  na equação  $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$ . A seguir inicia o cálculo da extrapolação das linhas de campo. Ao final, é apresentado de forma gráfica o resultado da extrapolação de linhas de campo, e todos os dados resultantes do cálculo da extrapolação são disponibilizados em um arquivo. Este processo pode ser executado repetidas vezes para diferentes valores de  $\alpha$ , onde

a cada execução é possível observar na estrutura das linhas de campo a influência da variação de  $\alpha$ . Se pudéssemos ter descritores com dados extraídos das imagens EUV da coroa solar poderíamos comparar estes descritores iterativamente com aqueles obtidos nas linhas de campo geradas sinteticamente até encontrar o conjunto de linhas gerado com um determinado valor de  $\alpha$  que resulte em um melhor ajuste. Com este procedimento teríamos um método de comparação das linhas sintéticas geradas pelo modelo com aquelas imageadas pelos instrumentos, resultado de grande importância, dado que em física solar muitos estudos sobre os campos magnéticos presentes na coroa do Sol demandam uma comparação detalhada da estrutura das linhas geradas sinteticamente e das linhas imageadas. Além disso, uma detecção automática das linhas de campo e portanto do  $\alpha$  resulta na melhor possibilidade que temos de prever uma explosão solar ou ejeção de massa coronal; de extrema importância para os centros de previsão do Clima Espacial. Contribuir para validação dos modelos físicos frente às observações é uma tarefa de grande importância, mas para que isto seja possível é fundamental realizar a detecção automática de linhas de campo em imagens coronais, principal motivação deste estudo.

## **1.2 Objetivos e metas**

Entendemos que em qualquer pesquisa científica é de fundamental importância o estabelecimento de um conjunto de objetivos e metas, e seu devido cumprimento. Para tanto, definimos objetivos e metas para este trabalho, o que foi de extrema importância para nossa orientação durante seu desenvolvimento.

### **1.2.1 Objetivos**

A característica multidisciplinar deste trabalho tem origem no fato de que trata-se de uma pesquisa em Computação Aplicada que visa apoiar a área de Física Solar. Ao ser proposta há algum tempo, estabeleceu-se como objetivo principal desta pesquisa o desenvolvimento de uma metodologia capaz de extrair dados estruturais das linhas de campo magnético presentes em imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta extremo. Como objetivo secundário, depois de efetuar a extração das linhas dos campos magnéticos, queremos avaliar a qualidade desta extração, aplicando uma metodologia que possa comparar as linhas extraídas em relação às presentes na imagem obtida no ultravioleta extremo. Iremos verificar se as linhas detectadas se ajustam às manchas solares presentes nos magnetogramas. De forma resumida e em alto nível, podemos dizer que estes são os objetivos desta pesquisa:

- Extrair dados estruturais das linhas de campo magnético da coroa solar;
- Avaliar a qualidade da extração em relação à imagem original;
- Avaliar a qualidade da extração em relação ao magnetograma da mesma região ativa.

### 1.2.2 Metas

Para atingir os objetivos citados acima foi fundamental estabelecer um conjunto de metas a ser perseguido ao longo da pesquisa. Estas metas envolveram o estudo básico da natureza dos campos magnéticos da coroa solar, bem como dos dados disponibilizados pela missão TRACE e SOHO, na forma das imagens obtidas no EUV e os magnetogramas respectivamente. Foi fundamental também uma revisão na literatura a fim de acompanhar a evolução das pesquisas dos grupos de física solar na área. Fizemos um estudo da teoria, metodologias e técnicas de reconhecimento estrutural de padrões em imagens e extração de características, a fim de subsidiar a construção de um algoritmo específico capaz de extrair dados estruturais das linhas de campo das imagens. A construção deste algoritmo teve grande importância em nosso estudo, pois com ele foi possível materializar os resultados da nossa pesquisa, testando nossas hipóteses e obtendo resultados. Uma das nossas metas também esteve associada com a validação da nossa extração de linhas de campo, comparando qualitativamente as linhas extraídas com os magnetogramas da mesma região ativa, e comparando as linhas extraídas com as linhas da imagem original, a partir da qual a extração foi realizada. Este texto irá explicitar o desenvolvimento deste conjunto de metas a fim de cumprir os objetivos estabelecidos para esta pesquisa.

### 1.3 Estrutura da tese

Para que fosse possível atingir as metas e cumprir os objetivos expostos acima, dividimos nosso trabalho em cinco capítulos e um apêndice, iniciando por esta introdução que apresentou o problema em linhas gerais e deu uma breve introdução do contexto da física solar no qual esta pesquisa se insere.

O capítulo 2 apresenta uma visão geral dos dados utilizados em nossa pesquisa. Abordamos detalhes das imagens obtidas no ultravioleta extremo (EUV) pelo instrumento TRACE bem como os magnetogramas da fotosfera solar obtidos pela missão SOHO. Veremos como as linhas de campo sintéticas são geradas a partir do modelo físico de extrapolação das linhas de campo.

No capítulo 3 apresentaremos o núcleo da nossa pesquisa, com todo o processo de desenvolvimento de nossa metodologia, desde o pré-processamento das imagens obtidas no ultravioleta extremo, sua segmentação e a detecção automática de linha de campo. Testes do algoritmo também foram realizados, permitindo compreender e verificar seu funcionamento de forma mais direta.

O capítulo 4 é dedicado à aplicação da nossa metodologia a imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta extremo. Apresentaremos os resultados obtidos, interpretaremos estes resultados e discutiremos suas características.

O capítulo 5 apresenta a conclusão, com uma síntese do trabalho, nossos comentários e idéias para futuros desenvolvimentos.

No apêndice A apresentaremos uma visão geral da teoria física dos campos magnéticos solares, abordando sua formação na tacoclina e sua extensão até a alta coroa solar. Mostraremos também a teoria associada aos modelos de extrapolação das linhas de campo magnético.





## 2 UMA VISÃO SOBRE OS DADOS UTILIZADOS

As observações solares aumentaram muito em quantidade e qualidade nas últimas décadas, de forma que dispomos hoje de grande volume de dados obtidos nas principais faixas do espectro eletromagnético, o que proporciona uma visualização detalhada do Sol, em diferentes altitudes, desde a fotosfera até os limites da coroa solar. Em nosso trabalho utilizamos dois diferentes tipos de dados: as observações obtidas pelo instrumento TRACE no ultravioleta extremo e os magnetogramas da fotosfera solar obtidos pelo instrumento MDI do satélite SOHO. Estes dados podem ser obtidos no sítio [http://trace.lmsal.com/trace\\_cat.html](http://trace.lmsal.com/trace_cat.html) para as imagens TRACE e em <http://soi.stanford.edu/data/> para os magnetogramas MDI/SOHO. Neste capítulo apresentaremos uma descrição de cada um destes tipos de imagens, bem como dos dados sintéticos gerados pelo algoritmo de extrapolação de linhas de campo.

### 2.1 Imagens de regiões ativas solares obtidas no Ultravioleta Extremo (EUV)

O Sol emite grande quantidade de radiação em muitas faixas do espectro eletromagnético. É possível detectar emissões de grande comprimento de onda, em VHF (*Very High Frequency*), UHF (*Ultra High Frequency*), microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, ultravioleta extremo, raios-X e comprimentos de onda ainda menores. Neste trabalho estamos especialmente interessados na coroa solar, região da atmosfera solar que emite grande quantidade de radiação na faixa espectral do ultravioleta extremo (EUV, ou *Extreme Ultra-Violet*). As emissões no ultravioleta situam-se na faixa do espectro eletromagnético que vai desde 3.900 Å até 100 Å aproximadamente. No extremo de comprimentos de onda menores é possível verificar que as emissões no ultravioleta extremo, localizado entre 1210 Å e 100 Å (ou 121 e 10 nm) mostram uma série de linhas de emissão que são transições eletrônicas de elementos químicos com grande grau de ionização além do contínuo produzido por bremsstrahlung térmico, ou emissão do tipo livre-livre (*free-free emission*). As linhas do ferro (Fe) apresentam vários picos de emissão, especialmente nos comprimentos de onda em torno de 171 Å (Fe IX,  $T \approx 1.0$  MK), 195 Å (Fe XII,  $T \approx 1,5$  MK) e 284 Å (Fe XV,  $T \approx 2.0$  MK), sendo que muitos instrumentos foram desenvolvidos para observar exatamente estes comprimentos de onda. Devido ao fato da atmosfera terrestre absorver praticamente toda a radiação ultravioleta, deixando passar apenas os raios UV-A (4000 Å a 3150 Å) e UV-B (3150 Å a 2800 Å), as observações solares no ultravioleta extremo só se tornaram possíveis para instrumentos embarcados em satélites e lançados ao espaço, o que motivou o desenvolvimento de uma série

de missões com o objetivo de obter dados do Sol em uma ampla faixa do espectro.

A primeira missão que contou com instrumentação específica para observações solares na faixa do EUV foi o *Orbiting Solar Observatory*, com oito lançamentos ocorridos entre 1962 a 1975, levando a bordo espectômetros para o ultravioleta extremo, raios-X moles, raios-X duros, detectores de raios gama e de emissão de radiação térmica. O observatório OSO-3 obteve destaque na observação de *flares* e no registro da emissão de raios-X de uma fonte extra solar conhecida como *Scorpius X-1* na constelação do Escorpião (KRAUSHAAR et al., 1972).

Outra missão que também contribuiu com observações solares no EUV foi a estação espacial *Skylab*, lançada em 14 de maio de 1973 e mantida em órbita até 11 de julho de 1979. A estação *Skylab* contava com um coronógrafo na faixa da luz visível, dois telescópios específicos para a faixa dos raios-X, espectroheliômetros e espectroheliógrafos para o EUV e um espectrógrafo para o ultravioleta. A missão *Skylab* deu importantes contribuições nas observações de arcos magnéticos em regiões ativas e *flares* (BRAY et al., 1991).

Em 14 de fevereiro de 1980 foi lançada a missão *Solar Maximum Mission* (SMM), cujo principal objetivo era fazer observações do Sol no visível e em altas energias (EUV, raios-X moles e raios-X duros) durante todo um ciclo solar. O SMM operou até 2 de dezembro de 1989. O SMM contava com espectômetros para raios-X moles e duros, um espectômetro para o EUV e um coronógrafo para a luz visível. A missão SMM se destacou por observar cerca de 12.000 *flares* solares e centenas de ejeções de massa coronal (*Coronal Mass Ejection*, ou CME) (STRONG; SCHMELZ, 1999).

O *Solar and Heliospheric Observatory*, ou SOHO, lançado em 2 de dezembro de 1995 e em operação até o momento em que este texto foi escrito foi a missão que mais instrumentos levou ao espaço. Um total de doze diferentes equipamentos de observação solar dedicados à observação heliosismológicas (GOLF, VIRGO, SOI/MDI), atmosfera solar (SUMER, CDS, EIT, UVCS, LASCO), e detectores de partículas para monitorar o vento solar (CELIAS, COSTEP, ERNE, SWAN). A missão SOHO é uma iniciativa de grande importância pois vem fornecendo dados a respeito dos processos magnéticos solares durante quase dois ciclos solares completos (FLECK et al., 1995).

Uma das principais missões enviadas ao espaço para coletar dados a respeito da magnetosfera solar foi a missão TRACE (*Transition Region And Coronal Explorer*). A missão TRACE foi lançada em 2 de abril de 1998 e operou até 21 de junho de

2010, caracterizando-se por realizar observações da coroa solar com uma resolução de 1", algo sem precedentes até então. O principal instrumento utilizado na missão TRACE foi um telescópio Cassegrain de 30 cm com um campo de visão (*Field Of View*, FOV) de  $8,5 \times 8,5$  minutos de arco. O TRACE operava em três bandas do ultravioleta extremo (Fe IX/X, em 171 Å; Fe XII/XXIV, em 195 Å e Fe XV em 284 Å). Contava também com detectores para o H I na linha de Lyman- $\alpha$  (1216 Å), C IV (1550 Å), ultravioleta contínuo (1600 Å) e luz visível (5000 Å). Esta faixa de bandas espectrais cobre temperaturas da ordem de 6000 K a 10 MK, o que possibilitou ao TRACE fornecer imagens detalhadas de alta resolução mostrando o comportamento dinâmico do plasma na coroa solar. O instrumento TRACE produzia em média cerca de 3 GB de dados por semana (HANDY et al., 1999).

Todos estes instrumentos geraram grande quantidade de dados para a comunidade científica, dados que precisaram ser tratados adequadamente. A maior parte deles foi disponibilizada no formato FITS (*Flexible Image Transport System*), formato digital de arquivos que permite o armazenamento não somente das imagens, mas de metadados associados, como as características básicas dos instrumentos, dados de calibração e dados relacionados ao instante da captura da imagem. As imagens utilizadas neste trabalho foram todas obtidas através do banco de dados do instrumento TRACE. São imagens disponibilizadas no formato FITS no tamanho de  $1024 \times 1024$  pixels, cujo cabeçalho contém uma série de metadados sobre a imagem, como os parâmetros espaciais em relação à posição da janela de observação sobre o disco solar, parâmetros temporais, como o momento da captura da imagem, e parâmetros auxiliares, como o comprimento de onda que está sendo visualizado num determinado instante (SOLARSOFT, 2005). As imagens solares presentes nos arquivos FITS do instrumento TRACE podem ser lidas por rotinas comuns para a manipulação do formato FITS disponíveis na maior parte dos aplicativos manipuladores de imagens, e normalmente são disponibilizadas para o usuário como tabelas de  $m \times n$  pixels de 8 bits cada ( $m$  e  $n$  as dimensões da imagem). Estas imagens também podem ser lidas por rotinas do *Solar Soft* (SSW), *framework* computacional desenvolvido em IDL pela comunidade de astrofísica solar e largamente difundido e utilizado por vários grupos na área (BENTELY; FREELAND, 1998). O *Solar Soft* disponibiliza rotinas básicas de leitura, gravação e manipulação de imagens, onde as mesmas são tratadas na forma de matrizes, e rotinas mais complexas para operações especiais. As imagens obtidas pelo TRACE são lidas na forma de matrizes com resolução radiométrica de 8 bits e constituem a principal fonte de dados para a condução deste trabalho. A figura 2.1 apresenta um mosaico de imagens obtidas com o instrumento TRACE, tratadas e disponibilizada no formato FITS.

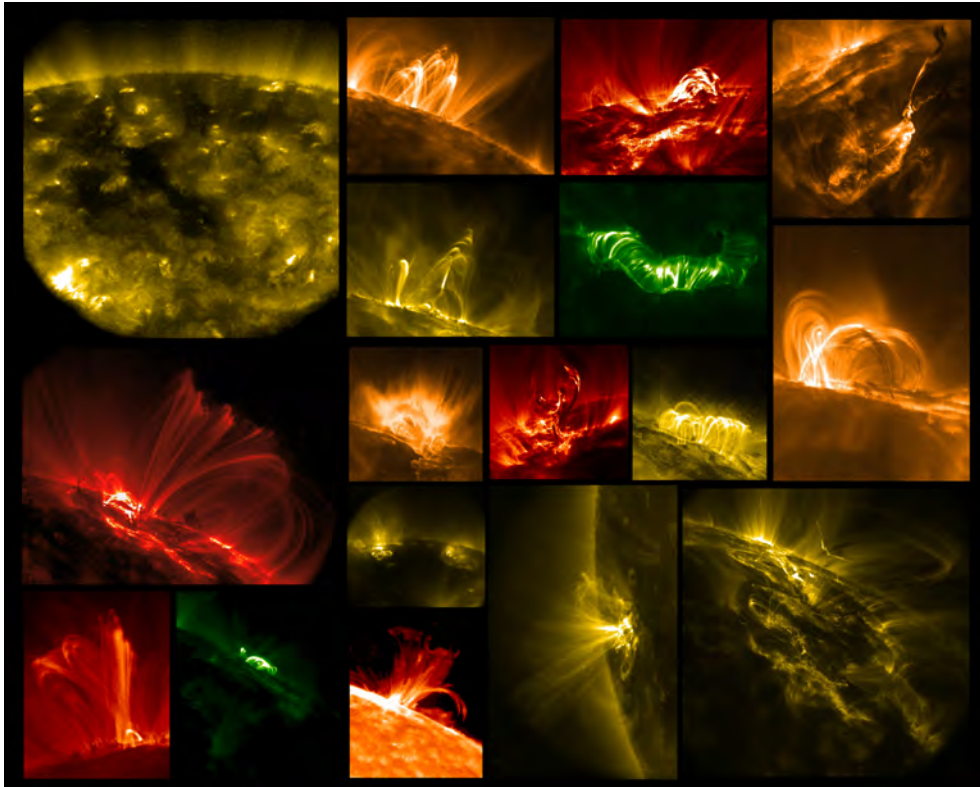


Figura 2.1 - Mosaico de imagens obtidas pelo instrumento TRACE na faixa espectral do ultravioleta extremo, nos comprimentos de onda de 171 Å, 195 Å e 284 Å.  
Fonte: NASA/Lockheed Martin (2001)

## 2.2 Magnetogramas

No final do século XIX e início do século XX, o físico alemão Pieter Zeeman publicou trabalhos onde investigava a variação do comportamento espectral da luz na presença de campos magnéticos, o chamado efeito Zeeman (ZEEMAN, 1911). O efeito Zeeman se manifesta pela separação das linhas espectrais em relação à linha central, aquela que seria a única a ser observada caso não existisse a presença de um campo magnético. A separação das linhas equidistantes em relação à linha central é proporcional à intensidade do campo, de forma que a medida desta separação permite obter a intensidade do campo magnético. O efeito Zeeman inverso (efeito Zeeman sobre as linhas de absorção) é utilizado para produzir mapas do campo magnético solar fotosférico chamados de magnetogramas, que representam então a intensidade dos campos magnéticos solares no nível fotosférico.

Se a observação ocorre na direção perpendicular ao campo é possível visualizar três linhas espectrais, mas se a observação ocorre na direção paralela ao campo,

somente as linhas separadas são vistas, o que dá a medida longitudinal do campo. Os magnetogramas longitudinais medem a intensidade da componente vertical ( $B_z$ ) do campo magnético (PINTO, 2010).

Os magnetogramas utilizados neste trabalho foram obtidos pelo instrumento MDI (*Michelson Doppler Imager*) do satélite SOHO. São magnetogramas longitudinais, fornecendo apenas a componente do campo magnético na linha de visada. Os dados obtidos pelo instrumento MDI são disponibilizados com calibração em arquivos no formato FITS no tamanho de 1024 x 1024 pixels que da mesma forma que os arquivos com imagens da coroa solar no ultravioleta extremo, também podem ser lidos e manipulados através do *SolarSoft*.

### 2.3 Dados sintéticos

No capítulo 1.1.2.3 verificamos que somente a partir da década de 1990 a comunidade científica teve acesso a imagens da coroa solar com bom nível de resolução. Antes disso a alternativa era estimar a estrutura dos campos magnéticos através de metodologias que utilizavam as informações das observações de regiões ativas na fotosfera e condições de contorno. Estas metodologias ficaram conhecidas como métodos de Extrapolação das linhas de campo. Um dos mais utilizados é o método *Linear Force-Free Field* (LFFF), que fundamentado na teoria dos campos magnéticos parte da premissa que os campos magnéticos coronais são livres de força, ou seja, a pressão gerada pelo plasma é muitas vezes menor do que aquela gerada pelo campo magnético. Muitos autores propuseram diferentes abordagens para calcular o problema da extrapolação das linhas de campo, como os métodos que utilizam as Funções de Green e a Transformada de Fourier. Há métodos que utilizam Funções Harmônicas Esféricas (NEWKIRK et al., 1968), superposição de fontes de fluxo discretas (LOTHIAN; BROWNING, 1995), e metodologias que utilizam termos da MHD (NEUKIRCH, 1995).

A implementação da metodologia que utiliza as Transformadas de Fourier foi publicada em um trabalho em 1972 (NAKAGAWA; RAADU, 1972), implementada pelo grupo de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, e utilizada em varios trabalhos (SELHORST et al., 2005). Nesta implementação do algoritmo de cálculo definiu-se um vetor de valores que representava a componente espacial  $z$  que é a altitude medida a partir da fotosfera, onde  $z = 0$ . Para cada valor discreto de  $z$ , o algoritmo calculava o valor das componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  do campo magnético  $\mathbf{B}$  seguindo a formulação dada por A.15, A.16 e A.17 no apêndice A desta tese. O algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* ou FFT) foi

utilizado nesta implementação, de forma que todo o processamento é rapidamente realizado. Após o cálculo da extrapolação é possível selecionar um parâmetro que corresponde à quantidade de linhas de força do campo magnético que serão exibidas no resultado final, que pode ser observado na figura [A.1](#).

### 3 A DETECÇÃO AUTOMÁTICA DAS LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO

Uma das muitas definições encontradas na literatura para o termo *Reconhecimento de Padrões* é aquela que afirma que esta é a disciplina científica cujo objetivo é classificar objetos em determinados conjuntos de categorias ou classes. Entendemos aqui que estes conjuntos de categorias ou classes estão diretamente relacionados com aquilo a que chamamos de *padrões*. Assim, independentemente da natureza dos objetos, sejam eles imagens, dados provenientes da leitura de sensores térmicos, formas de onda sonora ou outros, deseja-se verificar se existem padrões recorrentes nestes dados, e então, dependendo destes padrões e de sua recorrência, separá-los em classes (THEODORIDIS; KOUTROUMBAS, 2008). Existem diversas metodologias que podem ser utilizadas para realizar a separação dos objetos em classes, e muitos estudos já foram realizados utilizando probabilidade, estatística, geometria computacional, aprendizado de máquina e processamento de sinais para reconhecer padrões em objetos, sendo este um tema de importância central nas áreas de Inteligência Artificial e Visão Computacional.

De forma bastante geral podemos dizer que existem duas grandes abordagens para tratar os problemas de reconhecimento de padrões: a abordagem estatística e a abordagem estrutural. Estas abordagens podem eventualmente utilizar o mesmo ferramental matemático e computacional, mas partem de premissas diferentes, já que uma delas leva em conta o caráter quantitativo da informação contida nos dados, e outra o caráter semântico, respectivamente.

A abordagem estatística está associada aos conceitos da teoria de decisão estatística para discriminar dados de diferentes grupos baseado em características quantitativas destes dados. Existe uma variedade de técnicas que podem ser utilizadas para isto, mas que em geral tem dificuldade de discriminar corretamente dados que tenham algum tipo de informação morfológica.

A abordagem estrutural para o Reconhecimento de Padrões está baseada em conjuntos de regras para discriminar dados de diferentes grupos. Estas regras em geral utilizam a informação das interrelações morfológicas presentes nos dados, o que leva a questão para o campo da semântica. Assim, dependendo das características estruturais encontradas nos dados, o conjunto de regras citado anteriormente atuaria como uma gramática, permitindo a separação e classificação dos dados. De um ponto de vista prático as regras citadas seriam algoritmos capazes de analisar os dados estruturalmente, com forte dependência da aplicação.



Este trabalho busca fazer a extração de características bastante específicas em imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta extremo. Por estar diretamente associado às características morfológicas das imagens, adotamos aqui a abordagem estrutural, levando em conta muito mais os aspectos geométricos das estruturas presentes nas imagens do que os aspectos quantitativos. Neste ponto reside o aspecto inovador neste trabalho, já que buscamos utilizar um conjunto de métodos e técnicas para construir uma nova metodologia para a solução de um problema, como é bem típico da área de Visão Computacional. Uma revisão na literatura (ASCHWANDEN et al., 2008) mostrou que o problema do reconhecimento automático das linhas de campo em imagens da coroa solar geralmente é tratado como um problema de otimização com dois tipos distintos de tratamento, onde no primeiro tipo define-se uma função objetivo utilizada para mensurar a completude das linhas de campo extraídas, em número de pixels interconectados. Esta interconexão leva em conta alguns fatores, como a direção possível das linhas de campo, mas os métodos em geral utilizam como direção um modelo de linha de campos baseado em um dipolo, onde  $\nabla \times \mathbf{B} = 0$ , o que não corresponde à realidade na imensa maioria dos casos. Os métodos também tratam a questão da interconexão fazendo buscas pixel a pixel, e processam toda a imagem como uma única estrutura. No outro tipo de tratamento adotado normalmente utilizam-se aproximações iniciais das linhas de campo baseadas em funções que são interpoladas utilizando como referência determinados pixels nas imagens. São os chamados contornos ativos ou *snakes* (KASS et al., 1988), onde o processo de interpolação ocorre iterativamente atualizando-se a função objetivo, até que a mesma atinja um valor pré-determinado.

Dado que as imagens com as quais trabalhamos apresentam linhas de campos que gostaríamos de detectar automaticamente, partimos do princípio de que se pudéssemos dividir uma linha de campo em partes menores e em cada uma delas pudéssemos identificar um ponto que atue como um marcador, poderíamos identificar os  $m$  pontos de uma linha e interpolar estes pontos, obtendo a linha completa. Repetindo esta operação, teríamos detectado todas as linhas da imagem.

Consideramos assim que nossa abordagem é inovadora pois partimos da hipótese inicial de que seria possível fragmentar uma linha de campo em partes menores, tratando o problema de forma mais local, utilizando em seguida uma metodologia que pudesse extrair características dos segmentos de linhas de campo nestes fragmentos, ao final recompondo toda a imagem, utilizando as informações obtidas em cada fragmento para reconstruir a linha de campo, obtendo um descritor que nos forneça características geométricas individuais das linhas de campo magnético. Para



isto não fazemos uma busca pixel a pixel para identificar pixels conectados segundo um critério, mas utilizamos os pixels mais brilhantes da linha como marcadores para que a Transformada de Hough possa reconhecer no fragmento um segmento de linha reto que se aproxime de um segmento da linha de campo curvilíneo. Com esta aproximação obtivemos um pixel que é comum à linha de campo original e ao segmento de reta aproximado pela Transformada de Hough. Este pixel é utilizado como um nó que deverá fazer parte da linha extraída. Após isto utilizamos um algoritmo de interconexão dos fragmentos baseado conceitualmente no algoritmo A\* (HART et al., 1968), muito utilizado para busca de caminho em grafos, de forma a identificar quais fragmentos fazem parte de uma determinada linha de campo. Estabelecemos um conjunto de critérios para definir quais fragmentos estão interconectados, e com os nós de cada fragmento finalmente fazemos uma interpolação para reconstruir toda a linha de campo, obtendo finalmente um conjunto de descritores com as características de cada linha de campo, sendo possível reproduzi-la em qualquer escala. Dada a principal característica de utilizar a Transformada de Hough em fragmentos da imagem, decidimos nomear nossa metodologia como "Transformada de Hough para Imagens Fragmentadas" (ou HTFI, *Hough Transform for Fragmented Images*). Podemos resumir comparativamente as características de outras abordagens e da nossa metodologia da seguinte forma:

#### Outras metodologias

- Fazem busca pixel-a-pixel em toda a imagem;
- Utilizam como critério na busca para avaliar o próximo pixel uma direção dada pelo modelo de um dipolo simples;
- Testam o critério de busca de pixel para cada um, individualmente;
- Tratam a imagem como uma única estrutura.

#### Nossa metodologia

- Não faz busca pixel-a-pixel;
- Utiliza a informação do brilho das linhas de campo como marcadores para a Transformada de Hough obter uma aproximação através de um segmento de reta;

- A interconexão é realizada com base em critérios de direção da própria linha de campo na imagem, e não de um modelo teórico aproximado;
- Trata fragmentos da imagem, tornando a solução mais localizada.

Para implementarmos nossa metodologia, estabelecemos uma sequência de tarefas que quando executadas permitem a realização da detecção das linhas de campo em imagens, gerando descritores para as mesmas. A figura 3.1 mostra um diagrama de estágios de processamento e suas etapas.

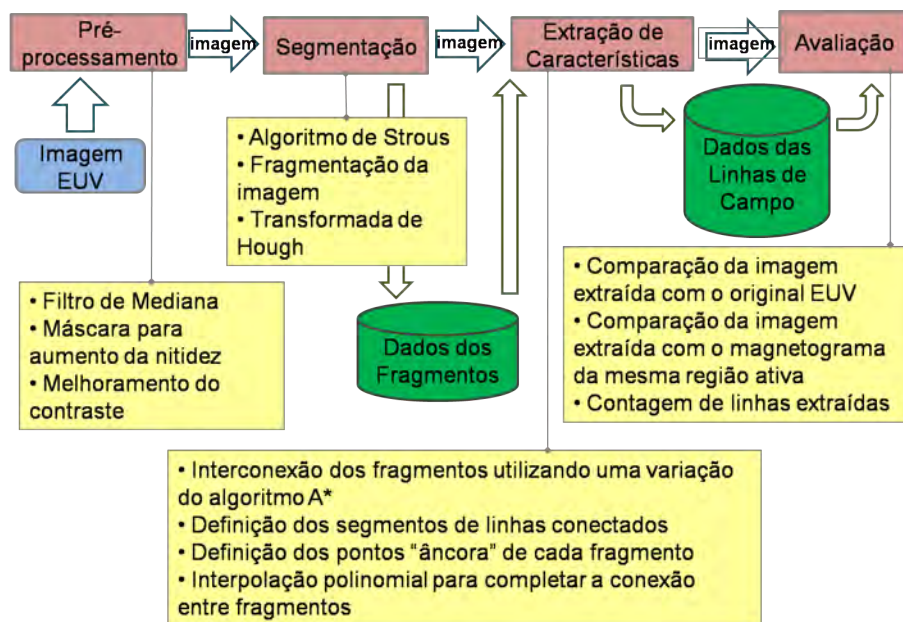


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do método da Transformada de Hough para Imagens Fragmentadas (*HTFI - Hough Transform for Fragmented Images*). O método é dividido em quatro grandes estágios e suas etapas: o pré-processamento das imagens, a segmentação, a extração de características e uma avaliação dos resultados.

Nossa metodologia (SILVA et al., 2012) está baseada em uma sequência de operações de processamento dos dados de entrada, que em nosso trabalho são as imagens do satélite TRACE obtidas no ultravioleta extremo descritas no capítulo 2.1. Dividimos todo o processamento em quatro grandes estágios: o pré-processamento das imagens, sua posterior segmentação, a extração das características da imagem segmentada, e finalmente uma avaliação do resultado final. No estágio de pré-processamento fazemos um tratamento da imagem a ser processada visando reduzir o ruído e melhorar o contraste da imagem. Em seguida efetuamos a segmentação da imagem, estágio do processamento que exigiu a utilização de diferentes algoritmos, conforme iremos

abordar mais a frente. No estágio seguinte desenvolvemos algoritmos que, com base nos dados obtidos a partir da segmentação da imagem, recuperaram a posição das linhas de campo, identificando cada uma delas separadamente. Ao final de todo o processamento realizamos uma avaliação da extração, quantificando as linhas detectadas e comparando-as com a imagem original e com o magnetograma. Nossa metodologia foi apresentada em um evento internacional na área de Computação Gráfica e Processamento de Imagens (SILVA et al., 2012), e publicada em periódico científico na área de Ciências Computacionais Interdisciplinares (SILVA et al., 2012). Nos tópicos seguintes iremos explorar em detalhes cada um destes estágios que culminaram na metodologia HTFI (*Hough Transform for Fragmented Images*).

### 3.1 Pré-processamento

Normalmente as imagens obtidas por dispositivos de aquisição apresentam imperfeições causadas por artefatos, ruído e outros tipos de alterações. Por esta razão muitas vezes o trabalho baseado no processamento de imagens inicia-se por uma etapa de pré-processamento das mesmas. Esta etapa visa garantir um nível mínimo de qualidade para que as imagens possam ser utilizadas nas etapas subsequentes. O pré-processamento das imagens em geral consiste na filtragem, equalização, e calibração (GONZALEZ; WOODS, 2001; JAIN, 1989; JAHNE, 2005).

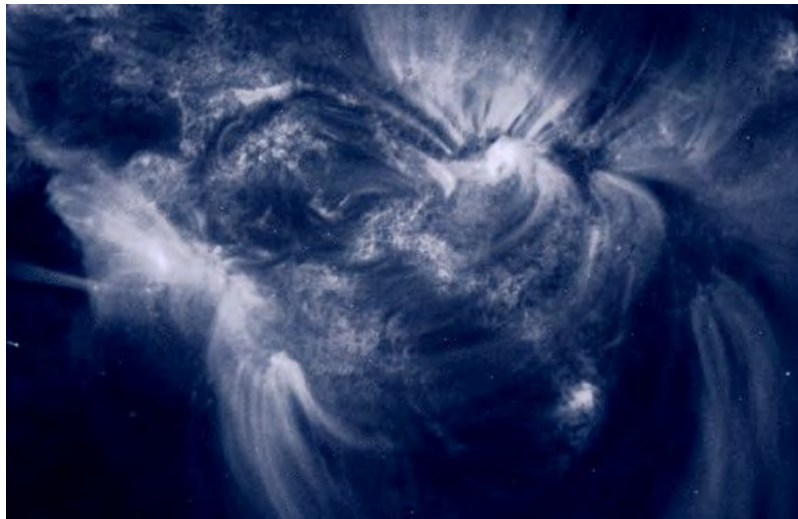


Figura 3.2 - Imagem em cores falsas obtida pelo satélite TRACE em 18/10/1999 na banda espectral de 171 Å (ultravioleta extremo) mostrando as linhas de força do campo magnético na coroa solar sobre uma região ativa. Notamos o baixo brilho e contraste, falta de nitidez e a presença de artefatos, o que demanda um pré-processamento para a sua posterior utilização.

Fonte: NASA - TRACE/LMSAL (1999)

O satélite TRACE forneceu em seus 12 anos de operação uma enorme quantidade de imagens no ultravioleta extremo que deram suporte a muitos trabalhos sobre os campos magnéticos coronais solares (HANDY et al., 1999). Estas imagens são disponibilizadas em arquivos no formato FITS, contendo um cabeçalho com uma série de parâmetros físicos e muitas vezes apresentam ruído excessivo e baixo nível de brilho e contraste, devendo ser pré-processadas para uso posterior. A figura 3.2 apresenta um exemplo dos arcos coronais de uma região ativa imageada no EUV na banda de 171 Å.

Normalmente as imagens obtidas pelo satélite TRACE e disponibilizadas para a comunidade científica apresentam as características observadas: baixo brilho e contraste, presença de ruído na forma de "chuviscos" (ruído *salt and pepper*) e a presença de artefatos oriundos da instrumentação, como exemplifica a figura 3.2. Uma abordagem clássica em processamento de imagens e extensivamente utilizada na literatura, a qual verificamos ser uma alternativa interessante para o tratamento do ruído *salt and pepper* em nosso estudo, é a utilização do filtro de mediana (LEE et al., 2006; ASCHWANDEN et al., 2008; GONZALEZ; WOODS, 2001). O filtro de mediana funciona alterando o valor de intensidade de cada pixel da imagem pelo valor da mediana da intensidade dos pixels vizinhos. Normalmente utiliza-se a vizinhança mais próxima, numa janela de tamanho 3 x 3, mas janelas de outros tamanhos são admitidas. Este procedimento garante que um pixel com nível de intensidade muito diferente de seus vizinhos seja corrigido para um valor próximo aos pixels da janela utilizada. O resultado final é que imagens com ruído em pixels isolados terão o nível de intensidade destes pixels corrigidos (JAHNE, 2005).

Em nosso trabalho, dada a imagem original  $f(x, y)$  utilizamos um filtro de mediana parametrizado pelo tamanho da janela, tal que a imagem processada pelo filtro é dada por

$$f_m(x, y) = \text{Median}[f(x, y), s_m] \quad , \quad (3.1)$$

onde  $s_m$  é o tamanho, em pixels, da vizinhança para o cálculo da mediana. A figura 3.3 mostra uma imagem original sem processamento obtida pelo TRACE e a figura 3.4 sua versão após o processamento indicado pela expressão 3.1, com  $s_m = 3$ .

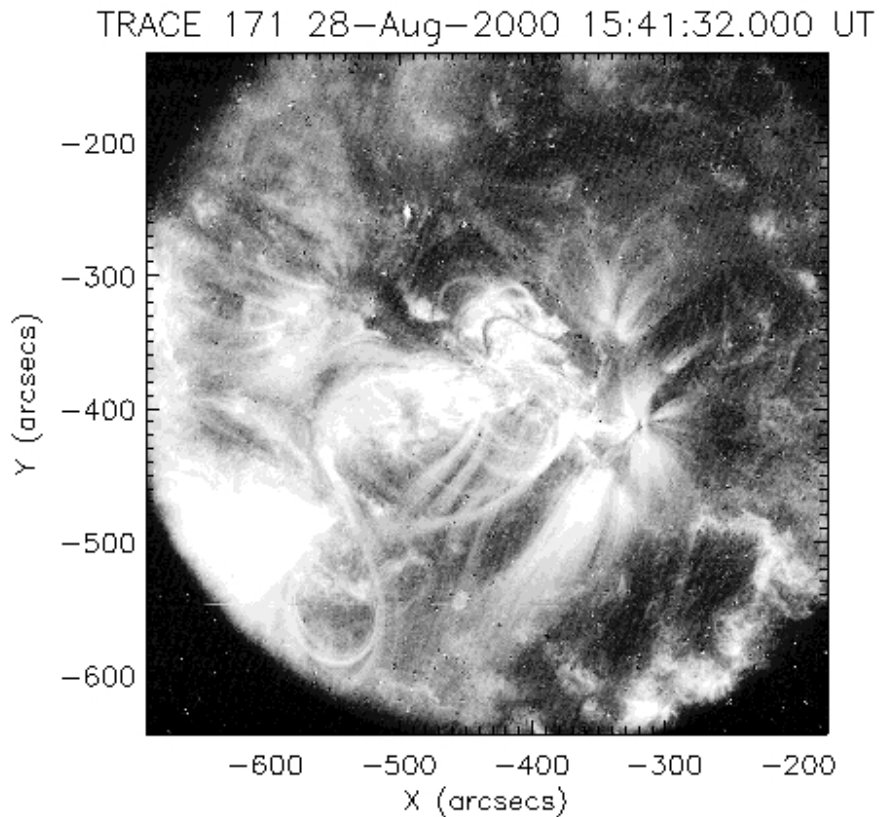


Figura 3.3 - Imagem original obtida pelo satélite TRACE em 28/08/2000 15:41:32 UT na banda espectral de  $171 \text{ \AA}$ . Podemos notar a presença de ruído *salt and pepper* na forma de pontos claros e escuros.  
 Fonte: NASA/TRACE-LMSAL (2000)

Como utilizaremos no estágio de segmentação um método baseado em gradientes, é importante que os pixels de interesse sejam realçados no pré-processamento. No caso das imagens obtidas pelo TRACE as linhas de força do campo magnético coronal constituem as estruturas de maior importância a serem analisadas, e por esta razão utilizamos um método de realce através do uso de um filtro passa-alta, já que desejamos destacar as altas frequências na variação dos pixels da imagem. Em nossa implementação utilizamos uma variação da técnica conhecida como *máscara de nitidez* (*unsharp masking*) onde fazemos a subtração da versão suavizada da imagem (através de um filtro de média com janela de tamanho  $s_u$ ) da imagem original obtida pela expressão 3.1, obtendo a imagem  $f_u$ , que essencialmente é uma máscara da imagem original destacando as estruturas de alta frequência (GONZALEZ; WOODS,

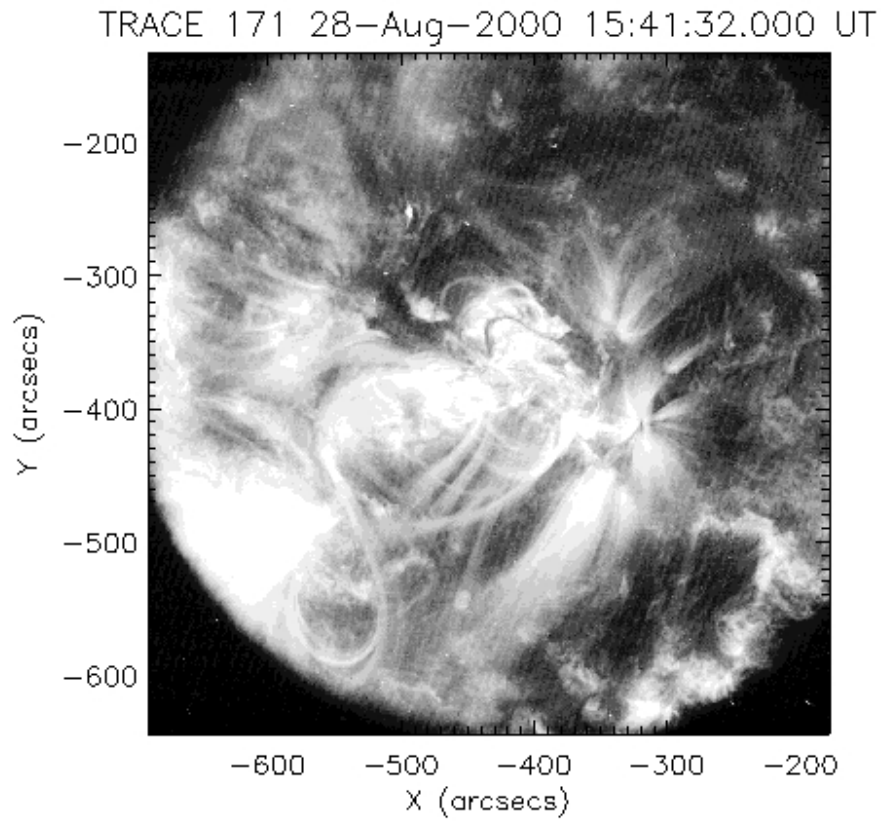


Figura 3.4 - Imagem da figura 3.3 após o processamento do filtro da mediana descrito na equação 3.1 com  $s_m = 3$ . Verificamos que o filtro contribuiu com a remoção dos pixels claros e escuros verificadas na imagem anterior.

Fonte: NASA/TRACE-LMSAL

2001).

A expressão

$$f_u(x, y) = f_m(x, y) - \text{Smooth}[f_m(x, y), s_u] \quad (3.2)$$

define esta etapa de processamento, cujo resultado pode ser observado na figura 3.5, com  $s_u = 17$ .



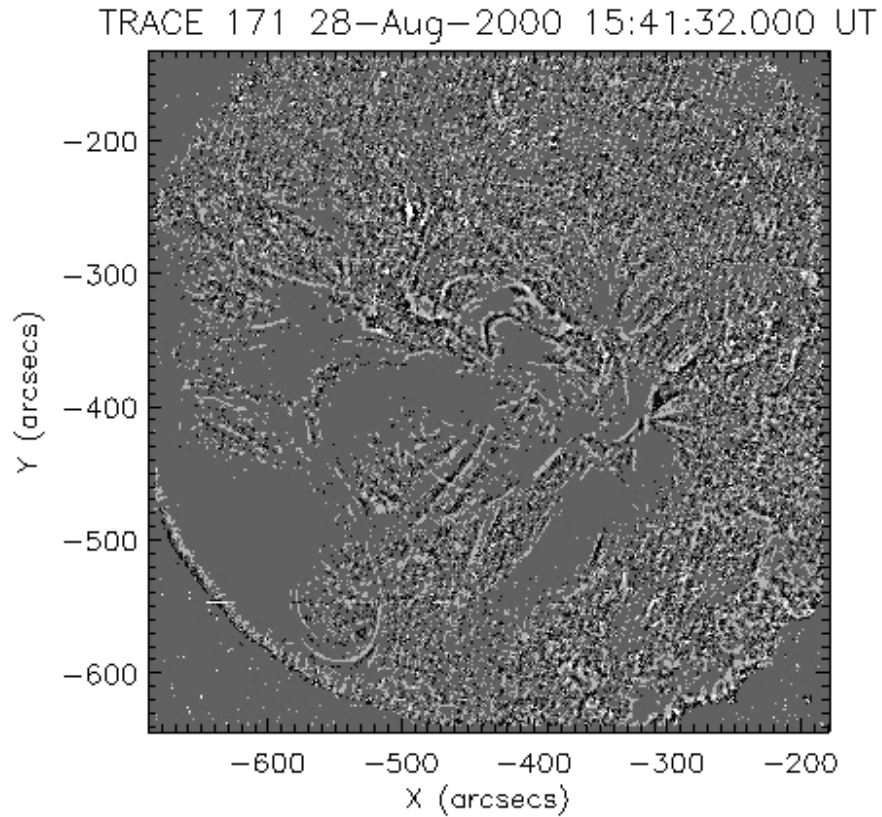


Figura 3.5 - Resultado da imagem original após a remoção do ruído com o filtro de mediana e após o processamento utilizando o filtro passa-altas descrito pela expressão 3.2, com  $s_u = 17$ .

Verificamos que a imagem da figura 3.5 apesar de destacar estruturas de alta frequência na imagem original, ainda apresenta baixo contraste. Utilizamos então mais uma etapa de filtragem, utilizando um filtro de raiz quadrada para efetuar o melhoramento do constraste, conforme a expressão 3.3

$$f_{sq}(x, y) = \sqrt{f_u(x, y)} \quad , \quad (3.3)$$

obtendo como resultado final a imagem observada na figura 3.6.

Este estágio de pré-processamento da imagem original é cumulativo, sendo que cada etapa ocorre com uma imagem resultante do processamento da etapa anterior, de forma que as expressões 3.1, 3.2 e 3.4 podem ser combinadas obtendo-se,

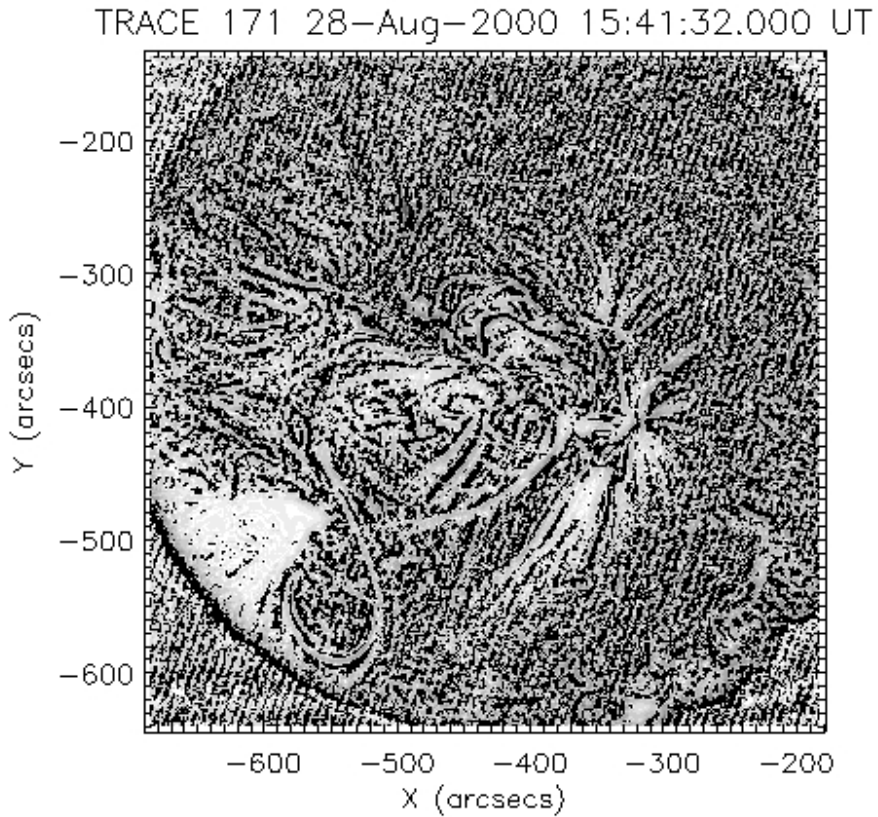


Figura 3.6 - Resultado final da etapa de pré-processamento após o melhoramento do contraste da imagem apresentada na figura 3.5. Nesta imagem foi utilizada inicialmente um filtro de mediana e posteriormente uma máscara de nitidez.

$$f_{sq1}(x, y) = \sqrt{|Median[f(x, y), s_m] - Smooth[Median[f(x, y), s_m], s_u]|} \quad , \quad (3.4)$$

onde os valores inteiros de  $s_m$  e  $s_u$  correspondem respectivamente ao tamanho da janela (em unidades de pixel) utilizada nos filtros de mediana e de máscara de nitidez. Verificamos experimentalmente durante nosso estudo que em algumas situações, dependendo da distribuição de brilho dos pixels na imagem, o resultado final da etapa de pré-processamento poderia gerar resultados com as linhas de campo mais destacadas se uma alteração na sequência das operações fosse realizada. A expressão 3.4 mostra que realizamos primeiramente uma filtragem utilizando e mediana, e depois utilizamos a variação da técnica de máscara de nitidez. Implementamos então



a ordem inversa das operações, inicialmente a aplicação da máscara de nitidez e depois o filtro de mediana na imagem, conforme a expressão

$$f_{sq_2}(x, y) = \sqrt{|Median[f(x, y) - Smooth[f(x, y), s_u], s_m]|} . \quad (3.5)$$

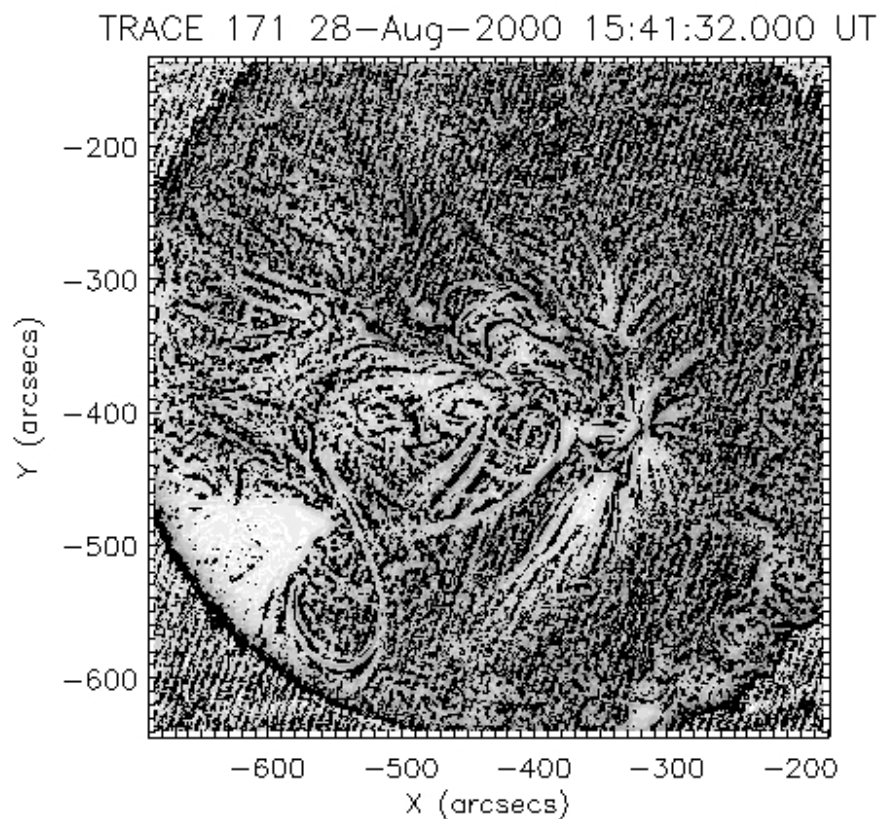


Figura 3.7 - Resultado final da etapa de pré-processamento após o melhoramento do contraste da imagem apresentada na figura 3.5. Nesta imagem inicialmente foi utilizada a máscara de nitidez e posteriormente uma filtragem usando a mediana.

O resultado desta variação no pré-processamento da imagem original do TRACE pode ser observado na figura 3.7. Os valores correspondentes ao tamanho das vizinhanças  $s_m$  e  $s_u$  são parâmetros do algoritmo no estágio do pré-processamento e são bastante dependentes da imagem processada, o que discutiremos em uma aplicação prática no próximo capítulo.

### 3.2 Segmentação

De forma bastante geral, a segmentação de imagens pode ser definida como a subdivisão da imagem em suas partes ou objetos constituintes (GONZALEZ; WOODS, 2001). Os métodos de segmentação buscam distinguir elementos na imagem que tenham características semelhantes, de forma que as etapas de processamento subsequentes possam utilizar estas características como informação *a priori* para, por exemplo, quantificar objetos em uma cena. Muitos métodos de segmentação foram desenvolvidos, sendo alguns deles os métodos baseados em histogramas, em detecção de bordas, métodos baseados no crescimento de regiões, os métodos de "enchimento de bacias" e os métodos multi-escala. Dentre estes, os métodos de detecção de bordas são muito utilizados em uma diversidade de aplicações. De uma forma geral os algoritmos de detecção de bordas funcionam com base no gradiente de brilho dos pixels da imagem. Ao analisar cada pixel, o algoritmo verifica a variação de brilho do pixel com relação à sua vizinhança, e se o gradiente desta variação é positivo ou negativo. A partir daí, gera uma matriz identificando estas regiões onde ocorrem as maiores variações. Cada algoritmo tem suas características próprias, podendo gerar resultados diferentes. Os algoritmos de Roberts, Sobel e Canny (ZIOU; TABBONE, 1998) são exemplos de algoritmos clássicos de detecção de bordas e foram utilizados em uma série de aplicações.

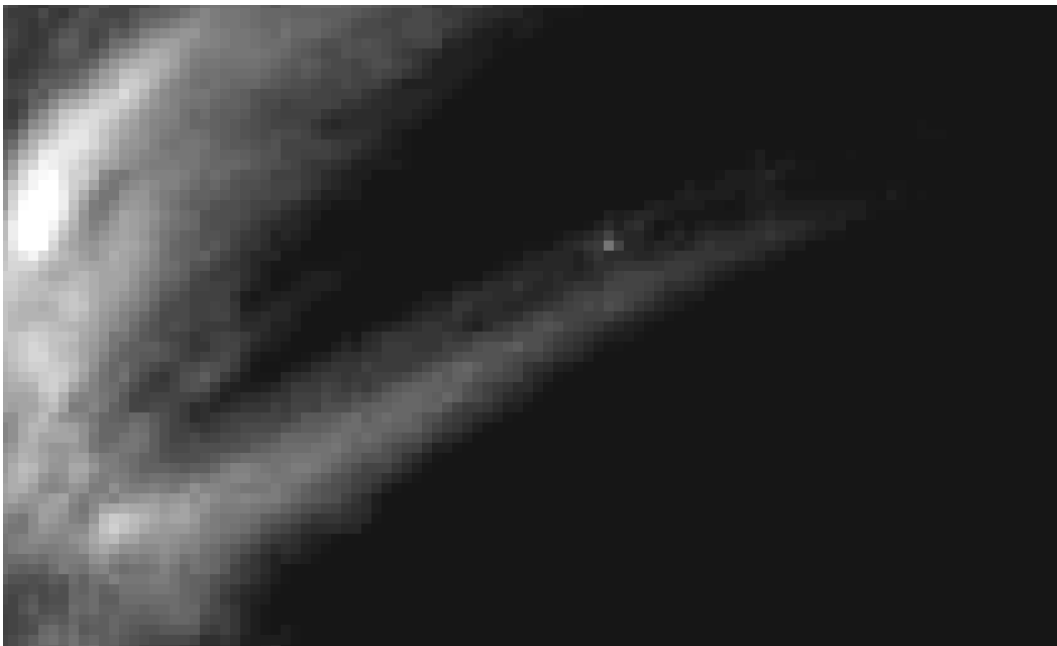


Figura 3.8 - Detalhe de uma linha de campo mostrando a variação de intensidade dos pixels próximos a sua borda contra o fundo da imagem.

O estudo das técnicas de segmentação das imagens em nossa pesquisa iniciou-se com uma avaliação das técnicas de detecção de bordas e amplamente utilizadas, como as citadas anteriormente. Estas técnicas são frequentemente utilizadas como ferramentas para segmentação de imagens. Baseadas em um procedimento matemático simples, oferecem resultados satisfatórios em muitas situações, principalmente na presença de baixo nível de ruído na imagem, mas como a maioria das técnicas de segmentação, são muito dependentes dos dados de entrada.

Ao analisar em detalhes as estruturas magnéticas das imagens obtidas pelo TRACE pudemos verificar que as linhas de campo, normalmente apresentam certa largura em pixels. Transversalmente os pixels que compõem a linha de campo aparecem com brilho mais intenso do que o fundo. A imagem 3.8 mostra este detalhe de uma linha de campo.

Esta análise levantou a questão de que talvez os métodos tradicionais de detecção de bordas não seriam os mais adequados para o nosso problema, pois necessitávamos que as regiões mais brilhantes das linhas de campo fossem destacadas durante a segmentação, e não suas bordas, para que na etapa seguinte, ao fragmentarmos a imagem e utilizarmos a Transformada de Hough, os segmentos de linhas fossem detectados. Realizamos uma série de testes com os métodos de detecção de bordas de Roberts, Sobel e Canny, verificando que os resultados destes métodos não eram interessantes para a nossa metodologia, o que nos motivou a buscar a alternativa descrita no próximo item. A figura 3.9 mostra o resultado destes testes. Em nosso estudo consideramos a possibilidade de utilizarmos metodologias de morfologia matemática para a etapa de segmentação. Realizamos alguns testes preliminares utilizando estas metodologias e rapidamente pudemos notar que pelas mesmas razões relatadas acima os resultados foram absolutamente insatisfatórios, não contribuindo com as etapas seguintes do método.

### **3.2.1 O Algoritmo de Strous**

Motivados pelos resultados insatisfatórios dos algoritmos de detecção de bordas na para a etapa de segmentação, implementamos e utilizamos o algoritmo de Strous (STROUS, 2007). Este algoritmo consiste em uma técnica simples onde os pixels são analisados com base em seu gradiente de brilho. Em uma estrutura de linhas de campo como a da figura 3.8 os pixels evidenciados pelo algoritmo de Strous seriam aqueles mais brilhantes, onde foi detectada maior emissão de radiação.

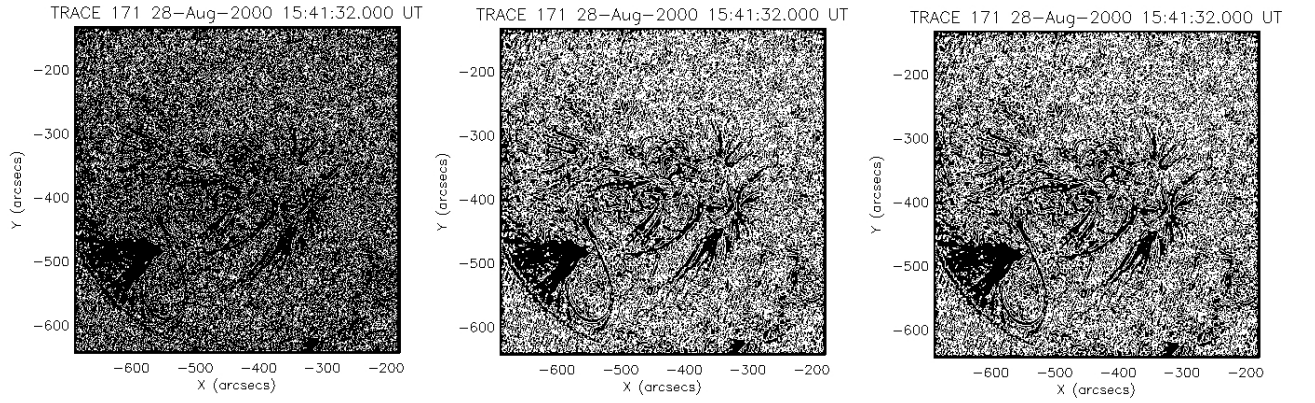


Figura 3.9 - Detecção de bordas da imagem da figura 3.7. À esquerda utilizamos o método de Roberts, na imagem central o método de Sobel e à direita o método de Prewitt.

O algoritmo de Strous é fortemente influenciado pela direção do gradiente de brilho, e funciona comparando o pixel que está sendo processado com um par de vizinhos, inicialmente os vizinhos à esquerda e à direita do pixel processado (direção horizontal ou L-O), depois com os vizinhos acima e abaixo (direção vertical ou N-S), depois com os dois vizinhos em uma das direções diagonais (SO-NE) e finalmente na outra direção diagonal (SE-NO). Em cada uma das comparações, caso o pixel processado seja simultaneamente maior que seus dois vizinhos, soma-se um "voto" a um acumulador de mesmo tamanho da imagem original, na mesma posição do pixel processado. Dada a imagem original  $f(x, y)$  onde  $f'(x, y)$  é a imagem  $f(x, y)$  com as dimensões aumentadas em 2 unidades em  $x$  e  $y$  para que seja possível resolver o problema do processamento nas bordas da imagem e um acumulador horizontal de mesmas dimensões  $a_h(x, y)$ , temos

$$a_h(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f'(x, y) > f'(x + 1, y) \wedge f'(x, y) > f'(x - 1, y) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.6)$$

Para as outras direções e respectivos acumuladores como o citado acima, teremos

$$a_v(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f'(x, y) > f'(x, y + 1) \wedge f'(x, y) > f'(x, y - 1) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$a_{d_1}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f'(x, y) > f'(x-1, y-1) \wedge f'(x, y) > f'(x+1, y+1) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.8)$$

e

$$a_{d_2}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f'(x, y) > f'(x+1, y+1) \wedge f'(x, y) > f'(x-1, y-1) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} . \quad (3.9)$$

Verificamos que cada um dos acumuladores pode assumir valores 0 ou 1. Um acumulador final é gerado através da expressão

$$a(x, y) = a_h(x, y) + a_v(x, y) + a_{d_1}(x, y) + a_{d_2}(x, y) \quad , \quad (3.10)$$

de forma que os valores acumulados em  $a(x, y)$  podem variar entre 0 e 4. Assim, pixels que acumulam o valor quatro são aqueles que apresentam maior brilho quando comparados com seus vizinhos nas quatro direções consideradas, e assim por diante para os outros valores acumulados, até o valor zero, que indica que o pixel processado não é maior que seus vizinhos em nenhuma das quatro direções. Esta estratégia de comparação é conhecida como a variação 1 do algoritmo de Strous, onde a equação 3.6 pode ser substituída por

$$a_h(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f'(x, y) > \text{MAX}(f'(x+1, y), f'(x-1, y)) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad , \quad (3.11)$$

extendendo-se a mesma definição de 3.11 para as equações 3.7, 3.8 e 3.9, observando-se no entanto a posição relativa entre o pixel processado e seus vizinhos.

Na variação 2 do algoritmo soma-se um ao acumulador quando o pixel processado for maior que a média simples de seus vizinhos, como podemos verificar em



$$a_h(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f'(x, y) > \frac{f'(x+1,y)+f'(x-1,y)}{2} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.12)$$

que pode ser estendida para as outras posições relativas entre o pixel processado e seus vizinhos nas expressões 3.7, 3.8 e 3.9.

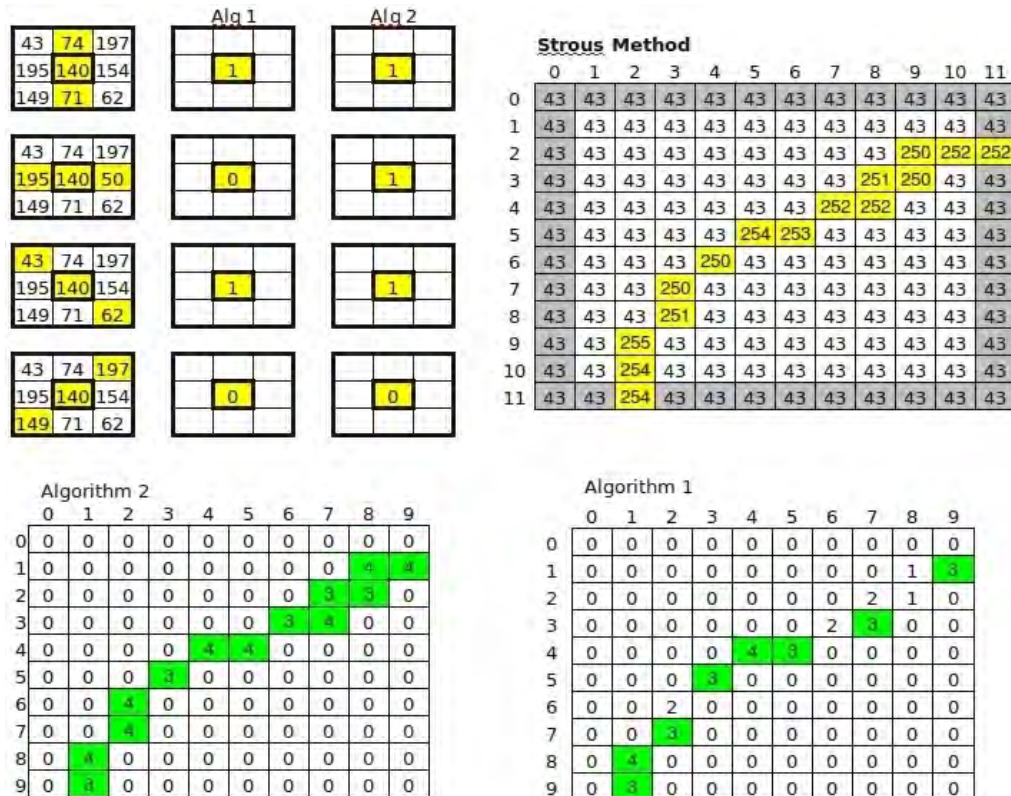


Figura 3.10 - O algoritmo de Strous compara o pixel processado com seus vizinhos, considerando quatro direções. A variação 1 do algoritmo acrescenta o valor 1 a um acumulador caso o pixel processado seja simultaneamente maior que seus vizinhos, enquanto que a variação 2 compara o pixel processado com a média dos pixels vizinhos.

A figura 3.10 apresenta um diagrama mostrando o funcionamento do algoritmo de Strous onde vemos no canto superior esquerdo um exemplo numérico dos quatro acumuladores criados para cada uma das direções consideradas, para cada uma das variações do algoritmo: a variação 1, quando a comparação é feita pelo maior valor, e a variação 2, quando a comparação é feita pela média. Ainda na figura vemos um exemplo da aplicação do algoritmo de Strous para uma matriz de 10 x 10 pixels

de dimensão. No canto superior direito a matriz foi estendida para o tamanho 12 x 12 para possibilitar o processamento nos cantos da imagem. A imagem apresenta uniformidade no valor dos pixels, com exceção da faixa de valores destacada. No canto inferior direito vemos o resultado do processamento utilizando a variação 1 do algoritmo de Strous, e finalmente no canto inferior esquerdo, o resultado do processamento utilizando a variação 2 do algoritmo. Nas imagens resultantes do processamento podemos notar que destacamos apenas os pixels com valores 3 e 4. Em nosso algoritmo definimos dois parâmetros para o algoritmo e Strous: a variação do método de comparação do algoritmo de Strous que será utilizado (pelo valor máximo ou pela média) e, a partir das quatro direções possíveis onde as comparações ocorrem, quais delas serão utilizadas (é possível utilizar-se apenas uma direção ou a combinação delas). Aplicamos o algoritmo de Strous na imagem 3.7 resultante do estágio de pré-processamento, obtendo os resultados observados na figura 3.11.

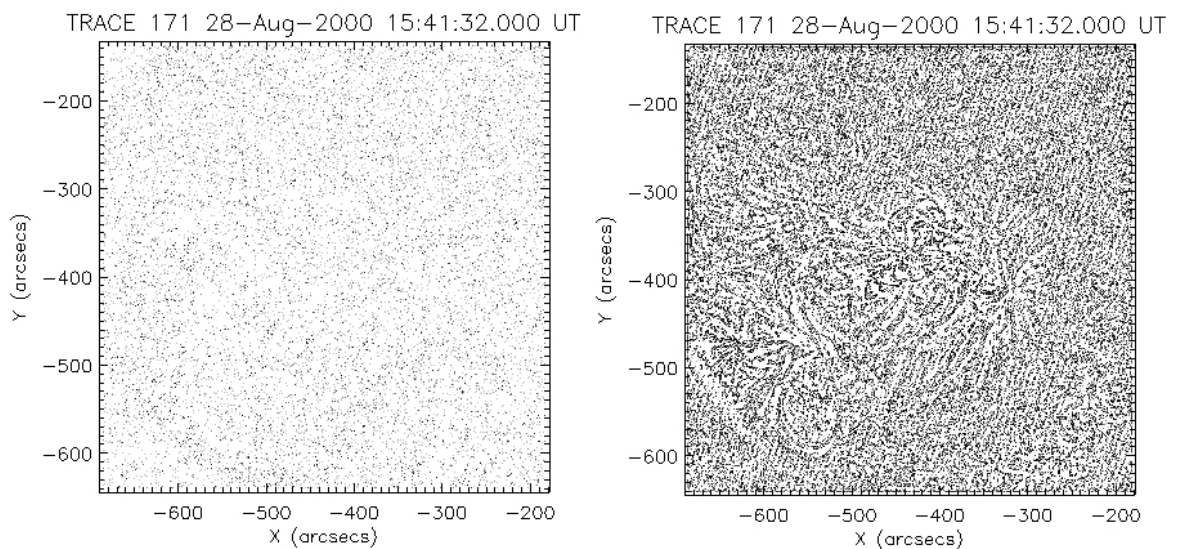


Figura 3.11 - Resultado da imagem 3.7 processada com o algoritmo de Strous. À esquerda vemos o resultado da variação 1 do algoritmo, que utiliza o valor máximo como critério de comparação entre os valores dos pixels. À direita o resultado da variação 2, que compara os pixels através da média.

Verificamos que o algoritmo de Strous apresenta como vantagens o fato de destacar as estruturas mais brilhantes em uma imagem, a simplicidade na codificação e o baixo custo computacional. No entanto o algoritmo de Strous apresenta algumas limitações em condições específicas. No próximo capítulo veremos uma aplicação completa onde as imagens segmentadas com o algoritmo de Strous apresentaram

melhores resultados por inspeção visual do que os da figura 3.11. Como o algoritmo de Strous está baseado em uma aproximação do gradiente dos pixels em quatro principais direções, o mesmo é bastante sensível ao ruído presente nas imagens, o que observamos ao longo de nossa pesquisa. Isto nos motivou a prosseguir na busca de uma técnica que pudesse extrair das imagens as estruturas das linhas de campo com a maior remoção de ruído e artefatos possíveis. Esta técnica poderia ter como entrada de dados as imagens processadas pelo algoritmo de Strous.

### **3.2.2 A Transformada de Hough como método de segmentação**

Prosseguindo em nossa pesquisa, com o objetivo de realizar a detecção das linhas de campo magnético da coroa solar utilizando uma técnica capaz de fragmentar as linhas de campo em pequenas partes e extrair dados de cada uma delas, verificamos que a Transformada de Hough poderia ser aplicada com sucesso para obter estes dados, ao mesmo tempo que poderia melhorar a segmentação das imagens geradas pelo algoritmo de Strous. Desta forma, a próxima tarefa em nossa metodologia de processamento foi a fragmentação das imagens.

#### **3.2.2.1 Fragmentação da imagem**

Como dissemos anteriormente, adotamos a fragmentação das imagens em nossa metodologia com o objetivo de melhorar a detecção dos segmentos de retas a ser realizado posteriormente pela Transformada de Hough. Uma característica das imagens com as quais estamos trabalhando é a presença de ruído que também pode afetar sobremaneira o processamento com a Transformada de Hough, o que é maximizado ao se processar porções maiores de uma imagem. Assim optamos por fragmentar a imagem em partes menores, adotando dois critérios práticos para o nível de fragmentação adequado: o primeiro é que cada fragmento tivesse dimensão tal que pudesse apresentar segmentos das linhas de campo magnético com pouca curvatura, a fim de ser aproximado adequadamente por um segmento de reta com a Transformada de Hough; o segundo critério é que os fragmentos não fossem muito pequenos, de forma que os pixels que compõem um segmento de linha de campo não fossem confundidos com pixels provenientes de ruído. Dado que as imagens TRACE com as quais trabalhamos tem dimensão de 1024 x 1024 pixels, chegamos a um valor empírico de 32 x 32 pixels por fragmento, pois nesta dimensão os pixels que compõem os segmentos de linhas de campo magnético ainda se destacam dos pixels provenientes do ruído e ao mesmo tempo não apresentam curvatura acentuada. A dimensão dos fragmentos são parâmetros em nosso algoritmo, de forma que, por exemplo, em uma imagem de dimensões de 1024 x 1024 pixels dividida em fragmentos de 32 x 32 pixels tere-



mos 1024 fragmentos a serem processados. A figura 3.12 apresenta um diagrama da etapa de fragmentação da imagem e uma ampliação do fragmento 851, mostrando a idéia central do método HTFI, que é fragmentar a imagem e aplicar a Transformada de Hough em cada fragmento, obtendo uma aproximação do segmento de linha de campo magnético por um segmento de reta, com pelo menos um ponto em comum.

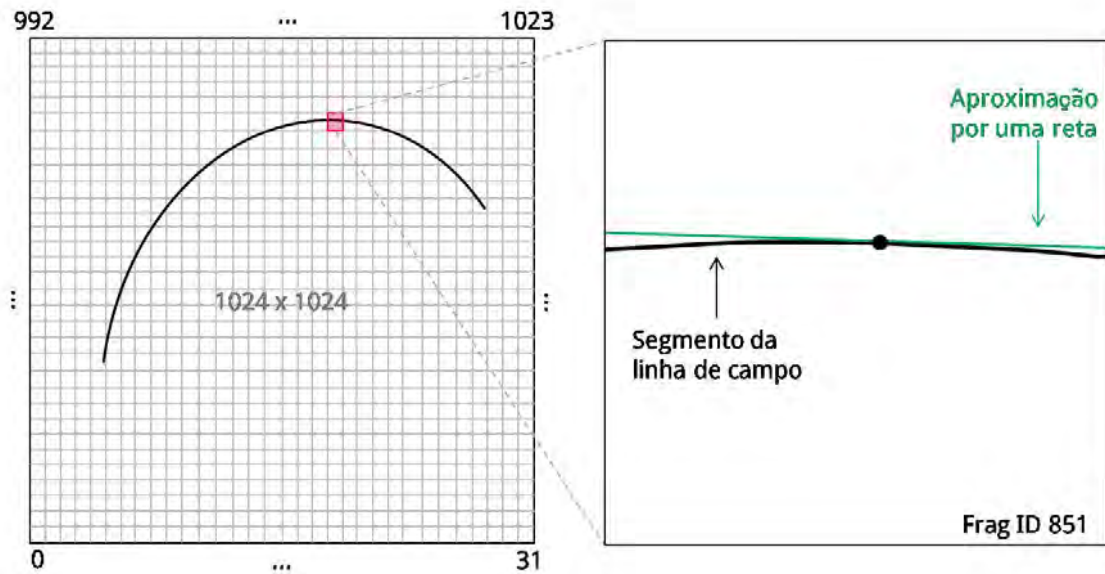


Figura 3.12 - Diagrama apresentando o processo de fragmentação da imagem. À esquerda temos uma linha de campo em uma imagem de 1024 x 1024 pixels dividida em 1024 fragmentos numerados sequencialmente de 0 a 1023. Destacamos à direita o fragmento 851, com dimensões de 32 x 32 pixels. Uma das premissas do nosso método é a aproximação de um segmento de linha de campo magnético por um segmento de reta obtido pela Transformada de Hough.

### 3.2.2.2 O método da Transformada de Hough para Imagens Fragmentadas

A Transformada de Hough tem papel central na nossa metodologia pois a extração das informações mais básicas que irão constituir os descritores das linhas de campo magnético da imagem são obtidos através dela. A Transformada de Hough já foi extensivamente utilizada em muitas aplicações na área de reconhecimento de padrões pois trata-se de uma técnica matemática que recupera linhas retas em imagens com excessiva quantidade de ruído. Na versão inicial desenvolvida na década de 1960, seu objetivo era o de efetuar a análise de imagens da trajetória de partículas eletricamente carregadas em câmaras de bolhas de hidrogênio líquido (HOUGH; POWELL, 1960). Posteriormente, na década de 1970 a metodologia foi melhorada, resultando

na transformada que conhecemos hoje (DUDA; HART, 1972). Atualmente a Transformada de Hough pode ser utilizada para recuperar outras primitivas geométricas em imagens, como circunferências e elipses.

A Transformada de Hough para retas tem como base a criação de um espaço alternativo ao espaço da imagem, chamado espaço de Hough, definido por

$$H(\theta, \rho) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad , \quad (3.13)$$

onde  $f(x, y)$  é a função-imagem a ser transformada e  $\delta$  a função Delta de Dirac. A Transformada de Hough tem como importante premissa tomar a formulação paramétrica da primitiva geométrica que se deseja buscar em uma imagem. No caso da reta a formulação paramétrica utilizada foi (DUDA; HART, 1972):

$$y = \left( -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) x + \left( \frac{\rho}{\sin \theta} \right) \quad , \quad (3.14)$$

de forma que, para um dado ponto P no espaço da imagem, teremos como  $\theta$  o ângulo formado pela perpendicular de uma reta-suporte em relação ao eixo  $x$  do sistema de coordenadas passando pelo ponto P e  $\rho$  a distância entre a origem do sistema de coordenadas e o ponto P, como podemos observar na figura 3.13. Esta formulação foi adotada para evitar um problema conhecido como *declive intercept*, pois considerando-se a formulação puramente cartesiana da reta, onde

$$y = ax + b \quad (3.15)$$

há uma ambiguidade para retas paralelas ao eixo  $y$ , quando  $x = 0$ , onde  $y$  poderia assumir quaisquer valores, dependendo apenas de  $b$ . A figura 3.13 ilustra o conceito fundamental da Transformada de Hough.

Das expressões 3.14 e 3.15 vemos claramente que

$$a = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \quad (3.16)$$

e

$$b = \frac{\rho}{\sin \theta} , \quad (3.17)$$

de forma que com os valores de  $\theta$  e  $\rho$  podemos calcular aos valores de  $a$  e  $b$ .

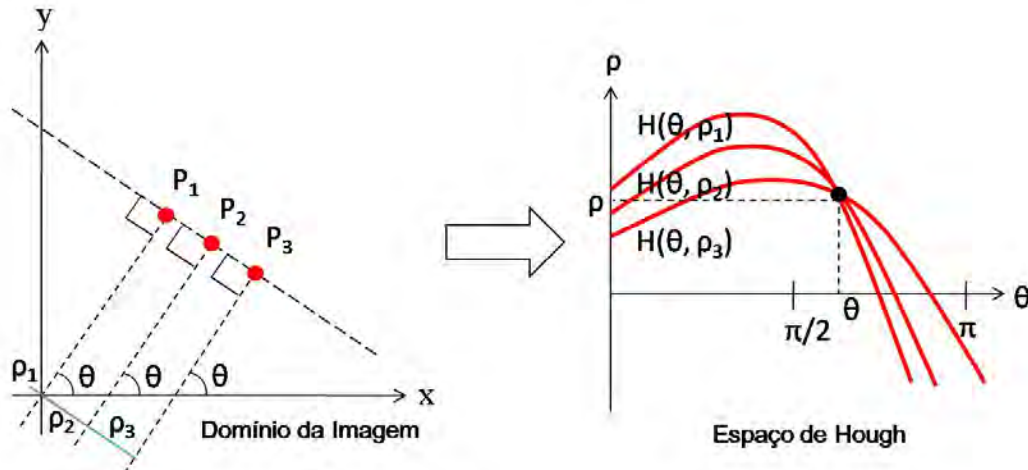


Figura 3.13 - Pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  no espaço da imagem cujas perpendiculares são retas-suporte de ângulo  $\theta$  e respectivas distâncias  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  e  $\rho_3$  a partir do eixo  $x$  podem ser representados no espaço de Hough através da transformação definida pela equação 3.13, gerando um conjunto de curvas periódicas onde o cruzamento define o ponto de coordenadas  $\theta$  e  $\rho$  que representa uma reta que passa pelos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  no espaço da imagem.

Computacionalmente o espaço de Hough é uma matriz construída nas dimensões do refinamento da grade de parâmetros  $\theta$  e  $\rho$  que se deseja adotar. O algoritmo da Transformada de Hough analisa a imagem pixel a pixel e para cada um deles verifica se o mesmo encontra-se sobre a perpendicular de uma reta suporte que passe pela origem do sistema de coordenadas e com valores de ângulos dados por  $\theta$  e sua distância  $\rho$  a partir da origem do sistema. Caso o pixel analisado atenda os valores de  $\theta$  e  $\rho$  definidos na grade, soma-se um ao elemento de coordenadas  $\theta$  e  $\rho$  na matriz que representa o espaço de Hough. Esta abordagem é encontrada na literatura como um esquema de pontuação, ou "votos". Ao final da análise de toda a imagem, a matriz que representa o espaço de Hough apresentará regiões vazias, com baixa contagem, e regiões com alta contagem de "votos". As coordenadas  $\theta$  e  $\rho$  para as regiões de maior contagem representam no espaço de Hough retas no espaço da imagem. A partir dos valores  $\theta$  e  $\rho$  das coordenadas da matriz é possível voltar para o espaço da imagem, obtendo os parâmetros  $a$  e  $b$  da reta  $y = ax + b$  traçando-as e identificando-as na imagem. A figura 3.14 ilustra três momentos distintos da

aplicação da Transformada de Hough: uma imagem ruidosa onde hipoteticamente existem estruturas na forma de retas, o espaço de Hough, com destaque para a maior contagem de pontos que representa cada reta, e finalmente as retas identificadas.

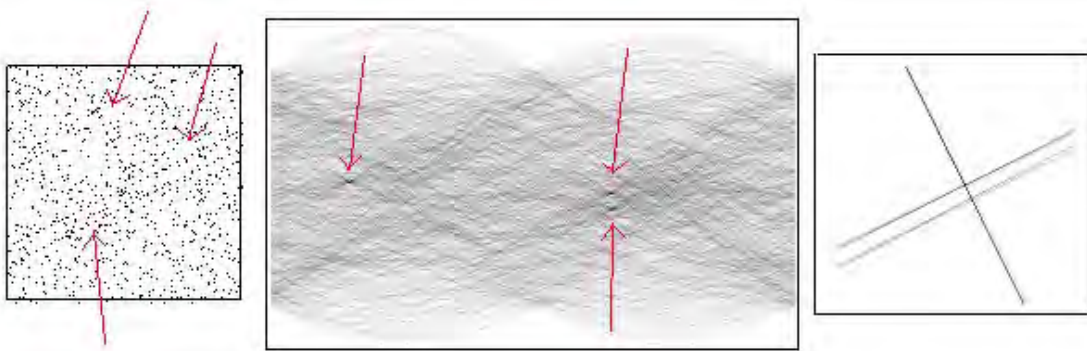


Figura 3.14 - Resultados obtidos com a Transformada de Hough. Uma imagem ruidosa, que aparentemente contém pixel alinhados definindo uma reta (à esquerda) é processada pela Transformada de Hough, que gera um espaço de parâmetros (centro) onde identifica-se maior contagem de valores para os parâmetros  $\theta$  e  $\rho$ , que quando retornados ao espaço da imagem (direita) permitem o reconhecimento das retas.

Fonte: RSI IDL Manual (2000)

Prosseguindo, aplicamos a Transformada de Hough em cada um dos fragmentos, armazenando o espaço de Hough correspondente. O espaço de Hough contém pequenas nuvens de pontos com maiores contagens para as imagens onde há a presença de segmentos de retas. Aqui cabe uma reflexão mais detida, pois é bastante claro que se em um dado fragmento ocorrer a presença de dois ou mais segmentos de linhas de campo, a transformada irá gerar um espaço de Hough com uma quantidade de pontos correspondente à quantidade de segmentos de linhas no espaço da imagem. Se não houverem pixels alinhados formando retas no espaço da imagem, a contagem de pontos no Espaço de Hough será zero. Se houverem pixels alinhados no espaço da imagem definindo uma única reta, teremos no Espaço de Hough um único ponto com uma grande contagem; e se no espaço da imagem tivermos pixels alinhados definindo mais de uma reta, no Espaço de Hough teremos mais de um ponto, na maior parte dos casos com contagens diferentes. Entendemos que a presença de mais de um segmento de reta por fragmento retornado pela Transformada de Hough iria causar inconsistências e um aumento considerável na complexidade do algoritmo durante o procedimento de interconexão dos fragmentos, no estágio de extração de características das linhas, e por esta razão, apesar de verificarmos que

em alguns casos encontra-se dois ou mais segmentos de reta no mesmo fragmento, optamos por assumir sempre a presença de um segmento de reta quando ocorrer mais de um em um mesmo fragmento. Esta questão foi tratada selecionando-se as coordenadas do ponto de maior contagem no espaço de Hough, ou um deles caso haja empate, retornando um único valor que corresponde à reta mais representativa daquele fragmento no espaço da imagem.

Nosso algoritmo implementa nesta etapa uma parametrização que limita o comprimento de pixels de um segmento de reta gerado pela Transformada de Hough, a fim de promover ajustes necessários dependendo da imagem de entrada. Maximizando o valor deste parâmetro, o algoritmo retorna uma maior quantidade de segmentos de reta. Minimizando este parâmetro, o algoritmo limita o tamanho dos segmentos, reduzindo sua quantidade total. Este ajuste é importante dependendo da qualidade da imagem original, pois contribui para a detecção dos segmentos de reta gerados. A figura 3.15 mostra a estrutura de um fragmento implementada em nosso algoritmo, elemento de importância central no nosso estudo.

Nosso algoritmo separa no espaço de Hough os pontos cujas coordenadas  $\theta$  e  $\rho$  representam retas no espaço da imagem do fragmento em questão. Desta forma temos um mapeamento de todos os segmentos de linhas de cada fragmento da imagem em suas coordenadas locais (do fragmento) e em suas coordenadas globais (da imagem). Ao final do processamento o algoritmo reconstrói toda a imagem a partir de cada fragmento, mas nesta etapa ainda não verifica a interconexão entre os segmentos de linhas. Em nosso algoritmo armazenamos todos os dados obtidos em uma estrutura de dados já preparada para utilização no estágio de extração das características das linhas. O diagrama apresentado na figura 3.16 mostra a sequência de passos do nosso método até o processamento do fragmento pela Transformada de Hough tomando como exemplo um fragmento de uma imagem artificial, produzida apenas para este exemplo. Este fragmento foi pré-processado (item 3.1) e submetido a uma etapa de segmentação utilizando o algoritmo de Strous (item 3.2), obtendo-se o espaço de Hough correspondente, onde determinam-se as coordenadas  $\theta$  e  $\rho$  do ponto onde obteve-se a maior contagem. Com estes valores é possível calcular  $a$  e  $b$  através das equações 3.16 e 3.17 e obter as coordenadas dos pixels das extremidades do fragmento, dados por  $(x_0, y_0)$  e  $(x_1, y_1)$ , as coordenadas do pixel central  $(x_c, y_c)$  e um identificador numérico do fragmento ao qual chamamos **IDFrag**, dados importantes que compõem o descritor de cada fragmento e que serão utilizados no estágio de extração de características das linhas de campo.

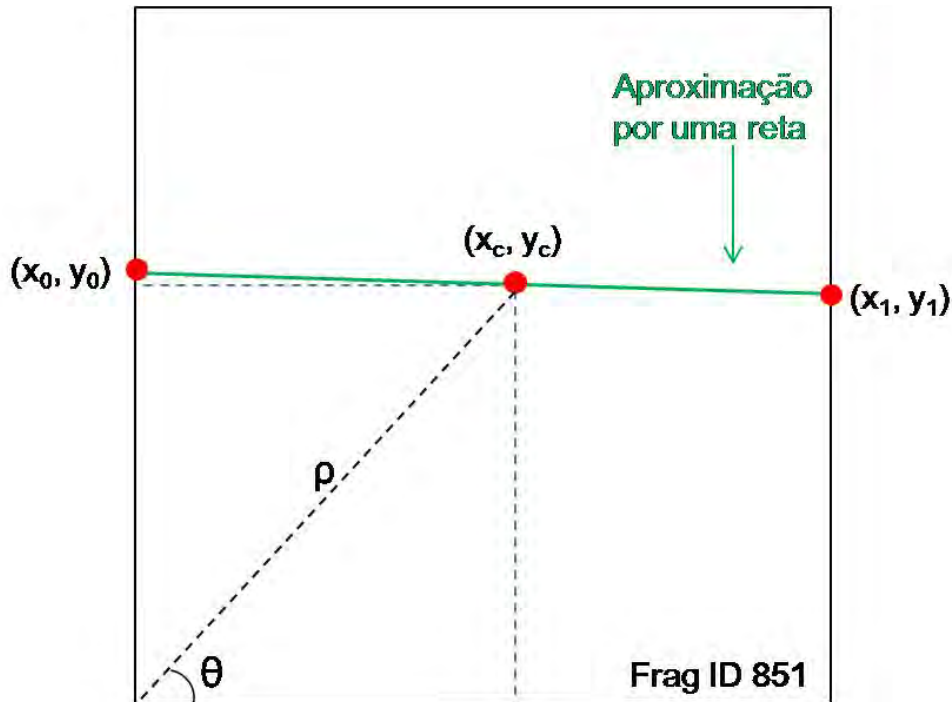


Figura 3.15 - Exemplo de fragmento utilizado em nosso algoritmo. Vemos aqui os principais dados obtidos para cada fragmento após seu processamento: seu identificador (851 neste exemplo), os parâmetros  $\theta$  e  $\rho$  obtidos pela Transformada de Hough, e os parâmetros locais relacionados com a posição do segmento de reta: as extremidades  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$  e o ponto central  $(x_c, y_c)$ . A partir do tamanho dos fragmentos definido no algoritmo, do identificador do fragmento e das coordenadas das extremidades da linha é possível obter os valores globais destas coordenadas nas dimensões da imagem completa.

### 3.3 Extração de Características

Nossa metodologia está fundamentada no uso da Transformada de Hough em fragmentos da imagem original como forma de realizarmos uma aproximação dos segmentos de linhas de campo. Os dados obtidos nesta etapa são fundamentais para o nosso estudo, porém até este ponto não temos as linhas de campo identificadas individualmente. Imaginando uma imagem com várias linhas de campo, teríamos apenas um conjunto de fragmentos com todos os dados dos segmentos de linhas armazenados, porém não teríamos descritores para as linhas de campo. Iremos avançar no detalhamento da nossa metodologia apresentando nossa abordagem para obter descritores que possam separar individualmente as linhas de campo com base nos dados obtidos até aqui.

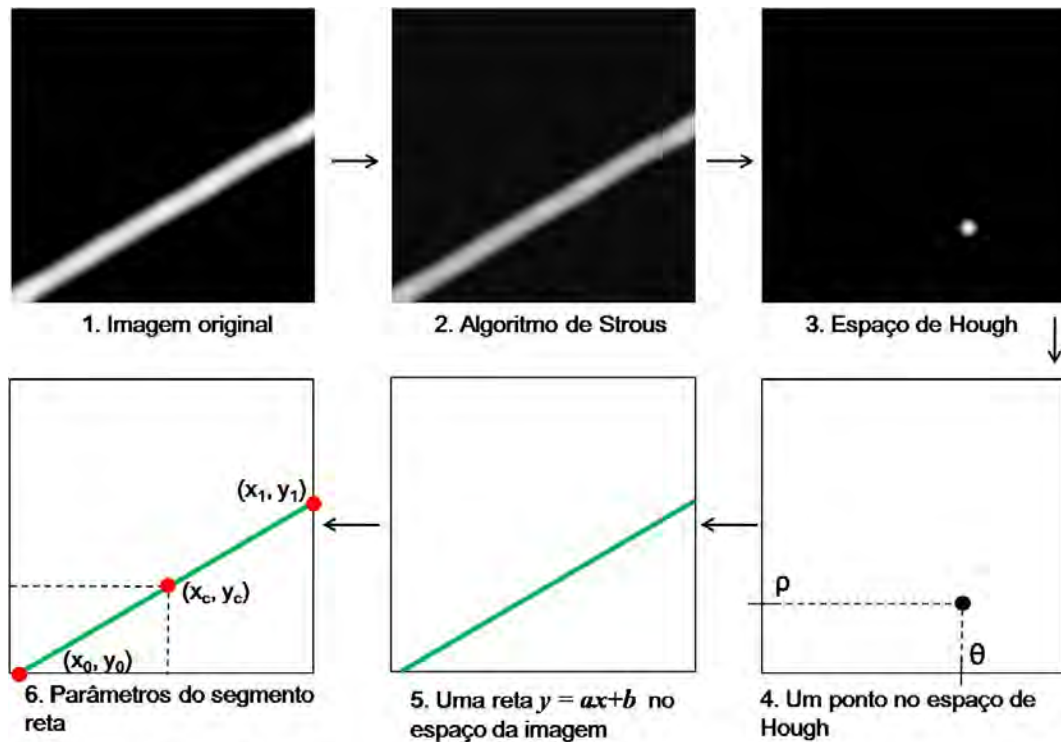


Figura 3.16 - Diagrama apresentando a utilização da Transformada de Hough no método HTFI. Em cada fragmento da imagem pré-segmentada pelo algoritmo de Strous onde há um segmento de linha de campo magnético, a Transformada de Hough recupera um segmento de reta que aproxima o segmento de linha de campo. Os principais parâmetros desta reta são armazenados:  $\theta$ ,  $\rho$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $x_c$ ,  $y_c$  e os valores de  $a$  e  $b$  calculados pelas expressões 3.16 e 3.17.

### 3.3.1 A reconstrução das linhas de campo magnético

No item 1.2.1 afirmamos que um dos objetivos do nosso estudo era "Extrair dados estruturais das **linhas** de campo magnético da coroa solar", e o grifo na palavra **linha** significa que entendemos que os descritores que desejamos obter devam ser tais que possibilitem a identificação única de uma linha de campo magnético em uma imagem da coroa solar. Para as aplicações em física solar já mencionadas é muito importante poder contar com uma descrição geométrica de uma linha de campo, e entendemos como descrição geométrica as coordenadas dos pixels que compõem cada uma destas linhas. Nossa abordagem busca contribuir para a solução desta questão partindo da informação obtida em um nível local para a informação no nível global, utilizando os dados de cada fragmento de linha para compor os dados que identifiquem unicamente cada linha de campo.



### 3.3.1.1 Conexão dos fragmentos

Nossa primeira tarefa neste estágio consistiu em reconstruir toda a imagem a partir dos dados obtidos na etapa anterior. Fragmentamos a imagem original, dividindo linhas de campo em várias partes que puderam ser identificadas pela Transformada de Hough, descritores para cada fragmento. Nossa hipótese neste ponto é de que ao reconstruir toda a imagem poderíamos analisar os dados de cada segmento de reta, e com um conjunto de critérios previamente estabelecido, determinar se segmentos de retas de fragmentos contíguos estão conectados, o que significa dizer que estes segmentos de reta comporiam uma mesma linha de campo. Repetindo este processo de avaliação dos segmentos em toda a imagem, poderíamos identificar linhas de campo individuais através dos dados de seus fragmentos.

Para reconstruir uma linha de campo através de seus fragmentos, inicialmente definimos um conjunto de critérios para avaliar se segmentos de reta de fragmentos contíguos estão conectados, e depois desenvolvemos um algoritmo de sequenciamento para gerar sequências de fragmentos que contém segmentos de retas interconectados, compondo uma mesma linha de campo.

O primeiro dos critérios utilizados e o mais evidente deles, chamado por nós de **critério dL** (cdL), dado em unidades de pixel, está baseado no fato de que para haver conexão entre dois segmentos de retas de fragmentos contíguos, as extremidades destes segmentos devem estar próximas uma da outra, e aqui o conceito de proximidade significa estar dentro de uma área quadrada de dimensões  $dL^2$  pixels: se sim, considera-se que estes segmentos de retas estão conectados, caso contrário não estão conectados. Existem quatro posições relativas possíveis entre dois fragmentos que devem ser consideradas com relação à conexão dos segmentos de retas, conforme podemos verificar na figura 3.17. Para dois fragmentos contíguos  $k$  e  $k+n$ ,  $n$  variando dependendo da posição dos fragmentos, cada um deles com um segmento de reta estabelecemos que o critério dL (cdL) é verdadeiro se as extremidades dos segmentos de retas de cada um dos fragmentos estiverem contidas ou no limite de uma área quadrada de lado  $dL$ . Esta premissa é válida para qualquer uma das posições relativas dos fragmentos, e se pelo menos uma delas for verdadeira dizemos que pelo critério dL os fragmentos estão conectados. Com base na figura 3.17 e assumindo que os valores 0 e 1 significam respectivamente FALSO e VERDADEIRO, podemos definir o critério cdL para fragmentos contíguos na horizontal, vertical nas duas diagonais:



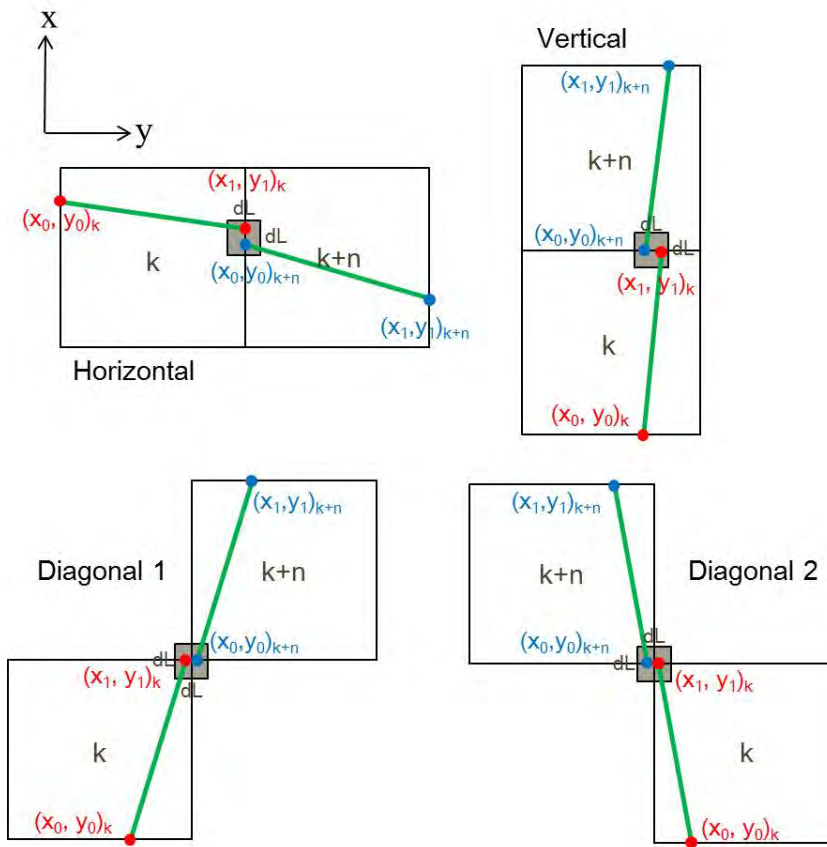


Figura 3.17 - Diagrama mostrando exemplos de diferentes posições relativas dos fragmentos e segmentos de retas na avaliação do critério de conexão. O pequeno quadrado cinza define uma área de  $dL^2$  pixels. Caso as extremidades dos segmentos de linhas estejam dentro desta área, considera-se que os segmentos estão conectados.

$$cdL_H = \begin{cases} 1, & |(x_1)_k - (x_0)_{k+n}| \leq dL \wedge |(y_1)_k - (y_0)_{k+n} + S_f| \leq dL \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.18)$$

$$cdL_V = \begin{cases} 1, & |(x_1)_k - (x_0)_{k+n} + S_f| \leq dL \wedge |(y_1)_k - (y_0)_{k+n}| \leq dL \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.19)$$

$$cdL_{D1} = \begin{cases} 1, & |(x_1)_k - (x_0)_{k+n} + S_f| \leq dL \wedge |(y_1)_k - (y_0)_{k+n} + S_f| \leq dL \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.20)$$

$$cdL_{D2} = \begin{cases} 1, & |(x_1)_k - (x_0)_{k+n} + S_f| \leq dL \wedge |(y_1)_k - (y_0)_{k+n} - S_f| \leq dL \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.21)$$

O valor  $dL$  pode ser variável e constitui um parâmetro em nosso método. Veremos no próximo capítulo que apesar de  $dL$  não ser fixo, sua determinação empírica varia dependendo de outros parâmetros no problema. O parâmetro  $S_f$  é o ajuste necessário para deslocar a posição dos pixels de um segmento em seu vizinho, a fim de podermos comparar as mesmas posições, e tem o mesmo valor de uma das dimensões do tamanho do fragmento, em pixels.

Mesmo que dois segmentos de retas de fragmentos contíguos tenham suas extremidades dentro da área de conexão definida pelo parâmetro  $dL$ , não podemos imediatamente afirmar que os mesmos fazem parte de uma mesma linha de campo. As linhas de campo magnético presentes nas imagens da coroa solar normalmente são alongadas e apresentam baixa curvatura. Por esta razão, no nível local, em um par de fragmentos contíguos não deveria haver mudança brusca de inclinação dos segmentos de reta. É esperado que a inclinação de segmentos de reta em fragmentos contíguos seja suave e acompanhe a curvatura de uma linha de campo. Verificamos empiricamente muitas vezes que isto não ocorre devido à presença de ruído nas imagens segmentadas com o algoritmo de Strous, e por esta razão é necessário estabelecer mais um critério de conexão para atuar em conjunto com o anterior, de forma que possamos assegurar que além de terem as extremidades dentro da mesma área  $dL^2$ , os segmentos de retas não apresentam variação brusca em sua direção. Definimos assim um segundo critério a ser utilizado para estabelecer a conexão entre fragmentos, o qual chamamos de **critério  $d\theta$**  ( $cd\theta$ ), dado em graus e que representa o módulo da diferença angular entre a inclinação  $\theta$  de dois segmentos de reta contíguos. Verificamos que a Transformada de Hough retorna o valor  $\theta$  da inclinação do segmento de reta em radianos, o qual convertemos para graus posteriormente. Aqui há um detalhe que deve ser observado em relação aos valores obtidos para  $\theta$ : na implementação da Transformada de Hough que estamos utilizando os ângulos são dados sempre no

intervalo  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  considerando separadamente os hemisférios 1 e 2 da circunferência trigonométrica. A figura 3.18 mostra esta estrutura, e permite verificarmos que ângulos com valores de, por exemplo  $5^\circ$  e  $170^\circ$  apesar de numericamente terem uma diferença absoluta de  $165^\circ$  nesta estrutura apresentam diferença de apenas  $15^\circ$ . Este detalhe tem grande importância em nosso critério de conexão dos segmentos de retas de fragmentos contíguos pois estabelece de um ponto de vista prático que segmento de reta de fragmentos contíguos em posição quase vertical podem estar conectados mesmo que seus ângulos tenham valores tão diferentes quanto o exemplo dado.

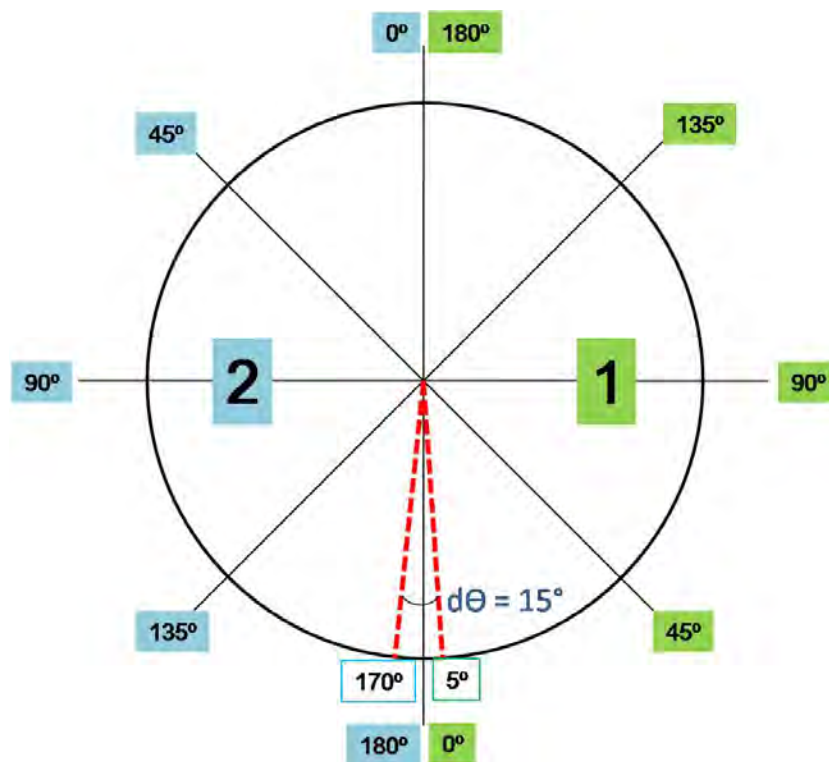


Figura 3.18 - A implementação da Transformada de Hough utilizada trata de forma particular o valor dos ângulos dos segmentos de reta dos fragmentos, conforme a figura. Segmentos em uma posição relativa próxima da vertical podem ser considerados conectados mesmo que apresentem diferença numérica maior do que o limite estabelecido, o que dependerá apenas do ângulo relativo entre eles.

Assim, considerando os fragmentos contíguos  $k$  e  $k + n$ , cada um deles com um segmento de reta de inclinação  $\theta_k$  e  $\theta_{k+n}$  respectivamente, definimos que

$$\Delta\theta = |\theta_k - \theta_{k+n}| \quad , \quad (3.22)$$

e que

$$cd\theta = \begin{cases} 1, & \Delta\theta \leq r_\theta \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.23)$$

onde 0 e 1 significam respectivamente FALSO e VERDADEIRO e  $r_\theta$  é o limite máximo de diferença angular admitido entre os dois segmentos de reta. Este limite assume um valor dependente do tamanho de cada fragmento, o que discutiremos no capítulo seguinte. Na equação acima, se  $cd\theta$  for verdadeiro significa que pelo critério da variação angular os segmentos estão conectados.

Tomando como exemplo a figura 3.19, vemos que os fragmentos onde foram identificados segmentos de reta são os de número 670, 701, 702, 732 e 733, com os respectivos valores de inclinação  $\theta_{670}$ ,  $\theta_{701}$ ,  $\theta_{702}$ ,  $\theta_{732}$ ,  $\theta_{733}$ . Para o par de segmentos contíguos 670 e 701 por exemplo, podemos dizer que os mesmos estão conectados pelo critério da variação angular desde que  $|\theta_{670} - \theta_{701}| = \Delta\theta \leq r_\theta$ .

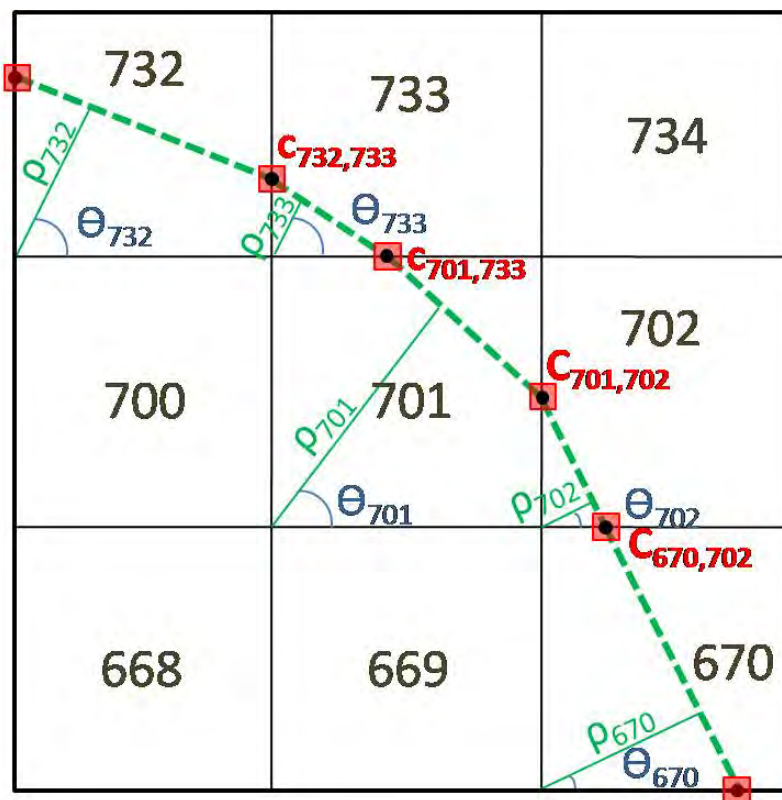


Figura 3.19 - Exemplo de um trecho de imagem com 9 fragmentos em uma estrutura 3 x 3 mostrando os 3 critérios utilizados para estabelecer a conexão entre os segmentos de reta de cada fragmento.

A fim de sedimentar o uso dos critérios de conexão dos segmentos de reta em fragmentos contíguos, utilizando os dados fornecidos pela Transformada de Hough, definimos um terceiro e último critério de conexão baseados na distância  $\rho$  da linha identificada até a origem do sistema de coordenadas do fragmento, a que chamamos de **critério  $d\rho$**  ( $cd\rho$ ). Na figura 3.19 estas distâncias aparecem como  $\rho_{670}$ ,  $\rho_{701}$ ,  $\rho_{702}$ ,  $\rho_{732}$ ,  $\rho_{733}$ , de forma que

$$\Delta\rho = |\rho_k - \rho_{k+n}| \quad , \quad (3.24)$$

e que

$$cd\rho = \begin{cases} 1, & \Delta\rho \leq S_f \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad , \quad (3.25)$$

onde  $S_f$  é a dimensão do fragmento, o que significa que por este critério consideramos que os fragmentos estão conectados se estiverem em regiões próximas da imagem, no máximo a um fragmento de distância um do outro. Os valores 0 e 1 significam FALSO e VERDADEIRO respectivamente.

Combinando as três abordagens definidas acima, estabelecemos um único critério geral para determinar se segmentos de retas de fragmentos contíguos estão conectadas ou não. Este critério pode ser resumido através da expressão

$$cd = \begin{cases} 1, & cdL \wedge cd\theta \wedge cd\rho \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad , \quad (3.26)$$

e mostra que consideramos dois segmentos de retas em fragmentos contíguos conectados se suas extremidades estiverem dentro de uma região comum, se a variação do ângulo de curvatura dos segmentos for menor do que um certo limite, e se os segmentos de reta estiverem à distância de no máximo um fragmento um do outro. Neste caso dizemos que a conexão entre os segmentos de retas dos fragmentos contíguos  $k$  e  $k + n$  existe, de forma que  $cd = 1$  (VERDADEIRO).

### 3.3.1.2 Sequenciamento dos fragmentos

Devidamente definidos os critérios que permitem definir se um segmento de reta de um fragmento está conectado a outro, verificamos que o próximo passo seria obter um conjunto de fragmentos conectados de forma que os mesmos representassem uma única linha de campo magnético na imagem a partir dos quais poderíamos obter um conjunto de descritores para esta linha, identificando-a de forma única na imagem. Construímos então um algoritmo cuja idéia geral era de, a partir de um fragmento  $k$  com um segmento de linha devidamente identificado, encontrar um fragmento  $k+n$  contíguo a este primeiro utilizando os critérios definidos anteriormente, com  $n$  representando um incremento relativo ao fragmento contíguo. A partir deste novo fragmento  $k+n$  o processo se repetiria, buscando o fragmento  $k+n+1$  conectado a  $k+n$ , e assim por diante, até que não houvessem mais fragmentos conectados. O algoritmo deveria considerar o fato de que em uma imagem teríamos várias linhas de campo, e que teríamos fragmentos vazios, gerando ao final do processamento a lista de fragmentos conectados  $L = k \cup (k+n) \cup (k+n+1) \cup (k+n+2) \cup \dots \cup (k+n+i)$ , onde  $L$  denota uma linha de campo detectada com  $i+2$  fragmentos.

Verificamos na literatura que nosso problema de sequenciamento tinha as características daqueles solucionados com algoritmos de busca em grafos, e mais especificamente com aqueles que utilizava um critério de continuidade, dando preferência por algumas conexões entre os nós do grafo em detrimento de outras. O algoritmo  $A^*$ , uma variação do algoritmo de Dijkstra's, muito utilizado em aplicações específicas de "busca de caminho" (*pathfinding*) na área de Inteligência Artificial, se mostrou uma opção interessante no nosso contexto.

O algoritmo  $A^*$  é um algoritmo de busca em grafos que utiliza uma heurística para definir os nós que serão visitados, com o objetivo de reduzir o tempo de busca e a quantidade de nós visitados utilizando uma função objetivo que deve ser minimizada (HART et al., 1968). A sequência de processamento dos nós é dada pela função objetivo  $e(x) = g(x) + h(x)$ , onde  $g(x)$  é a distância do nó a partir da origem no grafo, e  $h(x)$  representa a heurística utilizada no problema. Quanto mais próximo  $h(x)$  estiver da real distância entre os nós, mais rápido será o processamento. Para casos especiais, onde  $h(x) = 0$  temos na verdade o algoritmo de Dijkstra.

Tomando como base o conceito estabelecido pelo algoritmo  $A^*$ , onde uma certa quantidade de nós é visitada, escolhendo-se o próximo nó a ser visitado através de um critério de escolha, desenvolvemos um algoritmo de sequenciamento dos fragmentos contíguos conectados, mas que ao invés de utilizar uma função objetivo para definir

a ordem de busca, utilizamos justamente o critério de conexão entre segmentos de fragmentos contíguos definido em 3.26. Nosso algoritmo de sequenciamento dos fragmentos pode ser descrito como:

---

**Algoritmo 1:** Sequenciamento de fragmentos de uma linha de campo

---

**Entrada:**  $F$ : (Lista com todos os fragmentos da imagem);  $r_\theta$ : Inclinação máxima entre dois segmentos de reta de fragmentos contíguos

**Saída:**  $L$  (Matriz de com as listas de fragmentos sequenciadas representando linhas de campo)

**início**

$A[ ] \leftarrow [\emptyset]$  // Cria uma lista A de fragmentos a serem visitados;

$V[ ] \leftarrow [\emptyset]$  // Cria uma lista V de fragmentos visitados;

$L[ ] \leftarrow [\emptyset, \emptyset]$  // Cria uma matriz dinâmica L para armazenar listas de fragmentos;

$A[ ] \leftarrow \text{Válidos}(F)$  // A recebe a lista de fragmentos que contém segmentos;

$q \leftarrow \text{Quantidade}(A)$ ;

$i \leftarrow -1$  // Índice das linhas da matriz L;

**enquanto**  $q > 0$  **faça**

$fp \leftarrow A[0]$  //  $fp$  recebe o primeiro fragmento;

$A[ ] \leftarrow \text{RemoveFragmento}(fp, A)$  // Remove  $fp$  de A; atualiza A;

$q \leftarrow q - 1$  // Menos um fragmento a ser visitado;

$i \leftarrow i + 1$ ;

$V[ ] \leftarrow fp$  // Inclui  $fp$  na lista de fragmentos visitados;

$vfp \leftarrow \text{Vizinho}(fp)$ ;

**enquanto**  $\text{ExisteFragmentoConectado}(fp, V, vfp, r_\theta)$  **faça**

        // Se existe conexão entre  $fp$  e  $vfp$  processa o bloco abaixo;

$L[ ] \leftarrow \text{InserirNaLista}(vfp)$ ;

$A[ ] \leftarrow \text{RemoveFragmento}(vfp, A)$ ;

$q \leftarrow q - 1$  // Menos um fragmento a ser visitado;

$V[ ] \leftarrow \text{InserirNaLista}(vfp)$  // Inclui  $vfp$  na lista de visitados;

$fp \leftarrow vfp$ ;

$vfp \leftarrow \text{Vizinho}(fp)$ ;

**fim enqto**

**fim enqto**

$\text{Salva}(L)$ ;

**fim**

---

Dado um fragmento inicial selecionado em uma lista de fragmentos que contém segmentos de retas, inserimos este fragmento em uma lista e verificamos se o fragmento seguinte está conectado a este utilizando os critérios  $dL$ ,  $d\theta$  e  $d\rho$ . Se estiver, o fragmento corrente é inserido na mesma lista do fragmento anterior. O algoritmo prossegue até que não existam mais fragmentos conectados, quando então irá buscar

um novo fragmento para iniciar uma nova lista. Se encontrar, repete o procedimento anterior, ou caso contrário, encerra o processamento. É importante observar que o ponto crítico para a eficiência do algoritmo em se estabelecer o sequenciamento correto entre os fragmentos consiste na eficiência do funcionamento dos critérios de conexão entre os segmentos de retas dos fragmentos contíguos.

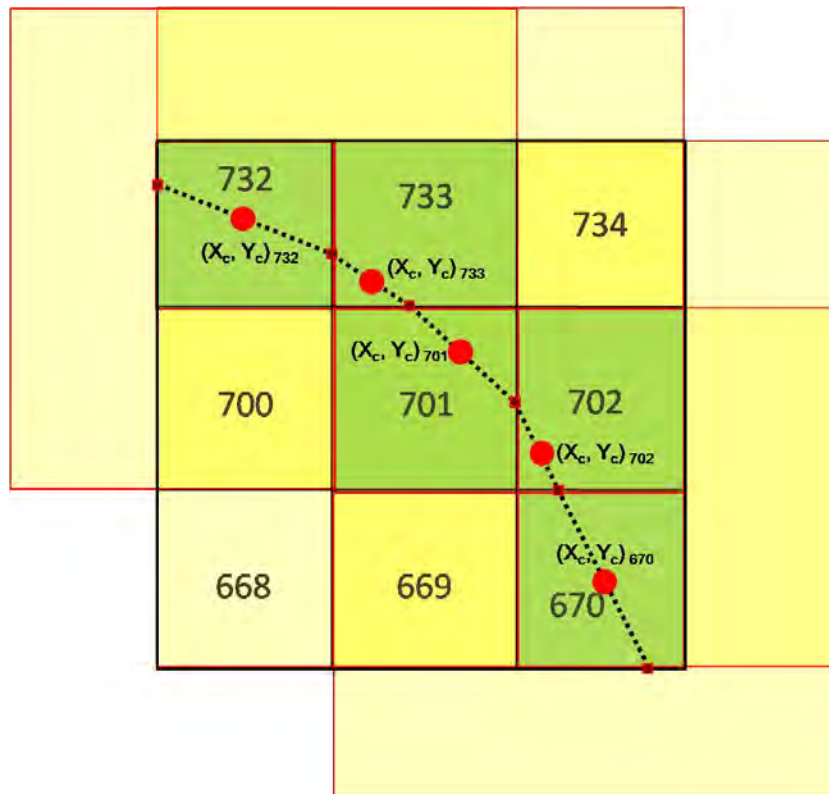


Figura 3.20 - Para um dado fragmento o algoritmo de sequenciamento analisa seus vizinhos que tem segmentos de retas, e utiliza os critérios de conexão para avaliar se estes segmentos estão conectados. Neste exemplo vemos que os fragmentos 670, 702, 701, 733 e 732 compõem uma linha de campo. Para cada segmento de reta é possível identificar um ponto central  $(x_c, y_c)$  utilizado como referência na etapa seguinte para a interpolação e obtenção da linha detectada.

No algoritmo que implementa nossa metodologia (algoritmo 1), a Transformada de Hough retorna um vetor de pares ordenados dos pixels que constituem o segmento de reta detectado em um fragmento. Ordenando este vetor pela coordenada  $x$  obtemos as coordenadas  $x_0$  e  $x_1$ . Calculando o índice do elemento central deste vetor em  $x$ , obtemos a coordenada central  $x_c$ . De forma semelhante para a direção  $y$ , obtemos  $y_0$ ,  $y_1$  e  $y_c$ , conforme vimos na figura 3.15, definindo as coordenadas  $(x_c, y_c)$ .



O algoritmo de sequenciamento das linhas de campo gera um conjunto de descritores das linhas baseado nos dados obtidos a partir da Transformada de Hough. É importante ressaltar que estes descritores identificam uma linha unicamente, através de um vetor de pares ordenados  $(x_c, y_c)$  que correspondem ao ponto central do segmento de reta obtido em cada fragmento. A figura 3.20 mostra cada um destes pontos centrais em cada um dos fragmentos. Implementamos uma estrutura para armazenar os dados das linhas onde cada uma é identificada unicamente por um número sequencial ao qual chamamos `IDLine`, e armazena a quantidade `QtFrag` de fragmentos pertencentes àquela linha, um vetor `p-ITP` com os pontos interpolados para a linha de campo e uma sub-estrutura para cada um dos fragmentos, contendo o identificador do fragmento `IDFrag`,  $\theta$ ,  $\rho$ ,  $(x_c, y_c)_{local}$ ,  $(x_c, y_c)_{global}$ , conforme podemos observar na figura 3.21. Com os dados armazenados nesta estrutura é possível reconstruir-se a imagem das linhas detectadas em qualquer ambiente computacional. As coordenadas globais dos pontos centrais de cada segmento de reta  $(x_c, y_c)_{global}$  são obtidas a partir da posição do respectivo fragmento em relação à imagem fragmentada e a partir das dimensões em pixel de cada fragmento. As coordenadas do ponto central de cada segmento de reta serão utilizadas como nós para a interpolação da linha, etapa final do estágio de extração de características no nosso método, conforme veremos a seguir.

### 3.3.1.3 Interpolação

Uma das aplicações mais utilizadas dos métodos de interpolação é a aproximação de funções, onde a partir de um dado conjunto de pontos discretos é possível construir um novo conjunto de pontos representando a função que se deseja aproximar. Nossa metodologia foi desenvolvida desde os passos iniciais com a meta de obter no estágio de extração das características um conjunto de pontos para cada linha de campo tal que o mesmo pudesse ser utilizado como dado de entrada de um método de interpolação, permitindo a construção de uma aproximação da linha de campo. A etapa de sequenciamento dos fragmentos gera um conjunto de descritores para cada linha de campo, de onde podemos obter o conjunto  $P_f = \{(x_c, y_c)_0, (x_c, y_c)_1, \dots, (x_c, y_c)_m\}$  de  $m + 1$  pares ordenados nas coordenadas globais (de toda a imagem) representando os pontos centrais de cada segmento de reta em cada fragmento. Nossa premissa era a de que utilizando este conjunto  $P_f$  de pontos em um método de interpolação adequado poderíamos obter uma aproximação da linha de campo magnético que passa por aqueles pontos, dado que o processo de fragmentação da imagem reduziu o problema da curvatura das linhas para uma aproximação local, permitindo que os pontos obtidos em cada fragmento sejam utilizados na interpolação final de uma

linha de campo.

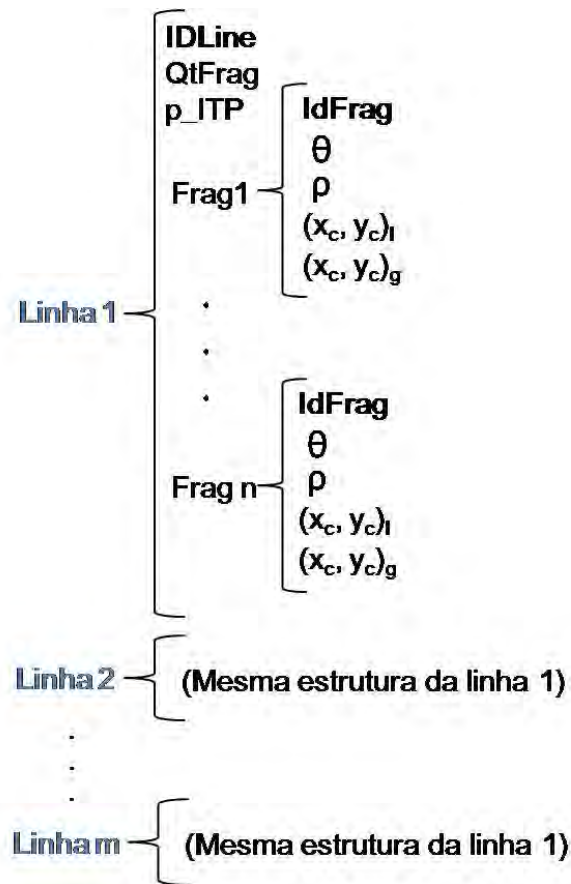


Figura 3.21 - Estrutura utilizada para armazenar os dados das linhas de campo detectadas.

Dentre os muitos métodos de interpolação existentes, demos preferência a um que pudesse realizar uma aproximação suave entre dois pontos próximos, sem grandes variações, pois este é geralmente o comportamento das linhas de campo magnético obtidas nas imagens TRACE. Utilizamos a interpolação cúbica de Hermite (SPITZBART, 1960), através do método PCHIP (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) onde cada trecho da função a ser interpolada é um polinômio de grau 3 especificado na forma Hermitiana, que leva em conta os valores dos pontos e os valores das derivadas naquele trecho da função. A interpolação Hermitiana é extensivamente utilizada em problemas de computação gráfica e modelagem geométrica para obter a trajetória de movimento de objetos que passam por determinados pontos, o que de um certo ponto de vista é o que queremos fazer (FASSHauer, 1999).

A figura 3.22 ilustra o resultado que desejamos obter através da interpolação dos

pontos centrais dos segmentos de retas de cada fragmento, visualizando agora toda a imagem reconstruída.

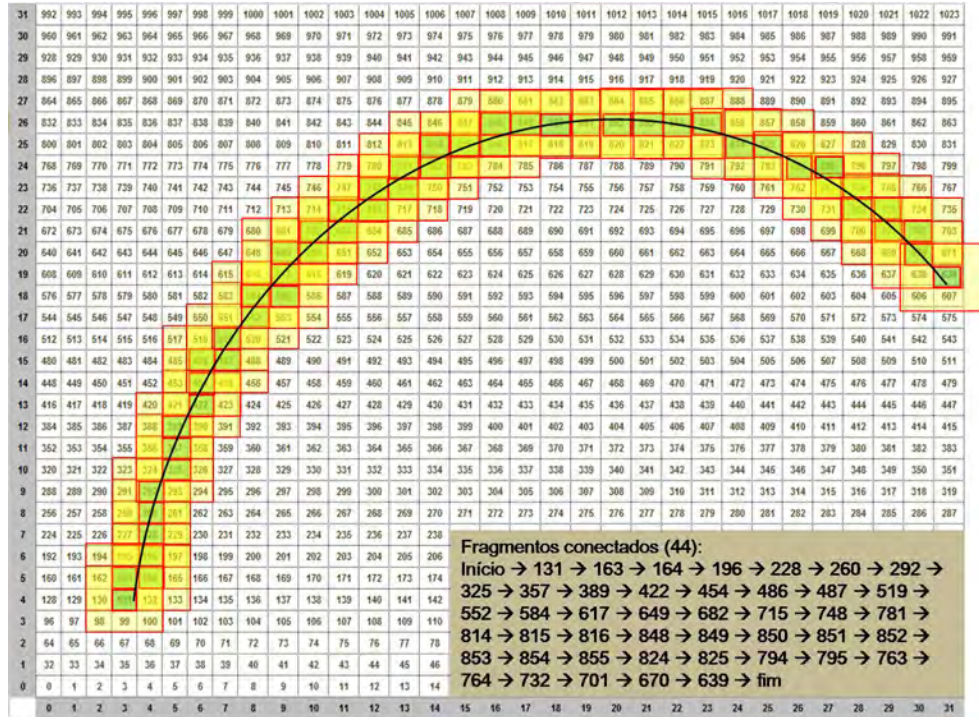


Figura 3.22 - Diagrama representando uma imagem de linha de campo magnético reconstruída após a fragmentação e o processamento para a extração dos descritores. O algoritmo de sequenciamento estabeleceu a seqüência dos 44 fragmentos indicados e cada um deles contribuiu com um ponto  $(x_c, y_c)_{global}$  para a interpolação de toda a linha.



## 4 APLICAÇÃO E RESULTADOS

Nossa pesquisa tem orientação fundamentalmente aplicada, de forma que desenvolvemos nosso trabalho com vistas à contribuir com as pesquisas sobre o clima espacial, fornecendo subsídios para que os grupos de física solar possam utilizar os dados gerados por nossa metodologia nos modelos de campos magnéticos solares. Todos os ensaios e testes apresentados neste capítulo foram realizados em um computador do tipo notebook, dotado de CPU Intel Dual-Core de 1.46 GHz com 2 GBytes de memória RAM, 300 GBytes de disco, sistema operacional Linux Ubuntu release 10.10 (maverick), kernel Linux 2.6.35-32 com o *framework Solar Soft* instalado. Neste computador o tempo de processamento de cada imagem levou em média 3 segundos, se eliminadas todas as mensagens de saída em terminal dos algoritmos do método. Este tempo pode dobrar se as mensagens de *status* forem habilitadas.

Neste capítulo apresentaremos os resultados da utilização do nosso método para a detecção de linhas do campo magnético nas imagens TRACE, iniciando com um ensaio da metodologia em uma imagem de linha de campo gerada artificialmente com um software gráfico. Em seguida apresentaremos resultados com imagens reais. Seleccionamos duas imagens com características diferentes, onde uma delas foi obtida em uma região ativa mais estressada, onde as linhas de campo estão mais retorcidas, formando sigmóides, característico de regiões com excesso de energia. A outra imagem foi obtida em uma região ativa onde as linhas de campo têm uma estrutura com linhas longas e de curvatura suave.

Submetemos as duas imagens ao algoritmo que implementa a nossa metodologia, processando as mesmas e obtendo resultados que discutiremos a seguir.

### 4.1 Ensaio

Conforme já visto anteriormente, a base da nossa metodologia descrita nas seções anteriores é a fragmentação da imagem e a aplicação da Transformada de Hough em cada um dos fragmentos. O algoritmo que implementamos admite uma série de parâmetros de entrada que podem ser ajustados para obter melhores resultados no processo de detecção das linhas de campo. Apresentaremos nesta seção um ensaio da metodologia em uma imagem simulada, criada sinteticamente de forma a representar uma linha de campo de uma imagem real.

A maioria dos parâmetros do nosso algoritmo estão associados às técnicas utilizadas em cada estágio do processo de extração de características das linhas de campo

(figura 3.1). Uma parte deles são parâmetros gerais, conforme podemos ver na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Relação de parâmetros gerais do algoritmo de extração de linhas.

#	Parâmetro	Descrição
1	imgMAG	Arquivo FITS para a imagem EUV
2	imgEUV	Arquivo FITS para o magnetograma
3	offset-size-reg	Tamanho em pixels da janela do magnetograma
4	adj-xc	Ajuste em x para a imagem EUV e o magnetograma em pixels
5	adj-yc	Ajuste em y para a imagem EUV e o magnetograma em pixels

Os parâmetros 1, 3, 4 e 5 da tabela 4.1 são necessários apenas quando fazemos a sobreposição da imagem EUV com o magnetograma. Os parâmetros 1 e 2 na tabela 4.1 correspondem à identificação dos arquivos FITS que contém a imagem TRACE e o magnetograma obtido pelo instrumento SOHO, respectivamente. O magnetograma é disponibilizado contemplando todo o disco solar, enquanto que a imagem TRACE traz uma região ativa. É importante destacarmos que como são dados provenientes de dois instrumentos diferentes a bordo de satélites diferentes, não há sincronia temporal nos dados obtidos. Em muitos casos é possível obter imagens em horários próximos, mas nos melhores casos as diferenças ficam na casa dos minutos. O cabeçalho do arquivo FITS da imagem TRACE traz entre outros dados a posição do centro da imagem, a qual utilizamos para localizar a região ativa correspondente no magnetograma, criando uma janela de tamanho `offset-size-reg` pixels nas direções  $x$  e  $y$ . A diferença temporal implica em pequenas variações na posição relativa das imagens fazendo com que seja necessário ajustar a janela da imagem EUV com o magnetograma utilizando os parâmetros `adj-xc` na direção  $x$  e `adj-yc` na direção  $y$ .

Nosso estudo mostrou que toda a metodologia é bastante sensível aos parâmetros utilizados, sendo o tamanho dos fragmentos um dos mais importantes. Voltando ao início do capítulo 3 vemos que a imagem obtida no ultravioleta extremo é pré-processada e depois segmentada através do algoritmo de Strous, quando na sequência ocorre a fragmentação da imagem. As imagens TRACE com as quais temos trabalhado tem tamanho de 1024 x 1024 pixels, onde verificamos que o tamanho de fragmento que apresentava melhores resultados nas etapas seguintes deveria ser de aproximadamente 3% do tamanho da imagem. Para imagens do tamanho citado, este percentual corresponde a um fragmento de 32 x 32 pixels. O valor de 3% não

é arbitrário, já que nas imagens TRACE o tamanho da região ativa imageada é tal que as linhas de campo que tipicamente são obtidas, quando fragmentadas a 3% do tamanho da imagem resultam em estruturas com baixa curvatura, o que favorece a aproximação por uma reta realizada pela Transformada de Hough. Outra questão que deve ser levada em conta é que com fragmentos de 32 x 32 pixels conseguimos uma distinção entre os pixels que constituem uma linha de campo e aqueles que fazem parte do ruído de fundo. Em fragmentos menores, de 16 x 16 por exemplo, predomina uma indeterminação neste sentido, pois como o fragmento tem tamanho reduzido não é possível distinguir pixels que pertençam a uma linha de campo daqueles que compõem o ruído de fundo, o que compromete o restante do processamento. Verificamos em nossas análises que a relação de 3% se mantém para imagens proporcionalmente maiores ou menores do que 1024 x 1024 pixels, de forma que a relação dada pela tabela 4.2 se mantém, considerando sempre imagens com o mesmo tamanho em  $x$  e  $y$ .

Tabela 4.2 - Relação entre o tamanho dos fragmentos e o tamanho das imagens no método HTFI. O método trata sempre imagens com o mesmo tamanho em  $x$  e  $y$ .

#	Tam. da imagem	3%	Dim. do fragmento	$n$
1	512 x 512	$512 \times 0.03 \approx 15.36$	$2^n = 16$	4
2	1024 x 1024	$1024 \times 0.03 \approx 30.72$	$2^n = 32$	5
3	2048 x 2048	$2048 \times 0.03 \approx 61.44$	$2^n = 64$	6

A tabela 4.3 relaciona os parâmetros funcionais do nosso algoritmo, onde o parâmetro 6 corresponde ao nível de fragmentação da imagem, onde atribuímos o índice  $n$  para fragmentos de tamanho  $2^n \times 2^n$ , ou seja, para  $n = 4$ , 16 x 16, para  $n = 5$  os fragmentos terão 32 x 32, e assim por diante.

Vimos na seção 3.1 que o pré-processamento é realizado utilizando um filtro de mediana, uma máscara de nitidez e o melhoramento no contraste na imagem. Os dois primeiros itens estão associados aos parâmetros  $s_m$  (equação 3.1) e  $s_u$  (equação 3.2), respectivamente os parâmetros 2 e 3 na tabela 4.3, correspondendo ao tamanho em pixels das janelas para o filtro da mediana e para a máscara de nitidez. Ao longo do nosso estudo observamos que dada uma imagem original obtida pelo instrumento TRACE, aplicar o filtro da mediana e depois a máscara de nitidez gera resultados diferentes caso invertamos a ordem das operações, afetando o resultado final da detecção, ou seja, inicialmente aplicar a máscara de nitidez e depois o filtro de mediana. Nesta última sequência estamos aumentando a nitidez de uma imagem "crua"

Tabela 4.3 - Relação de parâmetros funcionais do algoritmo de extração de linhas.

#	Parâmetro	Descrição
1	pp-mode	Modo UMASK-MED ou MED-UMASK
2	pp-med	$s_m$ , janela para a mediana
3	pp-umask	$s_u$ , janela para a máscara de nitidez
4	strous-dir	Direções no algoritmo de Strous
5	strous-mode	Algoritmo 1 ou 2 de Strous (MAX ou AVG)
6	N-for-2ToN-Fragments	$n$ para fragmento de tamanho $2^n$
7	iMinQtPixelPerLinSeg	Quantidade mínima de pixels
8	iConnectionWindowSize	Tamanho $dL$ da janela de conexão
9	iMinQtFragInExtractedLine	Quantidade mínima de fragmentos por linha
10	rTheta	Ângulo $r_\theta$ para a conexão

para depois remover possíveis ruídos e artefatos, enquanto que na sequência inversa primeiramente removemos o ruído. O primeiro parâmetro na tabela 4.3 controla esta sequência de operações.

Na seção 3.2 vimos que o algoritmo de Strous efetua a comparação entre o pixel processado e um par de pixels vizinhos em quatro diferentes direções. O parâmetro 4 da tabela 4.3 permite que estas direções do algoritmo de Strous sejam controladas através de um vetor de quatro posições, cada uma delas valendo 0 ou 1 e correspondendo respectivamente às direções vertical (|), horizontal (-), diagonal 1 (/) e diagonal 2 (\). Podemos selecionar entre o algoritmo 1 ou 2 de Strous através do parâmetro 5, onde escolhemos se o processamento deve ocorrer considerando a comparação pelo máximo valor ou pela média.

Na etapa da metodologia onde utilizamos a Transformada de Hough para obter um segmento de reta que represente o segmento de linha de campo de um fragmento, foi possível verificar a ocorrência de ambiguidades com o algoritmo reconhecendo linhas que na verdade não existiam, devido à presença de pixels que faziam parte do ruído de fundo no fragmento processado. Para minimizar este problema, parametrizamos o algoritmo de Hough para que o mesmo retorne apenas segmentos de reta cujo comprimento seja maior do que uma certa quantidade de pixels, parâmetro 7 na tabela 4.3. O maior valor possível é o comprimento da diagonal do fragmento.

Na seção 3.3, onde exploramos os aspectos da nossa metodologia voltados para a obtenção de descritores que representem uma linha de campo magnético na imagem, vimos que em dado momento foi necessário conectar os segmentos de retas de fragmentos contíguos. Nossa abordagem considerou uma área ao redor das extremidades



dos segmentos de retas como um limite para a determinação da conexão entre estes segmentos. O tamanho desta área em pixels foi parametrizado a fim de flexibilizar o algoritmo em função de distorções que podem ocorrer dependendo do tamanho dos fragmentos, o que aparece nas equações 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21 como o valor  $dL$ . Para fragmentos maiores, de 64 x 64 pixels, por exemplo,  $dL$  deve assumir valores maiores do que assumiria para fragmentos de 32 x 32 pixels. Este é o parâmetro 8 na tabela 4.3.

Ainda na mesma seção, na etapa de sequenciamento dos fragmentos contíguos, verificamos a necessidade de controlar a quantidade mínima de fragmentos que iriam compor uma linha de campo. Como a partir de cada fragmento que contém um segmento de reta obtemos um ponto que fará parte da interpolação, verificamos em alguns casos a ocorrência de linhas com apenas 2 fragmentos, e portanto 2 pontos, o que pode, dependendo do caso, não gerar bons resultados finais na interpolação. Assim parametrizamos nosso algoritmo para manter descritores de linhas a partir de uma certa quantidade de fragmentos, o que pode ser observado na linha 9 da tabela 4.3.

Finalmente, na linha 10 da tabela 4.3 temos o valor de  $r_\theta$ , máxima diferença na inclinação entre dois segmentos de retas de fragmentos contíguos, utilizado como um dos parâmetros de determinação da conexão entre os segmentos, conforme definimos na equação 3.23.

Desenvolvemos nossos algoritmos utilizando a linguagem de programação IDL (EXELIS, 2013) e o *framework Solar Soft* (BENTELY; FREELAND, 1998) ambos muito difundidos na comunidade de física solar. Organizamos todo o código em uma única aplicação que faz chamadas a funções que desenvolvemos de forma que também possam ser utilizadas separadamente, em uma estrutura modular. Produzimos uma versão em linha de comando para terminais Linux e outra versão baseada em janelas cuja tela inicial pode ser observada na figura 4.14.

Utilizamos neste teste uma imagem gerada artificialmente através de um software de desenho e posteriormente convertida para o formato FITS. Neste primeiro teste a imagem tem tamanho de 1024 x 1024 pixels e contém apenas uma linha de campo. Não foi adicionado nenhum tipo de ruído pois o objetivo aqui é avaliar o funcionamento mínimo do método, recuperando toda uma linha. A linha traçada possui uma estrutura semelhante a uma linha de campo alongada, encontrada com frequência nas imagens da coroa solar. Utilizamos esta imagem como dado de entrada em nosso método, onde o algoritmo foi parametrizado com os valores da tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados no teste.

#	Parâmetro	Valor
1	imgEUV	arc3-s0n-0-0.fits
2	pp-mode	UMASK-MED
3	pp-med	5
4	pp-umask	17
5	strous-dir	[1,1,1,1]
6	strous-mode	Algoritmo 2 (AVG)
7	N-for-2ToN-Fragments	5 (tamanho $2^5 = 32$ )
8	iMinQtPixelPerLinSeg	12
9	iConnectionWindowSize	10
10	iMinQtFragInExtractedLine	2
11	rTheta	30

Para esta imagem e este conjunto de parâmetros obtivemos os resultados apresentados na figura 4.1. É importante observar na linha 7 da tabela que dividimos nossa imagem em fragmentos de  $32 \times 32$  pixels, de forma que temos no total  $32^2 = 1024$  fragmentos.

No contexto de um estudo na área de Visão Computacional, e mais especificamente em uma metodologia voltada para a detecção automática de linhas de campo em imagens da coroa solar, é importante que pudéssemos obter um conjunto de descritores capazes de identificar unicamente as linhas de campo magnético em uma imagem. Dados como a quantidade de fragmentos que compõe as linhas de campo e a posição de cada pixel da linha na imagem, convertidos posteriormente em sua posição equivalente na coroa solar são de fundamental importância para a área de física solar em aplicações no estudo de explosões solares e outros fenômenos. Levando em conta estes fatores, implementamos nosso algoritmo de forma a gerar uma estrutura de dados completa a respeito de cada linha de campo e os fragmentos que a compõem. Através desta estrutura podemos quantificar as linhas e seus fragmentos e regenerar a qualquer momento a estrutura das linhas de campo, de forma gráfica inclusive.

Para o exemplo aqui apresentado nossos dados mostram que o algoritmo obteve uma linha de campo com um total de 26 fragmentos que após a interpolação geraram uma linha com 432 pixels, cujos dados podem ser observados na tabela 4.5.

Nesta mesma tabela a coluna **Frag** mostra o identificador do fragmento, permitindo localizá-lo na imagem completa, como a da figura 3.22. As colunas  $\theta$  e  $\rho$  mostram respectivamente os valores da inclinação do segmento e distância à origem do sistema

Tabela 4.5 - Dados da linha de campo obtidas no teste detalhado na figura 4.1.

Linha 0: 26 fragmentos, 432 pixels						
<b>Frag</b>	$\theta$	$\rho$	<b>LCOL</b>	<b>LROW</b>	<b>GCOL</b>	<b>GROW</b>
359	161.74	422.00	26	16	250	368
392	156.52	484.00	7	16	263	400
424	153.91	497.00	22	16	278	432
457	153.91	557.00	6	19	294	467
489	148.70	569.00	22	16	310	496
522	151.30	625.00	8	16	328	528
554	148.70	638.00	23	13	343	557
587	146.09	690.00	16	16	368	592
619	133.04	699.00	28	3	380	611
652	135.65	750.00	24	8	408	648
685	135.65	797.00	21	10	437	682
718	127.83	840.00	21	8	469	712
751	114.78	877.00	26	3	506	739
752	114.78	909.00	16	14	528	750
753	104.35	939.00	16	25	560	761
754	91.30	964.00	16	31	592	767
755	78.26	980.00	13	27	621	763
756	67.83	991.00	14	17	654	753
757	65.22	998.00	10	4	682	740
725	60.00	1002.00	24	27	696	731
726	52.17	1007.00	15	12	719	716
695	44.35	1012.00	16	16	752	688
664	33.91	1011.00	12	16	780	656
632	15.65	1006.00	28	17	796	625
601	5.22	988.00	3	16	803	592
569	169.57	994.00	3	16	803	560

de coordenadas do segmento de reta daquele fragmento obtido pela Transformada de Hough. As colunas **LCOL** e **LROW** mostram as coordenadas do pixel central do segmento de reta do fragmento em suas coordenadas locais na estrutura de 32 x 32 pixels do fragmento, e finalmente as colunas **GCOL** e **GROW** mostram as coordenadas do pixel central na estrutura global da imagem de 1024 x 1024 pixels. Os valores de **GCOL** e **GROW** são calculados somando a **LCOL** e **LROW** a distância em  $x$  e  $y$  da origem do sistema de coordenadas do fragmento à origem do sistema de coordenadas da imagem. Podemos verificar na tabela que os segmentos de reta de fragmentos contíguos (na sequência apresentada) possuem diferença angular menor do que estabelecido no parâmetro 11 da tabela 4.4, mesmo para os fragmentos 601 e 569, que atendem ao critério de variação angular conforme apresentado na figura 3.18.

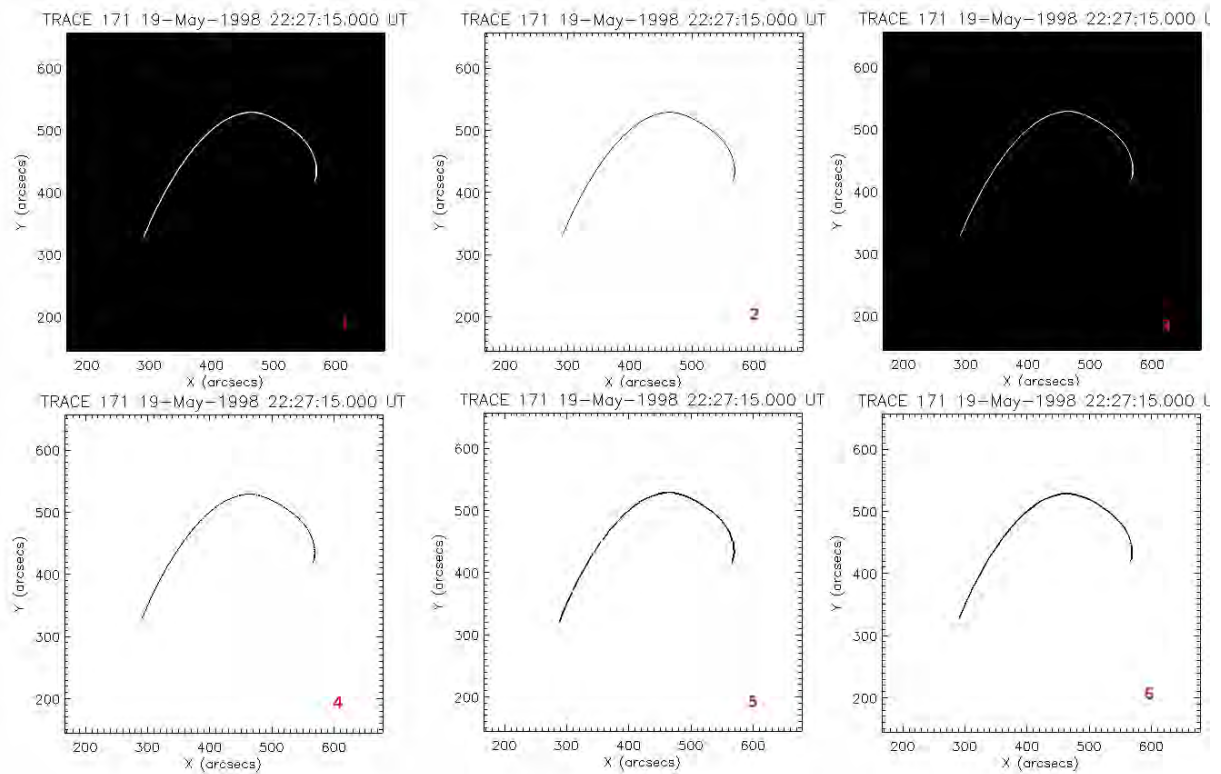


Figura 4.1 - Teste de extração de características com uma linha sintética. A partir do canto superior esquerdo, a imagem 1 mostra a linha de campo original e sua versão negativa na imagem 2. A imagem 3 mostra a figura pré-processada (seção 3.1), a imagem 4 mostra a linha de campo pré-segmentada pela Transformada de Strous (seção 3.2), a figura 5 mostra a linha de campo processada pela Transformada de Hough após a fragmentação da imagem, e finalmente a imagem 6 mostra a linha interpolada.

Nosso algoritmo recuperou a linha de campo em sua totalidade, o que pode ser observado na figura 4.2.

## 4.2 Extração de características em imagens de regiões ativas

O repositório de dados do instrumento TRACE (HANDY et al., 1999) disponibiliza uma grande quantidade de filmes, imagens e dados no formato FITS, fonte a partir da qual obtivemos as imagens aqui utilizadas. É possível obter dados de todo o período de operação do instrumento TRACE separadas por algumas características de interesse, como a região da imagem no disco solar, o filtro da imagem e dados estatísticos da mesma. Em 1998, época em que o instrumento TRACE começou a operar, suas imagens da coroa solar eram consideradas as de melhor qualidade, porém quando comparadas com imagens atuais, obtidas pelo instrumento AIA do satélite SDO, algumas imagens deixam a desejar. No início da nossa pesquisa as

imagens AIA/SDO ainda não eram públicas, de forma que os melhores dados com os quais poderíamos contar eram as imagens do TRACE.

#### 4.2.1 Observação de 14 de julho de 2000

O "*Bastille Day Flare*" foi uma explosão solar de grande intensidade energética ocorrida em 14 de julho de 2000, atingindo a classe GOES X5.7, causando a emissão de prótons energéticos na ionosfera terrestre detectados apenas 15 minutos depois da explosão. Foi o evento mais energético detectado desde 1989, e há registros de sua observação pelas sondas Voyager I e Voyager II, mesmo estas estando nos limites do sistema solar (WEBBER et al., 2002). A fase anterior do evento foi observada pelo satélite TRACE, onde verifica-se uma estrutura magnética complexa, com muitos sigmóides, evidenciando um excesso de energia.

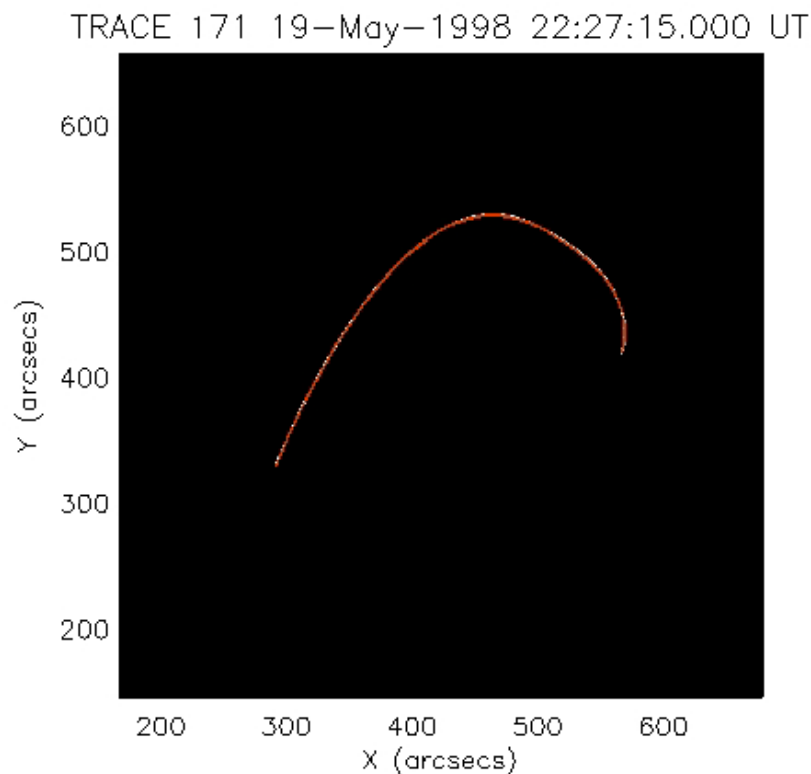


Figura 4.2 - Resultado final da extração de características de uma linha de campo. A linha em vermelho indica a parte da linha de campo original cujos descritores foram obtidos através da nossa metodologia, neste caso, a linha na íntegra.

Esta imagem possui estruturas com linhas de campo mais curtas e tensionadas, com curvatura acentuada e excesso de cruzamento entre as linhas. Realizamos alguns ensaios preliminares para testar qual conjunto de parâmetros se adequava à imagem, produzindo resultados mais satisfatórios, chegando aos valores adotados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados na imagem do "*Bastille Day Flare*".

#	Parâmetro	Valor
1	imgEUV	tri20000714.0900-0281.fits
2	pp-mode	UMASK-MED
3	pp-med	5
4	pp-umask	9
5	strous-dir	[1,1,1,1]
6	strous-mode	Algoritmo 2 (AVG)
7	N-for-2ToN-Fragments	5 (tamanho $2^5 = 32$ )
8	iMinQtPixelPerLinSeg	8
9	iConnectionWindowSize	10
10	iMinQtFragInExtractedLine	3
11	rTheta	30

A imagem `tri20000714.0900-0281.fits` (parâmetro 1) foi obtida no repositório de dados TRACE. Conforme vimos no item 3.1 onde descrevemos a etapa de pré-processamento das imagens, aplicamos um filtro de mediana e em seguida a máscara de nitidez (equação 3.4) na imagem, porém a ordem de utilização destes procedimentos pode ser invertida (equação 3.5). Estas duas variações são definidas pelo parâmetro 2 na tabela 4.6 como `MED-UMASK` e `UMASK-MED` respectivamente. Para imagens mais escuras e com baixo contraste em geral obtém-se melhores resultados com a utilização do parâmetro `UMASK-MED` pois a máscara de nitidez é aplicada na imagem original antes do filtro da mediana, gerando uma imagem com maior índice de brilho do que no caso inverso. Isto favorece a detecção dos pixels pelo algoritmo de Strous e a detecção de segmentos de retas pela Transformada de Hough.

O tamanho da janela utilizado pelo filtro de mediana e pela máscara de nitidez correspondem respectivamente aos parâmetros 3 e 4 da tabela 4.6. Estes parâmetros controlam o nível de filtragem da imagem original e estão diretamente relacionados à remoção do ruído e ao melhoramento do brilho e contraste das linhas de campo na imagem. Dado que a informação obtida e utilizada pelo método provém do brilho dos pixels das linhas de campo, o algoritmo é bastante sensível à variação destes dois

parâmetros. Os melhores resultados na detecção automática das linhas de campo, considerando fixos outros parâmetros, geralmente são obtidos quando a combinação dos parâmetros 3 e 4 gera uma imagem com maior relação sinal-ruído e com maior brilho e contraste. Estes critérios são totalmente dependentes da imagem de entrada, e nesta primeira aproximação devem ser ajustados manualmente. Para a imagem desta aplicação os valores dos parâmetros cujo resultado foi o mais satisfatório pelo nosso critério qualitativo constam da tabela 4.6.

Os parâmetros 5 e 6 controlam o comportamento do algoritmo de Strous utilizado em nosso método para destacar os pixels das linhas de campo em direções pré-determinadas. As duas variações do algoritmo de Strous, quando a comparação do pixel processado e seus vizinhos nas direções definidas se dá pela valor máximo (variação 1, equação 3.11) ou quando a comparação se dá pela média (variação 2, equação 3.12) são definidos pelo parâmetro 6. Em nossas aplicações temos verificado que os melhores resultados tem sido obtidos quando utilizamos a variação 2 do algoritmo de Strous, que geram estruturas com as linhas de campo mais definidas, conforme exemplo da figura 3.11 e em nossa aplicação a imagem 4 da figura 4.3.

No algoritmo de Strous podemos definir quatro possíveis direções para o processamento da imagem, dadas por um vetor de quatro posições, cada uma delas com valores 0 ou 1 indicando as direções apresentadas na seção 3.2.1, o que foi definido pelo parâmetro 5. Salvo casos muito específicos, este parâmetro sempre é utilizado considerando-se as quatro direções de vizinhança de pixels (horizontal, vertical e as duas diagonais) pois são todas as direções possíveis onde podemos encontrar pixels vizinhos em uma imagem, de forma que estes façam parte de uma linha de campo.

Como a imagem utilizada nesta aplicação tem o tamanho de 1024 x 1024 pixels, definimos a ordem de fragmentação em  $n = 5$ , o que significa dizer que os fragmentos terão  $2^n \times 2^n = 32 \times 32$  pixels, atendendo à relação de 3% para o tamanho de cada fragmento em relação ao tamanho da imagem já discutido no capítulo 3. O parâmetro que representa a ordem de fragmentação das imagens,  $n$ , corresponde ao parâmetro 7 da tabela 4.6 e é um dos mais sensíveis para o nosso algoritmo, já que todo o processo de segmentação utilizando a Transformada de Hough e o estágio de extração de características está baseado no tamanho dos fragmentos.

O parâmetro 8 da tabela 4.6 determina o comprimento mínimo dos segmentos de reta detectados pela Transformada de Hough, em pixels. Para a aplicação nesta imagem adotamos o comprimento mínimo de 8 pixels, que gerou um resultado com maior quantidade de linhas mais alongadas, já que segmentos de reta com comprimentos

menores que não aumentem a quantidade de ruído na imagem contribuem para uma maior quantidade de conexões de segmentos na etapa seguinte do algoritmo, resultando em mais linhas conectadas, e estas com maior quantidade final de pixels.

Os parâmetros 9, 10 e 11 estão associados à etapa de conexão dos segmentos de retas em fragmentos contíguos. Os parâmetros 9 e 11 correspondem às variações admitidas pelos critérios de conexão conforme definimos na seção 3.3. O parâmetro 9 corresponde ao valor  $dL$  da janela de tamanho  $dL \times dL$  pixels. Vimos na seção 3.2.2 que a aplicação da Transformada de Hough gerava um espaço de Hough para o fragmento processado, onde um ponto de máximo correspondia a um segmento de reta detectado no espaço da imagem. Utilizando a abordagem de uma aproximação de primeira ordem, desenvolvemos nosso método de forma a considerar apenas o ponto no espaço de Hough cuja contagem de "votos" fosse máxima. Para os casos onde dois pontos tivessem a mesma contagem, escolhemos apenas um deles. Esta abordagem simplificou a implementação do algoritmo e como uma primeira aproximação atende à necessidade da obtenção de um segmento de reta que represente um segmento de linha de campo para cada fragmento. No entanto, como uma linha de campo apresenta variação em seu brilho ao longo de sua estrutura, de uma extremidade à outra, é razoável imaginarmos a situação de que em fragmentos contíguos onde a linha de campo apresente intensidade de brilho diferente pode ocorrer uma situação onde a Transformada de Hough detecte segmentos de reta em fragmentos contíguos, que apesar de pertencerem a mesma linha de campo não estão alinhados, especialmente se em cada fragmento houver mais de um segmento de reta detectado. Esta situação de fato ocorre em alguns casos, e verificamos que as extremidades dos segmentos de retas ficam desalinhadas, à distância de alguns pixels uma da outra. Para tratar esta questão passamos a considerar o valor  $dL$  como um parâmetro variável do algoritmo, e não mais um valor fixo. Assim podemos definir uma área de tamanho  $dL \times dL$  pixels ao redor das extremidades de cada segmento de reta como espaço parametrizado de um dos critérios de conexão. Nesta aplicação estabelecemos o valor  $dL = 10$ , o que significa que estamos utilizando uma área de  $10 \times 10$  pixels nas extremidades dos segmentos de retas de fragmentos contíguos, onde consideramos que os mesmos estão conectados. Este tamanho representa quase  $\frac{1}{3}$  de cada fragmento de  $32 \times 32$  pixels, para que possamos garantir a conexão dos segmentos. Mesmo que estejamos sobre-valorizando este critério, temos ainda o critério associado à variação angular  $d\theta$  dos segmentos de retas, para evitar que sejam selecionados como conectados segmentos não pertencentes à mesma linha de campo.

Quanto ao parâmetro 11 ( $r_\theta$ ) que corresponde à diferença absoluta na inclinação



de segmentos de retas em fragmentos contíguos, atribuímos o valor  $d\theta = 30^\circ$ . Este valor não é arbitrário, e foi obtido observando-se as imagens do TRACE, onde podemos constatar que pequenos arcos coronais ocupam em muitos casos cerca de  $\frac{1}{5}$  da imagem, o que, para o tamanho de 1024 x 1024 pixels, corresponderia a aproximadamente a uma janela de 204 x 204 pixels. Considerando uma fragmentação de ordem 5, com fragmentos de 32 x 32 pixels, temos que  $204/32 \approx 6$  fragmentos, definindo uma área de 6 x 6 fragmentos. Se um pequeno arco coronal deve estar contido nesta área e sua variação angular acumulada de uma extremidade a outra deve ser de aproximadamente  $180^\circ$  considerando um arco completo, temos que para cada fragmento a inclinação média seria de  $\frac{180^\circ}{6} = 30^\circ$ . É claro que este valor é variável dependendo do nível de fragmentação selecionado e das características estruturais dos arcos, mas de fato em nossos testes temos obtidos melhores resultados com  $d\theta \approx 30^\circ$ . Para regiões ativas com arcos menores o valor de  $d\theta$  deve ser maior, pois deve admitir maior curvatura das linhas entre os fragmentos.

Definidos todos os parâmetros efetuamos o processamento da imagem e geramos os resultados que discutiremos a partir daqui.

Podemos verificar na figura 4.3 que a imagem original (1) é bastante escura e apresenta baixo contraste. Geramos sua versão negativa (2) a fim de facilitar a visualização das estruturas magnéticas. As linhas de campo foram destacadas no estágio de pré-processamento, e na imagem 3 já é possível ver com maior clareza a intrínca estrutura magnética desta região ativa. A imagem 4 mostra o resultado do processamento da imagem 3 com o algoritmo de Strous, que apesar de se tratar de um algoritmo baseado em gradientes, aumentando o ruído na imagem, destaca as estruturas finas das linhas de campo. Após a fragmentação da imagem e a aplicação da Transformada de Hough em cada um dos fragmentos obtivemos a imagem 5, onde vemos regiões da imagem onde claramente há um conjunto de segmentos de retas que fazem parte de linhas de campo. Finalmente os pontos centrais de cada segmento de reta das linhas de campo sequenciadas foram utilizados como marcadores para a interpolação utilizando o método PCHIP, gerando as linhas de campo observadas na imagem 6.

Uma questão que levantamos ao longo da nossa pesquisa foi a verificação dos resultados obtidos pelo método. Comparar um conjunto de linhas de campo detectadas com outro conjunto também obtido por um método automático *a priori* não garante uma boa avaliação dos resultados, de forma que os grupos que buscam tratar o mesmo problema em algum momento de suas análises fazem inspeções visuais e/ou

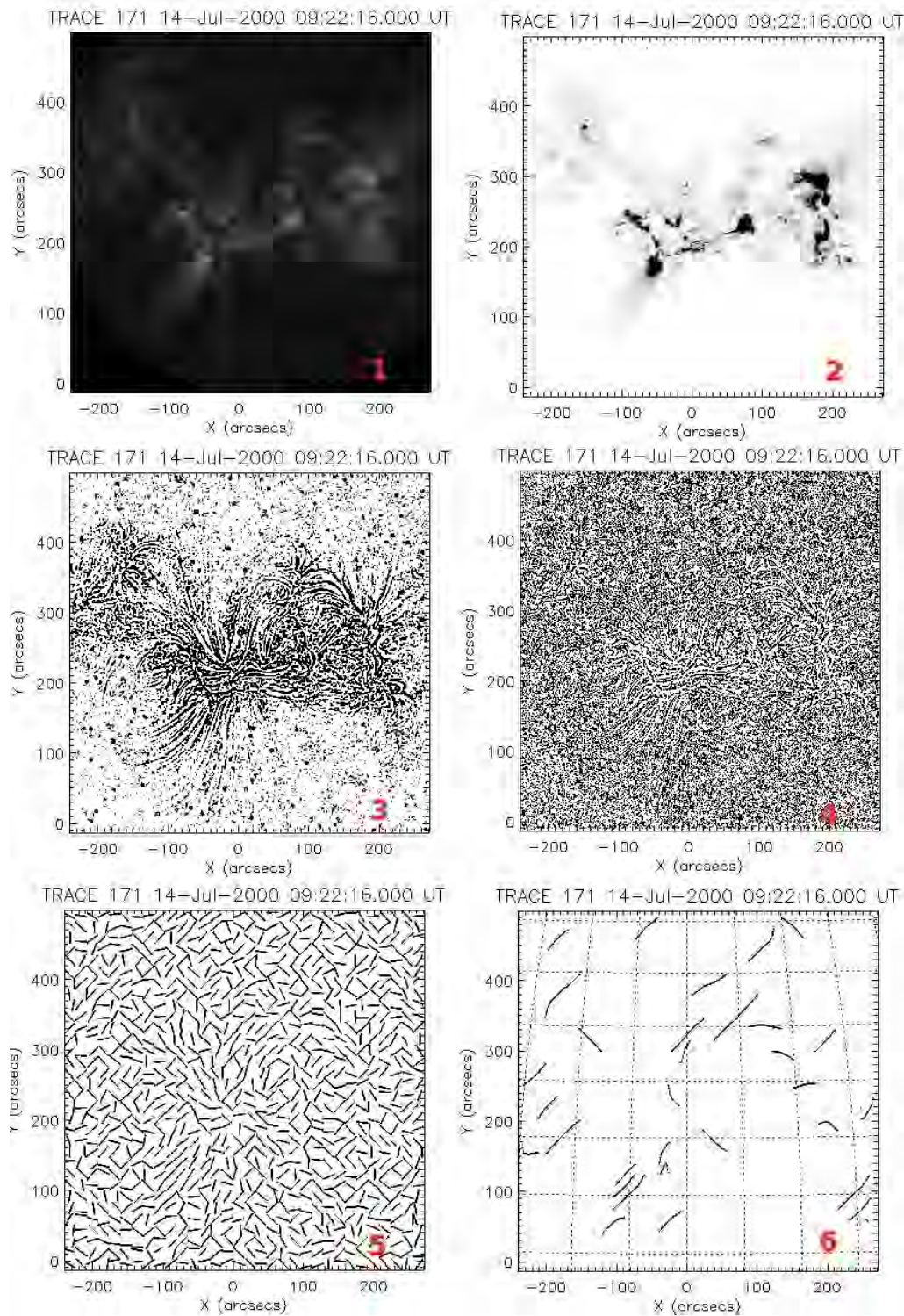


Figura 4.3 - Extração de características de uma imagem obtida pelo instrumento TRACE no ultravioleta extremo em 14/07/2000 09:22:16 UT. A partir do canto superior esquerdo, a imagem original (1) e sua versão negativa em 2. Na imagem 3 vemos o resultado do pré-processamento (seção 3.1), a imagem 4 mostra a imagem pré-segmentada pela Transformada de Strous (seção 3.2), na imagem 5 temos o resultado da aplicação da Transformada de Hough após a fragmentação da imagem, e finalmente a imagem 6 mostra as linhas detectadas e interpoladas.

comparações com linhas traçadas manualmente (ASCHWANDEN et al., 2008). Como solução de primeira ordem adotamos também a comparação por inspeção visual das imagens das linhas detectadas com a imagem original, e das linhas detectadas com o magnetograma da região ativa em estudo. Geramos um conjunto de metadados a respeito das linhas de campo detectadas, obtendo a quantidade de linhas detectadas na imagem  $N_L = 32$ , o comprimento em pixels da maior e da menor linha respectivamente  $L_{max} = 124$  e  $L_{min} = 7$ , o comprimento médio das linhas  $\bar{x}_L = 64$  e o desvio-padrão do comprimento das linhas  $\sigma_L = 25$ , todos em unidades de pixels.

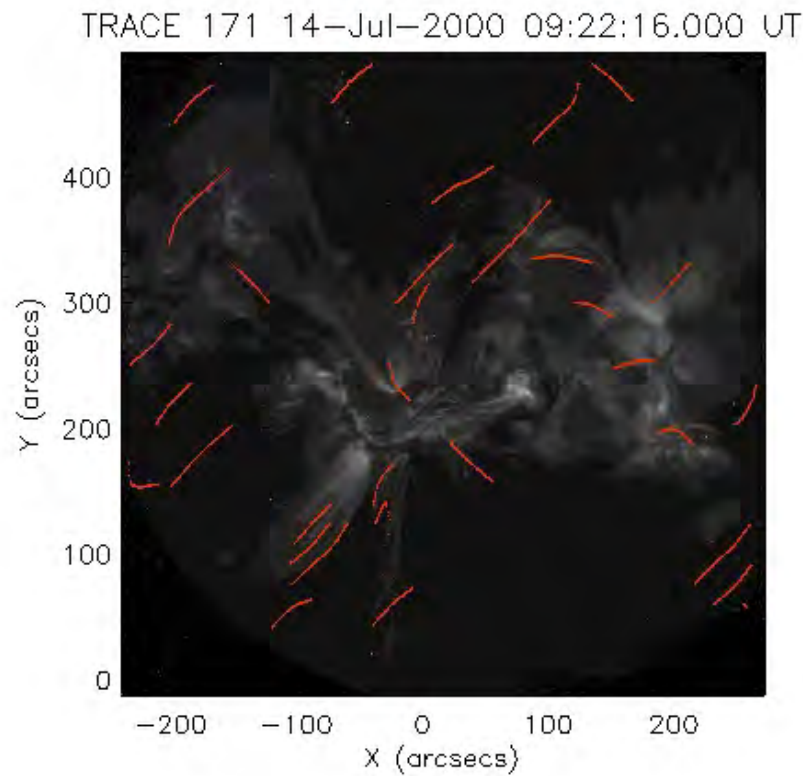


Figura 4.4 - Imagem original TRACE obtida em 14/07/2000 09:22:16 UT sobreposta pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI.

A figura 4.4 mostra em detalhes o resultado da detecção das linhas de campo em comparação com a imagem original, sobreposição das imagens 6 e 1 da figura 4.3. Podemos observar nesta imagem as 32 linhas detectadas pelo método, onde algumas se ajustam bem às estruturas de linhas de campo da imagem, como na região  $(x, y) = (-100, 100)$ . A baixa relação sinal-ruído é uma questão que pode comprometer a

utilização do método. As linhas detectadas que não tem relação com linhas de campo da imagem original são "falsos positivos" gerados exatamente pela ocorrência ainda excessiva de ruído na imagem.

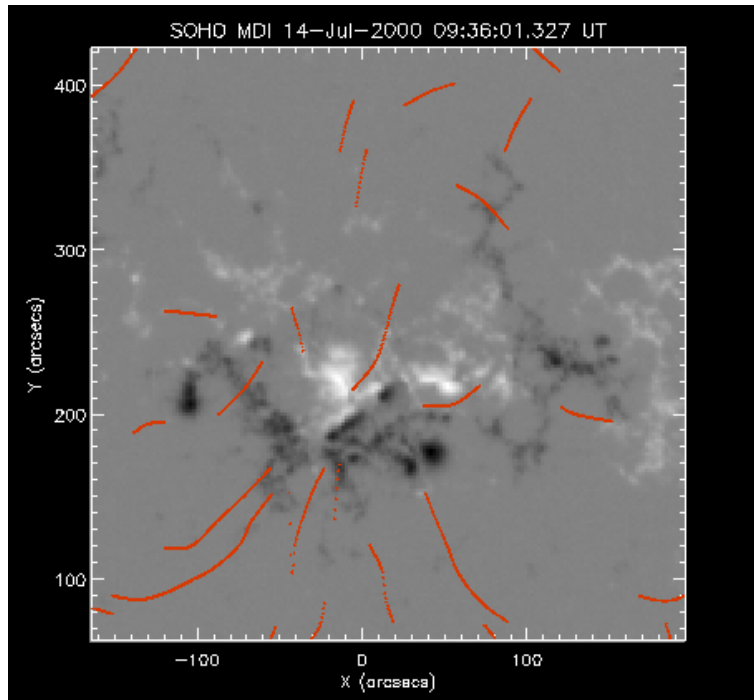


Figura 4.5 - Magnetograma obtido pelo instrumento MDI/SOHO em 14/07/2000 09:36:01 UT sobreposta pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI.

Muitas abordagens de detecção automática das linhas de campo em imagens da coroa solar utilizam como estratégia de identificação das linhas a busca de pixels um a um, dado um conjunto de critérios para avaliar sua conexão. Um critério muito utilizado é fazer com que, dado o pixel  $P_i$ , a busca pelo pixel  $P_{i+1}$  se dê na direção de uma linha de campo dipolar gerada sinteticamente, cujas extremidades encontram regiões opostas de manchas solares no magnetograma. Esta é uma boa aproximação, no entanto sabemos que apenas uma pequena parte das linhas de campo observadas na coroa apresentam configuração dipolar.

Diferentemente das outras abordagens normalmente utilizadas (ver seção 1.1.3), nosso método recompõe toda a imagem conectando os segmentos de reta dos fragmentos contíguos através do sequenciamento baseado no algoritmo A\*, exemplificado na figura 3.20. Neste processo de reconexão os fragmentos são agrupados em linhas de campo utilizando critérios de conexão que na verdade levam em conta a estru-

tura da própria linha de campo da imagem original, e não uma estrutura dipolar como o descrito acima. Assim, faz sentido comparar as linhas detectadas por nosso algoritmo com o magnetograma da região ativa correspondente à imagem TRACE obtida. Extendemos nosso algoritmo para gerar esta comparação, variando apenas o parâmetro 4 na tabela 4.6 de 9 para 11, a fim de obter uma configuração de linhas de campo ligeiramente diferente daquela obtida na imagem 4.4.

Observamos na imagem 4.5 que as linhas efetivamente as mesmas partem das regiões claras e escuras das manchas solares.

Independentemente da análise qualitativa, buscamos quantificar os resultados obtidos pelo nosso método, de forma a nos assegurar de que as linhas de campo detectadas pelo algoritmo sejam de fato as linhas mais brilhantes nas imagens obtidas pelo satélite TRACE, que por sua vez representam a emissão no ultravioleta extremo de partículas aprisionadas pelas linhas de campo magnético presentes na coroa solar.

Desenvolvemos uma avaliação quantitativa da detecção de linhas de campo baseados no fato de que a Transformada de Hough aplicada em cada fragmento, conforme detalhamos na seção 3.2.2, gera um espaço de parâmetros  $(\theta, \rho)$  onde a maior contagem para um certo par ordenado  $(\theta_i, \rho_i)$  representa uma reta no espaço da imagem com quantidade de pixels correspondente à contagem citada.

É evidente que o ruído presente na imagem gera no espaço de Hough outros pontos com distintas contagens, sem no entanto necessariamente representar um segmento de reta no espaço da imagem. Nos interessou saber qual seria a média destes valores, de forma que para o espaço de Hough de um fragmento calculamos a média das contagens. Chamamos convenientemente esta média de *ruído*. De forma complementar, o *signal* detectado naquele fragmento de imagem corresponde ao ponto de coordenadas  $(\theta_i, \rho_i)$  de maior contagem, obtido pela Transformada de Hough. Com estas duas medidas foi possível estabelecer uma relação entre a contagem do ponto correspondente a um segmento de reta detectado (*signal*) e a média de todos os outros pontos com contagens menores (*ruído*), obtendo uma relação *signal-ruído* para o espaço de Hough de cada fragmento. Esta relação possibilitou a avaliação de quanto o *signal* (segmento de linha de campo) detectado naquele fragmento de imagem é mais brilhante do que o *ruído* (fundo da imagem). A figura 4.6 ilustra esta idéia.



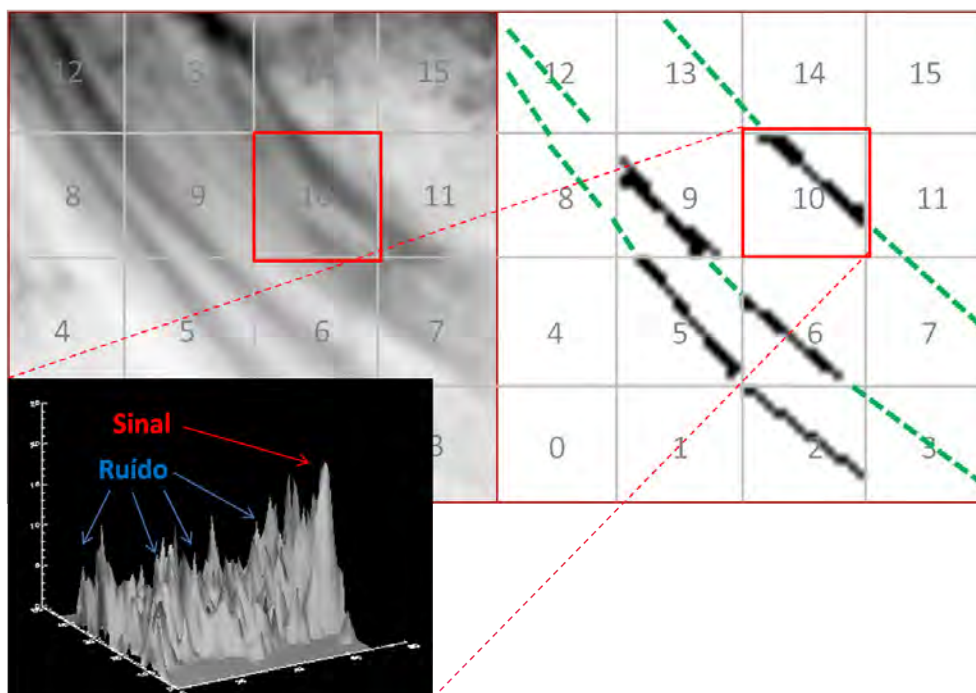


Figura 4.6 - Observamos no canto inferior esquerdo o espaço de Hough do fragmento 10 de uma imagem hipotética. Os picos representam diferentes contagens de "votos" no espaço de Hough. Notamos que o segmento de reta detectado na imagem corresponde a um ponto de coordenadas  $(\theta_i, \rho_i)$  de maior contagem no espaço de Hough, em vermelho, o que passamos a considerar como o *sinal*. O *ruído* (em azul) por sua vez corresponde aos valores menores do que o valor máximo. A média destes valores foi quantificada como o valor do *ruído* no fragmento analisado.

A partir desta idéia desenvolvemos um algoritmo que para cada fragmento da imagem, a partir dos valores de contagens fornecidos pelo espaço de Hough, obtém o valor da maior contagem (*sinal*) e calcula a média e desvio-padrão dos outros pares ordenados (*ruído*). O algoritmo consolida estes dados para toda a imagem, calculando a média global do *sinal* ( $s_\mu$ ), o *ruído* médio ( $n_\mu$ ) e o desvio-padrão médio do *ruído*. Geramos um gráfico com estes valores e verificamos que para a região ativa processada, as linhas de campo detectadas (*sinal*) estão acima de  $3n_\mu$  do *ruído* da imagem, resultado apresentado na figura 4.7.

Ao analisar estes resultados notamos que de fato a Transformada de Hough pôde nos fornecer a informação de que os segmentos de reta detectados correspondem **efetivamente** aos segmentos mais brilhantes, correspondendo aos fragmentos de linhas de campo magnético presentes nas imagens. Pudemos utilizar esta informação para obter melhores ajustes nos parâmetros do algoritmo, obtendo os valores aqui apresentados. A fim de obter uma visualização em duas dimensões do *sinal* detectado

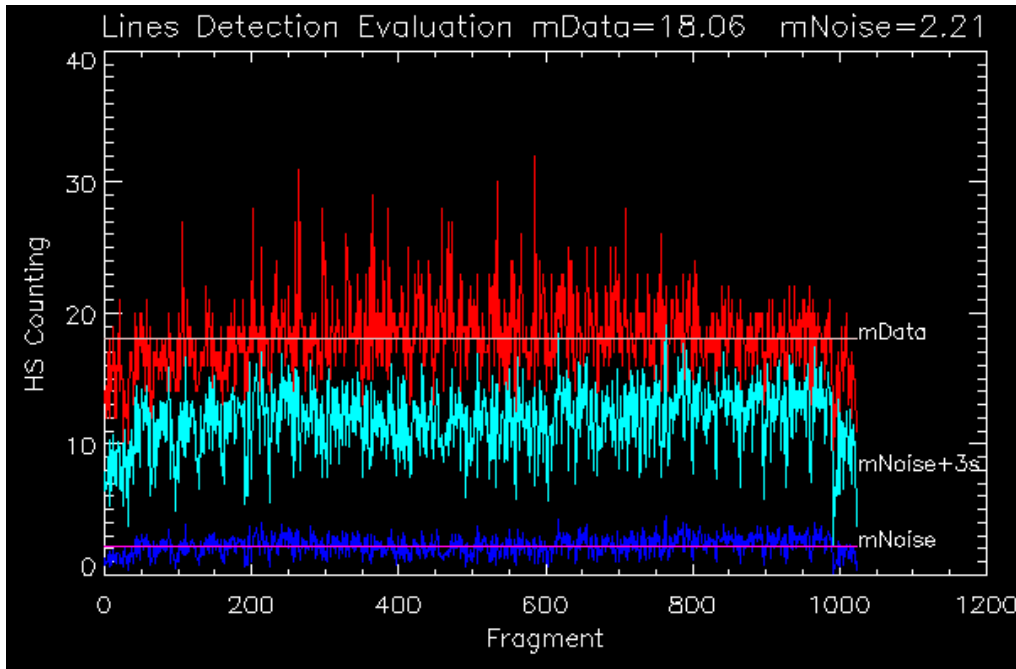


Figura 4.7 - Resultado da análise sinal-ruído para a imagem obtida no ultravioleta extremo do evento "Bastille Day Flare". Verificamos que o sinal (vermelho) apresentou média  $s_{1\mu} = 18,06$  enquanto que o ruído (azul escuro) médio foi de  $n_{1\mu} = 2,21$  em unidades de contagem no espaço de Hough. Para toda a imagem o sinal detectado permaneceu acima de  $3n_{1\mu}$  do ruído.

pelo nosso algoritmo, reorganizamos os dados que deram origem ao sinal (valores apresentados em vermelho no gráfico da figura 4.7) em uma matriz de fragmentos, obtendo um mapa do sinal detectado, onde em última instância, as regiões mais claras correspondem às regiões onde as linhas de campo apresentaram maior brilho em relação ao ruído, destacando-se deste. Este mapa pode ser observado na figura 4.8.

No estudo da região ativa apresentada nesta aplicação utilizamos um total de 25 imagens obtidas pelo satélite TRACE para instantes sequenciais para gerar um filme. Efetuamos todo o processamento e avaliação do método para cada uma das imagens, verificando que em todas elas o sinal médio permaneceu sempre acima de  $3n_{1\mu}$  do ruído médio.

#### 4.2.2 Observação de 19 de maio de 1998

A segunda imagem que iremos analisar neste trabalho foi obtida pelo satélite TRACE em 19/05/1998 22:27:15 UT, e diferentemente da imagem anterior, apresenta uma estrutura magnética quase com características dipolares, com linha alongadas e de

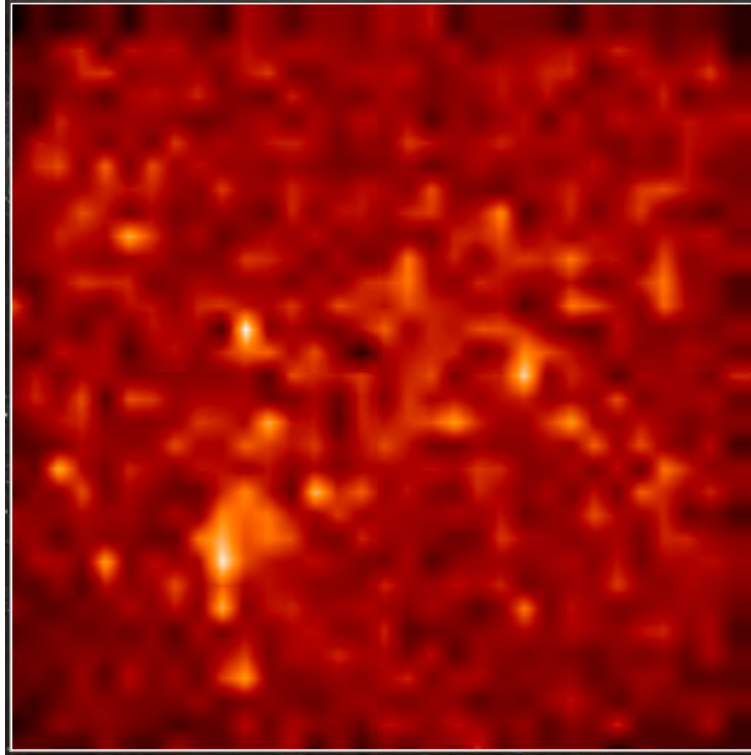


Figura 4.8 - Mapa do sinal detectado pelo algoritmo que implementa nossa metodologia. As regiões mais claras correspondem às maiores contagens no espaço de Hough, valores associados às linhas detectadas.

baixa curvatura. O nível de ruído da imagem original também é menor do que o da imagem anterior. Para o processamento desta imagem utilizamos os parâmetros listados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados na imagem de 19/05/1998 22:27:15 UT.

#	Parâmetro	Valor
1	imgEUV	tri19980519.2200-0124.fits
2	pp-mode	UMASK-MED
3	pp-med	5
4	pp-umask	9
5	strous-dir	[1,1,1,1]
6	strous-mode	Algoritmo 2 (AVG)
7	N-for-2ToN-Fragments	5 (tamanho $2^5 = 32$ )
8	iMinQtPixelPerLinSeg	10
9	iConnectionWindowSize	11
10	iMinQtFrgsInExtractedLine	3
11	rTheta	30



A variação de alguns parâmetros em comparação com aqueles utilizados na imagem anterior, listados na tabela 4.6 se devem às características da própria imagem de entrada. Podemos notar que os parâmetros que sofreram alteração foram aqueles que controlam o tamanho mínimo dos segmentos de reta detectados pela Transformada de Hough e o tamanho da área de conexão  $dL$ . Os valores atribuídos a estes parâmetros foram aumentados, o que faz sentido já que a estrutura de linhas de campo presente nesta imagem é composta em sua maioria de linhas alongadas e com baixa curvatura.

Com os parâmetros listados na tabela 4.7 obtivemos os resultados observados na figura 4.9, onde vemos a imagem original obtida pelo instrumento TRACE (1), sua versão negativa (2), a imagem pré-processada (3) ainda com uma certa quantidade de ruído na região das linhas de campo, a imagem segmentada pelo algoritmo de Strous (4), a imagem recomposta após a fragmentação e aplicação da Transformada de Hough em cada fragmento (5) e finalmente a imagem das linhas de campo detectadas (6). É possível observar imediatamente que os resultados obtidos com esta imagem foram melhores do que aqueles obtidos com a imagem anterior. Os metadados desta imagem foram obtidos de forma que a quantidade de linhas detectadas na imagem  $N_L = 49$ , o comprimento em pixels da maior e da menor linha respectivamente  $L_{max} = 160$  e  $L_{min} = 2$ , o comprimento médio das linhas  $\bar{x}_L = 63$  e o desvio-padrão do comprimento das linhas  $\sigma_L = 34$ , todos em unidades de pixels.

É possível verificar na figura 4.10 que de fato as linhas de campo detectadas se ajustam às linhas de campo da imagem original, apesar das linhas detectadas constituírem pequena quantidade quando comparadas com as linhas de campo na imagem original. A quantidade de linhas retornadas é bastante dependente dos parâmetros do algoritmo, e nesta aplicação estamos retornando linhas geradas a partir de 3 fragmentos ou mais.

Finalmente para esta imagem geramos também uma comparação entre as linhas detectadas e o magnetograma. Nesta aplicação o parâmetro 4 da tabela 4.7 também foi alterado de 9 para 11. Podemos verificar que as linhas detectadas apontam para as regiões das polaridades clara e escura do magnetograma na figura 4.11.

Para esta aplicação realizamos a mesma análise sinal-ruído apresentada na aplicação anterior. Verificamos que também para a região ativa estudada o método detectou os segmentos de retas mais brilhantes em cada fragmento, correspondendo aos fragmentos de linhas de campo mais brilhantes em contraste com o ruído de fundo, com sinal médio de  $s_{2\mu} = 19,84$  e ruído médio de  $n_{2\mu} = 1,94$ , conforme observamos na

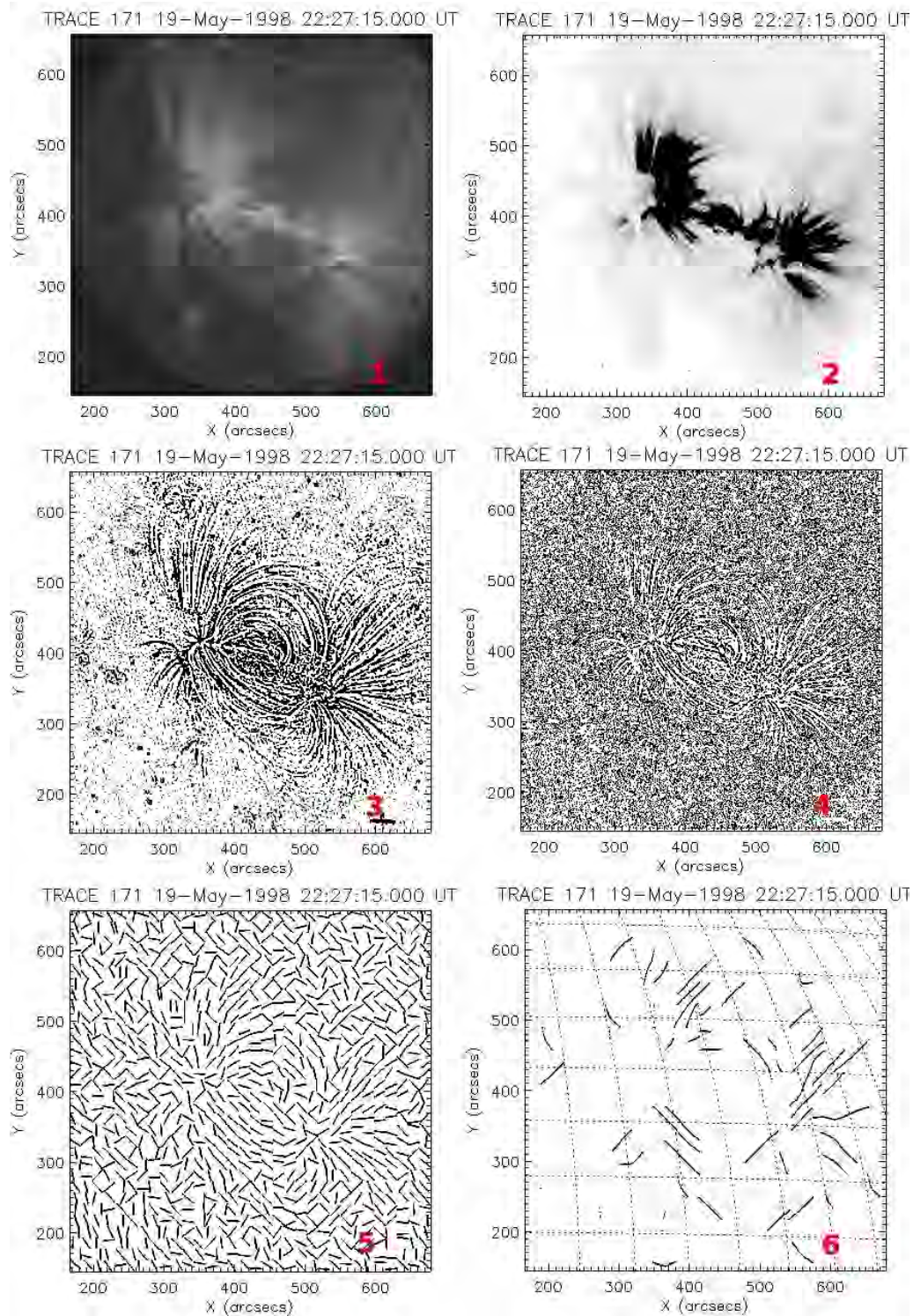


Figura 4.9 - Extração de características de uma imagem obtida pelo instrumento TRACE no ultravioleta extremo em 19/05/1998 22:27:15 UT. A partir do canto superior esquerdo, a imagem original (1) e sua versão negativa em 2. Na imagem 3 vemos o resultado do pré-processamento (seção 3.1), a imagem 4 mostra a imagem segmentada pela Transformada de Strouss (seção 3.2), na imagem 5 temos o resultado da aplicação da Transformada de Hough após a fragmentação da imagem, e finalmente a imagem 6 mostra as linhas detectadas e interpoladas.

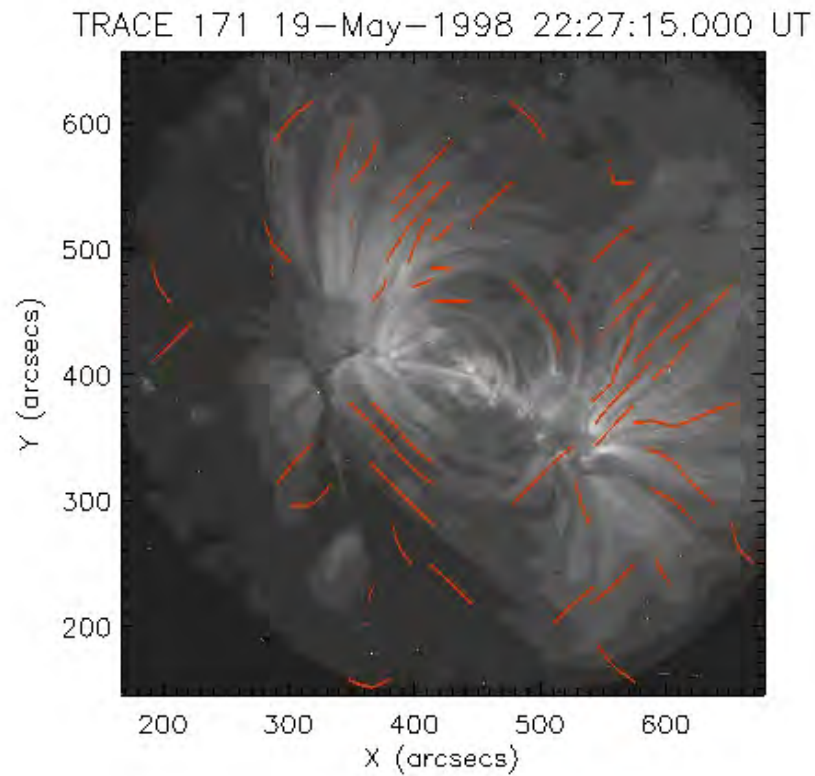


Figura 4.10 - Imagem original TRACE obtida em 19/05/1998 22:27:15 UT sobreposta pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI.

figura 4.12. Neste caso o sinal médio também permaneceu acima de  $3n_{2\mu}$ .

Como na aplicação anterior, para esta região ativa também geramos um mapa do sinal detectado, reorganizando os dados na forma de uma matriz, conforme podemos observar na figura 4.13.

Para este evento geramos um filme com 60 imagens obtidas pelo satélite TRACE em instantes sequenciais. Processamos e avaliamos todas as imagens, verificando que o sinal médio sempre permaneceu acima de  $3n_{2\mu}$  do ruído médio.

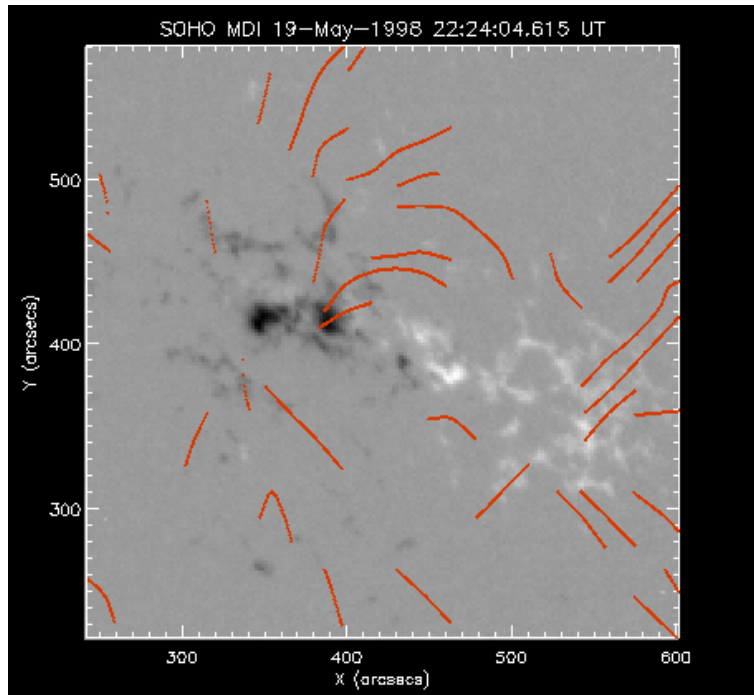


Figura 4.11 - Magnetograma obtido pelo instrumento MDI/SOHO em 19/05/1998 22:24:04 UT sobreposto pelo resultado do algoritmo de extração de características do método HTFI.

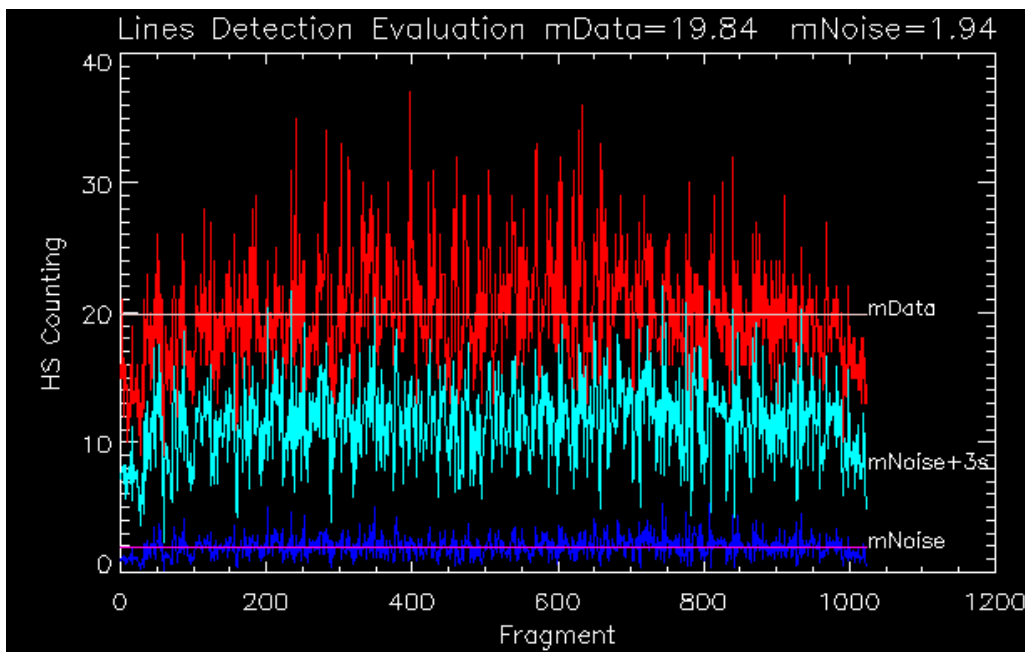


Figura 4.12 - Resultado da análise sinal-ruído para a imagem obtida no ultravioleta extremo do evento de 19/05/1998 22:27:15 UT. O sinal médio (vermelho) apresentou valor de  $s_{2\mu} = 19,84$  enquanto que o ruído (azul escuro) médio foi de  $n_{2\mu} = 1,94$  em unidades de contagem no espaço de Hough. O sinal detectado permaneceu acima de  $3n_{2\mu}$  do ruído.



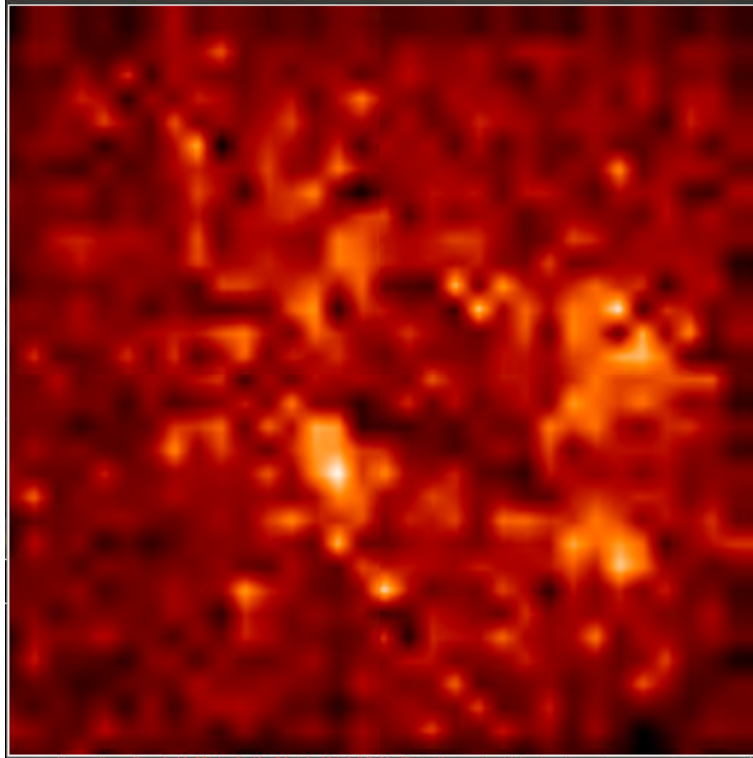


Figura 4.13 - Mapa do sinal detectado pelo algoritmo que implementa nossa metodologia. As regiões mais claras correspondem às maiores contagens no espaço de Hough, valores associadas às linhas detectadas.

### 4.3 Sobre o código desenvolvido e utilizado nas aplicações

Em nossa pesquisa buscamos produzir um código capaz de implementar a metodologia desenvolvida, de forma que o mesmo pudesse vir a ser utilizado pela comunidade de física solar. Desenvolvemos nosso código em linguagem IDL para manter a conveniência e padronização do ambiente computacional utilizado pelas comunidades de física solar, mas a implementação poderia ser realizada em outras linguagens de programação de alto nível, como C, C++ ou Java. Para ganho de performance e redução do custo computacional, é possível ainda desenvolver-se uma arquitetura de codificação baseada em GPU/CUDA.

Nosso código está organizado de forma modular, onde cada etapa de processamento foi escrita em funções separadas, de forma que as funções podem ser combinadas de diferentes formas em diferentes programas chamadores. Um exemplo de trecho de código que realiza a chamada do algoritmo de Strous é

```
; -- EUV image process (preprocessing, segmentation and FHT)
print, ' -----'
```

```

print, ' Preprocessing and Strous'
...
case strous-mode of
'MAX' : strous-img = strous-v1(pproc-euv, strous-dir, /MAX-VAL)
'AVG' : strous-img = strous-v1(pproc-euv, strous-dir, /AVG-VAL)
endcase

```

onde a função que realiza o processamento da imagem utilizando o algoritmo de Strous é `strous-v1`, que recebe como parâmetros a imagem a ser processada (`pproc-euv`), o vetor indicando a direção da vizinhança a ser considerada (`strous-dir`) e a variação do algoritmo (`/MAX-VAL` ou `/AVG-VAL`). Os parâmetros do algoritmo são inseridos diretamente no código-fonte, e neste exemplo foram utilizados os valores apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados para gerar as imagens de 4.14 a 4.22.

#	Parâmetro	Valor
1	imgEUV	tri19980519.2200-0124.fits
2	pp-mode	MED-UMASK
3	pp-med	3
4	pp-umask	17
5	strous-dir	[1,1,1,1]
6	strous-mode	Algoritmo 2 (AVG)
7	N-for-2ToN-Fragments	5 (tamanho $2^5 = 32$ )
8	iMinQtPixelPerLinSeg	10
9	iConnectionWindowSize	10
10	iMinQtFragInExtractedLine	2
11	rTheta	30

As figuras a seguir apresentam a sequência de processamento para uma imagem contendo uma estrutura de linhas de campo. A tela inicial do programa em IDL que implementa nosso algoritmo pode ser observada na figura 4.14. Inicialmente o algoritmo mostra o magnetograma do disco solar destacando a região ativa que será processada (figura 4.15). Na imagem seguinte é exibida uma ampliação desta região ativa (figura 4.16). A seguir o algoritmo apresenta a imagem obtida no ultravioleta extremo que corresponde à mesma região ativa apresentada na imagem anterior (figura 4.17). Esta imagem EUV será processada, detectando-se automaticamente as linhas de campo da mesma. Na imagem seguinte o algoritmo mostra a imagem EUV pré-processada (figura 4.18), e na sequência o resultado da fragmentação e o

processamento pela Transformada de Hough (figura 4.19). Para visualizar com maior detalhe e verificar que os segmentos de reta de cada fragmento estão correlacionados com as manchas solares no magnetograma, a imagem seguinte mostra o resultado da fragmentação e Transformada de Hough sobrepostos ao magnetograma (figura 4.20). Na imagem seguinte podemos ver o resultado da detecção de linhas sobrepostas ao magnetograma (figura 4.21), e ao final o resultado da interpolação dos pontos centrais de cada segmento de reta de cada fragmento, formando a estrutura de linhas detectadas, também sobrepostas ao magnetograma (figura 4.22). A sequência de imagens resultante do processamento com nosso código pode ser observada a seguir.

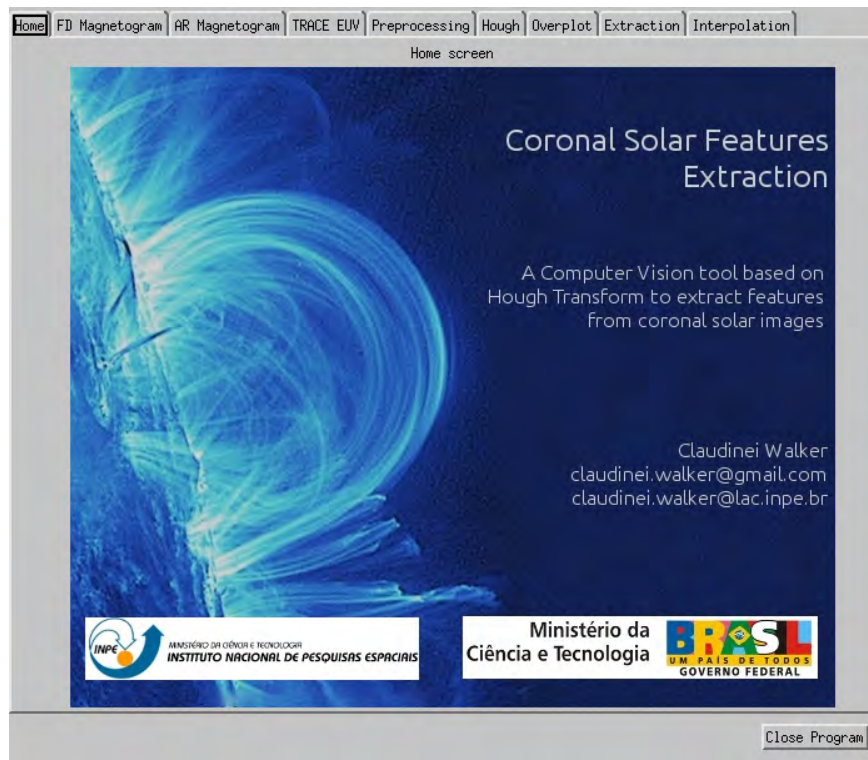


Figura 4.14 - Tela inicial da aplicação desenvolvida em IDL onde o método HTFI foi implementado.

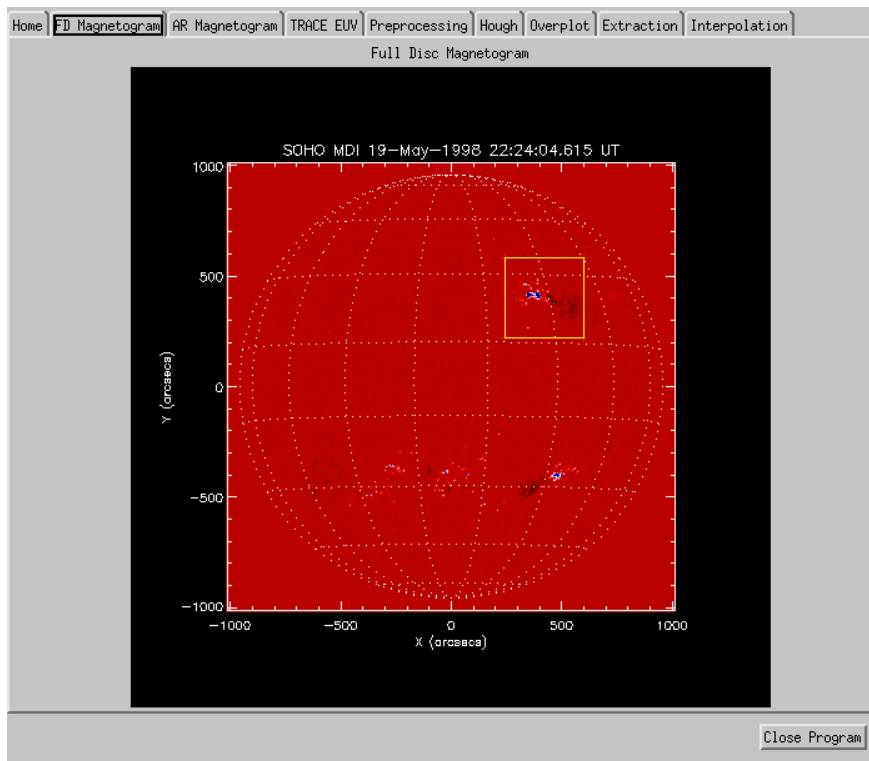


Figura 4.15 - Magnetograma do disco solar, destacando a região ativa que será processada.

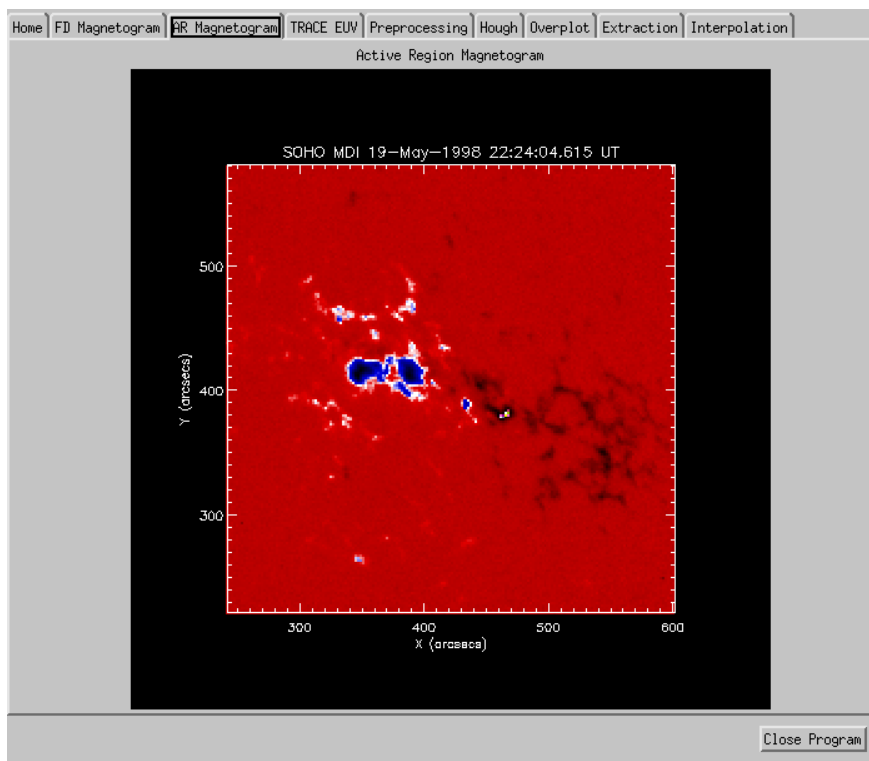


Figura 4.16 - Ampliação da região ativa cuja imagem no EUV da mesma região será processada.



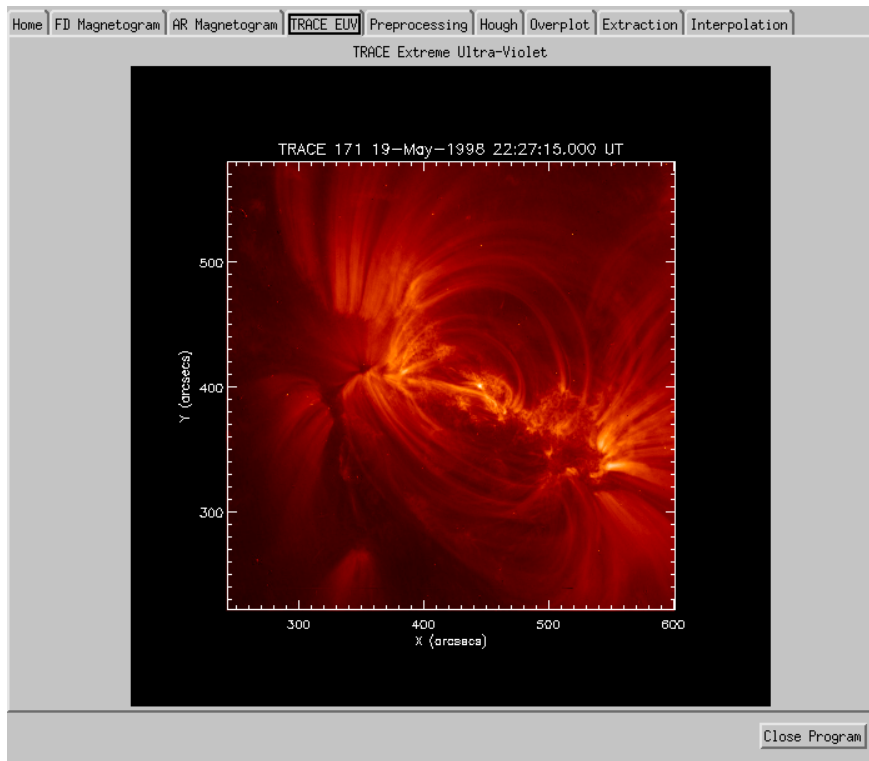


Figura 4.17 - Imagem no ultravioleta extremo mostrando a estrutura de linhas de campo.

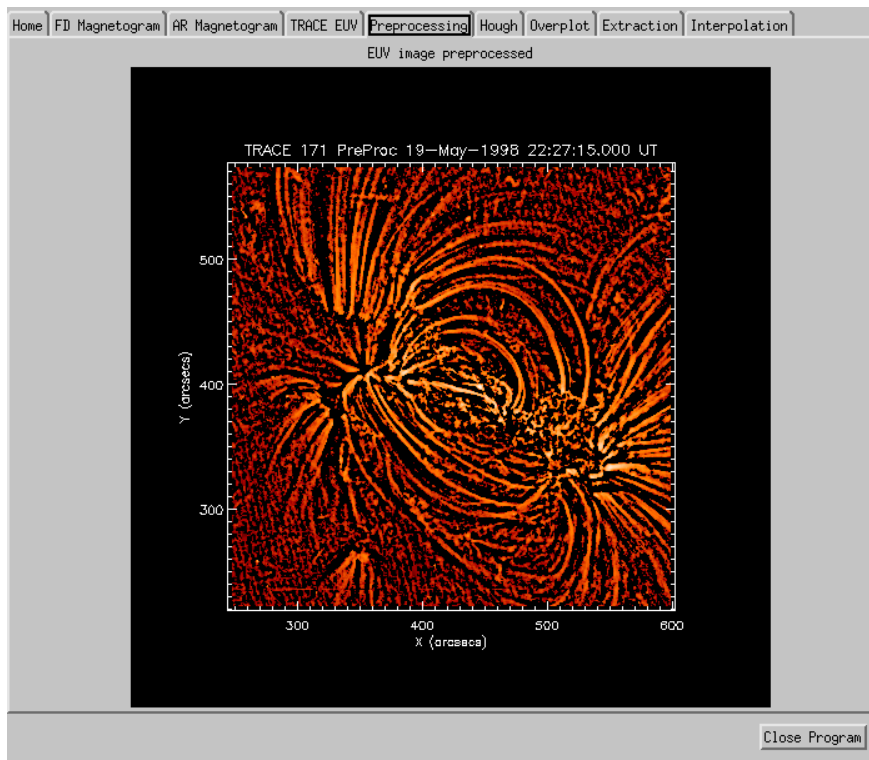


Figura 4.18 - Imagem anterior pré-processada pelo algoritmo para destacar as linhas de campo.

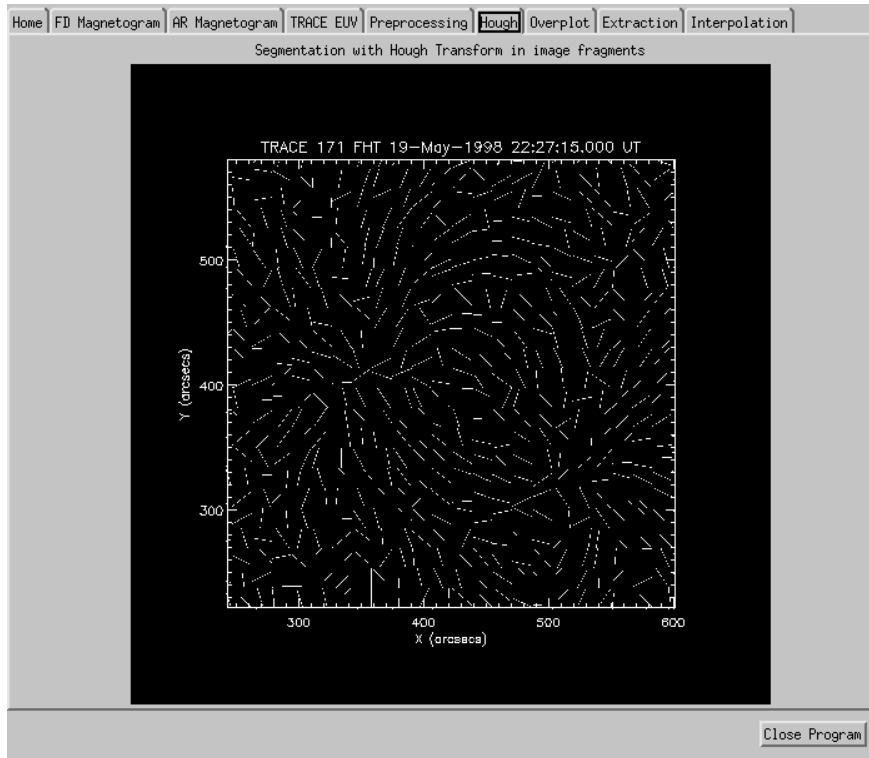


Figura 4.19 - Resultado da fragmentação da imagem e aplicação da Transformada de Hough em cada fragmento.

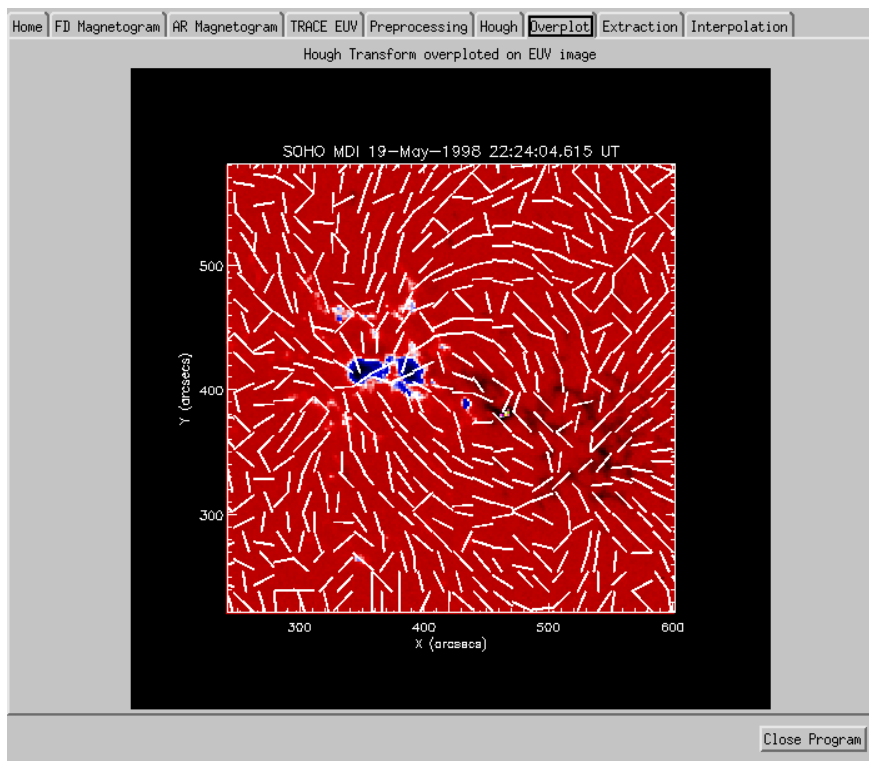


Figura 4.20 - Imagem anterior sobreposta ao magnetograma, mostrando que há correlação entre os segmentos de retas detectados pela Transformada de Hough e as machas solares no magnetograma.

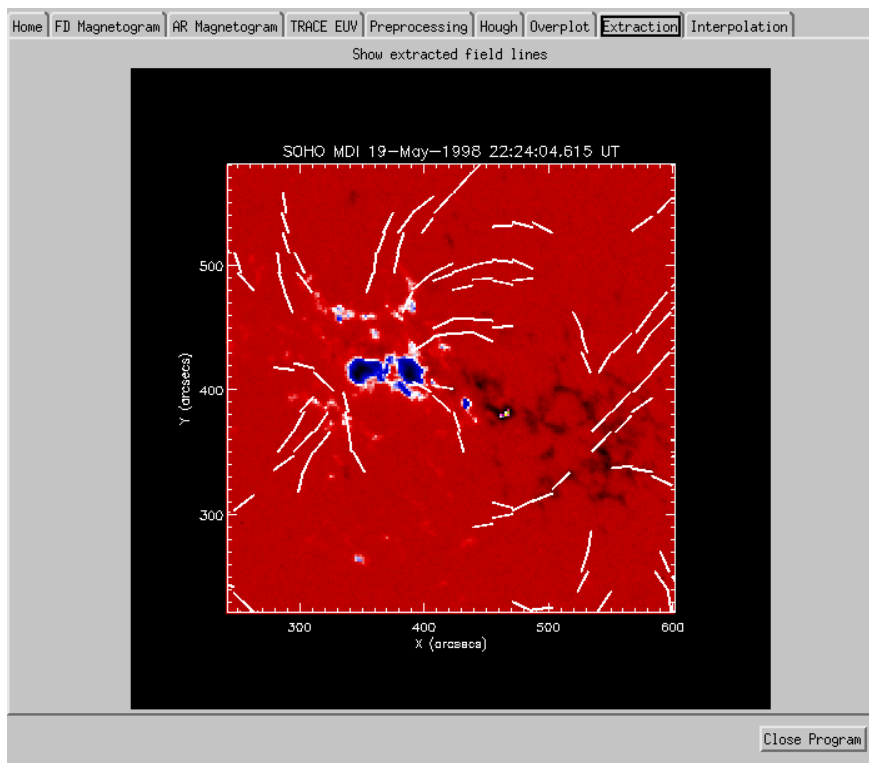


Figura 4.21 - Resultado da extração das linhas após a interconexão dos fragmentos detectados.

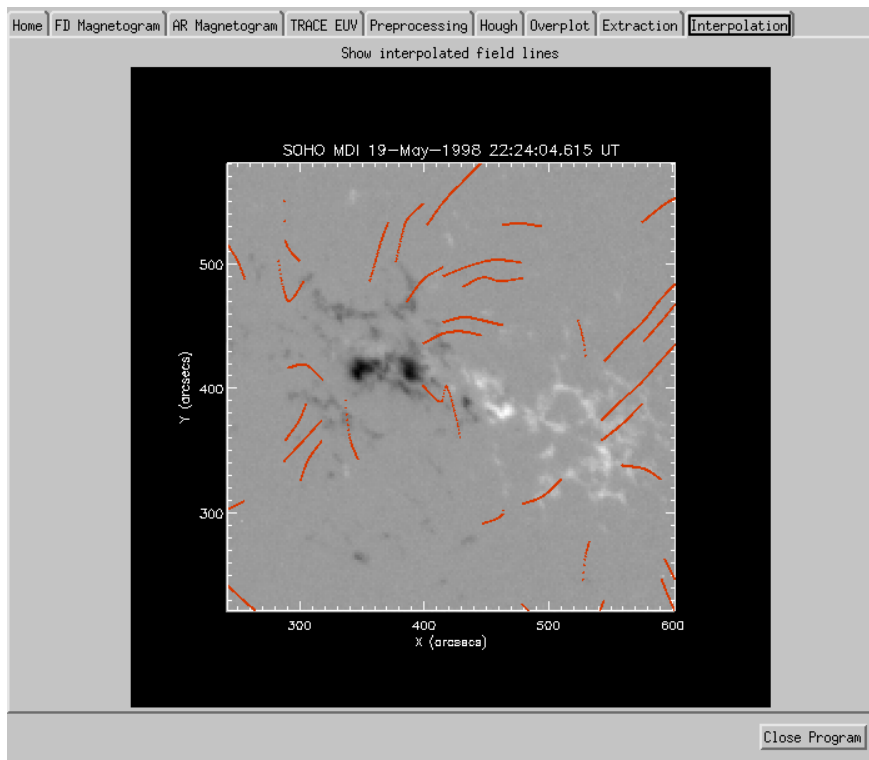


Figura 4.22 - Resultado final da detecção automática de linhas de campo.



## 5 CONCLUSÃO

Vivemos atualmente em uma sociedade cuja dependência tecnológica é algo sem precedentes. Toda cadeia de bens e serviços está de alguma forma associada a infraestruturas de fornecimento de energia elétrica, de forma que eventuais interrupções, mesmo que breves, dão uma demonstração do quão dependentes somos deste serviço. Esta questão tem nível de importância tão alto que é comum qualquer governo incluir os serviços de fornecimento de energia em seus sistemas de defesa. Interrupções no fornecimento de energia por longo períodos de tempo teria consequências caóticas.

A abordagem não é diferente para as telecomunicações, já que a economia moderna está totalmente baseada em uma cadeia de eventos e informações que se conecta utilizando redes de telecomunicações. Podemos dizer sem sombra de dúvida que interromper, ou mesmo paralizar por curto período de tempo os serviços de telecomunicações de uma região significa, no mínimo, paralizar a economia daquela região.

Estes são apenas dois de muitos pontos que poderiam ser destacados ao analisarmos as consequências de eventos solares extremos na Terra. Sabemos que o Sol apresenta um comportamento bastante dinâmico, e durante seus ciclos de aproximadamente 11 anos já se registrou a ocorrência de eventos que resultaram em diversos problemas. A comunidade científica está atenta a estas questões e busca desenvolver pesquisas que possam estender as fronteiras do conhecimento sobre o clima espacial e as relações Sol-Terra, aumentando o conhecimento sobre o tema e desenvolvendo produtos de informação que tragam benefício para a sociedade. Nossa pesquisa busca trilhar este caminho, propondo uma metodologia capaz de realizar a detecção automática das linhas de campo magnético presentes nas imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta extremo. Sob o aspecto da computação aplicada esta metodologia está inserida no contexto do estudo de sistemas de Visão Computacional, pois implementa técnicas capazes de detectar padrões em imagens e extrair descritores de dados a partir desta detecção. Sob o ponto de vista da física solar nosso trabalho se insere no contexto do clima espacial como metodologia capaz de contribuir para os estudos sobre previsões de eventos solares.

Em física solar é de fundamental importância conhecer a dinâmica dos campos magnéticos solares, pois supõe-se que os mesmos são responsáveis por uma série de fenômenos observados, como *flares* e ejeções de massa coronal. Nas últimas décadas surgiram várias metodologias voltadas para o estudo da dinâmica da magnetosfera solar. Com base nos magnetogramas obtidos na fotosfera, onde frequentemente ob-

servamos a presença de manchas, desenvolveu-se metodologias capazes de estimar a estrutura tridimensional e a intensidade dos campos magnéticos na coroa solar. Estas metodologias foram chamadas de "métodos de extrapolação de linhas de campo", e geram uma conjunto de linhas sintéticas a partir de um modelo físico. Os modelos de extrapolação de linhas foram especialmente úteis em uma época onde não havia a disponibilidade de imagens capazes de validar os modelos.

A partir da obtenção de imagens da coroa solar com o uso de instrumentação a bordo de satélites tornou-se factível a comparação dos resultados fornecidos pelos modelos com as imagens obtidas. Para que isto seja possível, é fundamental identificar nestas imagens os arcos magnéticos coronais. Esta identificação deve ser realizada por um conjunto de metodologias capazes de detectar automaticamente as linhas de campo nestas imagens, utilizando técnicas de reconhecimento de padrões estruturais orientadas especificamente para este tipo de aplicação.

Esta pesquisa desenvolveu uma metodologia capaz de realizar a detecção automática de linhas de campo megnético em imagens da coroa solar obtidas no ultravioleta extremo. Faremos a seguir uma breve síntese deste estudo, concluindo o trabalho com nossos comentários e sugerindo futuras evoluções.

## 5.1 Síntese

Nosso grande objetivo neste trabalho foi o de realizar a detecção automática de linhas de campo magnético em imagens da coroa solar. Para isto desenvolvemos uma metodologia baseada em técnicas de visão computacional capaz de obter descritores das linhas de campo a partir dos quais pudemos identificar as linhas. Nossa idéia principal foi a de, para uma dada linha de campo, obter um conjunto de pares ordenados representando pontos na imagem que corresponderiam às coordenadas de alguns pixels que fizessem parte da linha, de forma que ao interpolar estes pontos teríamos a linha de campo com as coordenadas de todos os pixels identificadas.

Para que fosse possível obter os conjuntos de pontos associados a cada linha de campo verificamos que a Transformada de Hough poderia ser utilizada, pois quando bem ajustada poderia retornar dados de retas detectadas em imagens ruidosas. Como em nossas imagens frequentemente existem linhas de campo alongadas, verificamos que ao subdividir a imagem em fragmentos, um pequeno trecho de linha de campo se aproxima de uma reta. Ao utilizar a Transformada de Hough em cada um dos fragmentos da imagem, obtivemos conjuntos de segmentos de retas. A partir daí procuramos identificar os segmentos de retas que se conectam analisando cada

fragmento e sua vizinhança. Com este procedimento foi possível identificar todos os fragmentos que compõem uma linha de campo. Obter as coordenadas do pixel central de cada segmento de reta em cada fragmento da linha nos deu os pontos para interpolação. Desenvolvemos um algoritmo que implementa toda esta sequência de tarefas, conforme já observamos na figura 3.1.

Iniciamos o pré-processamento das imagens obtidas no ultravioleta extremo utilizando um filtro de mediana, uma máscara de nitidez das imagens (máscara *unsharp*) e um filtro baseado na função raiz quadrada para o ajuste na intensidade dos pixels. Aplicados na imagem original, foi possível obter como resultado uma imagem com melhor contraste e destaque dos arcos coronais, onde também o ruído gerado por pontos claros e escuros (*salt and pepper*) foi sensivelmente reduzido.

Realizamos a segmentação das imagens em duas partes. Inicialmente procuramos destacar as linhas de campo utilizando uma técnica baseada no gradiente de brilho dos pixels dos arcos coronais. O algoritmo de Strous destaca as linhas de campo, porém apresenta o inconveniente de aumentar a quantidade de ruído na imagem, o que exige a realização de um ciclo de ajustes nos parâmetros e testes. Para efetivamente obter dados a respeito das linhas de campo na imagem utilizamos a Transformada de Hough, técnica computacional muito utilizada em reconhecimento de padrões que identifica retas em imagens ruidosas. Fragmentamos nossa imagem segmentada pelo algoritmo de Strous em pequenas partes e aplicamos a Transformada de Hough em cada uma delas. Ao final do processamento o algoritmo reconstruiu toda a imagem. Com isso foi possível destacar uma certa quantidade de segmentos de retas de linhas de campo, no entanto nesta etapa os segmentos de retas ainda estão desconectados. Desenvolvemos um algoritmo de sequenciamento das linhas de campo baseado no algoritmo de busca em grafos  $A^*$ , utilizando critérios especiais para estabelecer a conexão entre segmentos de retas em fragmentos contíguos, gerando ao final do processamento conjuntos de fragmentos pertencentes a linhas de campo. A partir daí calculamos as coordenadas do pixel central de cada segmento de linha, interpolando estes pontos e obtendo finalmente linhas de campo com todos os pixels identificados.

## 5.2 Comentários finais e trabalhos futuros

Desenvolvemos nosso estudo desde o início de forma que o mesmo fosse orientado a uma abordagem aplicada, com a perspectiva e expectativa de fornecer uma nova contribuição para o estudo dos campos magnéticos solares. Procuramos nos manter focados na detecção das linhas de campo magnético na coroa solar, e para isto estabelecemos alguns objetivos e metas, listados na seção 1.2.

O primeiro objetivo que buscamos atingir era o de extrair dados estruturais das linhas de campo magnético da coroa solar. Verificamos através dos testes realizados no capítulo 4 que as imagens apresentadas foram processadas com nosso algoritmo gerando um conjunto de descritores para as linhas de campo. Neste conjunto de descritores armazenamos vetores de dados com as coordenadas das linhas de campo interpoladas, resultado final do processo de detecção das linhas. Com estes vetores de dados é possível entre outras tarefas, por exemplo, reproduzir computacionalmente a estrutura magnética detectada.

O segundo objetivo do nosso trabalho era o de realizar a avaliação da detecção de linhas, comparando as linhas extraídas com a imagem original. Conforme já comentamos, a literatura da área mostra que o estabelecimento de uma métrica obtida de forma manual através da avaliação por inspeção visual sempre é necessária, já que não faz sentido comparar as linhas detectadas automaticamente por um método com linhas detectadas automaticamente por outro método, sem termos uma real medida de quão bom é o conjunto de dados analisados frente ao outro conjunto. Alguns grupos utilizam-se do traçado manual das linhas e da comparação daquelas obtidas automaticamente com as linhas obtidas manualmente.

Em nossa pesquisa nos concentramos no desenvolvimento e implementação da metodologia, optando pela inspeção visual na comparação entre as linhas detectadas e aquelas presentes na imagem original. Verificamos que algumas linhas se ajustam bem àquelas encontradas na imagem original, mas notamos ainda a presença de linhas detectadas em regiões da imagem onde originalmente há apenas o fundo da imagem. Isto se deve ao fato de que a metodologia como um todo é muito sensível à presença de ruído nas imagens. Isto ocorre porquê o algoritmo de Strous, utilizado na etapa de pré-segmentação é um algoritmo baseado em gradientes, e apesar da imagem já ter sido pré-processada nesta etapa, ainda temos casos onde a relação sinal-ruído é baixa, fazendo com que a Transformada de Hough obtenha segmentos de reta onde na verdade há apenas pixels que fazem parte do ruído na imagem. Nestes casos pode haver a geração de "falsos positivos", a detecção de linhas de campo onde na verdade não existem linhas correspondentes na imagem processada. Apesar disto, verificamos que a metodologia efetivamente faz a detecção de linhas de campo na imagem quando comparamos qualitativamente as linhas extraídas com a imagem TRACE original.

O terceiro objetivo vai na mesma linha do anterior, mas aqui nos interessa verificar se as estruturas das linhas detectadas estão em conformidade com as manchas solares



presentes nos magnetogramas. Pela mesma razão citada anteriormente, optamos também aqui pela abordagem de inspeção visual, verificando que as linhas detectadas de fato surgem em uma mancha solar e se encaminham em direção à mancha de polaridade oposta. Isto mostra que nosso algoritmo efetuou o sequenciamento dos segmentos de retas dos fragmentos contíguos de forma correta, seguindo a direção destes segmentos, que na verdade corresponde à direção dos segmentos de linhas de campo.

A fim de validar quantitativamente os resultados obtidos, desenvolvemos uma metodologia de avaliação dos resultados baseada nos dados fornecidos pela Transformada de Hough. Utilizamos os dados obtidos no espaço de Hough de cada fragmento da imagem para gerar uma relação sinal-ruído que nos indica quão brilhante foi o segmento de reta detectado naquele fragmento. Como um segmento de reta de um fragmento está associado a um segmento de linha de campo magnético na imagem original, já que a mesma foi fragmentada, em última instância a relação sinal-ruído obtida nos indica quanto as linhas detectadas foram mais brilhantes que o ruído de fundo. Para o espaço de Hough de um dado fragmento da imagem obtivemos a contagem das linhas detectadas, que chamamos de sinal, e a média da contagem das outras linhas não detectadas, que chamamos de ruído. Calculamos também o desvio-padrão do ruído naquele fragmento. Consolidamos os dados de todos os fragmento da imagem, gerando um gráfico que apresenta o nível do sinal detectado na imagem, a média do sinal ( $s_\mu$ ), o ruído na imagem, o ruído médio ( $n_\mu$ ) e o valor de  $3n_\mu$  em cada fragmento (figuras 4.7 e 4.12). Verificamos que o sinal detectado sempre permaneceu acima de  $3n_\mu$  do ruído, o que nos mostra que a Transformada de Hough detectou **efetivamente** as linhas de campo na imagem, destacando-as do ruído de fundo. Geramos também mapas de brilho do sinal detectado, mostrando as regiões da imagem onde o sinal detectado foi maior.

Para o primeiro teste, realizado em uma imagem do evento "*Bastille Day Flare*" de 14/07/2000, obtivemos o sinal detectado com uma média de  $s_{1\mu} = 18,06$  e ruído médio  $n_{1\mu} = 2,21$ . Para esta região ativa imageada geramos um filme processando 25 imagens, onde verificamos em todas elas que o sinal sempre esteve acima de  $3n_{1\mu}$ .

Para o segundo teste, onde utilizamos uma imagem de 19/05/1998, obtivemos o sinal detectado com uma média de  $s_{2\mu} = 19,84$  e ruído médio  $n_{2\mu} = 1,94$ . Geramos um filme utilizando 60 imagens da mesma região ativa onde também verificamos para todas elas que o sinal sempre este acima de  $3n_{2\mu}$ .

Nossa pesquisa desenvolveu uma metodologia utilizando uma visão inovadora, não

encontrada na literatura em outros grupos que realizam estudos semelhantes. Trata-se de uma primeira abordagem para a solução de um problema complexo, onde julgamos ser mais importante desenvolver um conjunto completo de técnicas e ferramentas para produzir um método que na íntegra pudesse fornecer uma primeira solução do problema da detecção automática das linhas de campo magnético do que refinar uma única etapa do processamento, sem no entanto completá-lo. Isto permitirá que o estudo admita continuidade, possibilitando uma série de extensões futuras.

No estágio de segmentação das imagens estamos utilizando o algoritmo de Strous para destacar a região central das linhas de campo magnético. Baseado no conceito de gradientes, apesar de efetivamente destacar a região mais brilhante das linhas de campo, o algoritmo de Strous é bastante sensível ao ruído presente na imagem. Uma futura melhoria no método poderia considerar uma pré-avaliação da imagem antes da aplicação do algoritmo de Strous, que seria executado apenas em regiões da imagem onde houvesse maior probabilidade da ocorrência de linhas de campo. O resultado do processamento seria então uma imagem com as linhas de campo destacadas, mas com sensível redução no ruído.

No estágio de extração das características das linhas de campo utilizamos a Transformada de Hough para aproximar segmentos de retas para segmentos de linhas de campo em cada fragmento da imagem. Vimos em nossa implementação que optamos por recuperar do espaço de Hough apenas as coordenadas cuja contagem foi a mais alta, representando uma reta com mais pixels no espaço da imagem. Há situações onde temos mais de um ponto no espaço de Hough, representando mais de uma reta no espaço da imagem.

Vimos que uma linha de campo não brilha com a mesma intensidade em toda a sua extensão ao mesmo tempo, de forma que nas imagens obtidas no ultravioleta extremo é muito comum observarmos linhas de campo com os pés mais brilhantes e o topo mais escurecido, ou o contrário. Como tratamos nossas imagens de forma fragmentada, ocorre que em alguns casos fragmentos contíguos apresentam segmentos de linhas de campo com brilho diferente. Quando há mais de uma linha de campo nestes fragmentos, a Transformada de Hough recupera apenas um segmento de reta de uma linha em um fragmento, e no fragmento vizinho um segmento de reta de outra linha, já que estamos utilizando apenas uma reta por fragmento. Este efeito faz com que em algumas situações os segmentos de retas de fragmentos contíguos não estejam alinhados, impedindo a conexão pelo algoritmo de sequenciamento. Es-

tender o método para tratar mais de um segmento de reta por fragmento também poderia contribuir para a melhoria na etapa de conexão dos fragmentos, gerando uma quantidade maior de linhas de campo detectadas, e com maior qualidade.

Uma característica do nosso método é o fato de o mesmo ser bastante sensível aos parâmetros de entrada, como o tamanho da janela do filtro de mediana e da máscara de nitidez, ou a variação angular absoluta  $d\theta$  entre dois segmentos de retas de fragmentos contíguos. Notamos em nossos testes que na prática diferentes imagens demandam pequenas variações nos parâmetros para que melhores resultados possam ser obtidos. Uma extensão do trabalho poderia se dar na utilização de redes neurais artificiais (RNAs) para a realização de uma avaliação dinâmica dos parâmetros dependendo da imagem de entrada de forma que existisse algum automatismo na seleção dos parâmetros com o objetivo de obter melhores resultados. As RNAs também poderiam ser utilizadas no sequenciamento dos segmentos de retas e na complementação de linhas de campo desconectadas, orientando *splines* para isto.

Finalmente, uma interessante extensão deste trabalho se daria na comparação das linhas de campo detectadas pelo nosso método com aquelas geradas sinteticamente através de uma metodologia de extrapolação de linhas, como o *Linear Force-Free Field* (LFFF). Os métodos de extrapolação de linhas normalmente utilizam como um dos parâmetros de entrada o valor de  $\alpha$  que indica o quão torcidas estão as linhas de campo em uma região ativa. Este valor poderia ser atribuído às linhas de campo da imagem, agregando mais um descritor aos dados obtidos pelo método.

Nosso algoritmo foi desenvolvido em linguagem IDL gerando uma aplicação que pode ser executada em qualquer ambiente onde este *framework* esteja disponível. O código pode ser facilmente portado para outras linguagens de programação, e uma sugestão para futuros desenvolvimentos é sua conversão para a linguagem C/C++ a fim de melhorar o tempo de processamento. Neste aspecto observamos também que parte da implementação do nosso método pode ser feita utilizando as premissas da computação paralela, na medida que dividimos a imagem em fragmentos e cada um deles é processado sequencialmente, o que eventualmente poderia ser realizado de forma paralela. Para uma aplicação massiva onde grandes bases de imagens devam ser processadas talvez esta seria uma abordagem interessante.

É importante destacar que nosso método está preparado para trabalhar com imagens de diferentes dimensões e resoluções. Ao longo da nossa pesquisa utilizamos com imagens do instrumento TRACE e magnetogramas do MDI/SOHO pois os dados destas missões estão disponíveis, podendo ser utilizados pela comunidade científica.

Os dados gerados por nosso algoritmo podem ser utilizados para a geração de filmes (*movies*) para acompanhar a evolução temporal de uma região ativa, gerando dados para cada imagem do filme e possibilitando um tipo diferente de visualização do evento solar. Para os testes realizados no capítulo anterior geramos dois filmes mostrando a evolução da detecção de linhas de campo ao longo do tempo.

Concluimos assim este trabalho, destacando como principal aspecto o fato de estarmos recuperando as linhas reais da imagem, aquelas que brilham mais no ultravioleta extremo, conforme avaliado pela relação sinal-ruído obtida pelos dados fornecidos na Transformada de Hough. Estamos certos de que existem muitas possibilidades de extensão deste estudo, desde melhorias em cada estágio de processamento até mesmo na introdução de novas técnicas computacionais que visem melhorar os resultados finais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALISSANDRAKIS, C. E. On the computation of constant alpha force-free magnetic field. **Astronomy and Astrophysics**, v. 100, p. 197–200, jul. 1981. 123

AMARI, T.; ALY, J. J.; LUCIANI, J. F.; BOULMEZAOU, T. Z.; MIKIC, Z. Reconstructing the solar coronal magnetic field as a force-free magnetic field. **Solar Physics**, v. 174, p. 129–149, ago. 1997. 121

ASCHWANDEN, M. J. **Physics of the solar corona**: an introduction with problems and solutions. 2. ed. [S.l.]: Springer-Praxis Publishing, 2005. 16, 121, 122, 123

ASCHWANDEN, M. J.; LEE, J. K.; GARY, G. A.; SMITH, M.; INHESTER, B. Comparison of Five Numerical Codes for Automated Tracing of Coronal Loops. **Solar Physics**, v. 248, p. 359–377, abr. 2008. 32, 36, 83

BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer vision**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1982. Disponível em:  
<<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/BOOKS/BANDB/bandb.htm>>. 3

BENTLEY, R. D.; FREELAND, S. L. Solarsoft: an analysis environment for solar physics. In: A CROSSROADS FOR EUROPEAN SOLAR AND HELIOSPHERIC PHYSICS, 1998, Noordwijk, Netherlands. **A crossroads for european solar and heliospheric physics. recent achievements and future mission possibilities**. ESA, 1998. p. 225. Disponível em:  
<<http://esoads.eso.org/abs/1998ESASP.417..225B>>. Acesso em: 12 July 2011. 18, 27, 73

BRAY, R. J.; CRAM, L. E.; DURRANT, C.; LOUGHHEAD, R. E. **Plasma loops in the solar corona**. [S.l.]: Cambridge: University Press, 1991. 26

BREKKE, P.; FLECK, B.; GURMAN, J. B. Highlights from SOHO and other space missions. In: IAU SYMPOSIUM 203 - 24TH GENERAL ASSEMBLY OF THE IAU, Manchester, United Kingdom. **Recent Insights into the Physics of the Sun and Heliosphere**. [S.l.]: Astronomical Society of the Pacific, 2001. v. 203. 9

CHARBONNEAU, P.; CHRISTENSEN-DALSGAARD, J.; HENNING, R.; LARSEN, R. M.; SCHOU, J.; THOMPSON, M. J.; TOMCZYK, S. Helioseismic

constraints on the structure of the solar tachocline. **The Astrophysical Journal**, v. 527, p. 445–460, dez. 1999. 5, 118

DAVEY, A. R.; AMEZCUA, A.; BOGART, R.; HOURCLE, J.; Spencer, J.; Suarez Sola, I.; VSO Team. SDO data distribution and access with VSO. In: AAS MEETING, 216., 2010. **American Astronomical Society Meeting Abstracts #216**. [S.l.], 2010. (Bulletin of the American Astronomical Society, v. 41), p. 876. 14

DÉMOULIN, P. Recent theoretical and observational developments in magnetic helicity studies. **Advances in Space Research**, v. 39, p. 1674–1693, 2007. 123

DUDA, R. O.; HART, P. E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. **Commun. ACM**, ACM Press, New York, NY, USA, v. 15, n. 1, p. 11–15, 1972. ISSN 0001-0782. 50

DUDA, R. O.; HART, P. E. **Pattern classification and scene analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1973. 2

EXELIS, V. I. S. **Exelis Visual Information Solutions**. 2013. Disponível em: <http://www.exelisvis.com/language/en-us/productsservices/idl.aspx>. Acessado em 27/03/2013. 73

FASSHAUER, G. Hermite interpolation with radial basis functions on spheres. **Advances in Computational Mathematics**, Kluwer Academic Publishers, v. 10, n. 1, p. 81–96, 1999. ISSN 1019-7168. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A3A1018914229009>>. 66

FLECK, B.; DOMINGO, V.; POLAND, A. **The SOHO mission**. [S.l.]: Dordrecht Kluwer, 1995. 26

FORNACIARI, M.; SOTTARA, D.; PRATI, A.; MELLO, P.; CUCCHIARA, R. An evidential fusion architecture for people surveillance in wide open areas. In: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYBRID ARTIFICIAL INTELLIGENT SYSTEMS, 6., 2011, Berlin, Heidelberg. **Proceedings...** Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. (HAIS'11), p. 239–246. ISBN 978-3-642-21218-5. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2021442.2021475>>. 3

GALILEI, G.; SCHEINER, C.; REEVES, E.; HELDEN, A. van. **On sunspots**. University of Chicago Press, 2010. ISBN 9780226707167. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=-vz1-geXj8IC>>. 4

GALILEI, G.; WELSER, M.; MASCARDI, G. R. **Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti**: comprese in tre lettere scritte all'illvstrissimo signor marco velseri ... dal signor galileo galilei. Appresso Giacomo Mascardi, 1613. Disponível em:

<[http://books.google.com.br/books?id=jg\\_6ewEACAAJ](http://books.google.com.br/books?id=jg_6ewEACAAJ)>. 4

GARCIA, R. A.; TURCK-CHIEZE, S.; JIMENEZ-REYES, S. J.; BALLOT, J.; PALLE, P. L.; EFF-DARWICH, A.; MATHUR, S.; PROVOST, J. Tracking solar gravity modes: The dynamics of the solar core. **Science**, v. 316, n. 5831, p. 1591–1593, 2007. Disponível em:

<<http://www.sciencemag.org/content/316/5831/1591.abstract>>. 4

GARY, G. A. Linear force-free magnetic fields for solar extrapolation and interpretation. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 69, p. 323–348, fev. 1989. 123

GILL, C. D.; FLETCHER, L.; MARSHALL, S. Using active contours for semi-automated tracking of UV and EUV solar flare ribbons. **Solar Physics**, v. 262, p. 355–371, abr. 2010. 18

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001. ISBN 0201180758. 35, 36, 38, 42

HANDY, B. N.; ACTON, L. W.; KANKELBORG, C. C.; WOLFSON, C. J.; AKIN, D. J.; BRUNER, M. E.; CARAVALHO, R.; CATURA, R. C.; CHEVALIER, R.; DUNCAN, D. W.; EDWARDS, C. G.; FEINSTEIN, C. N.; FREELAND, S. L.; FRIEDLAENDER, F. M.; HOFFMANN, C. H.; HURLBURT, N. E.; JURCEVICH, B. K.; KATZ, N. L.; KELLY, G. A.; LEMEN, J. R.; LEVAY, M.; LINDGREN, R. W.; MATHUR, D. P.; MEYER, S. B.; MORRISON, S. J.; MORRISON, M. D.; NIGHINGALE, R. W.; POPE, T. P.; REHSE, R. A.; SCHRIJVER, C. J.; SHINE, R. A.; SHING, L.; STRONG, K. T.; TARBELL, T. D.; TITLE, A. M.; TORGERSON, D. D.; GOLUB, L.; BOOKBINDER, J. A.; CALDWELL, D.; CHEIMETS, P. N.; DAVIS, W. N.; DELUCA, E. E.; MCMULLEN, R. A.; WARREN, H. P.; AMATO, D.; FISHER, R.; MALDONADO, H.; PARKINSON, C. The transition region and coronal explorer. **Solar Physics**, v. 187, p. 229–260, jul. 1999. 27, 36, 76

HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. **IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics**, v. 4, n. 2, p. 100–107, 1968. 33, 62

HOUGH, P.; POWELL, B. A method for faster analysis of bubble chamber photographs. **Il Nuovo Cimento (1955-1965)**, Italian Physical Society, v. 18, p. 1184–1191, 1960. 10.1007/BF02733175. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02733175>>. 49

JACKSON, J. D. **Classical electrodynamics**. 3rd ed.. ed. New York, NY: Wiley, 1999. ISBN 9780471309321. Disponível em: <<http://cdsweb.cern.ch/record/490457>>. 118

JAHNE, B. **Digital image processing**. Springer, 2005. ISBN 9783540240358. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=qUeecNvfn0oC>>. 35, 36

JAIN, A. **Fundamentals of digital image processing**. Prentice Hall, 1989. (Prentice-Hall information and system sciences series). ISBN 9780133361650. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=mQNSAAAAMAAJ>>. 35

KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D. Snakes: active contour models. **International Journal of Computer Vision**, v. 1, n. 4, p. 321–331, 1988. 18, 32

KRAUSHAAR, W. L.; CLARK, G. W.; GARMIRE, G. P.; BORKEN, R.; HIGBIE, P.; LEONG, V.; THORSOS, T. High-energy cosmic gamma-ray observations from the OSO-3 satellite. **Astrophysical Journal**, v. 177, p. 341, nov. 1972. 26

LEE, J. K.; NEWMAN, T. S.; GARY, G. A. Oriented connectivity-based method for segmenting solar loops. **Pattern Recogn.**, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 39, n. 2, p. 246–259, 2006. ISSN 0031-3203. 16, 36

LOTHIAN, R. M.; BROWNING, P. K. Coronal magnetic field equilibrium with discrete flux sources. **Solar Physics**, v. 161, p. 289–316, nov. 1995. 29, 125

MAUNDER, E. W. Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902. **Royal Astronomical Society**, v. 64, p. 747–761, jun. 1904. 117

NAKAGAWA, Y.; RAADU, M. A. On practical representation of magnetic field. **Solar Physics**, v. 25, p. 127–135, jul. 1972. 13, 29, 121, 123, 124, 125

NEUKIRCH, T. On self-consistent three-dimensional analytic solutions of the magnetohydrostatic equations. **Astronomy and Astrophysics**, v. 301, p. 628–+, set. 1995. 29, 125



NEWKIRK, G.; ALTSCHULER, M. D.; HARVEY, J. Influence of magnetic fields on the structure of the solar corona. In: K. O. Kiepenheuer (Ed.). **Structure and Development of Solar Active Regions**. [S.l.], 1968. (IAU Symposium), p. 379–384. 29, 125

PARKER, E. N. Hydromagnetic Dynamo Models. **The Astrophysical Journal**, v. 122, p. 293–+, set. 1955. 117

PINTO, T. S. N. **Aplicação de campos magnéticos livres de força na explosão solar de 13 de dezembro de 2006**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010–02–25 2010. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2010/02.12.17.57>>. 29, 124

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. 2nd edition. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2003. 1

SCHMELZ, J. T.; BROWN, J. C. The sun: a laboratory for astrophysics. In: NATO ASIC, 373., 1992. **Proceedings...** 1992. Disponível em:  
<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1992sla...conf.....S>>. Acesso em: 10 July 2012. 117, 119

SEEHAFER, N. Determination of constant alpha force-free solar magnetic fields from magnetograph data. **Solar Physics**, v. 58, p. 215–223, jul. 1978. 123, 125

SELHORST, C. L.; COSTA, J. E. R.; SILVA, A. V. R. 3-D solar atmospheric model over active regions. In: EUROPEAN SOLAR PHYSICS MEETING, 11., 2005, Leuven, Belgium. **Proceedings...** [S.l.], 2005. (ESA Special Publication, v. 600), p. 9.1–9.5. 20, 29, 125

SILVA, C. W.; COSTA, J. E. R.; ROSA, R. R. A new approach for using the Hough transform to extract features from solar coronal images. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, PACIS, v. 3, n. 3, p. 59, 2012. ISSN 2177-8833. Disponível em:  
<<http://epacis.net/jcis/10.6062jcis.2012.03.03.0059.php>>. 34, 35

SILVA, C. W. da; COSTA, J. E. R.; ROSA, R. R. A computer vision approach for the features extraction of magnetic force field lines in coronal solar images. In: SIBGRAPI 2012 (XXV CONFERENCE ON GRAPHICS, PATTERNS AND IMAGES), 25., 2012, Ouro Preto, MG, Brazil. **Proceedings...** Ouro Preto, MG, Brazil: SBC - Sociedade Brasileira de Computação, 2012. p. 7–12. Disponível em:

<<http://www.decom.ufop.br/sibgrapi2012/index.php/call/wtd>>. Acesso em: 16 may 2013. 35

SOLARSOFT. **SSW keyword/tag definitions**. [S.l.]: IAU Working Group on International Data Access, 2005. Disponível em: [www.mssl.ucl.ac.uk/grid/iau/extra/solarsoft/ssw\\_standards.html](http://www.mssl.ucl.ac.uk/grid/iau/extra/solarsoft/ssw_standards.html). Acessado em 03/03/2013. 27

SPITZBART, A. A generalization of Hermite's interpolation formula. **The American Mathematical Monthly**, Mathematical Association of America, v. 67, n. 1, 1960. ISSN 00029890. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2307/2308924>>. 66

STIX, M. **The sun: an introduction**. 2nd. ed. [S.l.]: Springer, 2004. 4, 119, 120

STRATIGRAPHY, I. C. on. **International Commission on Stratigraphy**. 2013. Disponível em: <http://www.stratigraphy.org>. Acessado em 14/01/2013. 4

STRONG, K.; SCHMELZ, J. The solar maximum mission. In: STRONG, K.; SABA, J.; HAISCH, B.; SCHMELZ, J. (Ed.). **The Many Faces of the Sun**. Springer New York, 1999. p. 1–18. ISBN 978-1-4612-7145-1. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-1442-7\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-1442-7_1)>. 26

STROUS, L. H. **Loop detection**. 2007. Disponível em: [www.lmsal.com/~aschwanden/stereo/2000\\_easton/cdaw.html](http://www.lmsal.com/~aschwanden/stereo/2000_easton/cdaw.html). Acessado em 28/08/2007. 16, 43

THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. **Pattern recognition**. 4th. ed. [S.l.]: Academic Press, 2008. ISBN 1597492728, 9781597492720. 31

TOBIAS, S. M. The solar dynamo. **Royal Society of London Philosophical Transactions Series A**, v. 360, p. 2741–2756, dez. 2002. 120

TURK, M. Perceptive media: machine perception and human computer interaction. **Chinese Journal of Computers**, v. 23, n. 12, p. 1235–1244, 2000. 2

WEBBER, W. R.; MCDONALD, F. B.; LOCKWOOD, J. A.; HEIKKILA, B. The effect of the July 14, 2000 "Bastille Day" solar flare event on >70 MeV galactic cosmic rays observed at V1 and V2 in the distant heliosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 10, p. 15–1–15–3, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2002GL014729>>. 77

WILLIAMS, G. E. Solar affinity of sedimentary cycles in the late precambrian elatina formation. **Australian Journal of Physics**, v. 38, p. 1027–1043, 1985. 4

ZEEMAN, P. Considerations concerning light radiation under the simultaneous influence of electric and magnetic forces and some experiments thereby suggested (first part). **Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences**, v. 14, p. 2–11, 1911. 28

ZIOU, D.; TABBONE, S. Edge detection techniques: an overview. **International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis**, v. 8, p. 537–559, 1998.

42



## APÊNDICE A - OS CAMPOS MAGNÉTICOS CORONAIS SOLARES

### A.1 Introdução

O Sol permanece como importante objeto para observações e estudos na área de astrofísica, pois nele ocorrem uma série de fenômenos, como as ejeções de massa coronal e as explosões solares. Muitos destes fenômenos ainda não foram totalmente esclarecidos, e o magnetismo provavelmente desempenha um papel de suma importância neste contexto.

O magnetismo no Sol ocorre em todas as escalas, desde o limite da resolução espacial encontrado pelos telescópios até a escala equivalente ao disco solar. O sobreaquecimento da coroa do Sol ainda é um problema em aberto e supõe-se que o transporte de energia que aquece a coroa solar seria realizado por dissipação dos campos magnéticos presentes em sua atmosfera. Desde tempos remotos observam-se na superfície solar (a fotosfera) a ocorrência de manchas. Observações sistemáticas durante longos períodos de tempo mostraram que estas manchas migram para a região equatorial solar, o que aparece claramente no diagrama "Asa de borboleta" (MAUNDER, 1904).

Atualmente algumas teorias propõem explicações para o surgimento e a evolução das manchas solares. As mais modernas invariavelmente estão atreladas aos campos magnéticos, mas ainda há uma série de questões em aberto. Uma destas questões é o fato de que os campos magnéticos nos corpos celestes, como a Terra, os outros planetas e o Sol, tende a diminuir de intensidade com o passar do tempo. Sabe-se hoje que a densidade de fluxo magnético no Sol varia com o tempo, diminuindo e aumentando sazonalmente, o que evidencia a atuação de processos de retro-alimentação deste fluxo. A Teoria do Dínamo Solar procura explicar estes processos de retro-alimentação dos campos magnéticos solares, tomando como base o efeito dínamo (SCHMELZ; BROWN, 1992).

Os trabalhos sobre objetos convectivos tiveram importante papel neste contexto (PARKER, 1955). Como já se sabia na época que a rotação diferencial pode produzir um campo magnético toroidal a partir de um campo orientado na direção polar (poloidal), ainda faltava compreender como o campo poloidal não decaía com o tempo. A contribuição de Parker foi no sentido de propor um modelo de dínamo capaz de transformar parte do campo toroidal no campo poloidal, regenerando-o.

Somente anos mais tarde, por volta da década de 1990 é que as primeiras observações

heliosismológicas foram realizadas. Partindo do princípio de que as ondas acústicas de pressão no Sol não são modificadas apenas por sua propagação no meio, mas também pelo fluxo de fluido no interior solar, foi possível inferir as velocidades deste fluido através da variação da pressão. Com estas medidas construiu-se um mapa da rotação diferencial no interior solar. Verificou-se que a rotação diferencial observada na superfície solar se mantém no interior da camada convectiva. Próximo do núcleo, a rotação se comporta mais como a de um sólido, sendo que a interface entre estes dois tipos de comportamento se encontra em torno de 70% do raio solar, onde se localiza a base da camada convectiva. Esta interface é uma camada bem delimitada, muito fina, com espessura da ordem de  $10^4$  m chamada *tacoclina*. A *tacoclina* é o limite de um interior solar cuja rotação se comporta como a de um sólido, e uma camada mais externa, convectiva e fluida, com rotação diferencial. É nesta região de interface onde o efeito dínamo se manifesta, aumentando muito a intensidade dos campos magnéticos solares (CHARBONNEAU et al., 1999).

## A.2 A física dos campos magnéticos solares

Para compreender melhor como estes campos magnéticos surgem, voltemos aos fundamentos do eletromagnetismo, pois sabemos que a base do efeito dínamo é o fenômeno da indução eletromagnética, onde um campo elétrico pode ser gerado pela variação do campo magnético ao longo do tempo. O campo magnético, por sua vez é alterado quando há a presença de cargas eletricamente carregadas se deslocando através deste campo magnético.

As equações de Maxwell (A.1 a A.4) constituem a base do eletromagnetismo e considerando a corrente de deslocamento de Maxwell para a Lei de Ampère, podem ser escritas como (JACKSON, 1999):

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho \quad , \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad , \quad (\text{A.2})$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad , \quad (\text{A.3})$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} . \quad (\text{A.4})$$

Aplicando o fenômeno de indução eletromagnética no plasma ionizado presente na camada convectiva solar, verificamos que a grande quantidade de partículas livres eletricamente carregadas ao se deslocarem através de um campo magnético, por força dos movimentos do próprio plasma na camada convectiva e pela rotação diferencial na superfície solar, induzem um campo elétrico. Considerando a velocidade de movimentação do plasma como  $\mathbf{v}$  e o campo magnético  $\mathbf{B}$ , podemos dizer que a equação A.5 descreve a indução do campo magnético (STIX, 2004):

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}), \quad \eta = \frac{1}{\mu \sigma} , \quad (\text{A.5})$$

com  $\sigma$  representando a condutividade elétrica e  $\mu$  a permeabilidade magnética ( $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  Vs/Am), chamamos  $\eta$  de difusividade magnética. O primeiro termo da equação A.5 descreve o efeito da indução através do campo magnético, enquanto o segundo termo manifesta o decaimento ôhmico do campo através da resistência elétrica.

Segundo (SCHMELZ; BROWN, 1992), podemos distinguir quatro diferentes abordagens para a Teoria do Dínamo Solar:

- a) A Teoria Laminar, uma abordagem não mais utilizada e de constituição matemática bastante simples;
- b) A Teoria do Campo Médio (*Mean Field Theory*), que leva em conta o caso da convecção turbulenta;
- c) As teorias espectrais, onde foram utilizadas transformações das equações para o campo dos coeficientes de Fourier;
- d) Simulações Numéricas, onde as equações da magnetohidrodinâmica (MHD) são solucionadas em um volume esférico.

Com o advento dos computadores a partir da década de 70, a abordagem MHD ganhou força, e tem sido a mais utilizada desde então.

Os fundamentos da Teoria do Dínamo Solar foram resumidos em um trabalho de 2002, mostrando que a existência de um campo magnético auto-sustentável se dá

através de iterações fundamentais no plasma convectivo, dando forma à Teoria do Dínamo Solar (TOBIAS, 2002):

- a) O movimento com velocidade  $\mathbf{v}$  de um fluido condutor através de um campo magnético  $\mathbf{B}$  induz um campo elétrico  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ;
- b) Pela Lei de Faraday ( $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ ), a variação de um campo magnético no tempo cria um campo elétrico  $\mathbf{E}$ ;
- c) Este campo elétrico descrito nos itens a e b gera uma corrente elétrica  $\mathbf{j}$  no fluido, dada pela Lei de Ohm de um condutor em movimento ( $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ );
- d) Pela Lei de Ampère, a corrente elétrica gera um campo magnético (desprezando os efeitos relativísticos)  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$ ;
- e) Finalmente, a interação do campo magnético com a corrente produz uma força de Lorentz ( $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ ) que volta a atuar no movimento do fluido condutor ( $\mathbf{j} = (1/\mu_0) \nabla \times \mathbf{B}$ ).

Aos campos magnéticos solares podemos associar a idéia de linhas, como nos estudos elementares de magnetismo. O movimento de rotação do Sol produz a torção das linhas de campo magnético na direção da rotação solar, de forma que as mesmas "se enrolam" ao redor do Sol com maior intensidade próximo da região equatorial. Este é o chamado efeito  $\Omega$ . Outro efeito importante é o chamado efeito  $\alpha$ , que também tem maior incidência na região equatorial, onde a rotação diferencial é mais pronunciada. O efeito  $\alpha$  retorce mais uma vez as linhas de campo toroidais no sentido aproximadamente perpendicular ao da rotação solar, por força da rotação diferencial, convertendo, de certa forma, linhas toroidais em linhas poloidais. Estes fenômenos combinados fazem com que os campos magnéticos extrapolem a superfície solar, elevando-os até as camadas mais altas da atmosfera. Observações confirmam os modelos e mostram que os campos magnéticos se estendem por toda a atmosfera solar, até a alta coroa e além dela. Uma constatação que se faz é que as linhas de campo magnético intensos observadas na coroa solar tem como base, na fotosfera, as manchas solares, que são exatamente as regiões onde os campos magnéticos atravessam a fotosfera solar (STIX, 2004).



### A.3 Um modelo de extrapolação das linhas de campo magnético

Situada a partir da cromosfera e se estendendo por milhares de quilômetros no espaço, a coroa apresenta uma característica bastante interessante que vem intrigando os físicos desde há muito tempo: sua temperatura é milhares de vezes mais alta do que a da fotosfera solar. Para que isto ocorra, supõe-se que exista algum processo não térmico de transporte de energia do interior solar para a coroa, já que pela 2ª Lei da Termodinâmica não haveria uma forma da fotosfera apresentar temperaturas da ordem de 5.800 °K, e a coroa da ordem de 1 M °K sem que existisse alguma camada altamente energética entre estas duas, ou que alguma forma de energia não-térmica fizesse parte do processo. As observações já mostraram que não existe tal camada energética entre a fotosfera-cromosfera e a coroa solar, restando a hipótese do transporte energético. Os estudos recentes sobre o aquecimento coronal e a produção de *flares* tem demonstrado que quando se observa o Sol em diferentes comprimentos de onda, verifica-se um aumento da temperatura com a altitude atmosférica, chegando até a 4 M °K, fortalecendo a idéia da ocorrência de processos de transporte energético para esta região. O transporte energético está muito mais próximo do fato do que da hipótese (ASCHWANDEN, 2005).

Detalhando a física da formação dos campos magnéticos solares, verificamos que a equação A.2 mostra que o campo  $\mathbf{B}$  é um campo solenoidal, ou incompressível. Isto significa que a este campo pode ser dado um tratamento segundo um campo potencial,  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ . Resolvendo A.2 como um campo potencial, obtemos (NAKAGAWA; RAADU, 1972):

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \int \nabla' \times \left[ \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right] d\mathbf{r}' . \quad (\text{A.6})$$

Fica claro através da equação A.6 que é necessário conhecer a corrente  $\mathbf{j}$  para calcularmos o campo  $\mathbf{B}$ . No entanto, não existe até o momento um método capaz de medir as correntes dos campos magnéticos na coroa solar (AMARI et al., 1997). Pela mesma equação, podemos obter a corrente se conhecermos o campo magnético. Também não há uma forma de medir-se o campo na coroa solar, mas desenvolveu-se há algum tempo uma metodologia que, dadas condições de contorno pode *inferir* o campo magnético na coroa a partir de seu valor na fotosfera. Esta metodologia se baseia na teoria de correntes alinhadas ao campo magnético e é conhecida como teoria dos campos livres de força, ou *force-free field*, e há vasta literatura sobre o tema. Uma extensa lista de trabalhos abordando a extrapolação do campo magnético e seus

diferentes métodos de resolução pode ser obtida em (ASCHWANDEN, 2005).

Em termos físicos, a extrapolação das linhas do campo magnético baseia-se no fato de que o plasma na coroa solar é essencialmente governado pelos campos magnéticos, de forma que podemos desconsiderar o termo da pressão ocasionada pelo plasma. Esta é a característica fundamental dos campos livres de força, o que equivale dizer que a força de Lorentz é nula nesta região. Se tomarmos a equação A.3 na sua aproximação não-relativística e evidenciarmos a corrente, podemos substituí-la em  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$ , obtendo uma expressão geral para os campos livres de força (ASCHWANDEN, 2005):

$$(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = 0 \quad . \quad (\text{A.7})$$

A equação A.7 é uma equação não-linear, já que sua resolução contém termos da ordem de  $B^2$  e sua solução pode ser bastante complexa. Uma das abordagens utilizadas para resolvê-la é separar a solução em soluções lineares e soluções não-lineares. Assim, podemos transformar a equação A.7 em uma equação linear fazendo

$$(\nabla \times \mathbf{B}) = 4\pi\mathbf{j} = \alpha(\mathbf{r})\mathbf{B} \quad . \quad (\text{A.8})$$

Verificamos facilmente que se  $\alpha(\mathbf{r}) \neq 0$  trata-se de um campo não-potencial, e que para  $\alpha(\mathbf{r}) = 0$  o campo é potencial e neste caso particular do modelo *force-free field* também é chamado de *current-free*. Nesta situação, as linhas de campo observadas são devidas ao campo que vem da fotosfera, já que a corrente é nula acima dela.  $\alpha(\mathbf{r})$  é uma função escalar que depende da posição  $\mathbf{r}$  e está relacionada à presença de correntes  $\mathbf{j}$ , de forma que duas condições devem ser satisfeitas para que possamos utilizá-la: ausência de monopólos magnéticos, expressa na equação A.2 de Maxwell e a identidade vetorial  $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = 0$ . Estas duas condições são sempre satisfeitas e portanto se conclui que  $\alpha$  não pode variar ao longo da linha de campo pois  $\Delta(\alpha\mathbf{B}) = 0$ , e portanto  $\alpha$  é constante ao longo da linha. Este raciocínio pode ser resumido com

$$0 = \nabla\alpha \cdot \nabla\mathbf{B} \Rightarrow \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla\alpha \cdot \nabla\mathbf{B} \Rightarrow \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \cdot (\alpha\mathbf{B}) \quad , \quad (\text{A.9})$$

levando finalmente a

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B} \quad , \quad (\text{A.10})$$

que é a forma geral da equação que governa as linhas de campo magnético coronal solar, utilizando-se o modelo de campo livre de forças, ou *force-free field*.

A partir da igualdade A.10, como  $\alpha$  é uma constante, podemos tomar o rotacional em ambos os lados da igualdade, obtendo

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \times (\alpha \mathbf{B}) \Rightarrow \alpha (\nabla \times \mathbf{B}) = \alpha^2 \mathbf{B} \quad , \quad (\text{A.11})$$

e aplicando mais uma identidade vetorial, temos

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} \Rightarrow \nabla^2 \mathbf{B} + \alpha^2 \mathbf{B} = 0 \quad , \quad (\text{A.12})$$

sendo o último termo a equação de Helmholtz, cuja solução pode ser obtida por vários métodos disponíveis na literatura.

Da expressão  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$  decorre que  $\mathbf{j} \parallel \mathbf{B}$ . No caso linear da aproximação para campos livres de força, a partir desta igualdade,  $\alpha$  torna-se um termo de proporcionalidade que está relacionado com a corrente, é paralelo ao campo magnético e tem o mesmo valor para todas as linhas de campo. No caso não-linear,  $\alpha(\mathbf{r})$  dependerá da posição, e portanto, será diferente para diferentes linhas de campo. Além disto,  $\alpha(\mathbf{r})$  ou mesmo  $\alpha$  está diretamente ligado à torção das linhas de campo: quanto mais positivo ou negativo seus valores, mais retorcidas em uma ou outra direção estarão as linhas de campo, sendo a situação de dipolo obtida quando  $\alpha = 0$  (ASCHWANDEN, 2005).

A forma clássica para solucionar a equação A.12 é utilizar o método das funções de Green ou de transformadas de Fourier, escrevendo o campo como combinação linear de um campo poloidal e outro toroidal (NAKAGAWA; RAADU, 1972; SEEHAFFER, 1978; ALISSANDRAKIS, 1981; DÉMOULIN, 2007; GARY, 1989; ASCHWANDEN, 2005).

A partir da equação de Helmholtz (equação A.12, último termo), foi proposta a separação do campo  $\mathbf{B}$  nas suas componentes poloidal  $P$  e toroidal  $T$  (NAKAGAWA; RAADU, 1972; SEEHAFFER, 1978). Assim, reescrevemos o campo magnético como

$$\mathbf{B} = \nabla \times \nabla \times (P\mathbf{I}_z) + \nabla \times (T\mathbf{I}_z) = \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) \mathbf{I}_x + \left( \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} - \frac{\partial T}{\partial x} \right) \mathbf{I}_y - \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \mathbf{I}_z . \quad (\text{A.13})$$

Pode-se verificar que as soluções da equação A.13 são obtidas através de funções harmônicas em  $x$  e  $y$ , cujas componentes real e imaginária relacionam  $P$  e  $T$ . Conhecendo a componente vertical na fotosfera, a partir dos magnetogramas, podemos obter a solução para  $P$  separando as variáveis horizontais e verticais, e a solução é dada na forma:

$$P = \sum_{k \neq 0} \frac{1}{k^2} \mathbf{B}_k e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - (k^2 - \alpha^2)^{1/2} z} . \quad (\text{A.14})$$

Fazendo as transformações adequadas, chegamos ao valor final das componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  do campo magnético (NAKAGAWA; RAADU, 1972):

$$B_x = \sum_{k \neq 0} \frac{i}{k^2} [\alpha k_y - k_x (k^2 - \alpha^2)^{1/2}] \mathbf{B}_k e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - (k^2 - \alpha^2)^{1/2} z} , \quad (\text{A.15})$$

$$B_y = \sum_{k \neq 0} \frac{-i}{k^2} [\alpha k_y + k_x (k^2 - \alpha^2)^{1/2}] \mathbf{B}_k e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - (k^2 - \alpha^2)^{1/2} z} , \quad (\text{A.16})$$

$$B_z = \sum_{k \neq 0} \mathbf{B}_k e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - (k^2 - \alpha^2)^{1/2} z} . \quad (\text{A.17})$$

"A quantidade  $(k^2 - \alpha^2)^{-1/2}$  é a escala de comprimento característica do sistema magnético para um dado número de onda  $k$ . Variando o valor de  $\alpha$  a quantidade de energia varia com o volume do sistema magnético. Para um dado valor de  $k$ , diferentes valores de  $\alpha$  representam diferentes graus de complexidade da configuração magnética. Isso mostra que ambientes mais complexos (mais retorcidos) contém maior excedente de energia" (PINTO, 2010). Esta questão torna-se importante para valores de  $\alpha$  que vão distanciando-se do zero, pois a partir de certo valor o ambiente vai assumindo características onde o método linear começa a deixar de ser o mais indicado.

Além dos métodos de cálculo da extrapolação para campos livres de força já citados, os métodos que utilizam as Funções de Green e a Transformada de Fourier, encontramos na literatura uma série de outras abordagens: o uso de Funções Harmônicas Esféricas (NEWKIRK et al., 1968), superposição de Fontes de Fluxo Discretas (LOTHIAN; BROWNING, 1995), e metodologias que utilizam termos da MHD (NEUKIRCH, 1995).

A implementação da metodologia proposta por (NAKAGAWA; RAADU, 1972) e (SEHAFER, 1978) foi realizada pelo grupo de física solar da Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e utilizada em vários trabalhos (SELHORST et al., 2005). Nesta implementação do algoritmo de cálculo, definiu-se um vetor de valores que representa a componente espacial  $z$  que é a altitude medida a partir da fotosfera, onde  $z = 0$ . Para cada valor discreto de  $z$ , o algoritmo calculava o valor das componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  do campo magnético  $\mathbf{B}$ , seguindo a formulação dada por A.15, A.16 e A.17. O algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* ou FFT) foi utilizado nesta implementação, de forma que todo o processamento é rapidamente realizado. Após o cálculo da extrapolação, é possível selecionar um parâmetro que corresponde à quantidade de linhas de força do campo magnético que serão exibidas no resultado final. A figura A.1 mostra a tela da programa de computador que implementa o algoritmo citado, com um conjunto de linhas extrapoladas sobre uma região ativa solar.

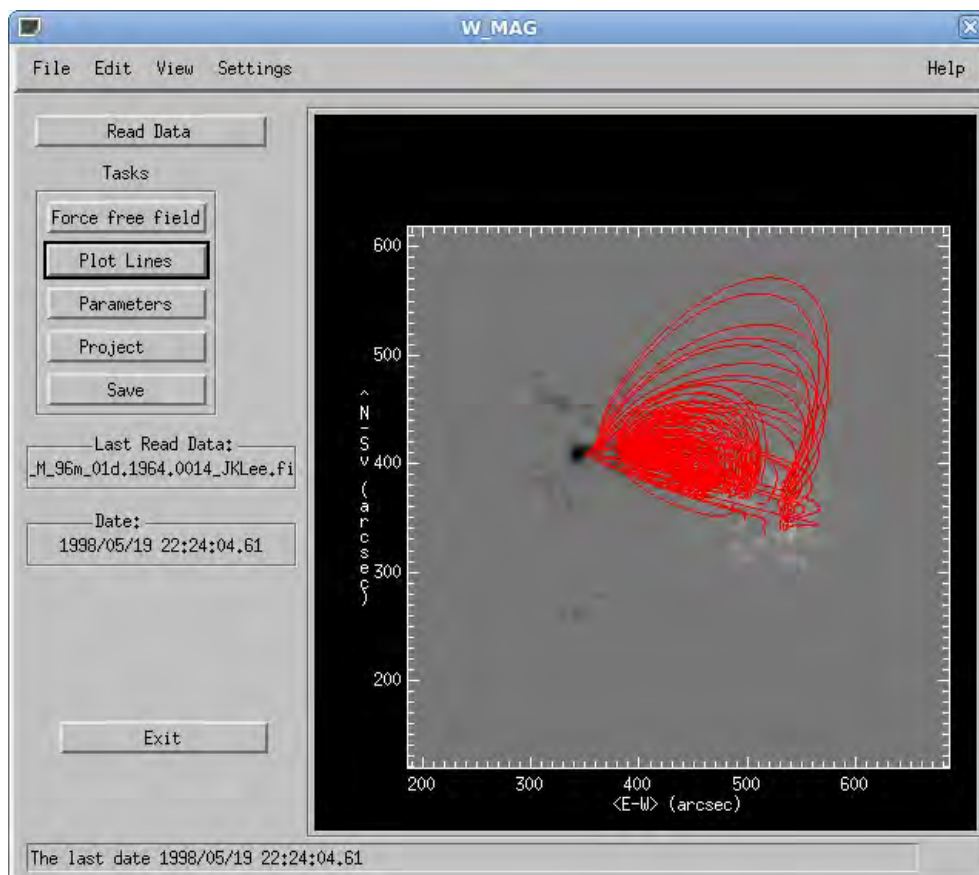


Figura A.1 - Resultado da extrapolação de linhas utilizando o método LFFF em algoritmo desenvolvido pelo grupo de Astrofísica do INPE.  
Fonte: INPE/DAS (2012)

## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.