

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-INPE-8307-TDI/766**

**LEVANTAMENTO DE TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE  
ESTRELAS E DESENVOLVIMENTO DE UM AMBIENTE DE  
SIMULAÇÃO E TESTES PARA ANÁLISE DE SEUS  
DESEMPENHOS EM APLICAÇÕES ESPACIAIS**

Gustavo Baldo Carvalho

Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e  
Controle, orientada pelo Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes, aprovada em 29 de  
setembro de 2000.

INPE  
São José dos Campos  
2001

629. 7. 062. 2

CARVALHO, G. B.

Levantamento de técnicas de identificação de estrelas e desenvolvimento de um ambiente de simulação e testes para análise de seus desempenhos em aplicações espaciais/ G. B. Carvalho. – São José dos Campos: INPE, 2000. 290p. – (INPE-8307-TDI/766).

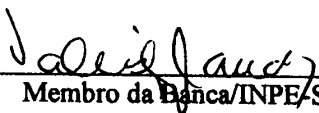
1.Sensor de estrelas. 2.Identificação de estrelas.  
3.Programa de computador. 4.Espaçonave. 5.Simulação.  
6.Controle de atitude. I.Título

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Engenharia e Tecnologia Espaciais /**  
**Mecânica Espacial e Controle.**

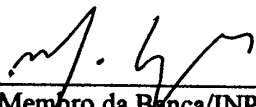
Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes

  
Orientador/Presidente/INPE-SJC/SP

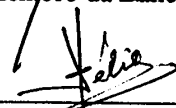
Dr. Valcir Orlando

  
Membro da Banca/INPE-SJC/SP

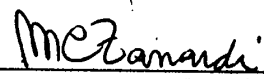
Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

  
Membro da Banca/INPE-SJC/SP

Dr. Hélio Koiti Kuga

  
Membro da Banca/INPE-SJC/SP

Dr<sup>a</sup> Maria Cecília França de P. S. Zanardi

  
Membro da Banca  
Convidado UNESP-Guará

Candidato (a) : Gustavo Baldo Carvalho

São José dos Campos, 29 de setembro de 2000.

A meus pais **Edson Carvalho e Maria Lúcia Baldo Carvalho,**  
e minha esposa **Liliane Bromberg Carvalho,**  
pelo apoio e ajuda,  
dedico.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer no presente momento às várias partes e pessoas que, direta ou indiretamente, envolveram-se com o desenvolvimento deste trabalho e contribuíram para seu mérito.

Em primeiro lugar, a **DEUS** por todas as oportunidades, crescimentos, desafios, vitórias, derrotas e inspirações que me levaram aos melhores caminhos.

A **meus pais, Edson Carvalho e Maria Lúcia Baldo Carvalho**, por todos os esforços e sacrifícios, ajuda, crença, apoio e força que sempre me deram para que eu chegasse até onde cheguei e ainda estou por chegar.

A **minha esposa, Liliane Bromberg Carvalho**, pela ajuda na confecção de todos os trabalhos que em conjunto contribuíram para resultar neste e por seu apoio, paciência e carinho.

A **meu sogro, Luiz Ricardo Terra Bromberg**, e **sogra, Ana Maria Machado Bromberg**, pelo apoio e ajuda.

À **EESC-USP-São Carlos**, pela qual muitas portas foram-me abertas e que ainda estão por abrir. Em especial ao **Departamento de Aeronaves** e aos **professores Dr. Fernando Martin Catalano e Dr. Michael George Maunsell**, pelo apoio e ajuda nos contatos iniciais com o INPE.

Ao **Observatório de São Carlos (CDA)-CDCC e responsáveis** por todas as oportunidades de experiência e conhecimentos adquiridos, essenciais no campo da atividade espacial.

Ao **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)** pelas facilidades e apoio oferecidos em todos os trabalhos desenvolvidos, assim como ao **Ministério da Ciência e Tecnologia**.

Ao **CNPq** e aos **Departamentos responsáveis no INPE** pela oportunidade de participar no **Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC)** em trabalhos anteriores, o que muito contribui no resultado deste, e por acreditarem em minha capacidade pessoal.

Ao meu **orientador, Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes**, pela orientação segura, confiante, entusiástica e amiga, dispondo de seu tempo e acreditando no desenvolvimento de todos os trabalhos que desenvolvemos em conjunto e que muito contribuíram na obtenção do conhecimento de uma área ainda inexplorada no Brasil.

A **todos os professores do INPE-ETE-DMC** pelo apoio e força que têm passado, e em especial ao **Dr. Luiz Carlos Gadelha de Souza** quem abriu-me as portas

do INPE, ao **Dr. Antônio Fernando Bertachini de Almeida Prado, Dr. Kondapalli Rama Rao, Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Sousa** e ao **Dr. Mário César Ricci** pela amizade, ajuda e apoio.

**Aos professores membros da minha Banca Examinadora** pelas sugestões apresentadas e avaliação desse trabalho.

**A todos os colegas do INPE-ETE-DMC** que com coragem e determinação trilharam junto comigo os caminhos para alcançar um objetivo comum.

À **EMBRAER-VPI/DTE/GEN/NSI**, pelas facilidades e apoio. Aos projetos do **Avionic Integration Rig-AMX (AIR) (Grupo da Análise de Resultados-ANR) (Ministério da Aeronáutica)** e **Brazilian International Space Station Program (BISSP) (Grupo de Software) (Agência Espacial Brasileira – AEB)** por todas as oportunidades de experiência e conhecimentos adquiridos que em muito me ajudaram durante todo o período de desenvolvimento deste.

Aos meus colegas de trabalho pela paciência e apoio nos momento mais difíceis. Em especial ao **Sr. Marcelo José Ruv Lemes** pela atenção e revisão no Capítulo de gestão de configuração de *software*. Aos **Srs. Maurício Figueiredo e Laerte de Oliveira**, por permitirem que eu continuasse no desenvolvimento da pesquisa iniciada anos antes no INPE em conjunto com os desafios que se me abriam dentro da seção (NSI) na EMBRAER. Também aos **Srs. Juliano Bittencourt Joppert Jr., Andrea Barp e Sra. Samira Rachid da Costa**, pelo apoio e por acreditarem na minha capacidade.

**A todos os pioneiros** que lutaram e deram suas vidas pela conquista do ar e do espaço.

E em especial, a **todos os meus amigos** que se propuseram de **espírito e alma** a estar sempre me ajudando.

Obrigado a todos que de algum modo contribuíram para que eu realizasse esta importante etapa.

## RESUMO

Este trabalho analisa e classifica diversas técnicas existentes de identificação de estrelas observadas por sensores estelares em espaçonaves estabilizadas triaxialmente, com o objetivo de facilitar a escolha do algoritmo mais adequado a uma determinada aplicação. A análise das técnicas de identificação de estrelas se baseia em simulações de vistas por um sensor estelar, utilizando-se um catálogo como fonte de informação. As possibilidades para as identificações de estrelas são: identificação correta, identificação errônea, identificação ambígua e não identificação. Algumas das principais tarefas das técnicas são maximizar a probabilidade de identificação correta e minimizar a probabilidade de identificação errônea. O tempo de processamento e a memória requerida são também aspectos relevantes. Algumas técnicas de identificação de estrelas analisadas pressupõem disponibilidade de informação de atitude a priori, enquanto outras não. Algumas procuram otimizar o processo de busca da solução por meio de uma técnica adequada de varredura do catálogo de estrelas enquanto outras fazem a varredura de catálogos de pares de estrelas ou ainda de catálogos de padrões de estrelas. A solução em algumas técnicas é obtida por sucessivas verificações lógicas, enquanto que em outras pela maximização de um índice de desempenho. Um ambiente de simulação e testes denominado *Star Identification Algorithm Test Software* (S.I.A.T.S.) foi desenvolvido para facilitar a comparação entre algoritmos que implementam técnicas de identificação de estrelas. Assim, diversos algoritmos são implementados e comparados em termos de taxa de sucesso, erros da atitude determinada e tempo de processamento. Após a identificação das estrelas, a atitude é estimada pelo método de mínimos quadrados que utiliza dois ou mais versores conhecidos em dois referenciais diferentes. A representação de atitude é feita através de ângulos de Euler e as coordenadas das estrelas em um referencial inercial são obtidas de catálogos estelares tais como o SKY Catalogue 2000.0 (Sky Publishing Corporation, 1991). Dessa forma, pretende-se somar esforços a projetos em andamento no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tais como o projeto de um sensor estelar, o satélite franco-brasileiro e o projeto do balão de “Máscara Codificada” (MASCO).

# **A SURVEY ON STAR IDENTIFICATION TECHNIQUES AND DEVELOPMENT OF A SIMULATION AND TEST ENVIRONMENT TO ANALYZE THEIR PERFORMANCE ON SPACE APPLICATIONS**

## **ABSTRACT**

This work analyzes and classifies star identification methods and techniques for star sensor observations on a three-axis stabilized spacecraft. The main aim is to ease the choice of the best algorithm for a specific space application. The analysis of the star identification techniques is based on digital simulation for the star sensor. There are four possibilities for a star identification: correct identification, misidentification, ambiguous identification and no identification. Some of the main tasks of the algorithms are to maximize the probability of a correct identification and to minimize the probability of a misidentification. The execution time and the required memory are also relevant performance parameters. Some of the analyzed star identification techniques require a priori attitude information availability, while others do not. Some seek the search process optimization for the solution by means of the stars' catalog tracking technique while others use stars' pairs catalogs or stars' patterns catalogs. The solution in some techniques is obtained by successive logical verifications, while others maximize a performance index. A simulation and test environment called Star Identification Algorithm Test Software (S.I.A.T.S.) was developed to ease the comparison among algorithms that implement stars identification techniques. The results are compared in terms of success rate, attitude estimation errors and execution time. After identification of the stars, the attitude is estimated by the least-squares method, which uses two or more vectors in both reference frame and body frame. The attitude is represented through Euler angles and the star coordinates in an inertial frame are obtained from a star catalog named SKY Catalogue 2000.0 (Sky Publishing Corporation, 1991). Thus, the results are intended to be a positive contribution to National Space Research Institute (INPE) projects such as the star tracker project, the French-Brazilian micro-satellite and the "Codified Mask" (MASCO) balloon project.



## SUMÁRIO

Pág.

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE SÍMBOLOS

### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|   |               |
|---|---------------|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>35</b>     |
| 1.1 - Motivação.....  | 35            |
| 1.2 - Objetivos.....  | 36            |
| 1.3 - Revisão bibliográfica.....  | 37            |
| 1.4 - Sequência do trabalho.....  | 39            |
| <br><b>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS .....</b>   | <br><b>41</b> |
| 2.1 - Sistemas de referência.....   | 41            |
| 2.1.1 - Esfera celeste.....   | 41            |
| 2.1.2 - Descrição dos referenciais.....   | 42            |
| 2.1.2.1 - Referencial inercial.....   | 42            |
| 2.1.2.2 - Referencial da espaçonave.....  | 43            |
| 2.1.2.3 - Referencial do sensor.....  | 44            |
| 2.2 - Sistemas de coordenadas.....  | 45            |
| 2.2.1 - Descrição dos sistemas de coordenadas.....  | 45            |
| 2.2.1.1 - Sistema equatorial de coordenadas.....  | 45            |
| 2.2.1.2 - Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas.....   | 46            |
| 2.2.1.3 - Sistema cartesiano-plano de coordenadas.....  | 47            |
| 2.2.2 - Transformações entre sistemas de coordenadas no mesmo referencial.....                      | 48            |
| 2.2.2.1 - Sistema equatorial de coordenadas e sistema vetorial-cartesiano de coordenadas.....       | 48            |
| 2.2.2.2 - Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas e sistema cartesiano-plano de coordenadas..... | 49            |
| 2.2.3 - Transformações entre sistemas de coordenadas entre referenciais diferentes.....             | 50            |
| 2.3 - Sistemas de representação de atitude.....   | 51            |
| 2.3.1 - Ângulos de euler.....   | 51            |
| 2.3.2 - Matriz de rotação ou atitude.....   | 51            |
| 2.3.3 - Sistema equatorial de atitude.....  | 53            |
| 2.3.4 - Eixo e ângulo de euler.....   | 54            |
| 2.3.5 - Transformações entre sistemas de representação de atitude.....                              | 54            |
| 2.3.5.1 - Matriz de rotação de atitude e ângulos de euler.....                                      | 54            |
| 2.3.5.2 - Ângulos de euler e sistema equatorial de atitude.....                                     | 55            |
| 2.3.5.3 - Eixo e ângulo de euler e matriz de rotação de atitude.....                                | 56            |

|  |    |
|--|----|
| 2.4 - Determinação de atitude.....   | 57 |
| 2.4.1 - Características gerais.....  | 57 |
| 2.4.2 - Modelo de determinação de atitude.....                                   | 58 |
| 2.4.2.1 - Determinação de atitude triaxial exata (algoritmo determinístico)..... | 58 |
| 2.4.2.2 - Determinação de atitude triaxial otimizada.....                        | 59 |
| 2.5 - Sensor estelar.....  | 61 |
| 2.5.1 - Características gerais.....  | 61 |
| 2.5.2 - Modelo de sensor estelar.....  | 65 |
| 2.6 - Catálogo de estrelas.....  | 69 |
| 2.6.1 - Características gerais.....  | 69 |
| 2.6.2 - Modelo de catálogo de estrelas.....                                      | 70 |
| 2.6.2.1 - Catálogo fonte e catálogo de trabalho.....                             | 70 |
| 2.6.2.2 - Região de observação do sensor estelar.....                            | 73 |
| 2.7 - Simulação de atitude.....  | 74 |
| 2.7.1 - Características gerais.....  | 74 |
| 2.7.2 - Modelo de simulação de atitude.....                                      | 75 |
| 2.7.2.1 - Geração de atitude e desvios na atitude.....                           | 75 |
| 2.7.2.2 - Geração dinâmica de atitude.....                                       | 77 |
| 2.8 - Sensor de pré-estimativa.....  | 79 |
| 2.8.1 - Características gerais.....  | 79 |
| 2.8.2 - Modelo de sensor de pré-estimativa.....                                  | 80 |

### **CAPÍTULO 3 - TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS..... 81**

|   |     |
|---|-----|
| 3.1 - Operação de sistemas de identificação de estrelas.....                      | 81  |
| 3.2 - Técnicas presentes na literatura.....                                       | 82  |
| 3.3 - Classificação dos métodos e técnicas.....                                   | 83  |
| 3.4 - Considerações gerais.....   | 86  |
| 3.4.1 - Tipos de identificação.....   | 86  |
| 3.4.2 - Características de implementação.....                                     | 87  |
| 3.4.3 - Configurações de implementação.....                                       | 90  |
| 3.5 - Identificação.....  | 90  |
| 3.5.1 - Características gerais.....   | 90  |
| 3.5.2 - Modelo de identificação.....  | 92  |
| 3.6 - Método de justaposição direta.....  | 94  |
| 3.6.1 - Técnica de otimização do raio do domínio de busca.....                    | 94  |
| 3.6.1.1 - Características gerais.....   | 94  |
| 3.6.1.2 - Modelo de otimização do raio do domínio de busca.....                   | 95  |
| 3.6.2 - Método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza..... | 99  |
| 3.6.2.1 - Sem resolução de identificações ambíguas.....                           | 100 |
| 3.6.2.2 - Com resolução de identificações ambíguas.....                           | 102 |
| 3.7 - Método de justaposição da separação angular.....                            | 105 |
| 3.7.1 - Técnica de varredura otimizada.....                                       | 105 |
| 3.7.2 - Técnica de identificação por confirmações sucessivas.....                 | 114 |
| 3.7.2.1 - Utilização com pré-estimativa.....                                      | 116 |
| 3.7.2.2 - Utilização com a técnica de varredura otimizada.....                    | 117 |

|   |            |
|---|------------|
| 3.7.3 - Técnica de identificação por avaliação de índice de desempenho.....                             | 119        |
| 3.7.3.1 - Avaliação do índice de desempenho na forma acoplada.....                                      | 119        |
| 3.7.3.1.1 Utilização na forma autônoma (recursivo com magnitude).....                                   | 125        |
| 3.7.3.1.2 Utilização com a técnica de varredura otimizada (não recursivo sem magnitude).....            | 125        |
| 3.7.3.2 - Avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.....                                   | 127        |
| 3.8 - Aspectos práticos na utilização de técnicas de identificação de estrelas em aplicações reais..... | 132        |
| <b>CAPÍTULO 4 - AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E TESTES.....</b>   | <b>135</b> |
| 4.1 - Metodologia de desenvolvimento e gestão de configuração.....                                      | 136        |
| 4.2 - Descrição estrutural e funcional.....   | 138        |
| 4.3 - Simulação.....  | 139        |
| 4.3.1 - Características gerais.....   | 139        |
| 4.3.2 - Modelo de simulação.....  | 140        |
| <b>CAPÍTULO 5 - TESTE E ANÁLISE DE ALGORITMOS REPRESENTATIVOS .....</b>                                 | <b>143</b> |
| 5.1 - Algoritmos sob teste.....   | 143        |
| 5.2 - Condições de teste.....   | 145        |
| 5.2.1 - Simulação aleatória.....  | 148        |
| 5.2.2 - Simulação dinâmica.....   | 148        |
| 5.2.3 - Simulação com dados reais do satélite ROSAT.....  | 149        |
| 5.3 - Parâmetros de avaliação.....  | 149        |
| 5.3.1 - Parâmetros gerais.....  | 150        |
| 5.3.1.1 - Avaliação global.....   | 150        |
| 5.3.2 - Parâmetros específicos.....   | 150        |
| 5.3.2.1 - Método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza.....                     | 150        |
| 5.3.2.2 - Técnica de identificação por confirmações sucessivas.....                                     | 151        |
| 5.3.2.3 - Técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho .....                          | 151        |
| 5.3.2.3.1 - Forma acoplada.....   | 151        |
| 5.3.2.3.2 - Forma desacoplada.....  | 152        |
| 5.4 - Avaliação dos resultados.....   | 153        |
| 5.4.1 - Método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza.....                       | 154        |
| 5.4.1.1 - Avaliação dos parâmetros gerais.....  | 160        |
| 5.4.1.2 - Avaliação parâmetros específicos.....   | 160        |
| 5.4.2 - Técnica de identificação por confirmações sucessivas.....                                       | 162        |
| 5.4.2.1 - Avaliação dos parâmetros gerais.....  | 172        |
| 5.4.2.2 - Avaliação parâmetros específicos.....   | 172        |
| 5.4.3 - Técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho.....                             | 174        |
| 5.4.3.1 - Forma acoplada.....   | 174        |
| 5.4.3.1.1 - Avaliação dos parâmetros gerais.....  | 187        |
| 5.4.3.1.2 - Avaliação parâmetros específicos.....   | 188        |
| 5.4.3.2 - Forma desacoplada.....  | 190        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.4.3.2.1 - Avaliação dos parâmetros gerais.....                 | 198        |
| 5.4.3.2.2 - Avaliação parâmetros específicos.....                | 198        |
| 5.4.4 - Avaliação global.....                                    | 200        |
| 5.4.4.1 - Avaliação dos parâmetros gerais.....                   | 203        |
| <b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>                              | <b>205</b> |
| 6.1 - Principais características de cada técnica estudada.....   | 205        |
| 6.2 - Recomendações.....   | 207        |
| 6.3 - Sugestões de trabalhos futuros.....                        | 208        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                           | <b>211</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....</b>                            | <b>215</b> |
| <b>APÊNDICE A - MAGNITUDES.....</b>                              | <b>217</b> |
| <b>APÊNDICE B - ROSAT.....</b>                                   | <b>219</b> |
| B.1. Utilização de sensores de estrelas em aplicações reais..... | 219        |
| B.2. Implementação da interface com dados ROSAT.....             | 229        |
| <b>APÊNDICE C - SIATS.....</b>                                   | <b>239</b> |
| C.1. Componentes SIATS.....                                      | 240        |
| C.1.1. Control panel.....  | 240        |
| C.1.2. Simulation.....   | 269        |
| C.1.3. Function library.....                                     | 271        |
| C.1.4. Tools.....  | 271        |
| C.1.5. Data.....   | 272        |
| C.2. Exemplos de saída SIATS.....                                | 279        |
| <b>GLOSSÁRIO.....</b>  | <b>289</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 2.1 Codificação de coordenadas na esfera celeste .....  | 42          |
| 2.2 Referencial inercial .....  | 43          |
| 2.3 Referencial da espaçonave .....   | 43          |
| 2.4 Referencial do sensor .....   | 44          |
| 2.5 Esfera celeste no referencial da espaçonave ou sensor .....   | 45          |
| 2.6 Sistema equatorial de coordenadas .....   | 46          |
| 2.7 Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas .....  | 46          |
| 2.8 Sistema cartesiano-plano de coordenadas .....   | 47          |
| 2.9 Sistema de coordenadas vetorial-cartesiano e sistema equatorial de<br>coordenadas .....                     | 48          |
| 2.10 Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas e sistema cartesiano-plano de<br>coordenadas .....              | 49          |
| 2.11 Rotações sucessivas em ângulos de Euler em modo 312 .....  | 51          |
| 2.12 Representação da atitude através de eixo e ângulo de rotação de Euler .....                                | 54          |
| 2.13 Determinação de versores de apontamento de estrelas a partir da<br>espaçonave .....                        | 57          |
| 2.14 Bases ortonormais construídas através dos versores obtidos .....   | 58          |
| 2.15 Modelo de determinação de atitude .....  | 61          |
| 2.16 Matriz CCD do sensor de varredura eletrônica .....   | 62          |
| 2.17 Características de projeto em sistemas de determinação de atitude através<br>de sensores de estrelas ..... | 64          |
| 2.18 Movimentos em torno dos eixos do sensor e da espaçonave - Precisão<br>do sensor .....                      | 65          |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.19 | Diagrama simplificado de um sensor fixo com varredura eletrônica.....  | 66 |
| 2.20 | Relação de coordenadas no sistema óptico e matriz eletrônica do sensor.....  | 67 |
| 2.21 | Modelo do sensor estelar.....  | 68 |
| 2.22 | Esfera celeste no referencial do sensor e sistema cartesiano-plano de coordenadas representando a matriz eletrônica.....                     | 69 |
| 2.23 | Posicionamento das estrelas na esfera celeste (magnitude máxima 5).....  | 70 |
| 2.24 | Funcionamento do sistema de manipulação da base de dados para geração de catálogo fonte.....   | 71 |
| 2.25 | Características da matriz <i>PC-Matlab</i> representativa dos catálogos de estrelas.....   | 72 |
| 2.26 | Planificação do mapa estelar a partir do catálogo fonte gerado.....  | 72 |
| 2.27 | Geração de informações de entrada para o modelo do sensor estelar.....   | 73 |
| 2.28 | Modelo de geração de informações de entrada para o sensor de estrelas.....   | 74 |
| 2.29 | Características da matriz <i>PC-Matlab</i> representativa da região de observação do sensor estelar.....                                     | 74 |
| 2.30 | Modelo de geração de atitude aleatória.....  | 76 |
| 2.31 | Modelo de geração de desvio aleatório de atitude.....  | 76 |
| 2.32 | Modelo de geração de atitude com valores pré-determinados.....   | 77 |
| 2.33 | Caminho descrito na esfera celeste pelo apontamento de um sensor estelar a bordo de uma espaçonave com a órbita polar circular definida..... | 78 |
| 2.34 | Modelo de geração dinâmica de atitude.....   | 79 |
| 2.35 | Modelo do sensor de pré-estimativa.....  | 80 |
| 3.1  | Classificação das técnicas de identificação de estrelas.....   | 85 |
| 3.2  | Obtenção da abertura angular da diagonal de um FOV.....  | 88 |
| 3.3  | Ocorrência de condição espelho.....  | 89 |
| 3.4  | Modelo genérico de identificação de estrelas.....  | 93 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.5  | Probabilidades de identificação para a característica de raio de busca (Gráfico obtido de uma execução no <i>software</i> SIATS).....   | 98  |
| 3.6  | Índice de desempenho crítico, otimização e equilíbrio dos critérios para as probabilidades de identificação para o raio de busca (Gráfico obtido de uma execução no <i>software</i> SIATS)..... | 98  |
| 3.7  | Modelo de otimização do raio de busca.....  | 99  |
| 3.8  | Sequência do método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza sem resolução de ambiguidades.....  | 100 |
| 3.9  | Representação gráfica do método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza.....  | 102 |
| 3.10 | Sequência do método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza com resolução de ambiguidades.....  | 104 |
| 3.11 | Face do icosaedro dividida em triângulos menores cujos vértices são centros de subcatálogos.....  | 105 |
| 3.12 | Representação da definição de regiões de subcatálogos e de estrelas primárias.....  | 107 |
| 3.13 | Definição de uma estrela secundária.....  | 108 |
| 3.14 | Distribuição dos pesos das estrelas secundárias em duas condições de implementação (Esquerda – FOV $8^0 \times 8^0$ e mag. Máx. 4, Direita - FOV $20^0 \times 20^0$ e mag. Máx. 5,5).....       | 109 |
| 3.15 | Representação gráfica 3D dos subcatálogos resultantes da divisão do icosaedro inscrito à esfera celeste.....  | 111 |
| 3.16 | Representação gráfica 2D dos subcatálogos resultantes da divisão do icosaedro inscrito à esfera celeste.....  | 111 |
| 3.17 | Sequência do algoritmo da técnica da varredura otimizada.....   | 113 |
| 3.18 | Sequência do algoritmo da técnica de identificação por confirmações sucessivas.....   | 116 |
| 3.19 | Representação gráfica da técnica de identificação por confirmações sucessivas.....  | 117 |
| 3.20 | Representação gráfica da técnica de varredura otimizada conjugada com a técnica de identificação por confirmações sucessivas.....   | 118 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.21 | Representação gráfica da atribuição de notas na verificação de pares na matriz de Bezooijen.....  | 119 |
| 3.22 | Sequência do algoritmo da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma acoplada.....   | 124 |
| 3.23 | Representação gráfica da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma acoplada (Recursivo com magnitude).....  | 125 |
| 3.24 | Representação gráfica da técnica de varredura otimizada conjugada com a Técnica da avaliação do índice de desempenho na forma acoplada (Não recursivo sem magnitude)..... | 126 |
| 3.25 | Conceito operacional da identificação via técnica de avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.....  | 128 |
| 3.26 | Exemplo de divisão do domínio circular em anéis para a definição do vetor binário (domínio = $5^0$ , Número de bins = 32).....  | 129 |
| 3.27 | Sequência do algoritmo da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.....  | 131 |
| 3.28 | Representação gráfica da técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.....   | 132 |
| 3.29 | Modelo de interface com dados ROSAT.....  | 133 |
| 4.1  | Ferramenta de simulação e testes desenvolvida.....  | 135 |
| 4.2  | Estrutura computacional de desenvolvimento e gestão de configuração utilizada no trabalho.....  | 137 |
| 4.3  | Estrutura funcional de CSCs do ambiente de simulação e testes SIATS.....  | 138 |
| 4.4  | Modelo de simulação de funcionamento do sistema de determinação de atitude com sensores de estrelas.....  | 142 |
| 5.1  | Definição dos algoritmos sob teste.....   | 144 |
| 5.2  | Probabilidades teóricas para os tipos de identificação e ocorrência real dos tipos de identificação (Esquerda – teste 1, Direita – teste 12). Algoritmo: D-Or-S-P.....    | 158 |
| 5.3  | Precisão nas direções relativas ao apontamento (Em cima – z, Em baixo - xy) (Esquerda – teste 1, Direita – teste 12). Algoritmo: D-Or-S-P.....                            | 158 |



|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.4  | Probabilidades de identificação (Em cima) e otimização do raio de busca (Em baixo) (Esquerda – teste 1, Direita – teste 12). Algoritmo: D-Or-S-P. ....   | 159 |
| 5.5  | Probabilidades de identificação (Esquerda), otimização do raio de busca (Centro) e probabilidades teóricas para os tipos de identificação e ocorrência real dos tipos de identificação(Direita) (teste 45 – simulação n <sup>o</sup> . 100). Algoritmo: D-Or-S-P. .... | 159 |
| 5.6  | Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação com relação ao FOV (Em cima – FOV pequeno – testes 3 e 4, Em baixo – FOV grande – testes 14 e 15). Algoritmos Sa-C-M-S-P e Sa-C-M-O. ....   | 166 |
| 5.7  | Precisão nas direções de apontamento (Em cima – z, Em baixo - xy) (Esquerda - teste 4, Direita – teste 15). Algoritmo: Sa-C-M-O. ....  | 167 |
| 5.8  | Precisão nas direções de apontamento (Em cima – z, Em baixo - xy) (Esquerda – teste 3, Direita – teste 14). Algoritmo: Sa-C-M-S-P .....  | 168 |
| 5.9  | Precisão na direção de apontamento com FOV pequeno (Em cima – sim. aleatória, Em baixo – sim. dinâmica) (Esquerda – varredura simples - testes 3 e 4, Direita – varredura otimizada - testes 25 e 26). Algoritmos Sa-C-M-S-P e Sa-C-M-O. ....                          | 169 |
| 5.10 | Precisão na direção de apontamento com FOV grande (Em cima – sim. aleatória, Em baixo – sim. dinâmica) (Esquerda – varredura simples – testes 14 e 15, Direita – varredura otimizada - testes 36 e 37). Algoritmos Sa-C-M-S-P e Sa-C-M-O. ....                         | 170 |
| 5.11 | Número de verificações de estrelas guia para varredura otimizada com relação ao FOV (Esquerda – teste 4, Direita – teste 15). Algoritmo: Sa-C-M-O. ....  | 171 |
| 5.12 | Tipos de busca em subcatálogo para varredura otimizada com relação ao FOV (Esquerda – teste 4, Direita – teste 15). Algoritmo: Sa-C-M-O. ....  | 171 |
| 5.13 | Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação com FOV pequeno (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 5 a 10).....  | 179 |
| 5.14 | Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação com FOV grande (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 16 a 21).....  | 180 |
| 5.15 | Precisão na direção de apontamento com FOV pequeno (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 5 a 10).....  | 181 |
| 5.16 | Precisão na direção de apontamento com FOV grande (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 16 a 21).....  | 182 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.17 | Precisão na direção perpendicular ao apontamento com FOV pequeno (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 5 a 10).....   | 183 |
| 5.18 | Precisão na direção perpendicular ao apontamento com FOV grande (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 16 a 21).....   | 184 |
| 5.19 | Número de observações (Em cima), número de identificações corretas (Centro e número de estrelas observadas com nota não nula (Em baixo) (Esquerda – teste 5, Direita – teste 8). Algoritmos Sa-I-A-R-S-Au e Sa-I-A-S-Au.....  | 185 |
| 5.20 | Tipos de busca em subcatálogo para varredura otimizada com relação ao FOV (Esquerda – teste 10, Direita – teste 21). Algoritmo: Sa-I-A-O.....   | 186 |
| 5.21 | Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação (Esquerda -FOV pequeno, Direita – FOV grande, Em cima – sim. Aleatória, Em baixo sim. Dinâmica) (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 11,22, 33 e 44). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.....              | 195 |
| 5.22 | Precisão na direção de apontamento (Esquerda -FOV pequeno, Direita – FOV grande, Em cima – sim. Aleatória, Em baixo – sim. Dinâmica) (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 11, 22, 33 e 44). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.....                                 | 196 |
| 5.23 | Precisão na direção perpendicular ao apontamento (Esquerda -FOV pequeno, Direita – FOV grande, Em cima – sim. Aleatória, Em baixo – sim. Dinâmica) (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 11, 22, 33 e 44)Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.....                     | 197 |
| 5.24 | Número de estrelas guia no FOV interno (Esquerda), número de estrelas no FOV externo (Centro) e número de estrelas dentro do domínio da guia (Direita) (teste 11). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.....   | 197 |
| B.1  | Satélite alemão ROSAT.....  | 219 |
| B.2  | Convenção dos referenciais ROSAT.....   | 232 |
| B.3  | Convenção dos referenciais SIATS.....   | 233 |
| B.4  | Observações e FOV do sensor (eixos x e y do FOV estão representados com a convenção de eixos para SIATS). C representa os valores (RA,DEC) para as estrelas do catálogo (2.a e 3.a colunas da matriz Stars) e O os valores (X,Y) (7.a e 8.a colunas da matriz Stars)..... | 236 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| B.5  | Representação 3D da atitude e FOV (Eixos azuis maiores são relacionados ao referencial da espaçonave, enquanto que os menores são relacionados à matriz CCD do FOV)..... | 237 |
| C.1  | Estrutura funcional de CSCs do ambiente de simulação e testes SIATS.....   | 239 |
| C.2  | Janela principal de interface da ferramenta SIATS.....   | 240 |
| C.3  | Visualização 3D (ampliada) dos resultados de teste.....  | 241 |
| C.4  | Visualização textual dos resultados de teste.....  | 242 |
| C.5  | Visualização gráfica dos resultados de teste.....  | 243 |
| C.6  | Menus de configuração do ambiente de simulação e teste.....  | 244 |
| C.7  | Configuração do catálogo.....  | 245 |
| C.8  | Configuração de características de catálogo.....   | 246 |
| C.9  | Configuração do tipo de simulação.....   | 247 |
| C.10 | Configuração do sensor de estrelas.....  | 248 |
| C.11 | Configuração de características do sensor de estrelas.....   | 248 |
| C.12 | Configuração de características do arquivo de dados de sensor de estrelas.....   | 249 |
| C.13 | Configuração do sensor de pré-estimativa.....  | 250 |
| C.14 | Configuração de características do sensor de pré-estimativa.....   | 250 |
| C.15 | Configuração do arquivo de dados de sensor de estrelas.....  | 251 |
| C.16 | Configuração do algoritmo de identificação de estrelas.....  | 252 |
| C.17 | Configuração de características do algoritmo de identificação de estrelas.....   | 253 |
| C.18 | Configuração da determinação de atitude.....   | 254 |
| C.19 | Configuração da simulação dinâmica de atitude.....   | 255 |
| C.20 | Configuração do arquivo de dados de teste.....   | 256 |
| C.21 | Configuração de características do arquivo de dados de teste.....  | 256 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| C.22 | Menus de ajuda do ambiente de simulação e teste.....                                 | 257 |
| C.23 | Informações gerais sobre a ferramenta.....   | 258 |
| C.24 | Informações sobre configuração de arquivos e modelos.....                            | 258 |
| C.25 | Informações sobre execução dos testes.....   | 259 |
| C.26 | Informações sobre funções da biblioteca de funções.....                              | 259 |
| C.27 | Informações sobre as ferramentas auxiliares.....                                     | 260 |
| C.28 | Menus de ações de manipulação de arquivos do ambiente de simulação e teste.....      | 261 |
| C.29 | Menus de ações de visualização de informações do ambiente de simulação e teste.....  | 261 |
| C.30 | Menus de ações de manipulação de informações do ambiente de simulação e teste.....   | 262 |
| C.31 | Configuração do arquivo que concentra todas as informações de configuração.....      | 263 |
| C.32 | Configuração de características do arquivo de dados de configuração.....             | 264 |
| C.33 | Visualização de configurações atuais.....  | 264 |
| C.34 | Visualização textual dos dados presentes em um arquivo de dados de sensor.....       | 265 |
| C.35 | Visualização dos resultados 3D dos testes.....                                       | 265 |
| C.36 | Visualização de informações presentes em catálogos escolhidos.....                   | 266 |
| C.37 | Visualização de informações presentes em arquivos de dados de sensor escolhidos..... | 267 |
| C.38 | Importação de arquivos de dados de sensor.....                                       | 267 |
| C.39 | Exportação de arquivos de dados de sensor.....                                       | 268 |
| C.40 | Inserção de novas estrelas em um catálogo escolhido.....                             | 268 |
| C.41 | Visualização 3D dos testes.....  | 269 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| C.42 | Configuração da entrada manual e condições iniciais de atitude para a<br>simulação dinâmica..... | 270 |
| C.43 | Configuração do número de passos para a simulação dinâmica.....                                  | 271 |
| C.44 | Exemplo de saída 3D.....   | 279 |
| C.45 | Exemplos de saída gráfica.....   | 280 |

## LISTA DE TABELAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 3.1 Faixas de aplicação ótimas às probabilidades de identificação .....   | 97          |
| 3.2 Relação dos tamanhos de FOV com o número de divisões a ser utilizado e<br>número de subcatálogos resultantes .....                              | 106         |
| 5.1 Definição das configurações de sistema .....  | 145         |
| 5.2 Definição dos testes .....  | 147         |
| 5.3 Parâmetros gerais de teste do método de justaposição direta com otimização<br>de domínio de incerteza .....                                     | 155         |
| 5.4 Ocorrências dos tipos de identificação nos testes do método de justaposição<br>direta com otimização de domínio de incerteza .....              | 156         |
| 5.5 Parâmetros específicos de teste do método de justaposição direta com<br>otimização de domínio de incerteza .....                                | 157         |
| 5.6 Parâmetros gerais para teste da técnica de identificação por confirmações<br>sucessivas .....   | 163         |
| 5.7 Ocorrências dos tipos de identificação nos testes da técnica de identificação<br>por confirmações sucessivas .....                              | 164         |
| 5.8 Parâmetros específicos para teste da técnica de identificação por<br>confirmações sucessivas .....  | 165         |
| 5.9 Parâmetros gerais para teste da técnica de identificação por avaliação do<br>índice de desempenho na forma acoplada .....                       | 175         |
| 5.10 Ocorrências dos tipos de identificação nos testes da técnica de identificação<br>por avaliação do índice de desempenho na forma acoplada ..... | 176         |
| 5.11 Parâmetros específicos (1) para teste da técnica de identificação por<br>avaliação do índice de desempenho na forma acoplada .....             | 177         |
| 5.12 Parâmetros específicos (2) para teste da técnica de identificação por<br>avaliação do índice de desempenho na forma acoplada .....             | 178         |
| 5.13 Parâmetros gerais para teste da técnica de identificação por avaliação do<br>índice de desempenho na forma desacoplada .....                   | 191         |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.14 | Ocorrências dos tipos de identificação nos testes da técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.....                 | 192 |
| 5.15 | Parâmetros específicos referentes às estrelas nos testes da técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada....           | 193 |
| 5.16 | Parâmetros específicos referentes aos padrões binários nos testes da técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada..... | 194 |
| 5.17 | Avaliação global das técnicas de identificação de estrelas – caso aleatório.....  | 201 |
| 5.18 | Avaliação global das técnicas de identificação de estrelas – caso dinâmico.....   | 202 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $al$                              | - número aleatório   |
| $\arccos$                         | - Função arco-coseno   |
| $\arcsen$                         | - Função arco-seno   |
| $\arctg$                          | - Função arco-tangente   |
| $Bom$                             | - nível considerado aceitável para um dado critério de otimização                            |
| $B$                               | - magnitude azul   |
| $C_I$                             | - números de catalogação das estrelas associadas às observações univocamente identificadas   |
| $c_i, d_i$                        | - coeficientes dependentes do sensor no cálculo do sinal de saída                            |
| $c_{Min}$                         | - coseno da abertura angular da metade da diagonal (ou raio) do FOV                          |
| $\cos$                            | - Função coseno  |
| $\cos x$                          | - coseno de x  |
| $\det$                            | - determinante de matriz   |
| $\hat{e}$                         | - eixo de rotação de <b>Euler</b>  |
| $\hat{e}_i$                       | - versor do sistema ortonormal de base $\epsilon$  |
| $\hat{e}_i, \hat{e}_j, \hat{e}_k$ | - versores do sistema ortonormal   |
| $\hat{e}\phi$                     | - Sistema de atitude em eixo e ângulo de rotação de <b>Euler</b>                             |
| $f$                               | - distância focal da lente   |
| $f_k(\epsilon)$                   | - função de probabilidades modificada por faixa de critérios                                 |
| $f_{ótima}(\epsilon)$             | - função ótima dos múltiplos critérios   |
| $F_S$                             | - abertura angular da metade da diagonal do FOV  |
| $f(R)$                            | - função matriz  |
| $h$                               | - hora   |
| $h$                               | - fator de erro de probabilidades;<br>- fator empírico no cálculo de magnitude instrumental. |
| $i, j, k$                         | - versores do sistema ortonormal   |
| $I$                               | - matriz identidade $3 \times 3$<br>- conjunto de versores de estrelas identificadas         |



|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| $I$                                  | - sinal de saída relacionado à magnitude instrumental   |
| $J$                                  | - funcional erro  |
| $m_i$                                | - magnitude instrumental  |
| $M_i$                                | - matriz definida para o cálculo de $\xi_i^*$   |
| $M_{i-se}$                           | - matriz de rotação do referencial do sensor para o referencial inercial<br>- matriz de atitude do referencial inercial com relação ao sensor   |
| $M_{i-sp}$                           | - matriz de rotação do referencial da espaçonave para o referencial inercial<br>- matriz de atitude do referencial inercial com relação à espaçonave                                      |
| $M_{pe}$                             | - matriz de rotação de pré-estimativa do referencial inercial para o referencial da espaçonave<br>- matriz de atitude de pré-estimativa da espaçonave com relação ao referencial inercial |
| $M_r$                                | - matriz representativa da base ortonormal em um referencial r  |
| $M_s$                                | - matriz representativa da base ortonormal em um referencial s  |
| $M_{se-i}$                           | - matriz de rotação do referencial inercial para o referencial do sensor<br>- matriz de atitude do sensor com relação ao referencial inercial   |
| $M_{sp-i}$                           | - matriz de rotação do referencial inercial para o referencial da espaçonave<br>- matriz de atitude da espaçonave com relação ao referencial inercial                                     |
| $M_{sp-se}$                          | - matriz de rotação do referencial do sensor para o referencial da espaçonave<br>- matriz de atitude da espaçonave com relação ao sensor  |
| $M_{se-sp}$                          | - matriz de rotação do referencial da espaçonave para o referencial do sensor<br>- matriz de atitude do sensor com relação à espaçonave   |
| $mags$                               | - magnitude observada   |
| $N$                                  | - Norte   |
| $N_I$                                | - número de estrelas do catálogo candidatas à identificação para cada estrela observada (mesmo as não identificadas univocamente)   |
| $\hat{n}_i, \hat{n}_i', \hat{n}_i''$ | - eixos de rotação de <b>Euler</b> após rotações sucessivas   |
| $O$                                  | - conjunto de versores de estrelas observadas   |
| $O_C$                                | - índices das estrelas do catálogo que foram observadas pelo sensor.  |
| $O_I$                                | - estrelas observadas univocamente identificadas  |

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| $O_s$                                 | - índices das estrelas de entrada no modelo do sensor que foram observadas pelo sensor.        |
| $Pa$                                  | - probabilidade de identificação ambígua   |
| $Pe$                                  | - probabilidade de identificação errônea   |
| $Pi$                                  | - probabilidade de identificação correta   |
| $P_k(\varepsilon)$                    | - função de probabilidade de identificação   |
| $Pni$                                 | - probabilidade de não identificação   |
| $q$                                   | - quaternion   |
| $Q$                                   | - densidade estelar  |
| $q_N$                                 | - quaternion normalizado   |
| $\vec{r}$                             | - vetor qualquer   |
| $R$                                   | - matriz de rotação  |
| $R^{-1}$                              | - matriz inversa única de $R$  |
| $R^{Sk}$                              | - matriz anti-simétrica de um vetor  |
| $R^T$                                 | - matriz transposta de $R$   |
| $R_1$                                 | - matriz de transformação de $x'y'z''$ para $x'''y'''z'''$                                     |
| $\{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3\}$ | - base ortonormal inercial   |
| $R_2$                                 | - matriz de transformação de $x'y'z'$ para $x''y''z''$   |
| $R_3$                                 | - matriz de transformação de $xyz$ para $x'y'z'$   |
| $R_{321}$                             | - matriz de transformação de $xyz$ para $x'''y'''z'''$ (ângulos de Euler em modo 321)          |
| $R_\sigma$                            | - matriz de rotação causada por erro ou desvio padrão $\sigma$                                 |
| $Ruim$                                | - nível considerado inaceitável para um dado critério de otimização                            |
| $S$                                   | - Sul  |
| $S$                                   | - versor de posicionamento da estrela no sistema do sensor                                     |
| $\{\hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{s}_3\}$ | - base ortonormal no referencial da espaçonave   |
| $\text{sen}$                          | - Função seno  |
| $\text{sx}$                           | - seno de $x$ ;  |
| $S_x, S_y, S_z$                       | - componentes de vetor no sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial do sensor. |
| $\text{tg}$                           | - Função tangente  |
| $tol$                                 | - precisão de busca de posição   |
| $tol_{sep}$                           | - precisão de busca separação angular  |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $tol_M$            | - precisão de busca de magnitude   |
| $tr$               | - traço de matriz  |
| $v$                | - magnitude visual aparente  |
| $\vec{U}_i$        | - vetor definido para o cálculo de $\vec{\xi}_i^*$   |
| $u, v$             | - coordenadas cartesianas planas na matriz do sensor   |
| $\hat{V}$          | - versor de observação no referencial inercial   |
| $\vec{V}$          | - vetor de módulo $V$  |
| $[[\vec{V}]]$      | - função ômega da matriz anti-simétrica definida sobre o vetor $\vec{V}$                           |
| $V_{n \times 1}$   | - vetor ou matriz coluna   |
| $V_x, V_y, V_z$    | - Componentes de vetor no sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial inercial       |
| $\hat{W}$          | - versor de observação no referencial da espaçonave  |
| $W_x, W_y, W_z$    | - componentes de vetor no sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial da espaçonave. |
| $x$                | - abertura angular da metade da largura<br>- eixo do sistema cartesiano-plano de coordenadas       |
| $y$                | - abertura angular da metade da altura<br>- eixo do sistema cartesiano-plano de coordenadas        |
| $xy$               | - Sistema cartesiano-plano de coordenadas  |
| $xyz$              | - Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas   |
| $x, y, z$          | - componentes de vetor no sistema ortonormal   |
| $X, Y, Z$          | - Eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial inercial                      |
| $x', y', z'$       | - eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas depois da rotação $\varphi$                  |
| $x'', y'', z''$    | - eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas depois da rotação $\theta$                   |
| $x''', y''', z'''$ | - eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas depois da rotação $\psi$                     |

## Gregos

|                |   |
|----------------|---|
| $\alpha$       | - ascensão reta no referencial inercial                         |
| $\alpha_h$     | - ascensão reta em horas no referencial inercial                |
| $\alpha_{hs}$  | - ascensão reta em horas no referencial da espaçonave ou sensor |
| $\alpha\delta$ | - Sistema equatorial de coordenadas                             |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $\alpha\delta\psi$          | - Sistema equatorial de atitude   |
| $\gamma$                    | - ponto de equinócio vernal   |
| $\delta$                    | - declinação no referencial inercial  |
| $\delta_s$                  | - declinação no referencial da espaçonave ou sensor   |
| $\Delta$                    | - variação  |
| $\varepsilon$               | - tolerância permitida  |
| $\varepsilon, \varepsilon'$ | - bases   |
| $\epsilon_{ijk}$            | - condição do sistema ortonormal  |
| $\theta$                    | - segunda primeira rotação de <b>Euler</b> nos eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas<br>- ângulo qualquer; primeiro ângulo de coordenada esférica                             |
| $\lambda$                   | - ângulo de estrela referente ao plano $xy$ do sensor   |
| $\Lambda$                   | - matriz diagonal   |
| $\mu$                       | - fator de presença de estrelas no campo para as probabilidades   |
| $\vec{\xi}_i$               | - vetor erro da atitude calculada com relação à real  |
| $\vec{\xi}_i^*$             | - vetor erro que otimiza $J$  |
| $\pi$                       | -número Pi  |
| $\rho$                      | - densidade de estrelas; raio de coordenada esférica  |
| $\partial$                  | - diferencial parcial   |
| $\sigma$                    | - desvio padrão   |
| $\sigma_{\text{mag}}$       | - erro de magnitude de observação   |
| $\sigma_k$                  | - desvio padrão de medida (erro do sensor)  |
| $\sigma_{\text{pe}}$        | - erro de pré-estimativa  |
| $\sigma_s$                  | - erro de posição de observação   |
| $\sigma_{\text{sep}}$       | - precisão de separação angular   |
| $\Sigma$                    | - somatória   |
| $\phi$                      | - primeira rotação de <b>Euler</b> nos eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas<br>- ângulo de estrela referente ao plano $yz$ do sensor ; segundo ângulo de coordenada esférica |
| $\phi\theta\psi$            | - Sistema de atitude em ângulos de <b>Euler</b>   |

|             |   |
|-------------|---|
| $\psi$      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- terceira rotação de <b>Euler</b> nos eixos do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas</li> <li>- ângulo de fase no sistema equatorial de atitude</li> </ul> |
| $\vartheta$ | - área de busca delimitada pelo raio de busca em torno da posição da estrela observada  |
| $\int$      | - símbolo de integração   |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|          |  |
|----------|--|
| AMCD -   | <i>Attitude Measurement and Control Data</i>                   |
| AMCS -   | <i>Attitude Measurement and Control System</i>                 |
| CCD -    | <i>Charged Couple Device</i> (matriz eletrônica foto sensível) |
| CDA -    | Centro de Divulgação da Astronomia                             |
| CSC –    | <i>Computer Software Component</i>                             |
| DLR –    | <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>               |
| FOV –    | <i>Field Of View</i> (campo de visada)                         |
| Mag. -   | Magnitude  |
| Máx. -   | Máximo   |
| Mín. -   | Mínimo   |
| RAM -    | <i>Random Access Memory</i>                                    |
| ROSAT. - | <i>Roentgen Satellite</i>                                      |

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 MOTIVAÇÃO

A questão da identificação de estrelas observadas por sensores estelares insere-se no contexto da determinação de atitude de veículos espaciais, necessária tanto para o controle da atitude do veículo quanto para a correta interpretação de informações fornecidas pelos instrumentos da carga útil. Dentre os diversos tipos de sensores de atitude utilizados para determinar a atitude de um veículo espacial, o sensor estelar se destaca pela capacidade de oferecer a maior quantidade de observações simultâneas e com a melhor precisão. No entanto, o uso deste tipo de sensor requer um pré-processamento especial das observações no sentido de identificar quais são as estrelas que estão sendo efetivamente observadas no momento da determinação de atitude.

Infelizmente não existe ainda uma solução consensual e definitiva para este problema. De fato, na literatura especializada encontram-se diversas técnicas de identificação de estrelas, cada qual utilizando-se de diferentes métodos de identificação com vantagens e desvantagens que as tornam mais ou menos indicadas para uma determinada aplicação. No entanto, a inexistência de uma comparação sistemática de um conjunto de técnicas diferentes é uma dificuldade presente para a escolha da técnica mais apropriada e, conseqüentemente, do algoritmo a ser implementado para a aplicação em um projeto particular.

Da mesma forma, não existe o sensor estelar ideal para um veículo espacial genérico. Encontram-se disponíveis no mercado uma variedade de sensores estelares com seus diferentes parâmetros, tais como precisão, abertura do campo de visada, número e magnitude limite de estrelas simultaneamente rastreáveis. Por sua vez, as missões espaciais possuem seus requisitos específicos de precisão de determinação de atitude, memória disponível no computador de bordo, peso, volume, potência e recursos disponíveis para o sensor estelar, entre outros. Tais características são decisivas ao se escolher uma determinada técnica de identificação de estrelas para uma dada aplicação espacial. Uma escolha inadequada ou incompatível comprometerá os resultados esperados. Daí a importância de um estudo comparativo sobre as diferentes técnicas de identificação de estrelas dos pontos de vista teórico e prático de sua aplicação em missões espaciais.

Em particular, a existência de projetos em andamento no contexto do programa espacial brasileiro tais como o desenvolvimento de um sensor estelar, o micro-satélite científico franco-brasileiro, bem como o balão estratosférico MASCO, justificam a realização de pesquisas sobre este tema ainda pouco explorado no país.

Além disso, já existem no mesmo contexto, esforços no desenvolvimento de pesquisas de tópicos relacionados à determinação de atitude via sensores de estrelas tais como estudos na área de catálogos de estrelas.

## 1.2 OBJETIVOS

O problema de identificação de estrelas consiste em associar a cada estrela observada por um sensor uma única estrela catalogada.

O trabalho aqui apresentado estuda e classifica métodos, e técnicas que os utilizam, para a identificação de estrelas observadas por sensores estelares existentes na literatura e desenvolve um ambiente de simulação e teste para análise de seus desempenhos em aplicações espaciais.

Este trabalho não pretende desenvolver técnicas novas. Porém utiliza-se da ferramenta desenvolvida para estudar o comportamento de algumas técnicas quando aplicadas em conjunto com possíveis variações aqui desenvolvidas.

O ambiente desenvolvido auxilia não só o estudo prático deste trabalho como também pode auxiliar possíveis trabalhos futuros, além de facilitar o projeto e avaliação de implementação de requisitos de sistemas de determinação de atitude baseados em sensores de estrelas

Para tanto, com base na pesquisa bibliográfica, foram selecionadas algumas técnicas que se utilizam de diferentes métodos e que sejam representativas para a implementação em computador através de algoritmos bem definidos, realizando-se o levantamento de desempenho por testes via simulação digital.

Como é possível alterar e adaptar os algoritmos às técnicas de muitas maneiras, estudou-se e implementou-se para algumas das técnicas, algumas variações nos algoritmos a título de demonstração para as possibilidades que existem em termos de adaptação.

Os requisitos considerados na implementação das técnicas e na avaliação de suas características distinguem-se em:

- Concentrar o estudo em aplicações para espaçonaves com estabilização em três eixos;
- Escolher técnicas que possuam versatilidade, rapidez de processamento e baixa requisição de memória de armazenamento;
- Reter apenas a essência das técnicas selecionadas em benefício da representatividade;
- Não levar em consideração as particularidades das aplicações que motivaram cada técnica avaliada;
- Conduzir os testes sob condições padronizadas que permitam a comparação entre os resultados obtidos pelos algoritmos que implementam as diferentes técnicas;
- Testar, excepcionalmente, algumas adaptações inovadoras que surjam durante a implementação das técnicas pelos algoritmos;



- Gerar um quadro de avaliação comparativa das diferentes categorias analisadas, contendo informações úteis para a formulação de estratégias racionais de identificação de estrelas para as diferentes fases de uma missão espacial.
- Prover informações que viabilizem possíveis desenvolvimentos futuros de novas técnicas ou melhorias nos algoritmos com base na necessidade de projetos de interesse brasileiro.

Sendo assim, técnicas consideradas variantes dentro de uma mesma categoria não foram implementadas, até para evitar que o trabalho assumisse proporções que o inviabilizassem. Todavia, propostas de melhorias foram devidamente anotadas e serão resumidas na Seção 6.3 (SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS) no Capítulo 6. (CONCLUSÕES).

Além dos testes via simulação, com base nas descrições e especificações do satélite *Roentgen Satellite* (**ROSAT**), foi possível testar dados fornecidos pelo instituto espacial alemão *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (**DLR**), a título de exemplo, utilizando-se de uma das técnicas definidas para implementação.

O detalhamento da implementação da utilização de dados **ROSAT** encontra-se descrito no Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS). O detalhamento da implementação da interface com os dados ROSAT encontra-se na Seção B.2 (IMPLEMENTAÇÃO DA INTERFACE COM DADOS ROSAT) do APÊNDICE B.

Por fim, até onde o autor tem conhecimento, a ferramenta desenvolvida para avaliação sistemática de diversas técnicas de identificação de estrelas, representa uma contribuição original para a área.

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada neste estudo teve por objetivos adquirir conhecimentos sobre trabalhos já desenvolvidos que, de forma independente, aplicam-se aos seus devidos contextos de operação no âmbito da determinação de atitude através de identificações de estrelas observadas por sensores estelares a bordo de espaçonaves estabilizadas em três eixos. Teve também por objetivo a seleção das técnicas que se destinaram à implementação para estudo prático da operação de cada uma.

Da análise destes trabalhos, pode-se distinguir dois diferentes métodos: justaposição direta e justaposição de separação angular.

O método da justaposição direta utiliza-se basicamente da comparação entre as posições da estrela observada com a estrela catalogada. Já o método da justaposição angular utiliza-se da comparação das separações angulares entre estrelas observadas com as separações angulares entre estrelas catalogadas.

Para o método da justaposição direta nota-se a aplicação mencionada por Wertz (1997), que utiliza-se do auxílio de outros tipos de sensores para a obtenção da pré-estimativa.

Já o método da justaposição de separação angular caracteriza-se por uma maior variedade de técnicas disponíveis. Algumas utilizam-se apenas da comparação entre os pares como apresentado por Baldini et al. (1993), ou ainda com o auxílio de um catálogo de pares previamente armazenado como apresentado por Bank (1995). Outras elaboram estratégias que se utilizam da formação de padrões como apresentado por Scholl (1995). Também existe a possibilidade da utilização de índices de desempenho que classifiquem as identificações entre si com a utilização de catálogo de pares de estrelas como apresentado por Bezooijen (1989) ou com a utilização de catálogo de padrões binários formados pelas estrelas com suas vizinhas como apresentado por Williams et al. (1993). Ainda pode-se considerar aqueles que dividem o céu e armazenam as regiões resultantes para posterior comparação como apresentado por Strikwerda et al. (1991).

Estas técnicas podem utilizar-se do auxílio da pré-estimativa ou ainda de técnicas de otimização da varredura, como a apresentada por Ketchum (1995) ou Mortari (1996), que lhes conferem uma característica de funcionamento autônomo.

No mesmo contexto foram ainda analisadas publicações (Rupp; Feucht,1995) (Rupp; Bollner,1991) (Purll; Gradmann; Bollner,1991 ) (Bollner,1989), que descrevem um caso real de aplicação de sensores de estrelas para o cálculo de atitude para a espaçonave **ROSAT** estabilizada em três eixos. Essas publicações descrevem detalhadamente a constituição do sistema de determinação de atitude que utiliza-se de um sistema de sensores de estrelas combinado com giroscópios para posicionar e alinhar um telescópio de raios X a bordo. Descrevem também os efeitos e soluções adotadas diante do mal funcionamento de um dos giros, seguido por perda de um sensor de estrelas e um giroscópio. Essas publicações são detalhadas na Seção B.1. (UTILIZAÇÃO DE SENSORES DE ESTRELAS EM APLICAÇÕES REAIS) do APÊNDICE B.

Além das análises teóricas com base na bibliografia, contou-se também com a experiência prática adquirida previamente nos trabalhos (Lopes; Carvalho,1996a) e (Lopes; Carvalho, 1996b), ambos aplicando-se ao cálculo da atitude de uma espaçonave estabilizada em três eixos utilizando-se do método de determinação apresentado por Shuster (1989) em solução ao problema proposto por Wahba (1965).

No primeiro, houve-se por objetivo o estudo da técnica apresentada por Wertz (1997) que utiliza-se do método da justaposição direta com raio de incerteza otimizada pela técnica de múltiplos critérios (Levine, 1996).

Já no segundo, houve-se por objetivo o estudo da técnica apresentada por Bezooijen (1989) que utiliza-se do método da justaposição de separações angulares.

Algumas das conclusões desses trabalhos mostraram a importância e influência das hipóteses adotadas. Para o primeiro verificou-se a confirmação quanto ao desempenho no que se refere à distribuição das estrelas no céu, assim como a densidade de estrelas.

Já para o segundo, iniciou-se o estudo do modo de cálculo da notas atribuídas às estrelas.

## 1.4 SEQUÊNCIA DO TRABALHO

Dando sequência ao trabalho, o Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS) traz os conceitos básicos envolvidos com relação aos sistemas de referência e coordenadas utilizados, assim como o detalhamento e modelamento dos sistemas que compõem a determinação de atitude de uma espaçonave com sensores estelares. O modelamento foi elaborado de forma a possuir independência ao máximo com relação ao ambiente computacional a ser utilizado na implementação. Porém, como alguns dos itens são dependentes da ferramenta computacional, estes foram modelados já orientados ao ambiente *PC-Matlab* (The Math Works Inc.), no qual se baseia a ferramenta de ambiente de simulação e testes desenvolvida para este trabalho batizada com o nome *Star Identification Algorithm Test Software* (**SIATS**).

As técnicas de identificação são abordadas no Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS), que apresenta as técnicas presentes na literatura e classifica aquelas que foram escolhidas para implementação, além de abordar a utilização de dados reais provenientes do satélite **ROSAT** na identificação de estrelas. Detalhes sobre os dados, estudo e implementação da interface **ROSAT** podem ser encontrados no APÊNDICE B.

O Capítulo 4. (AMBIENTE DE SIMULAÇÃO TESTES) mostra os conceitos e detalhes do desenvolvimento do ambiente de simulação e testes **SIATS** construído especialmente para este trabalho de forma a facilitar a análise dos testes para cada técnica, os quais são discutidos no Capítulo 5 (TESTE E ANÁLISE DE ALGORITMOS REPRESENTATIVOS). Conclusões sobre o estudo e os testes elaborados podem ser encontrados no Capítulo 6. (CONCLUSÕES). Detalhes do desenvolvimento do aplicativo **SIATS** encontram-se no APÊNDICE C.

O APÊNDICE A contém informações adicionais sobre magnitudes de estrelas.

Como adotou-se o inglês como idioma para o *software* **SIATS** e as figuras que representam os gráficos de resultados ou visualização 3D das implementações foram geradas pelo *software* **SIATS**, as mesmas apresentam-se em Inglês. Em algumas adaptações das figuras originais utilizou-se o Português.



## **CAPÍTULO 2**

### **CONCEITOS BÁSICOS**

Esta parte do desenvolvimento estabelece uma breve discussão a respeito de conceitos básicos, sem os quais seria impossível o perfeito andamento do trabalho.

Todos os conceitos aqui apresentados formam em conjunto a base que dita a forma e as características com que o sistema desenvolvido funciona.

#### **2.1 SISTEMAS DE REFERÊNCIA**

##### **2.1.1 ESFERA CELESTE**

O conceito de esfera celeste derivou da noção primitiva de uma gigantesca esfera concêntrica com a Terra, onde estão fixos os astros. Apesar desta concepção do Cosmos estar ultrapassada, o conceito de esfera celeste em si permanece bastante utilizado por seu aspecto didático e sua capacidade de representar posições quando a distância em profundidade não é considerada.

Através deste conceito, projetam-se características presentes na Terra para esta esfera, como o eixo de rotação e os pólos, sendo então denominados eixo e pólos celestes respectivamente.

Desprezaram-se neste trabalho, os movimentos próprios de todos os astros, imaginando-se que estes estejam estáticos. Além disso não foram considerados os planetas, cometas, asteróides, o Sol e a Lua, apenas levando-se em conta as estrelas.

Unindo-se a este conceito, acrescentam-se sistemas que codificam coordenadas, facilitando a localização de qualquer astro na esfera. Imaginam-se circunferências envolvendo a esfera e concorrendo nos pólos, constituindo os meridianos ou círculos horários, e circunferências perpendiculares ao eixo de rotação que constituem os paralelos ou círculos diários (Ver Fig. 2.1).

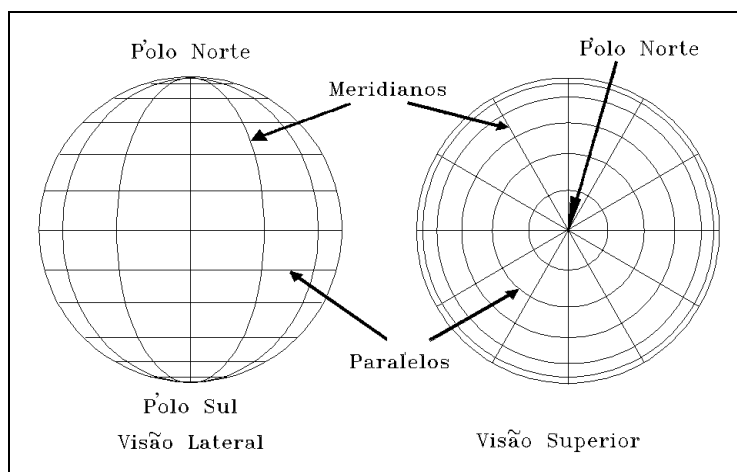


Fig. 2.1 - Codificação de coordenadas na esfera celeste.

## 2.1.2 DESCRIÇÃO DOS REFERENCIAIS

Cada referencial a seguir pode ser associado a uma esfera celeste associada e às suas referências.

A associação dos referenciais à esfera celeste deve ser estabelecida com base nas referências do sistema de paralelos e meridianos da mesma.

Para os paralelos a referência é o paralelo central chamado de Equador, enquanto que para os meridianos, a referência é adotada como sendo o meridiano que contém um ponto definido denominado por  $\gamma$  (ponto vernal).

### 2.1.2.1 REFERENCIAL INERCIAL

O referencial inercial define-se com base nas características físicas e geométricas da órbita terrestre e é solidário à mesma e às suas referências (Ver Fig. 2.2). É neste referencial que encontram-se catalogadas todas as coordenadas de estrelas utilizadas.

No caso do referencial inercial, o ponto  $\gamma$  referência é definido como a interseção entre o plano orbital terrestre (plano dos equinócios ou eclíptica), plano equatorial terrestre e a esfera celeste (Ver Fig. 2.2). Esta interseção deve-se ao fato de a Terra não possuir seu eixo de rotação perpendicular ao plano de órbita, fazendo com que haja um ângulo entre os dois planos descritos. É importante ressaltar que, devido aos movimentos de precessão e nutação da Terra, a interseção entre os planos orbital e do equador não é estática, o que faz com que a interseção com a esfera celeste também não seja estática, modificando lentamente a definição do ponto referência  $\gamma$  e, com ele, todas as coordenadas associadas. O movimento de precessão possui um período de aproximadamente 26.000 anos para completar um ciclo no equador celeste, enquanto que o de nutação aproximadamente de 11.000 anos. Neste trabalho, estas mudanças foram desprezadas utilizando-se de catálogos de coordenadas de estrelas estáticos calculados com datas de referência fixas.

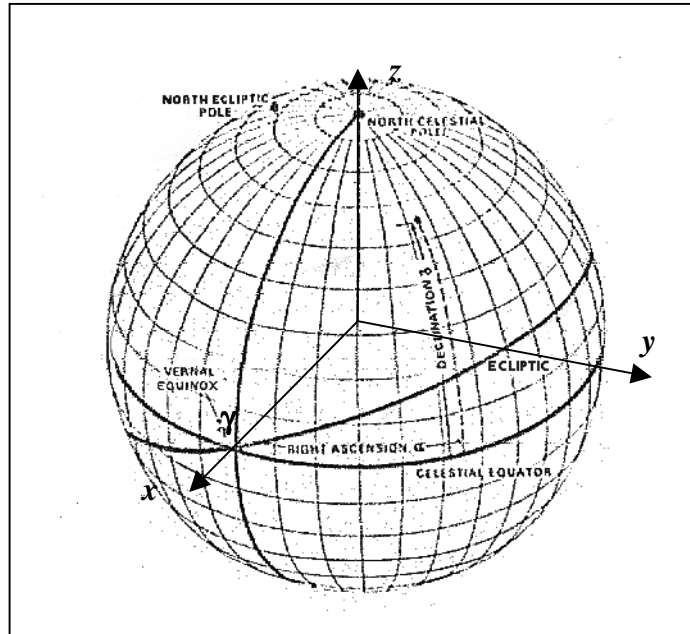


Fig. 2.2 - Referencial inercial.

Fonte: adaptado de Wertz (1997, p.27).

### 2.1.2.2 REFERENCIAL DA ESPAÇONAVE

O referencial da espaçonave define-se com base nas características físicas e geométricas da espaçonave e é solidário à mesma e às suas referências (Ver Fig. 2.3).

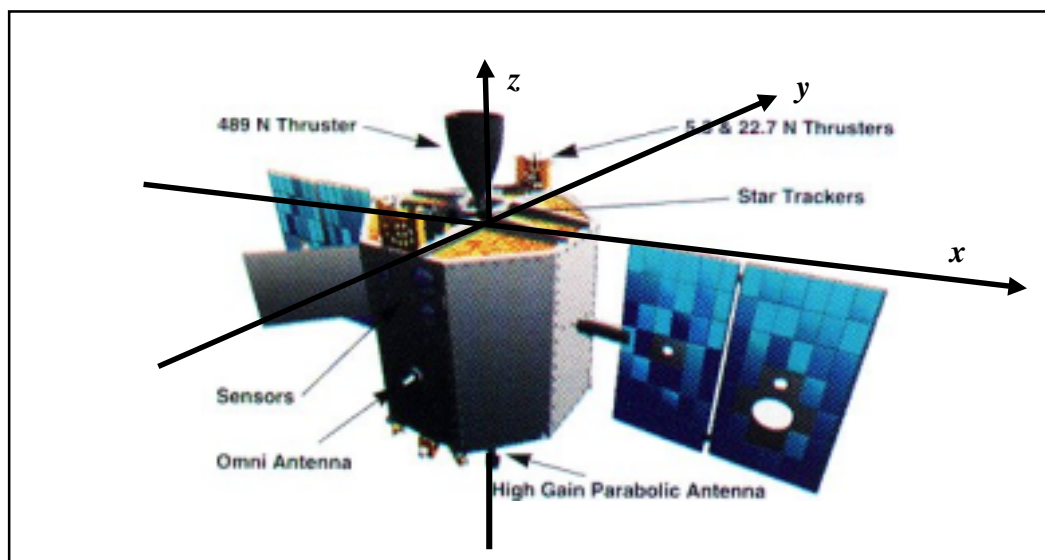


Fig. 2.3 - Referencial da espaçonave.

Fonte: adaptado de Williams (2000a).

### 2.1.2.3 REFERENCIAL DO SENSOR

O referencial do sensor define-se com base nas características físicas e geométricas do sensor e é solidário ao mesmo e às suas referências (Ver Fig. 2.4).

Neste trabalho, o apontamento do sensor está alinhado com o eixo  $y$  de seu referencial. Além disso considera-se que é neste referencial que o sensor observa as estrelas. A necessidade deste último referencial ocorre devido a possíveis desalinhamentos entre as referências do sensor e da espaçonave da qual ele faz parte.

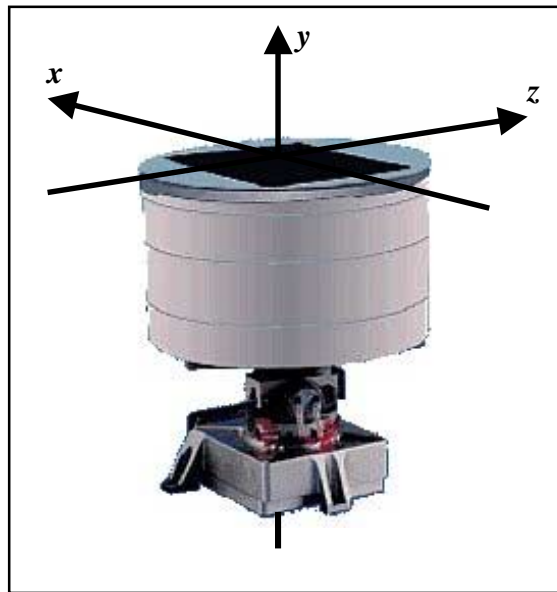


Fig. 2.4 - Referencial do sensor.

Fonte: Adaptado de Williams (2000b).

Assim, utilizando-se as referências de cada referencial, posiciona-se um sistema vetorial-cartesiano  $xyz$  com origem no centro da esfera.



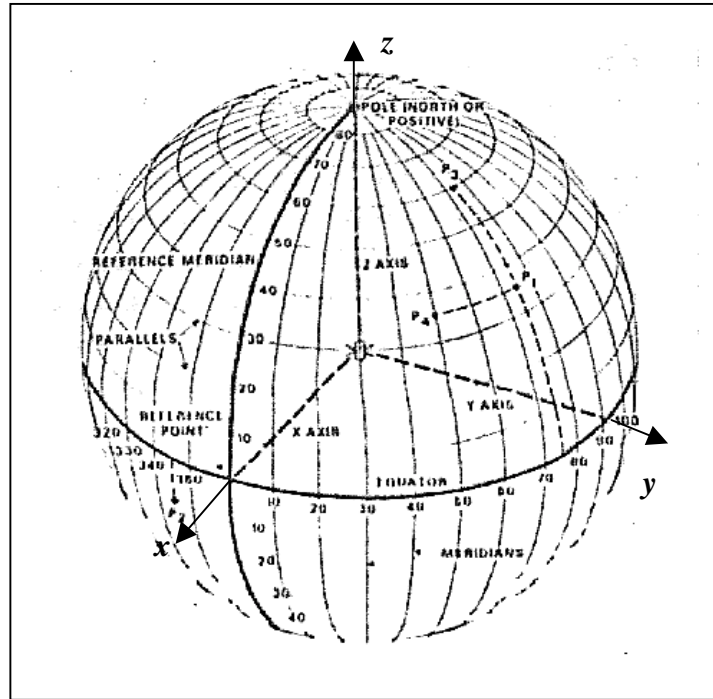


Fig. 2.5 - Esfera celeste no referencial da espaçonave ou sensor.  
Fonte: adaptado de Wertz (1997, p.24).

## 2.2 SISTEMAS DE COORDENADAS

### 2.2.1 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE COORDENADAS

#### 2.2.1.1 SISTEMA EQUATORIAL DE COORDENADAS

O sistema utilizado para catalogar as estrelas é o sistema equatorial de coordenadas, definido com base em duas coordenadas angulares. A partir dos meridianos define-se a coordenada de ascensão reta  $\alpha$  que equivale ao ângulo medido entre dois segmentos com vértice no centro da esfera e apontando, um para o meridiano de referência (que contém  $\gamma$ ) e o outro para um meridiano qualquer, sendo este ângulo medido em cima do equador em horas de 0 a 24 hs (comum em Astronomia) ou em graus de 0 a 360°, (adotado neste trabalho) a partir do meridiano de referência no sentido rotação positiva em torno de  $z$ .

A partir dos paralelos define-se a coordenada de declinação  $\delta$  que equivale ao ângulo medido entre dois segmentos com vértice no centro da esfera e apontando, um para o equador e o outro para um paralelo qualquer em cima de um mesmo meridiano, sendo medido a partir do equador positivamente de 0 a 90° para o norte e negativamente de 0 a -90° para o sul (Ver Fig. 2.6).

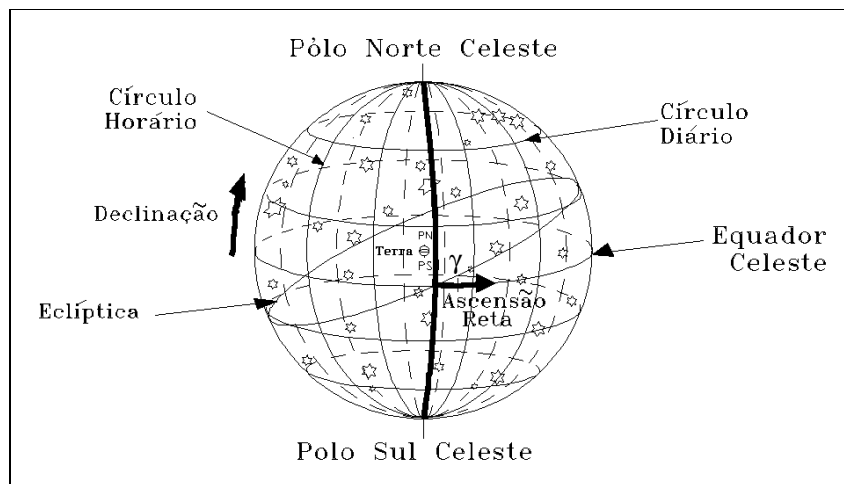


Fig. 2.6 - Sistema equatorial de coordenadas.

Apesar da praticidade em visualização, os sistemas angulares possuem alguns inconvenientes no que se refere aos cálculos com a utilização dos valores angulares e funções trigonométricas. Dessa forma, utiliza-se também um sistema de coordenadas vetorial, o vetorial-cartesiano.

#### 2.2.1.2 SISTEMA VETORIAL-CARTESIANO DE COORDENADAS

Este sistema de coordenadas é definido basicamente pela representação de um vetor no sistema de eixos cartesianos triaxial  $xyz$  (Ver Fig. 2.7).

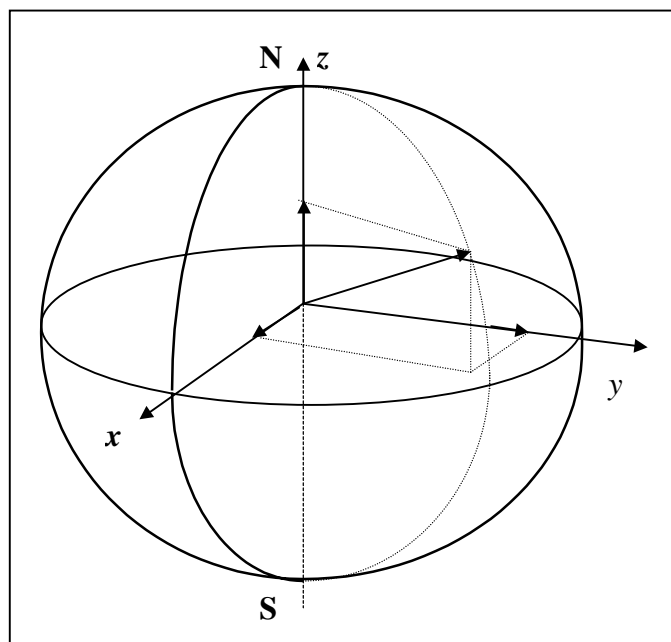


Fig. 2.7 - Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas.

Este sistema de coordenadas tem a função de ditar o posicionamento na esfera celeste, não tendo o módulo vetorial aplicação neste trabalho. Assim ao adotar-se para o mesmo o módulo unitário, ou seja, uma esfera de raio unitário, pode-se trabalhar com versores sem absolutamente nenhum prejuízo para o desenvolvimento.

### 2.2.1.3 SISTEMA CARTESIANO-PLANO DE COORDENADAS

Além de todos os sistemas de coordenadas utilizados para posicionamento, ainda há um sistema de coordenadas somente utilizado no sensor e que representa a matriz eletrônica plana e é chamado sistema cartesiano-plano de coordenadas.

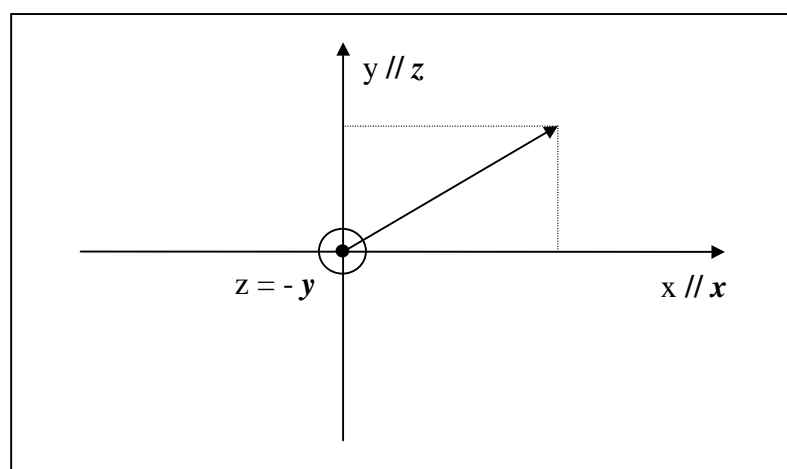


Fig. 2.8 - Sistema cartesiano-plano de coordenadas.

Esse sistema de coordenadas (Ver Fig. 2.8) é definido por um par de eixos cartesianos  $xy$  (caracteres não itálicos para diferenciar do sistema  $xyz$ ). Como o sensor neste trabalho está alinhado ao eixo  $y$  do seu referencial, o sistema cartesiano-plano de coordenadas está num plano perpendicular ao eixo  $y$  deste referencial, sendo que  $y$  possui a mesma direção do eixo  $z$  e  $x$  tem o mesmo sentido de  $x$  do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial do sensor. Note-se que o eixo  $z$  associado a esse sistema de coordenadas tem a mesma direção, porém sentido contrário ao eixo  $y$  do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial do sensor. Este sistema de coordenadas tem referência no centro da matriz do sensor, por onde passa o eixo  $y$  do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial do sensor.

## 2.2.2 TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS NO MESMO REFERENCIAL

### 2.2.2.1 SISTEMA EQUATORIAL DE COORDENADAS E SISTEMA VETORIAL-CARTESIANO DE COORDENADAS

Supondo-se um astro com coordenadas angulares no sistema equatorial de coordenadas, com ascensão reta  $\alpha$  e declinação  $\delta$ , pode-se obter suas coordenadas no sistema de coordenadas vetorial-cartesiano com as três componentes  $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ . Esta transformação leva as coordenadas de posicionamento de um sistema de coordenadas angulares para um vetorial (Ver Fig. 2.9).

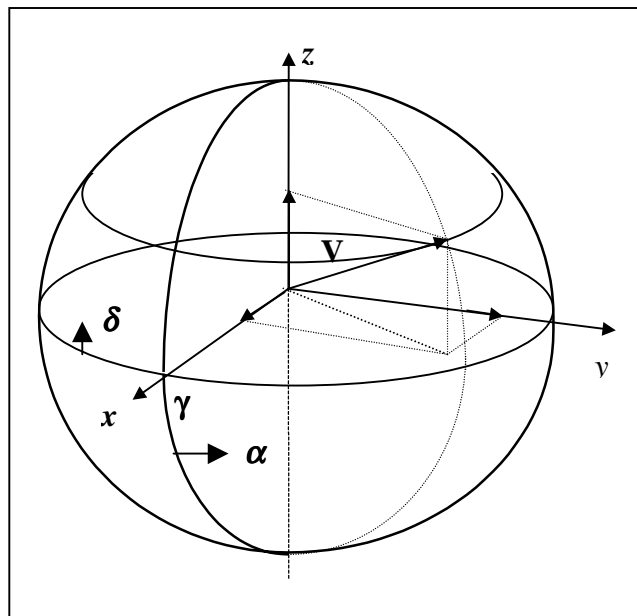


Fig. 2.9 - Sistema de coordenadas vetorial-cartesiano e sistema equatorial de coordenadas.

Tem-se então através da figura as seguintes relações:

Como:

$$|\vec{V}| = 1 : \quad (2.1)$$

Então:

$$V_x = \cos \delta \cdot \cos \alpha, \quad (2.2)$$

$$V_y = \cos \delta \cdot \sin \alpha. \quad (2.3)$$

$$V_z = \sin \delta; \quad (2.4)$$

A transformação inversa é da seguinte forma:

$$\alpha = \arctg (V_y/V_x) , \quad (2.5)$$

$$\delta = \arcsen (V_z) , \quad (2.6)$$

A transformação da ascensão reta de graus para horas é da seguinte forma:

$$\alpha_h = \alpha / 15 . \quad (2.7)$$

Com a devida análise do sinal de  $V_x$  e  $V_y$  para o posicionamento do ângulo no quadrante correto.

#### 2.2.2.2 SISTEMA VETORIAL-CARTESIANO DE COORDENADAS E SISTEMA CARTESIANO-PLANO DE COORDENADAS

Através da figura a seguir (Ver Fig. 2.10) pode-se obter as relações entre os dois sistemas a partir do versor  $\hat{S}$  (módulo unitário):

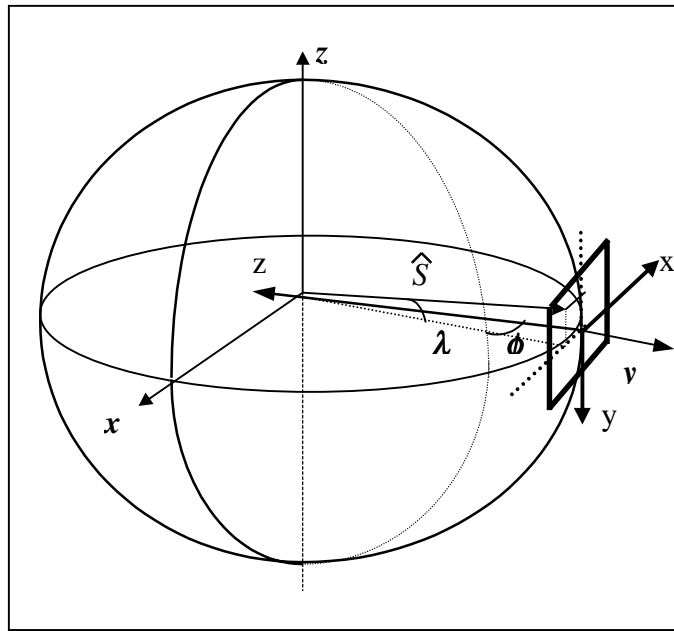


Fig. 2.10 - Sistema vetorial-cartesiano de coordenadas e sistema cartesiano-plano de coordenadas.

Escrevendo o versor  $\hat{S}$  no sistema  $xyz$ , e as coordenadas  $x$  e  $y$  no sistema  $xyz$  através dos ângulos  $\phi$  e  $\lambda$  temos:

$$S_x = \cos \lambda . \sen \phi. \quad (2.8)$$

$$S_y = \cos \lambda . \cos \phi. \quad (2.9)$$

$$S_z = \text{sen } \lambda \quad (2.10)$$

$$x = -\text{tg } \phi \quad (2.11)$$

$$y = -\text{tg } \lambda / \cos \phi \quad (2.12)$$

Então:

$$x = -S_x / S_y \quad (2.13)$$

$$y = -S_z / S_y \quad (2.14)$$

A transformação inversa seria da seguinte forma:

$$S_y = 1 / \sqrt{x^2 + y^2 + 1} \quad (2.15)$$

$$S_x = -x / \sqrt{x^2 + y^2 + 1} \quad (2.16)$$

$$S_z = -y / \sqrt{x^2 + y^2 + 1} \quad (2.17)$$

### 2.2.3 TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS ENTRE REFERENCIAIS DIFERENTES

Neste trabalho, como as estrelas são catalogadas no sistema equatorial de coordenadas no referencial inercial, mas são observadas no referencial do sensor, há a necessidade de transformar as informações do referencial do sensor para o referencial inercial.

As transformações de coordenadas do referencial inercial para o referencial do sensor e vice-versa dão-se numa seqüência de transformações utilizando-se das transformações descritas anteriormente.

Dessa forma, com as coordenadas  $x$  e  $y$  no sistema cartesiano-plano de coordenadas no referencial do sensor, pode-se chegar às coordenadas  $\alpha$  e  $\delta$  no sistema equatorial de coordenadas no referencial inercial da seguinte forma:

- 1) Transformação das coordenadas  $(x, y)$  do sistema cartesiano-plano de coordenadas no referencial do sensor para o sistema vetorial-cartesiano de coordenadas  $(S_x, S_y, S_z)$  no referencial do sensor;
- 2) Transformação das coordenadas do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial do sensor  $(S_x, S_y, S_z)$  para coordenadas do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial da espaçonave  $(W_x, W_y, W_z)$  através da matriz de rotação 312 que leva do referencial do sensor para o da espaçonave  $M_{sp-se} : W = M_{sp-se} \cdot \hat{S}$ ;
- 3) Transformação das coordenadas do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial da espaçonave  $(W_x, W_y, W_z)$  para coordenadas do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial inercial  $(V_x, V_y, V_z)$  através da matriz de

- 4) rotação 321 que leva do referencial da espaçonave para o inercial  $M_{i-sp}$  :  
 $\hat{V} = M_{i-sp} \hat{W}$ ;
- 5) Transformação das coordenadas do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas no referencial inercial ( $V_x, V_y, V_z$ ) para do sistema equatorial de coordenadas no referencial. Inercial ( $\alpha, \delta$ ).

## 2.3 SISTEMAS DE REPRESENTAÇÃO DE ATITUDE

A atitude pode ser definida como a orientação dos eixos de um referencial com relação a outro referencial, podendo ser representada por ângulos de **Euler**, matriz de rotação ou eixo e ângulo de rotação de **Euler**, por exemplo.

### 2.3.1 ÂNGULOS DE EULER

Neste trabalho utilizam-se os ângulos de **Euler** em rotação 3-1-2 e 3-2-1. A seguir é mostrado o processo de rotações sucessivas para a rotação 3-1-2 como exemplo.

As rotações sucessivas significam rotações em torno do eixo  $z(3)$  (ascensão reta), em seguida  $x(1)$  (declinação) e por último  $y(2)$ (fase), todas no sentido positivo do vetor rotação (Ver Fig. 2.11).

A primeira rotação identifica-se por  $\phi$ , a segunda por  $\theta$  e a terceira por  $\psi$  como mostrado na sequência de eixos abaixo:

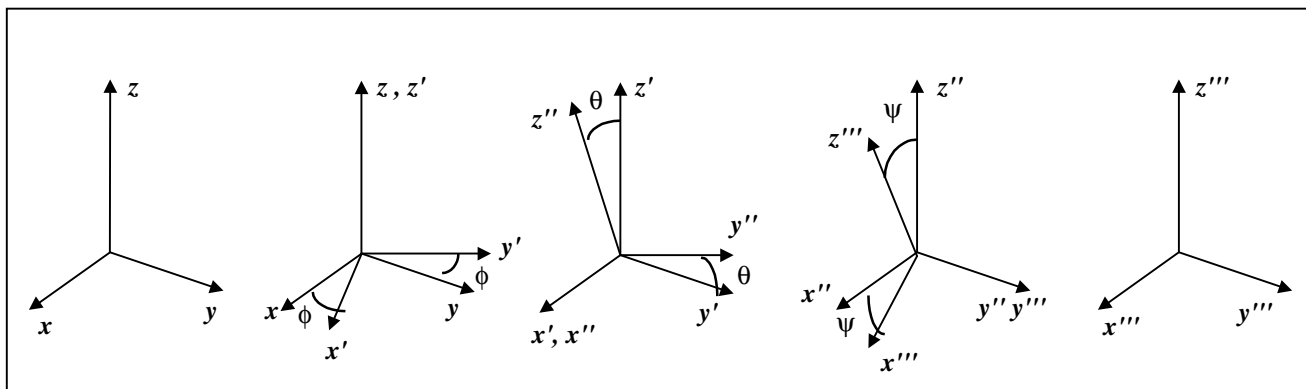


Fig. 2.11 - Rotações sucessivas em ângulos de *Euler* em modo 312.

### 2.3.2 MATRIZ DE ROTAÇÃO OU ATITUDE

Seguindo a sequência dos eixos associados às rotações dos ângulos de **Euler** acima e fazendo as transformações, pode-se chegar à matriz de rotação 3-1-2, por exemplo, que leva  $xyz$  para  $x''', y'''$  e  $z'''$ .

1) Primeira transformação - rotação  $\phi$ :

$$x' = x \cdot \cos \phi + y \cdot \sin \phi + z \cdot 0, \quad (2.18)$$

$$y' = x \cdot (-\sin \phi) + y \cdot \cos \phi + z \cdot 0, \quad (2.19)$$

$$z' = x \cdot 0 + y \cdot 0 + z. \quad (2.20)$$

Em forma matricial:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Esta matriz de transformação identifica-se por  $R_3$ .

2) Segunda transformação - rotação  $\theta$ :

$$x'' = x' \cdot 1 + y' \cdot 0 + z' \cdot 0, \quad (2.22)$$

$$y'' = x' \cdot 0 + y' \cdot \cos \theta + z' \cdot \sin \theta, \quad (2.23)$$

$$z'' = x' \cdot 0 + y' \cdot (-\sin \theta) + z' \cdot \cos \theta. \quad (2.25)$$

Em forma matricial:

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Esta matriz de transformação identifica-se por  $R_1$ .

3) Terceira transformação - rotação  $\psi$ :

$$x''' = x'' \cdot \cos \psi + y'' \cdot 0 + z'' \cdot (-\sin \psi), \quad (2.26)$$

$$y''' = x'' \cdot 0 + y'' \cdot 1 + z'' \cdot 0, \quad (2.27)$$

$$z''' = x'' \cdot \sin \psi + y'' \cdot 0 + z'' \cdot \cos \psi. \quad (2.28)$$



Em forma matricial:

$$\begin{pmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Esta matriz de transformação identifica-se por  $R_2$ .

Enfim:

$$\begin{pmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{pmatrix} = R_2 \cdot \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = R_2 \cdot R_1 \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_{312} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Portanto a matriz de rotação de  $xyz$  para  $x'''y'''z'''$  pode ser obtida da multiplicação matricial:  $R_{312} = R_2 \cdot R_1 \cdot R_3$ . De forma análoga, considerando-se que no caso de rotação 321 tem-se as rotações sucessivas em torno do eixo  $z(3)$  (ascensão reta), em seguida  $y(2)$  (declinação) e por último  $x(1)$ (fase), todas no sentido positivo do vetor rotação, resulta respectivamente em  $R_3$ ,  $R_2$  e  $R_1$ . Assim tem-se  $R_{321} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ .

A título de simplicidade de notação, utiliza-se a notação  $c\phi = \cos\phi$  e  $s\phi = \sin\phi$ .

$$R_{312} = \begin{pmatrix} c\psi c\phi - s\psi s\theta s\phi & c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi & -s\psi c\theta \\ -c\theta s\phi & c\theta c\phi & s\theta \\ s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi - c\psi s\theta c\phi & c\psi c\theta \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

$$R_{321} = \begin{pmatrix} c\theta c\phi & c\theta s\phi & -s\theta \\ -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & s\psi c\theta \\ s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\theta \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

### 2.3.3 SISTEMA EQUATORIAL DE ATITUDE

De forma análoga à representação da atitude através de ângulos de Euler, pode-se definir uma representação de atitude baseada no sistema equatorial de coordenadas adicionando-se um terceiro ângulo  $\psi$  denominado fase. Assim tem-se o conjunto (ascensão reta, declinação, fase):

$$\text{Sistema equatorial de atitude} = \alpha\delta\psi \quad (2.33)$$

Onde  $\alpha$  e  $\delta$  são exatamente como definidos anteriormente e  $\psi$  é o ângulo de rotação em torno do 3.o eixo no sentido positivo.

### 2.3.4 EIXO E ÂNGULO DE EULER

Do teorema de **Euler**, sabe-se que sempre é possível dispor um eixo  $\hat{e}$  entre dois referenciais diferentes de forma que ao se aplicar neste uma rotação de um determinado ângulo  $\phi$ , um sistema de coordenadas  $xyz$  em um dos referenciais pode ser representado no outro  $x'y'z'$  (Ver Fig. 2.12). Assim, pode-se usar este eixo  $\hat{e}$  e a rotação  $\phi$  como representação da atitude de um referencial com relação ao outro.

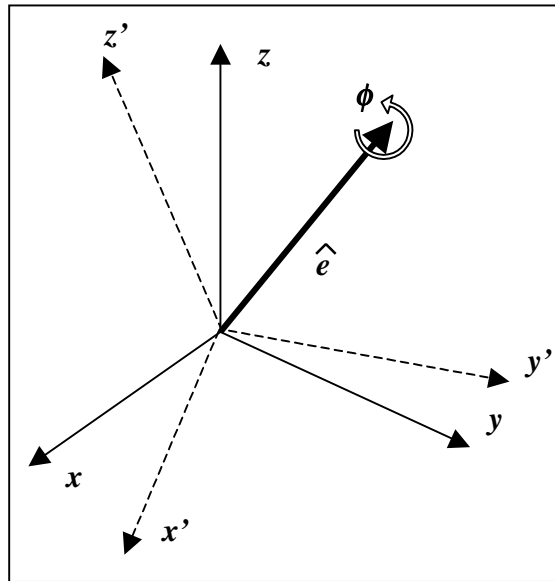


Fig. 2.12 - Representação da atitude através de eixo e ângulo de rotação de Euler.

### 2.3.5 TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE REPRESENTAÇÃO DE ATITUDE

#### 2.3.5.1 MATRIZ DE ROTAÇÃO DE ATITUDE E ÂNGULOS DE EULER

Pode-se chegar aos ângulos de **Euler** equivalentes a uma matriz de rotação  $R$  utilizando-se de alguns dos termos da matriz de rotação. Tomando  $R_{312}$ , por exemplo, chega-se à seguinte relação (neste caso com  $\cos\theta \neq 0$ ):

$$R_{312}(2,1) / R_{312}(2,2) = -\tan \phi \rightarrow \phi = \arctg (-R_{312}(2,1) / R_{312}(2,2)) \quad (2.34)$$

$$R_{312}(2,3) = \sin \theta \rightarrow \theta = \arcsen ( R_{312}(2,3) ), \quad (2.35)$$

$$R_{312}(1,3) / R_{312}(3,3) = -\tan \psi \rightarrow \psi = \arctg (-R_{312}(1,3) / R_{312}(3,3)) \quad (2.36)$$

Com a devida análise do sinal dos numeradores e denominadores para o posicionamento do ângulo no quadrante correto no caso de  $\phi$  e  $\psi$ . Caso  $\cos\theta = 0$ , pode-se resolver a indeterminação escolhendo-se a fase  $\psi = 0$  e obtendo-se então  $\phi$ .

É conveniente computacionalmente, uma referência vetorial aos ângulos de **Euler** da seguinte forma:

$$(\phi \ \theta \ \psi) . \quad (2.37)$$

A transformação inversa seria seguida apenas com a aplicação do ângulos de **Euler** de forma direta nas equações matriciais (2-31.) e (2-32.) da matriz de rotação R.

### 2.3.5.2 ÂNGULOS DE EULER E SISTEMA EQUATORIAL DE ATITUDE

Nesta transformação, considerando-se a seqüência de rotação 312, a rotação  $\phi$  equivale ao movimento em ascensão reta:

$$\alpha = \phi \quad (2.38)$$

O movimento em declinação é a rotação  $\theta$

$$\delta = \theta. \quad (2.39)$$

O último giro, denominado como fase  $\psi$ , em nada afeta a coordenada de apontamento, sendo idêntico ao último ângulo de **Euler**.

$$\psi = \psi \quad (2.40)$$

Neste trabalho utiliza-se apenas o sentido de giro positivo para  $\phi$ , transformando da seguinte forma quando dos cálculos resultar negativo:

$$\text{Se } \phi < 0 \quad \phi = \phi + 360^\circ. \text{ (para } |\phi| < 360^\circ) \quad (2.41)$$

A transformação inversa seria da seguinte forma:

$$\phi = \alpha \quad (2.42)$$

$$\theta = \delta \quad (2.43)$$

$$\psi = \psi \quad (2.44)$$

### 2.3.5.3 EIXO E ÂNGULO DE EULER E MATRIZ DE ROTAÇÃO DE ATITUDE

Com o eixo  $\hat{e}$  e o ângulo  $\phi$  de rotação de **Euler** pode-se obter a matriz de rotação de atitude R da seguinte forma (Wertz, 1997, pg413):

$$R = \begin{pmatrix} \cos\phi + e(1)^2 \cdot (1 - \cos\phi) & e(1) \cdot e(2) \cdot (1 - \cos\phi) + e(3) \cdot \sin\phi & e(1) \cdot e(3) \cdot (1 - \cos\phi) - e(2) \cdot \sin\phi \\ e(1) \cdot e(2) \cdot (1 - \cos\phi) - e(3) \cdot \sin\phi & \cos\phi + e(2)^2 \cdot (1 - \cos\phi) & e(2) \cdot e(3) \cdot (1 - \cos\phi) + e(1) \sin\phi \\ e(1) \cdot e(3) \cdot (1 - \cos\phi) + e(2) \cdot \sin\phi & e(2) \cdot e(3) \cdot (1 - \cos\phi) - e(1) \cdot \sin\phi & \cos\phi + e(3)^2 \cdot (1 - \cos\phi) \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

A transformação inversa seria da seguinte forma (com  $\sin\phi \neq 0$ ) (Wertz, 1997, pg. 413 e 414):

$$\phi = \arccos \left( 1/2 \cdot (tr(R) - 1) \right) \quad (2.46)$$

$$\hat{e} = \begin{pmatrix} (R(2,3) - R(3,2)) / (2 \cdot \sin\phi) \\ (R(3,1) - R(1,3)) / (2 \cdot \sin\phi) \\ (R(1,2) - R(2,1)) / (2 \cdot \sin\phi) \end{pmatrix} \quad (2.47)$$

Caso  $\sin\phi = 0$ , pode-se adotar qualquer eixo  $\hat{e}$ , pois como a rotação  $\phi$  é nula, não faz diferença (transformação identidade).

## 2.4 DETERMINAÇÃO DE ATITUDE

### 2.4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Para o processo de determinação de atitude, é necessário conhecer informações de coordenadas para cada estrela identificada nos dois referenciais diferentes entre os quais deseja-se determinar a atitude. Assim, a cada estrela observada no referencial do sensor (Ver Fig. 2.13), há uma correspondente identificada no referencial inercial obtida do catálogo. Como o que se deseja é conhecer a atitude do referencial da espaçonave com relação ao inercial, é necessário converter as coordenadas observadas do referencial do sensor para o da espaçonave. Isso é possível, pois a atitude do referencial do sensor com relação ao da espaçonave é conhecida através da instalação do sensor. Com esta informação é possível obter a matriz de rotação  $M_{sp-se}$  que leva um versor observado  $\hat{S}$  do referencial do sensor para o da espaçonave  $\hat{W}$ .

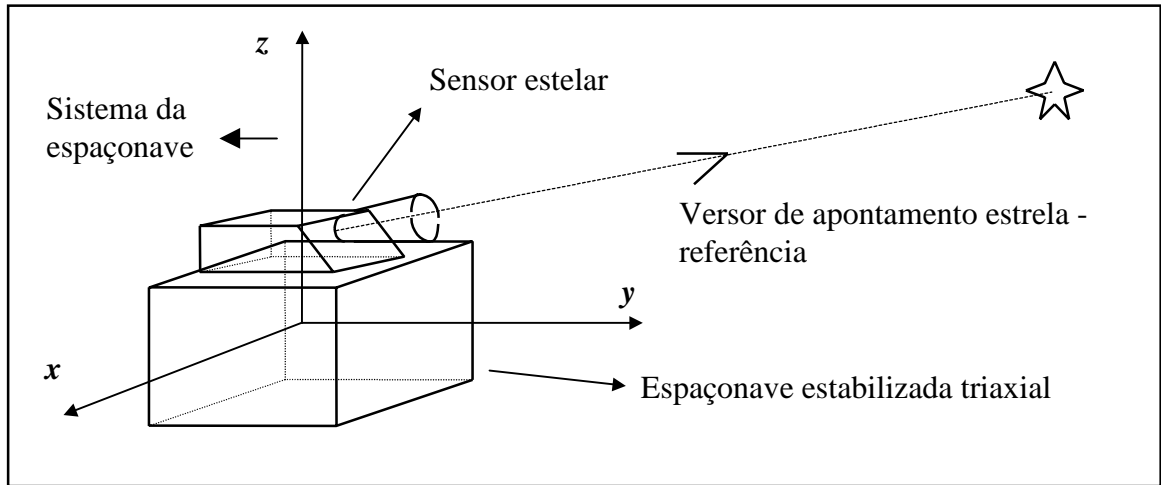


Fig. 2.13 - Determinação de versores de apontamento de estrelas a partir da espaçonave.

Assim:

$$\hat{W} = M_{sp-se} \cdot \hat{S} \quad (2.48)$$

Com o versor escrito no referencial da espaçonave  $\hat{W}$  e no referencial inercial  $\hat{V}$ , a matriz de atitude da espaçonave  $M_{sp-i}$  é a matriz de rotação que leva o referencial inercial para o referencial da espaçonave. Caso os versores não contenham nenhuma imprecisão, essa matriz pode ser obtida da relação entre os versores nos dois referenciais:

$$\hat{W} = M_{sp-i} \cdot \hat{V} \quad (2.49)$$

É a obtenção dessa matriz a finalidade dos versores nos referenciais do sensor e inercial obtidos dos algoritmos de identificação de estrelas.

É possível utilizar-se destes versores para calcular a matriz atitude de modo determinístico, porém o resultado sofrerá o impacto das imprecisões de observação. Na prática, determinações mais precisas são obtidas por técnicas estatísticas que na grande maioria apresentam soluções para o chamado problema de Wahba (Wahba, 1965). A seguir apresentam-se as estratégias de cálculo determinístico e otimizado da atitude com base nos versores observados, utilizadas neste trabalho.

## 2.4.2 MODELO DE DETERMINAÇÃO DE ATITUDE

Os procedimentos a seguir, apresentados por (Shuster, 1989), são suficientemente genéricos e servem para o cálculo da atitude entre dois referenciais quaisquer aos quais os conjuntos de versores estão referenciados. Porém, para o cálculo da atitude da espaçonave, deve-se lembrar que antes é preciso transformar os versores do referencial do sensor para o da espaçonave. Se isso não ocorrer, a atitude determinada será a do sensor com relação ao referencial inercial e não o da espaçonave com relação ao referencial inercial como desejado.

### 2.4.2.1 DETERMINAÇÃO DE ATITUDE TRIAXIAL EXATA (ALGORITMO DETERMINÍSTICO)

A matriz de atitude de um referencial em relação a um dado referencial externo pode ser obtida a partir de versores nestes referenciais. Deve-se ter no mínimo dois pares de versores nestes dois referenciais, respectivamente  $\hat{V}_1$  e  $\hat{V}_2$  no referencial externo e  $\hat{W}_1$  e  $\hat{W}_2$  no referencial desejado, sendo estes livres de qualquer imprecisão (Ver Fig. 2.14).

Neste caso vale:

$$\hat{W}_1 = R \cdot \hat{V}_1, \quad \hat{W}_2 = R \cdot \hat{V}_2 \quad (2.50)$$

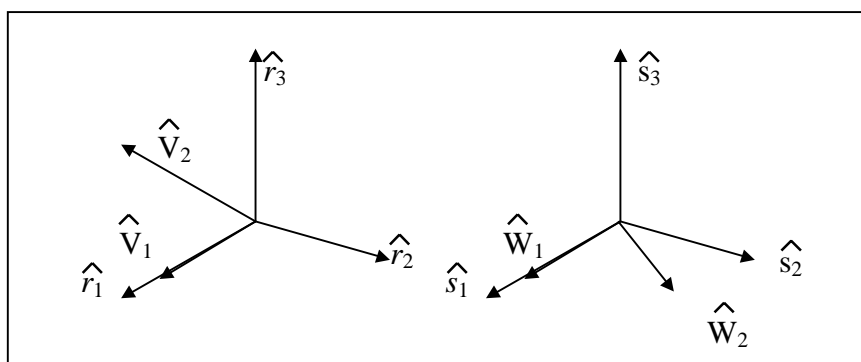


Fig. 2.14 - Bases ortonormais construídas através dos versores obtidos.  
Fonte: Lopes; Carvalho (1996a, p.32).

Pode-se escrever:  $\{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3\}$  e  $\{\hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{s}_3\}$  a partir dos versores  $\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{V}_1$  e  $\hat{V}_2$  respectivamente da seguinte forma:

$$\hat{r}_1 = \hat{V}_1, \quad \hat{r}_2 = \frac{\hat{V}_1 \times \hat{V}_2}{|\hat{V}_1 \times \hat{V}_2|}, \quad \hat{r}_3 = \hat{r}_1 \times \hat{r}_2 \quad (2.51)$$

$$\hat{s}_1 = \hat{W}_1, \quad \hat{s}_2 = \frac{\hat{W}_1 \times \hat{W}_2}{|\hat{W}_1 \times \hat{W}_2|}, \quad \hat{s}_3 = \hat{s}_1 \times \hat{s}_2 \quad (2.52)$$

Então tem-se:

$$\hat{s}_i = R \cdot \hat{r}_i \quad (2.53)$$

Definindo:

$$M_r \equiv [\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3] \quad (2.54)$$

$$M_s \equiv [\hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{s}_3] \quad (2.55)$$

Verifica-se que:

$$M_s = R \cdot M_r \Rightarrow R = M_s \cdot M_r^T \quad (2.56)$$

Assim, obtém-se a matriz de rotação ou atitude  $R$  desejada, não levando em conta as imprecisões de observação.

#### 2.4.2.2 DETERMINAÇÃO DE ATITUDE TRIAXIAL OTIMIZADA

Para levar em conta as imprecisões de observação, pode-se obter a matriz atitude  $R$  ortogonal que minimiza o seguinte funcional (problema proposto originalmente por (Wahba, 1965)) :

$$J(R) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{K=1}^N \frac{1}{\sigma_K^2} \cdot |\hat{W}_K - R \cdot \hat{V}_K|^2 \quad (2.57)$$

Para  $N$  versores onde os  $\sigma_K$  são os desvios padrões das medidas.

Existem na literatura diversas técnicas para resolver este problema (Shuster; Oh, 1981) (Markley, 1988). Como a solução ótima, uma vez obtida, independe do algoritmo utilizado, este trabalho utiliza-se da estratégia descrita a seguir (Shuster, 1989) sem qualquer perda para os objetivos do mesmo.

Definindo a função ômega para obter a matriz anti-simétrica definida sobre um vetor qualquer :

$$R^{Sk} = [[ \vec{Vetor} ]] = \begin{pmatrix} 0 & Vetor_z & -Vetor_y \\ -Vetor_z & 0 & Vetor_x \\ Vetor_y & -Vetor_x & 0 \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

Pode-se aproximar  $R$  por iteração através de:

$$R \cong ( I + [[ \vec{\xi}_i ]] ) \cdot R_{i-1} \quad (2.59)$$

Onde  $I$  é a matriz identidade,  $[[ \vec{\xi}_i ]]$  é a matriz anti-simétrica do vetor erro  $\vec{\xi}_i$  e  $R_{i-1}$  é a matriz da iteração anterior.

Com isso o funcional  $J(R)$  fica aproximado em torno de um valor pequeno (módulo) de  $\vec{\xi}_i$ , e assim só tem um valor de mínimo. Utilizando essa expressão para  $R$  na função  $J(R)$ , obtém-se a função  $J(\vec{\xi}_i)$  e dessa forma o problema passa a ser achar  $\vec{\xi}_i$  que minimize  $J(\vec{\xi}_i)$ .

Assim, derivando  $J(\vec{\xi}_i)$  com relação a  $\vec{\xi}_i$ , pode-se obter a matriz  $M_i$  e o vetor  $\vec{U}_i$ :

$$M_i = \sum_{K=1}^N \cdot \frac{1}{\sigma_K^2} \cdot [[R_{i-1} \cdot \hat{V}_K]]^T \cdot [[R_{i-1} \cdot \hat{V}_K]] \quad (2.60)$$

$$\vec{U}_i = \sum_{K=1}^N \cdot \frac{1}{\sigma_K^2} \cdot [[R_{i-1} \cdot \hat{V}_K]] \cdot (\hat{W}_K - R_{i-1} \cdot \hat{V}_K) \quad (2.61)$$

Derivando  $\partial J(\vec{\xi}_i) / \partial \vec{\xi}_i$  com relação a  $\vec{\xi}_i$ , conclui-se que a matriz  $M_i$  representa a derivada segunda  $\partial^2 J(\vec{\xi}_i) / \partial \vec{\xi}_i^2$ . Como a matriz  $M_i$  é de forma quadrática, pode-se garantir que o sinal da segunda derivada é positivo.

Assim, igualando  $\partial J(\vec{\xi}_i) / \partial \vec{\xi}_i$  a zero, é possível obter  $\vec{\xi}_i^*$  que minimize  $J(\vec{\xi}_i)$ . A obtenção de  $\vec{\xi}_i^*$  pode utilizar-se da matriz  $M_i$  e do vetor  $\vec{U}_i$  obtidos anteriormente aplicando-se a condição de mínimo  $\partial J(\vec{\xi}_i) / \partial \vec{\xi}_i = 0$ :

$$\vec{\xi}_i^* = M_i^{-1} \cdot \vec{U}_i \quad (2.62)$$

Com  $\vec{\xi}_i^*$  na equação (2-59) obtém-se  $R$  ótimo.

O algoritmo inicia-se com uma estimativa inicial que é dada pelo algoritmo determinístico, aproximando-se  $R$  por iterações sucessivas.



A seqüência do algoritmo desenvolve-se da seguinte forma:

- 1) O algoritmo determinístico dá a estimativa inicial para  $R$ , a partir de um par arbitrário dentre os versores  $\hat{V}_i$  e  $\hat{W}_i$ .
- 2) Com  $R_1$  obtém-se  $M_1$  e  $\vec{U}_1$  através das equações (2-60.) e (2-61.).
- 3) Com  $M_1$  e  $\vec{U}_1$  obtém-se  $\xi_1^*$  através da equação (2-62.)
- 4) Com  $\xi_1^*$  e  $R_1$ , obtém-se  $R_2$  através da equação (2-59.)
- 5) Com  $R_2$  prossegue-se até que o módulo de  $\xi_i^*$  esteja muito próximo do módulo de  $\xi_{i-1}^*$ , sendo dessa forma a matriz  $R$  ótima igual à matriz  $R_i$  da última iteração. Para este trabalho, a precisão utilizada é de 1'' (adotado) no módulo de  $\xi$ .

Assim, pode-se representar o modelo de determinação de atitude da seguinte forma:

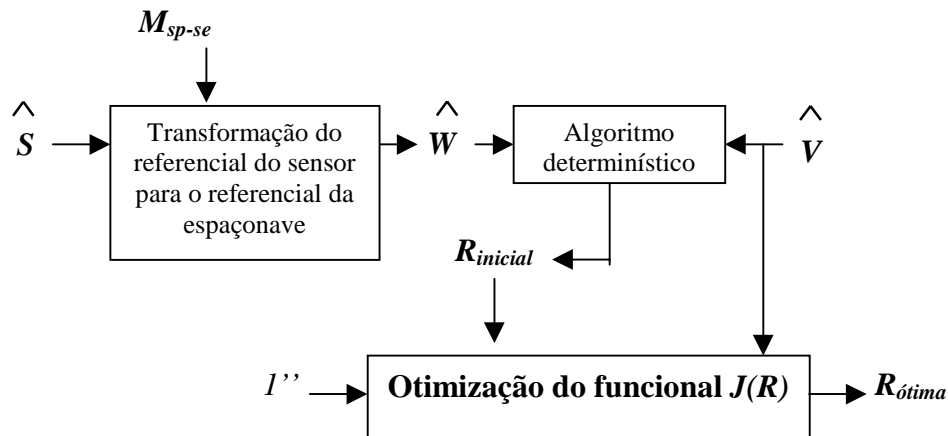


Fig. 2.15 - Modelo de determinação de atitude.

## 2.5 SENSOR ESTELAR

### 2.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A classe de sensores estelares divide-se em três principais tipos: de varredura (*scanner* - utilizados em espaçonaves com estabilização por rotação), de dispositivos mecânicos (possuem movimento próprio para promover a varredura - utilizados em espaçonaves triaxialmente estabilizadas) e o de cabeça fixa com matriz eletrônica foto-sensível *Charged Couple Device* (CCD) (Ver Fig. 2.16) (possuem varredura eletrônica de um campo de visada fixo - também utilizados em espaçonaves triaxialmente estabilizadas). Todos eles são constituídos de partes comuns, sendo estas o protetor solar gerador de sombra que minimiza efeitos indesejáveis de reflexo (do Sol, da Terra e da Lua), sistema óptico, equipamento de definição de imagem e eletrônica de processamento. Como cada tipo possui sua própria característica específica de operação, os algoritmos precisam ser particularizados para o uso de cada tipo de sensor. Este trabalho se concentrará no sensor do tipo CCD.

A título de exemplo, pode-se citar as seguintes características para este tipo de sensor:

- Tamanho do *Field Of View* (FOV):  $8^\circ \times 8^\circ$
- Faixa de magnitude: - 4,5 a 8,0 visual
- Número de estrelas rastreadas simultaneamente: 5
- Tempo de aquisição 5 s
- Tempo de rastreamento: 0,5 s
- Frequência de atualização de dados: 2 Hz
- Acuracidade de posição: 2,5"
- Acuracidade de magnitude: 0,15 visual
- Vida útil: 5 anos

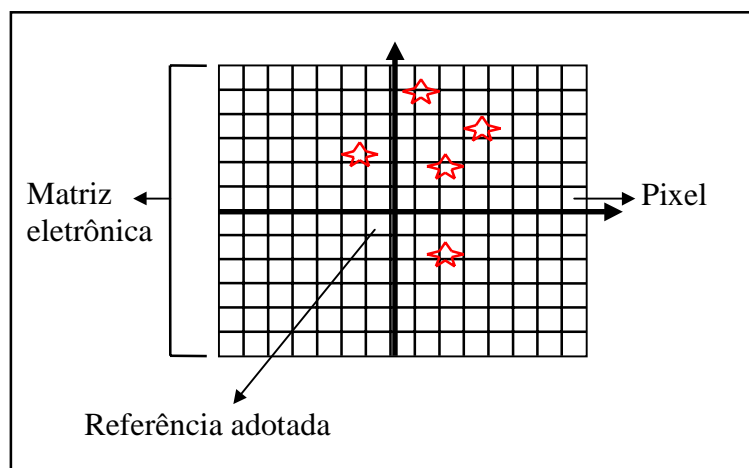


Fig. 2.16 - Matriz CCD do sensor de varredura eletrônica.

Sistemas de determinação de atitude baseados em sensores de estrelas, apesar de mais caros, pesados e necessitarem maior esforço computacional, têm sido largamente utilizados em várias missões. Isso se deve às resoluções da ordem de segundos de arco que propiciam informações que possibilitam grande precisão para a determinação de atitude. Podem ser utilizados tanto na aquisição, como no rastreamento.

O princípio básico de funcionamento do sensor estelar é o seguinte:

- O campo de visada instantâneo ou rastreador (janela lógica que se locomove pelo campo de visada) varre o campo de visada continuamente até que alguma estrela sensibilize o equipamento;
- A luz da estrela atravessa a ótica do equipamento, sendo invertida por efeito das lentes;
- A luz invertida projeta-se na matriz CCD próxima ao plano focal;
- A projeção da luz sensibiliza de forma desfocada uma região de 3x3 células da matriz eletrônica foto-sensível (matriz = 500 x 500 células, por exemplo);
- Quando o pequeno campo de rastreamento cruza a imagem desfocada são gerados dois pulsos eletrônicos, um na entrada e outro na saída, constituindo um

- sinal eletrônico (se houver sobreposição de estrelas não há como distinguir duas observações, prevalecendo a de magnitude menor – mais brilhante);
- O sinal é calibrado com corrente de escuro (sinal presente mesmo em ausência de luz). Há ainda resfriamento do sensor para a redução dos efeitos térmicos de distorção.
  - O sinal eletrônico é enviado ao *software* do sensor para que calcule a posição da estrela na matriz, onde a imagem desfocada resulta numa informação mais distribuída, evitando erros associados a discrepâncias associadas a um único pixel. Com essa distribuição calcula-se o centróide da imagem, sendo este considerado como a posição da estrela observada. A intensidade do sinal é traduzida em valor de magnitude (É importante observar que duas estrelas sobrepostas ou muito juntas podem acabar gerando um único sinal de saída com uma magnitude diferente ou até mais brilhante).
  - Uma vez detectadas as estrelas no modo de varredura, um subconjunto das estrelas mais brilhantes passa a ser rastreado eletronicamente, definindo-se ao redor de cada estrela uma pequena matriz que acompanha o movimento aparente da estrela. O rastreamento continua até que a estrela saia do campo de visada ou haja comando de parar rastreamento.
  - Neste trabalho o modelo de sensor observa e fornece magnitudes visuais apenas para a estrela mais brilhante de todas que estejam mais perto uma das outras que 500'';

Dentre as características que empenham papel importante na escolha de um sensor estão o tamanho e formato do campo de visada e a sensibilidade à magnitude. A escolha do campo de visada e da sensibilidade de magnitude depende dos requisitos da missão.

Um rastreador é sempre mais eficiente num campo de visada menor. No entanto, para pequenos campos é necessária sensibilidade maior à magnitude afim de garantir que hajam estrelas no campo, e ainda, campos grandes precisam de grandes calibrações antes e depois do lançamento para correções devido às temperaturas, distorções e desalinhamentos. Com o aumento de sensibilidade à magnitude o acesso a milhares de estrelas mais fracas é facilitado, dificultando a identificação.

Também deve-se ter em mente a utilização conjunta com o algoritmo de identificação. Se não houver necessidade de um campo de visada retangular, pode-se partir para a utilização de formato redondo para o campo de visada de forma a evitar tratamento para que as estrelas de borda sejam desprezadas pelo algoritmo.

Dessa forma, há que se ponderar estes fatores para a escolha do sensor ótimo a ser utilizado na missão. O diagrama na Fig. 2.17 ilustra esta questão.

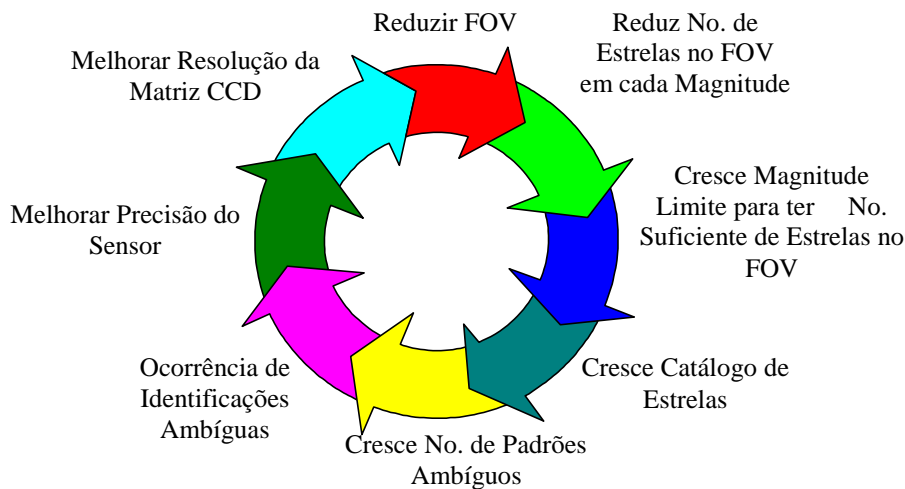


Fig. 2.17 - Características de projeto em sistemas de determinação de atitude através de sensores de estrelas.

Outro fator importante é a diferença de resposta para a observação de magnitude. A magnitude percebida no espaço é uma peculiaridade de cada instrumento, sendo diferente das usualmente catalogadas (faixas visual, azul e infravermelho do espectro) e por isso chamada de instrumental. A partir da magnitude observada (instrumental) pode-se calcular as magnitudes ópticas observadas das estrelas. Ainda, na maioria das vezes, a CCD é mais sensível ao vermelho e dessa forma é possível que uma estrela vermelha seja mais fraca do que aparenta (estrelas vermelhas são mais facilmente observáveis neste caso). Porém neste trabalho o modelo de sensor observa e fornece magnitudes visuais e a identificação das estrelas apenas leva em conta a magnitude visual.

As principais fontes de erros dos sensores estelares são desalinhamentos mecânicos e, no caso da CCD, assimetrias na matriz eletrônica que tenta representar no plano uma porção esférica do céu, além de erros de origem foto-eletrônica.

Esses fatores influem na precisão das informações fornecidas pelo sensor e estas influenciam diretamente na qualidade da identificação. Como a identificação influencia diretamente na determinação de atitude, a questão da escolha adequada das características do sensor de estrelas a ser utilizado é portanto acoplada com a precisão requerida de determinação de atitude.

É importante ainda a análise da sensibilidade das observações a movimentos da espaçonave. Quando há movimento por parte da espaçonave deve-se notar que a capacidade de notar desvios não é a mesma em todo os eixos do sensor.

Os movimentos podem ser decompostos em dois componentes principais: rotação em torno do eixo de apontamento do sensor e rotação perpendicular ao eixo de apontamento do sensor (Ver Fig. 2.18).

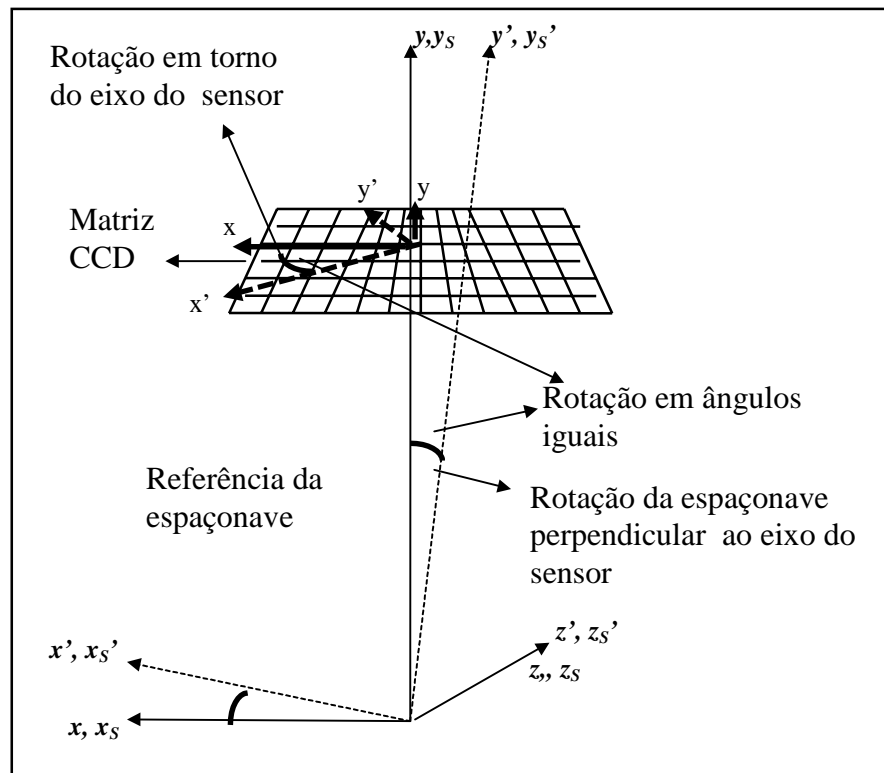


Fig. 2.18 - Movimentos em torno dos eixos do sensor e da espaçonave - Precisão do sensor.

Percebe-se que a capacidade de percepção de alteração de posição angular da imagem é melhor na direção perpendicular ao eixo de apontamento do sensor, uma vez que o raio que vai do centro da referência de atitude da espaçonave ao sensor é maior que o raio que, no plano da matriz, vai do eixo de apontamento do sensor a um ponto de imagem qualquer. Desta forma, para um mesmo ângulo de rotação, um ponto de imagem na matriz se locomove muito mais nos sentidos perpendiculares ao eixo de apontamento do sensor que numa rotação em torno do mesmo, sendo então mais perceptível o seu movimento no sentido de rotação perpendicular ao eixo do sensor.

## 2.5.2 MODELO DE SENSOR ESTELAR

O sensor modelado pelo trabalho aqui desenvolvido é o do tipo fixo que utiliza-se de uma matriz eletrônica foto-sensível CCD para promover a varredura (Ver Fig. 2.19). Não se tem aqui a preocupação com o funcionamento interno do equipamento, mas apenas com um modelo simples de seu funcionamento que forneça saídas de observações de estrelas que estejam em seu campo de visada.

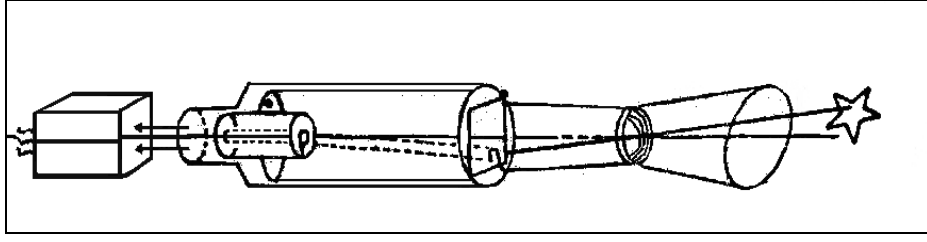


Fig. 2.19 - Diagrama simplificado de um sensor fixo com varredura eletrônica.  
Fonte: Wertz (1997, p.189).

O modelamento matemático do sensor considera as informações de entrada como os ângulos ( $\phi$ ,  $\lambda$ ) de posicionamento das estrelas com relação ao eixo de apontamento do sensor (neste caso eixo  $y$ ) e as respectivas magnitudes como apresentado na Seção 2.6 (CATÁLOGO DE ESTRELAS) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS) (Ver Fig. 2.27 e 2.28). Com estes ângulos, é possível determinar quais estrelas estão dentro do FOV.

Com as estrelas presentes no FOV obtém-se o versor de apontamento da estrela no referencial do sensor da seguinte forma (Wertz, 1997):

$$\hat{S}' = \begin{pmatrix} -\sin \phi \cdot \cos \lambda \\ \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ -\sin \lambda \end{pmatrix} \quad (2.63)$$

Desta forma, aplica-se a este versor uma matriz de rotação  $R_{\sigma_{se}}$  baseada no erro de posicionamento de observações do sensor  $\sigma_{se}$ , representando assim o desvio no posicionamento da observação causada por erros do sensor:

$$\hat{S} = R_{\sigma_{se}} \cdot \hat{S}' \quad (2.64)$$

Após aplicar esses erros às entradas, é possível obter os novos ângulos ( $\phi_s, \lambda_s$ ) através das relações apresentadas. (Ver equações 2-69 e 2-70), e com estes verificar quais estrelas realmente foram observadas dentro do FOV.

Da mesma forma, com as estrelas presentes no FOV, aplica-se os erros à magnitude, onde  $\sigma_{mag}$  é o erro de observação da magnitude e verifica-se quais estrelas estão dentro do limite de magnitude máxima observada pelo sensor. Representando-se uma geração de números aleatórios gaussianos por  $al$  tem-se então a relação:

$$mag_s = mag + al \cdot \sigma_{mag} \quad (2.65)$$

A partir daí, se houver alguma sobreposição de estrelas (mais de uma estrela num raio de  $500''$ ), apenas a mais forte prevalece.

Com as resultantes, o *software* de operação do sensor escolhe as  $n$  estrelas mais brilhantes de acordo com o número máximo de estrelas rastreado simultaneamente pelo

sensor. Apenas as estrelas selecionadas serão então rastreadas e terão associadas coordenadas de sensor. Este número em geral não vai além de 5 estrelas.

Depois de feitas as seleções, é possível obter as coordenadas de matriz eletrônica (x,y). Porém, por efeito da distância focal da lente  $f$ , as coordenadas de matriz eletrônica (x,y) são traduzidas nas coordenadas de saída ( $u,v$ ) a partir dos ângulos ( $\phi_s, \lambda_s$ ) (Ver Fig. 2.20):

$$u = f \cdot \operatorname{tg} \phi_s \quad (2.66)$$

$$v = f \cdot (\operatorname{tg} \lambda_s / \cos \phi_s) \quad (2.67)$$

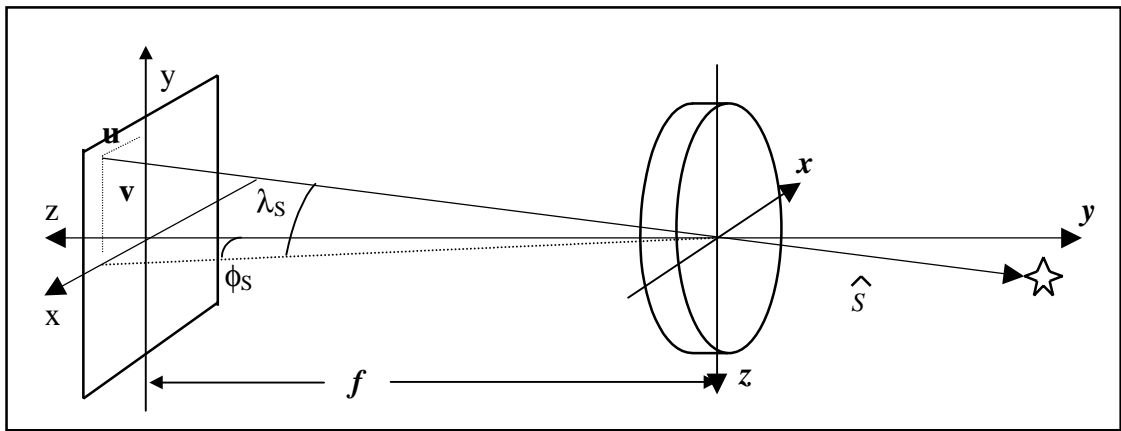


Fig. 2.20 - Relação de coordenadas no sistema óptico e matriz eletrônica do sensor.  
Fonte: Wertz (1997, p.256).

No entanto, estas relações não são suficientemente precisas devido às várias distorções de natureza óptica, eletrônica, térmica e mecânica surgindo então relações empíricas para o cálculo de ( $u,v$ ) a partir de ( $\phi_s, \lambda_s$ ), como descrito por (Wertz,1997.) (Ver APÊNDICE A). Porém neste trabalho não são levadas em consideração tais relações, sendo levados em conta somente os erros apresentados no modelamento.

Assim a saída fornecida pelo modelo do sensor estelar é um conjunto de coordenadas de matriz eletrônica ( $u,v$ ) e a magnitude  $\text{mag}_s$ .

Além da saída das coordenadas observadas, é útil acrescentar como saída os versores  $\hat{S}$  das estrelas rastreadas, além dos índices de quais estrelas fornecidas como entradas correspondem às coordenadas de saída ( $u,v$ ) do modelo  $O_s$  afim de que se possa verificar mais tarde a qualidade da identificação das observações do sensor. Assim, com esses índices é possível a partir da entrada fornecida obter quais são os números de catalogação das estrelas observadas que será designado aqui por  $O_c$ . Essas informações adicionais apenas são necessárias para facilitar o estudo de desempenho do sistema, não fazendo parte do conjunto de saídas fornecidas por um sensor estelar em funcionamento num caso real. O fato da adição destas saídas não é relevante em termos de alteração de desempenho do algoritmo de identificação a ser avaliado, visto que o desempenho do





Na esfera celeste, no referencial do sensor, pode-se representar o posicionamento do apontamento da matriz eletrônica (adotado na direção do eixo  $y$  do referencial do sensor) da seguinte forma (invertendo-se os eixos  $xy$  do campo de visada para representar o efeito de inversão provocado pelas lentes) (Ver Fig. 2.22):

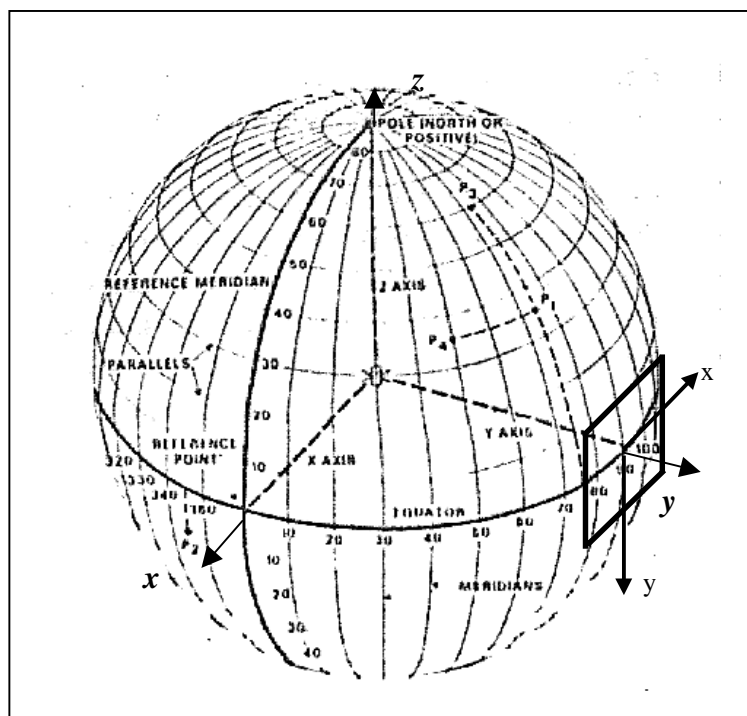


Fig. 2.22 - Esfera celeste no referencial do sensor e sistema cartesiano-plano de coordenadas representando a matriz eletrônica.

Fonte: adaptado de Wertz (1997, p.24).

## 2.6 CATÁLOGO DE ESTRELAS

### 2.6.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A fonte básica de informação para o funcionamento de um sistema de determinação de atitude baseado em sensores de estrelas são os posicionamentos e as magnitudes das estrelas no céu. Assim, faz-se necessário o estudo e modelamento das informações que as estrelas representam para o estudo deste trabalho.

O modo mais utilizado de representação das estrelas no céu utiliza-se do conceito de esfera celeste. No entanto, a representação de coordenadas pode utilizar diversos sistemas associados a este conceito. Neste trabalho são utilizados preferencialmente os sistemas equatorial e vetorial-cartesiano de coordenadas (Ver Fig. 2.23). Assim, o tratamento do posicionamento das estrelas no céu pode utilizar-se de ângulos através do sistema equatorial de coordenadas ou vetores através do sistema vetorial-cartesiano de coordenadas, sendo esta a representação mais cômoda para cálculos uma vez que não utiliza-se de ângulos.

Para a concentração das informações das estrelas é feito um mapeamento na esfera celeste através de seus ângulos no sistema equatorial de coordenadas. A este mapeamento é dado o nome de catálogo fonte.

Com base nas informações contidas num catálogo fonte é possível, através de relações entre sistemas de coordenadas, obter a representação das estrelas em qualquer que seja o sistema. Assim, é possível usar o posicionamento das estrelas para simular uma região a ser vista por um sensor através de ângulos relativos ao eixo de apontamento do sensor estelar.

A forma de catálogo também é útil para armazenar a base de informações das estrelas para utilização por algoritmos de identificação a bordo de uma espaçonave. No entanto, devido a limitações de *hardware* utiliza-se de catálogos menores contendo parte das estrelas de um catálogo fonte. Estes catálogos são chamados de catálogos de trabalho.

A geração de catálogos de trabalho tem uma íntima ligação com as características dos sensores estelares, pois são principalmente baseados na sensibilidade de magnitude máxima vista pelos mesmos.

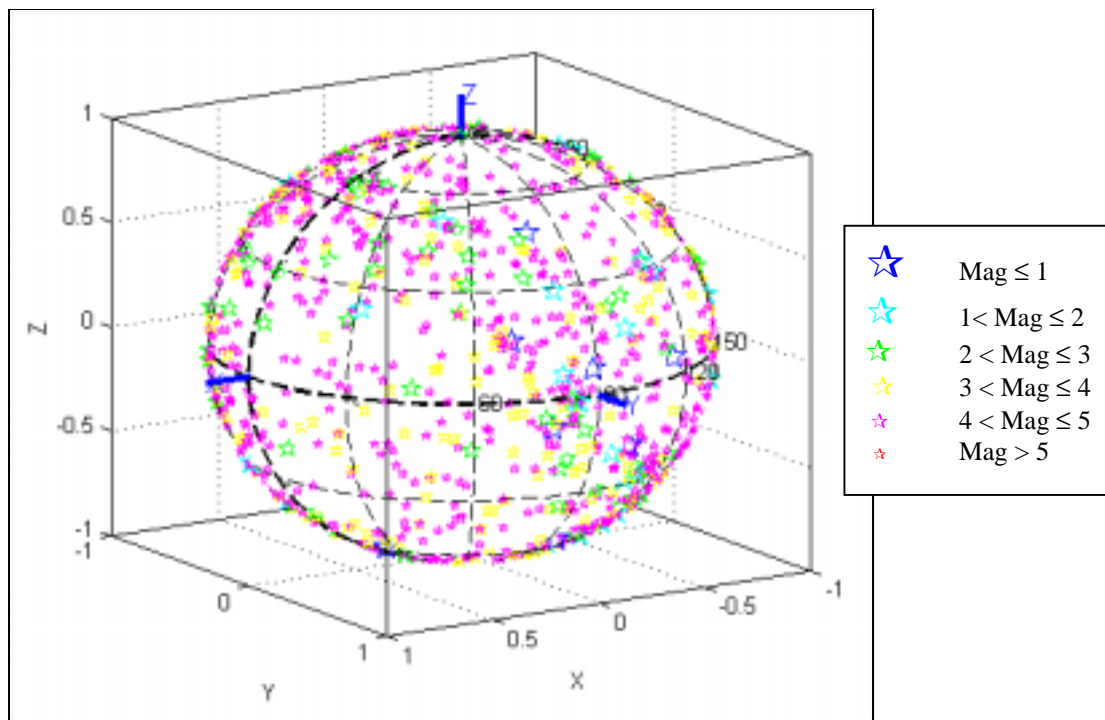


Fig. 2.23 - Posicionamento das estrelas na esfera celeste (magnitude máxima 5).

## 2.6.2 MODELO DE CATÁLOGO DE ESTRELAS

### 2.6.2.1 CATÁLOGO FONTE E CATÁLOGO DE TRABALHO

O processo de utilização de informações de dados de estrelas para a confecção do catálogo fonte deste trabalho parte do desenvolvimento de um *software* de leitura em

linguagem **QBASIC** (The Microsoft Corporation) de padrão **DOS** (The Microsoft Corporation) (Lopes; Carvalho, 1996b), que é capaz de ler e manipular os dados contidos numa base de dados de 50.071 estrelas com magnitude limite de brilho visual 8.0, obtido no **Observatório de São Carlos (CDA)** (Corporation, Sky Publishing, 1991).

Através da base de dados citada, o *software QBASIC* (The Microsoft Corporation) desenvolvido, foi capaz de gerar arquivos com extensão para *PC-Matlab* '.m' (The Math Works Inc.), de forma que pudessem ser executados no mesmo ambiente de execução do trabalho, dessa forma possibilitando toda a manipulação dos dados em ambiente *PC-Matlab* (The Math Works Inc.).

Todos os arquivos gerados foram acessados por um programa principal (Ver Fig. 2.24) que integrou numa só matriz *PC-Matlab* (The Math Works Inc.) todos os dados referentes às estrelas a serem utilizadas. Da mesma forma, a partir desta mesma matriz foi gerada uma matriz semelhante para o catálogo de trabalho, porém com limite de magnitude menor.

Para o caso deste trabalho, utiliza-se esta matriz resultante já existente de magnitude máxima 7.0, que representa um catálogo fonte de 15.985 estrelas. Já um catálogo de trabalho, no mesmo formato, com magnitude máxima 5, por exemplo, possui um total de 1624 estrelas.

Estas matrizes foram armazenadas num arquivo de dados *PC-Matlab* '.mat' (The Math Works Inc.), sendo assim possível carregá-las a qualquer momento dentro do ambiente *PC-Matlab* (The Math Works Inc.) (Ver Fig. 2.24):

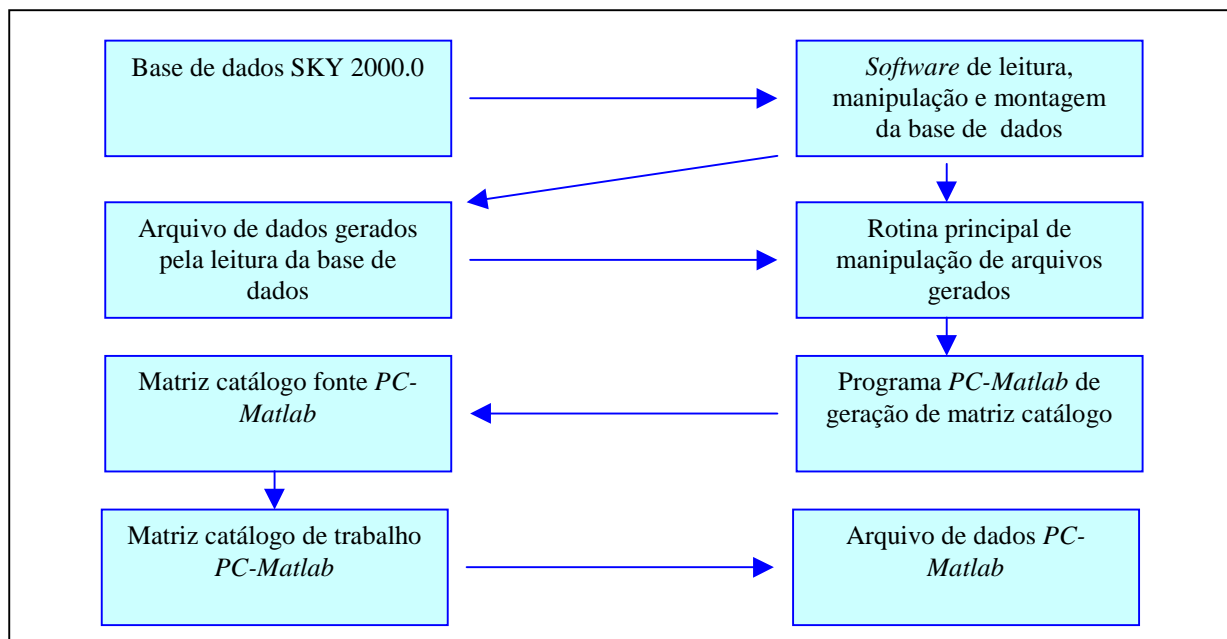


Fig. 2.24 - Funcionamento do sistema de manipulação da base de dados para geração de catálogo fonte.

Fonte: Lopes; Carvalho (1996b, p.24).

As informações contidas nas matrizes catálogo estão dispostas por colunas, sendo cada linha correspondente a uma estrela diferente (Ver Fig. 2.25).

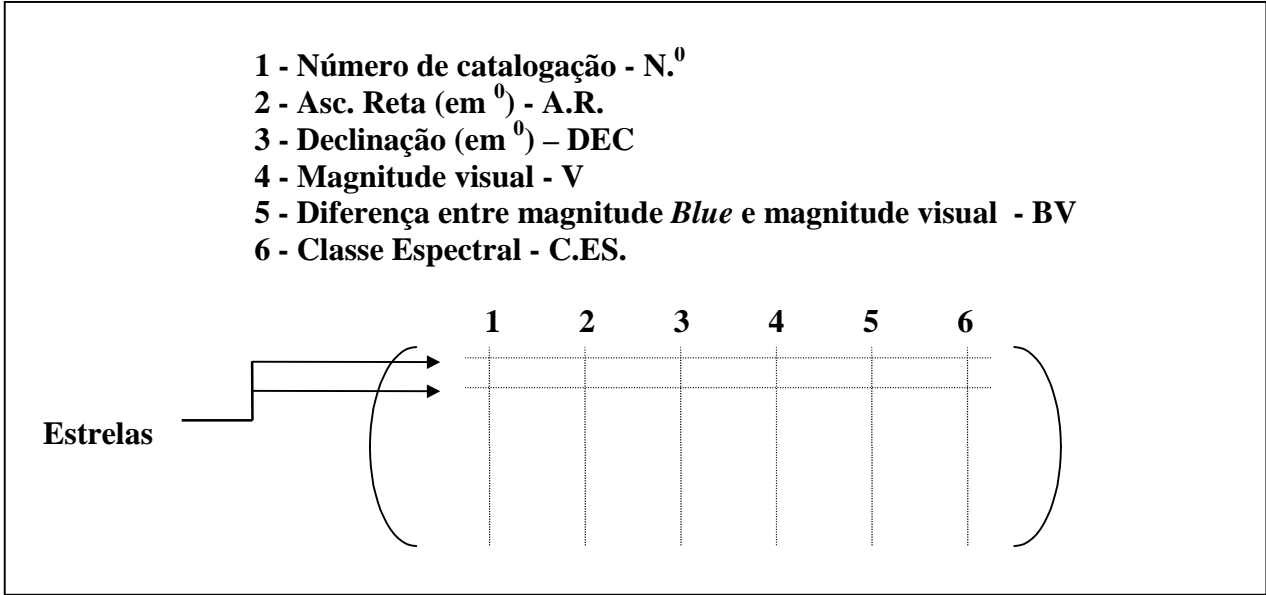


Fig. 2.25 - Características da matriz *PC-Matlab* representativa dos catálogos de estrelas.

A planificação do céu com informações das estrelas do catálogo fonte gerado é mostrada abaixo (Ver Fig. 2.26):

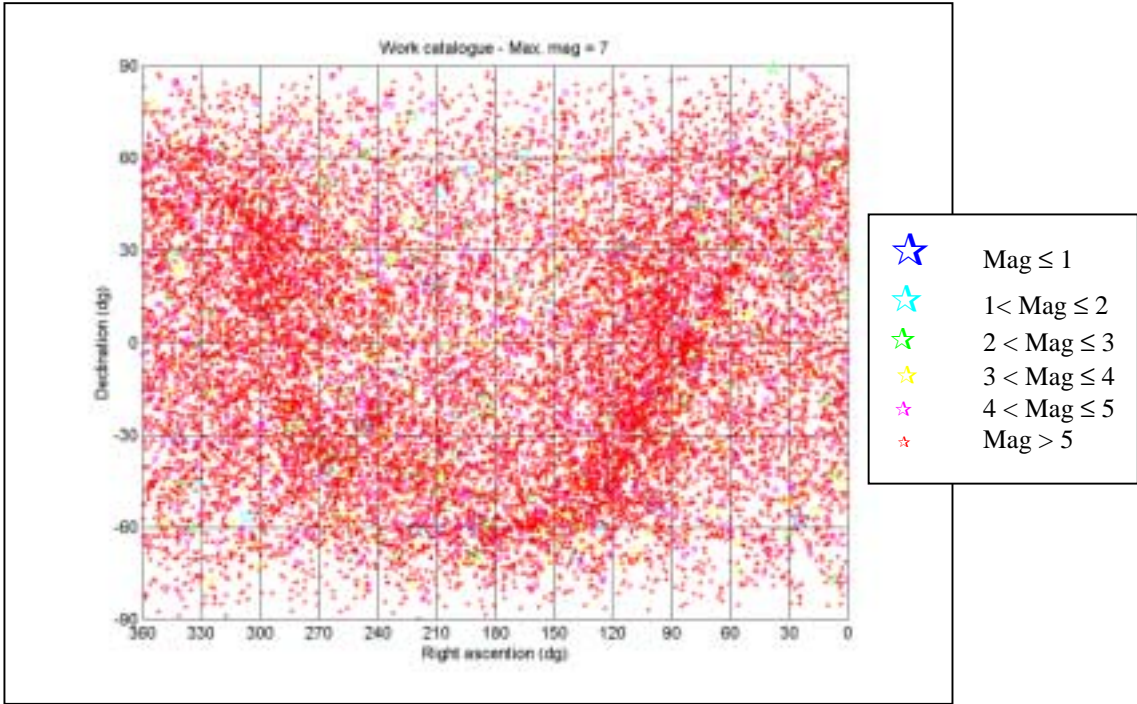


Fig. 2.26 - Planificação do mapa estelar a partir do catálogo fonte gerado.

### 2.6.2.2 REGIÃO DE OBSERVAÇÃO DO SENSOR ESTELAR

A partir do catálogo fonte é possível agrupar um conjunto de informações de estrelas que constituam a região a ser observada pelo sensor estelar na direção de seu apontamento. Através das informações do catálogo  $(\alpha_s, \delta)$  em torno da direção de apontamento do sensor é possível obter os versores das estrelas  $\hat{V}$  no referencial inercial como descrito na Seção 2.2.2. (TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS NO MESMO REFERENCIAL) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Com a matriz de rotação do referencial inercial para o do sensor  $M_{se-i}$  e os versores no referencial inercial  $\hat{V}$ , pode-se obter os versores no referencial do sensor  $\hat{S}$  através da seguinte relação:

$$\hat{S} = M_{se-i} \hat{V} \quad (2.68)$$

Com os versores no referencial do sensor é possível constituir os ângulos  $\phi$  e  $\lambda$ , e a magnitude visual da estrela  $mag$  a serem observados. O ângulo  $\phi$  é medido no plano  $xy$  no referencial do sensor no sentido positivo de rotação em  $z$ , enquanto que o ângulo  $\lambda$  é medido perpendicular a este plano no sentido negativo de  $z$  (casos próximos ao eixo  $y$ ) (Ver Fig. 2.27).

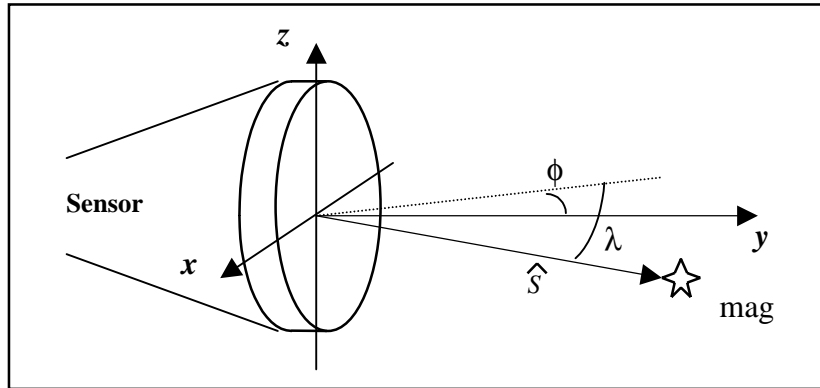


Fig. 2.27 - Geração de informações de entrada para o modelo do sensor estelar.

A obtenção de  $\phi$  e  $\lambda$  pode ser conseguida através da seguinte relação:

$$\phi = \arctg (-S(1)/S(2)) \quad (2.69)$$

$$\lambda = \arcsen (-S(3)) \quad (2.70)$$

Assim, pode-se representar o modelo de geração de entrada dos sensores de estrelas da seguinte forma (Ver Fig. 2.28):

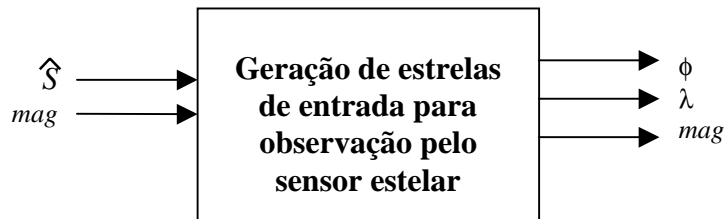


Fig. 2.28 - Modelo de geração de informações de entrada para o sensor de estrelas.

O formato utilizado para agrupar as informações é o de uma matriz *PC-Matlab* (The Math Works Inc.) como descrito na Fig. 2.29:

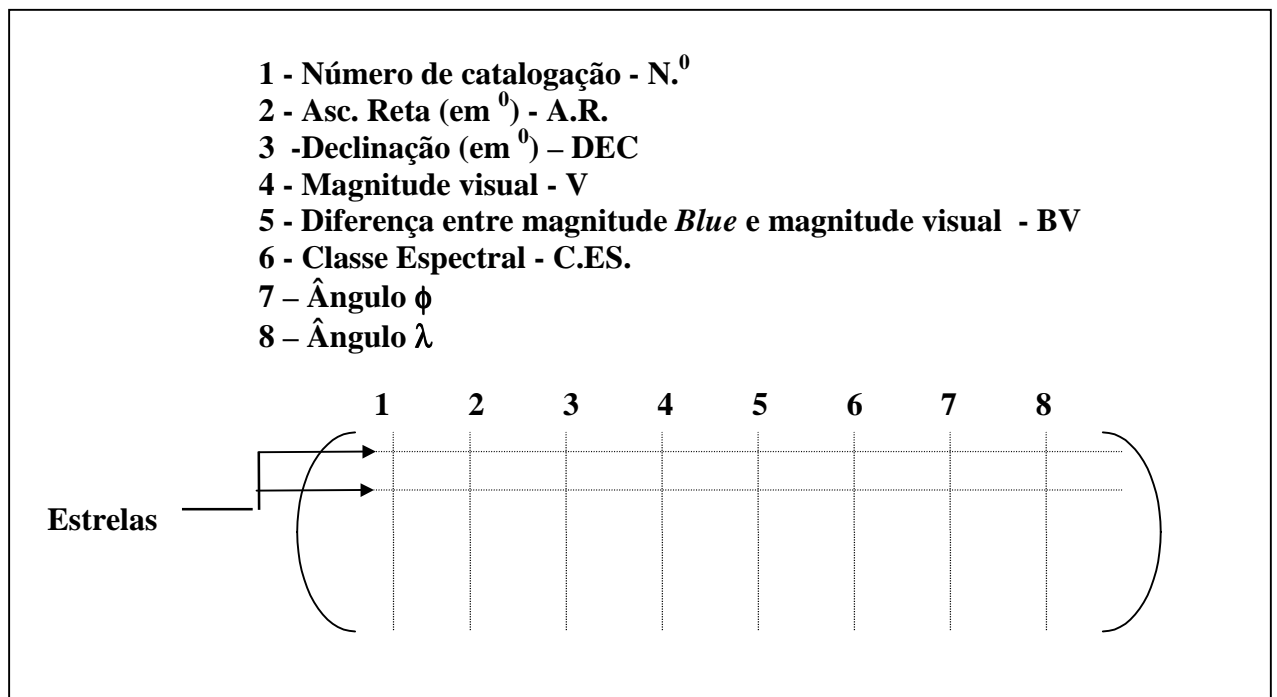


Fig. 2.29 - Características da matriz *PC-Matlab* representativa da região de observação do sensor estelar.

## 2.7 SIMULAÇÃO DE ATITUDE

### 2.7.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

No teste de um sistema de determinação de atitude é necessário que a atitude, a qual deve ser determinada pelo sistema, seja simulada para que seja possível estimular o mesmo.

Neste trabalho, esta informação é útil para que se possa gerar a informação de entrada para o sensor de estrelas, como descrito na Seção 2.6 (CATÁLOGO DE ESTRELAS) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Assim, faz-se necessário o modelamento da geração de atitude e os desvios que possivelmente possam ser aplicados na simulação de uma pré-estimativa, assim como a sua dinâmica que representa o movimento de atitude realizado pela espaçonave.

## 2.7.2 MODELO DE SIMULAÇÃO DE ATITUDE

Neste trabalho, a geração da atitude e desvios na atitude da espaçonave ocorre sempre em forma de matriz de rotação.

### 2.7.2.1 GERAÇÃO DE ATITUDE E DESVIOS NA ATITUDE

A geração da atitude pode ocorrer de forma aleatória ou pode ser fornecida como uma dinâmica pré-determinada. A forma aleatória parte de uma atitude uniformemente distribuída e segue deslocamentos aleatórios visando validar os procedimentos nas mais variadas configurações. Já o modo pré-determinado visa simular situações realistas, tais como espaçonave estabilizada inercialmente ou com apontamento terrestre.

Tanto a atitude como o desvio de atitude gerados aleatoriamente podem ser obtidos a partir de um eixo  $\hat{e}$  e ângulo  $\phi$  de rotação de **Euler** aleatórios.

Representando-se uma geração de números aleatórios gaussianos por  $al$ , para a geração de atitude aleatória  $M_{sp-i}$  pode-se obter um quaternion aleatório  $q$  que em seguida seja normalizado ( $q_N$ ) (Shuster, 2000):

$$q = \begin{pmatrix} al \\ al \\ al \\ al \end{pmatrix}, \quad q_N = q / |q| \quad (2.71)$$

Com os 3 primeiros elementos do quaternion normalizados entre si pode-se obter o eixo  $\hat{e}$ , e o ângulo  $\phi$  de rotação de **Euler** através do quarto elemento de  $q_N$  da seguinte forma:

$$\hat{e} = q_N(1,2,3) / |q_N(1,2,3)|, \quad \phi = 2.acos(q_N(4)) \quad (2.72)$$

Assim, com estes pode-se obter  $M_{sp-i} = R$  (Ver Equação 2-45).

Pode-se representar o modelo de geração de atitude aleatória da seguinte forma (Ver Fig. 2.30):

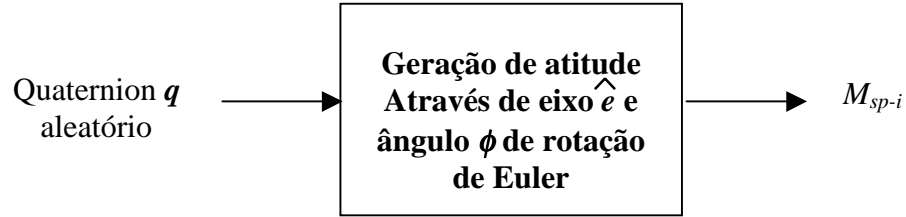


Fig. 2.30 - Modelo de geração de atitude aleatória

Para a geração de pequenos desvios aleatórios em torno de uma atitude com desvio padrão  $\sigma$  pode-se obter uma matriz de rotação  $R$  que realize o desvio quando aplicada à matriz de atitude

Com a geração de números aleatórios gaussianos  $al$ , pode-se obter o vetor aleatório  $\vec{val}$  que normalizado gere o eixo  $\hat{e}$ , e com o seu módulo e o desvio padrão  $\sigma$  pode-se obter o ângulo  $\phi$  de rotação de **Euler** da seguinte forma:

$$\vec{val} = \begin{pmatrix} al \\ al \\ al \end{pmatrix} \quad \hat{e} = \vec{val} / |\vec{val}| \quad (2.73)$$

$$\phi = |\vec{val}| \cdot \sigma \quad (2.74)$$

Da mesma forma, com estes pode-se obter  $R$  (Ver Equação 2-45) que aplicada à atitude original  $M_O$  pode gerar a atitude modificada  $M_M$  da seguinte forma:

$$M_M = R \cdot M_O \quad (2.75)$$

Pode-se representar o modelo de geração de desvio aleatório da atitude da seguinte forma (Ver Fig. 2.31):

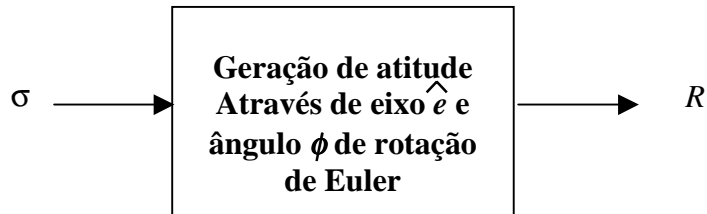


Fig. 2.31 - Modelo de geração de desvio aleatório de atitude.



Para facilitar, a atitude fornecida como um valor pré-determinado pode ser calculada em matriz de rotação a partir de uma entrada que pode estar representada no sistema equatorial, ou em ângulos de **Euler**. A obtenção da matriz de rotação  $R$  a partir das entradas nestes sistemas segue os procedimentos descritos na Seção 2.3.5. (TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE REPRESENTAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Assim, pode-se representar o modelo de geração de atitude da seguinte forma (Ver Fig. 2.32):

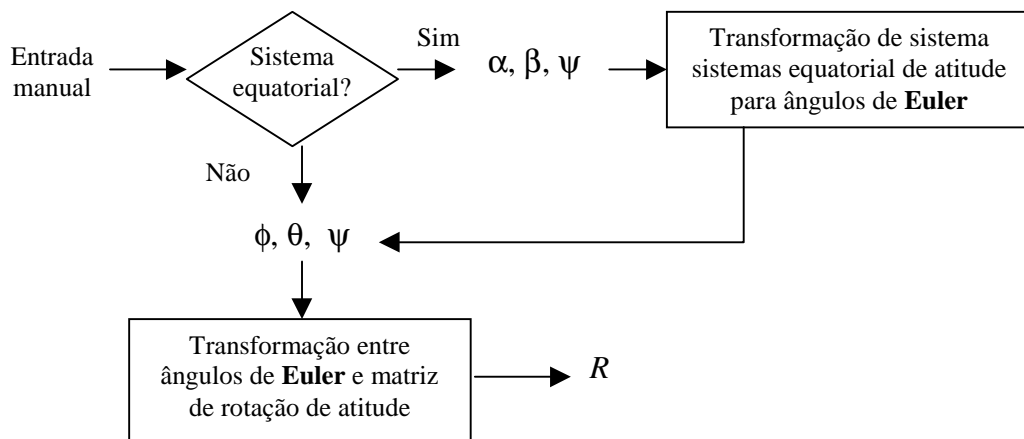


Fig. 2.32 - Modelo de geração de atitude com valores pré-determinados

Este modelo pode ser utilizado tanto para entradas que sejam da atitude inercial do sensor como da atitude inercial da espaçonave. Porém quando a entrada é referente à atitude do sensor, a matriz resultante  $R$  representa a atitude do sensor  $M_{se-i}$  com relação ao referencial inercial, sendo necessária a devida transformação com a matriz de rotação do referencial do sensor para o referencial da espaçonave  $M_{sp-se}$  para obter a matriz de atitude inercial da espaçonave  $M_{sp-i}$ :

$$M_{sp-i} = M_{sp-se} \cdot M_{se-i} \quad (2.76)$$

### 2.7.2.2 GERAÇÃO DINÂMICA DE ATITUDE

A geração dinâmica da atitude deve partir de um estado inicial representado por uma atitude inicial qualquer. Neste trabalho a atitude inicial para a simulação dinâmica da atitude é fornecida como um valor pré-determinado.

Qualquer que seja a atitude inicial, pode-se aplicar a ela alguma dinâmica de movimento de forma que depois de um intervalo de tempo ou passo de teste a atitude inicial seja alterada segundo as regras estipuladas pela dinâmica.

Apesar de possível utilizar qualquer outro tipo de simulação de órbita, a título de simplicidade, neste trabalho, o processo da dinâmica é representado por uma órbita polar circular, para efeito de teste considerada heliossíncrona, com horário de passagem 6:00 hs. Assim, considerando-se a espaçonave com apontamento terrestre durante todo o período, e o sensor de estrelas voltado para o zênite (pelo fato de a órbita ser

heliossíncrona), o Sol nunca aparece no FOV do sensor. Esta órbita foi discretizada em 24 pontos por órbita, sendo que o período de rotação do plano de órbita em torno do eixo da esfera celeste foi discretizado em 12 órbitas por ano, desta forma totalizando 288 simulações (Ver Fig. 2.33).

A partir da atitude inicial, utiliza-se de acréscimos em ângulo **Euler** de forma a constituir a órbita descrita. A cada passo, a atual atitude é utilizada como atitude inicial, à qual aplica-se a mesma regra de dinâmica e assim por diante.

A Fig. 2.33 representa essa órbita onde cada ponto magenta representa um dos apontamentos do sensor na esfera celeste. Os dois asteriscos vermelhos representam os apontamentos inicial e final de um intervalo anual de órbita

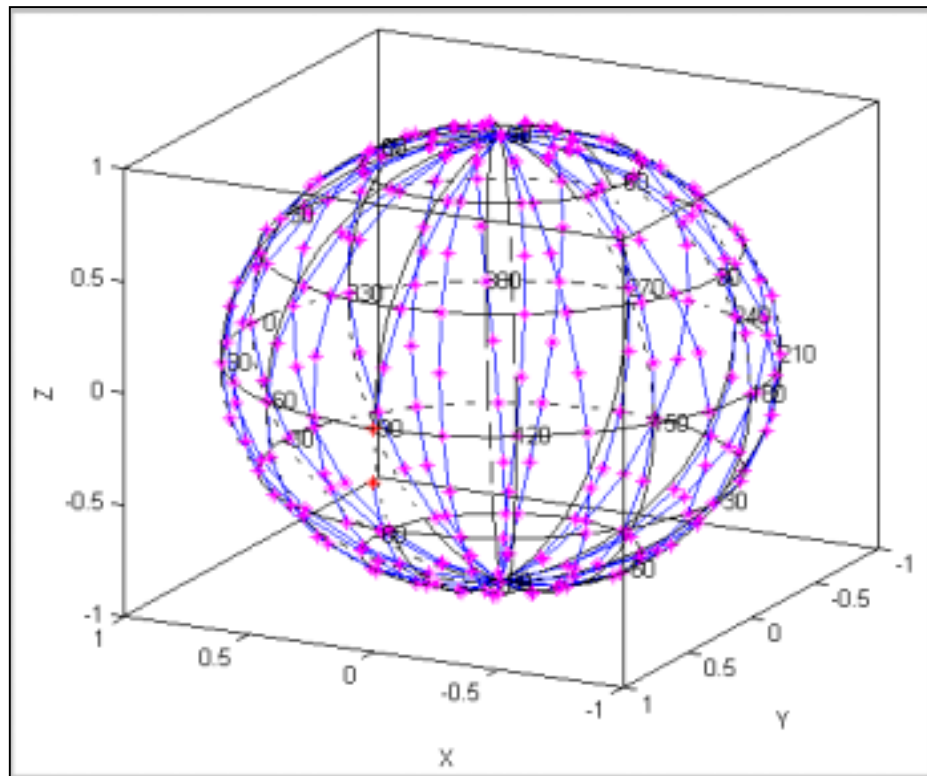


Fig. 2.33 - Caminho descrito na esfera celeste pelo apontamento de um sensor estelar a bordo de uma espaçonave com a órbita polar circular definida.

Assim, as relações entre os ângulos de **Euler** são:

$$\phi_f = \phi_i + \Delta\phi \quad (2.77)$$

$$\theta_f = \theta_i + \Delta\theta \quad (2.78)$$

$$\psi_f = \psi_i + \Delta\psi \quad (2.79)$$

Onde as variações são dadas pelas relações:

$$\text{Número de órbitas: } N_o = 12 \quad (2.80)$$

$$\text{Número de simulações: } N_s = 288 \quad (2.81)$$

$$\text{Número de pontos por órbita: } N_p = N_s / N_o = 24 \quad (2.82)$$

$$\Delta\phi = (360^0 / N_o) / N_p = 1,25^0 \quad (2.83)$$

$$\Delta\theta = 360^0 / N_p = 15 \quad (2.84)$$

$$\Delta\psi = 0^0 \quad (2.85)$$

A obtenção da matriz  $R$  a partir dos ângulos de **Euler** gerados segue os procedimentos descritos na Seção 2.3.5. (TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE REPRESENTAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Com a atitude gerada para a espaçonave  $M_{sp-i}$  e a matriz de rotação do sensor para o referencial da espaçonave  $M_{sp-se}$  (conhecida da montagem do sensor) pode-se gerar as informações necessárias para estímulo do sensor como descrito na Seção 2.6 (CATÁLOGO DE ESTRELAS) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Assim, pode-se representar o modelo de geração (Ver Fig. 2.34):

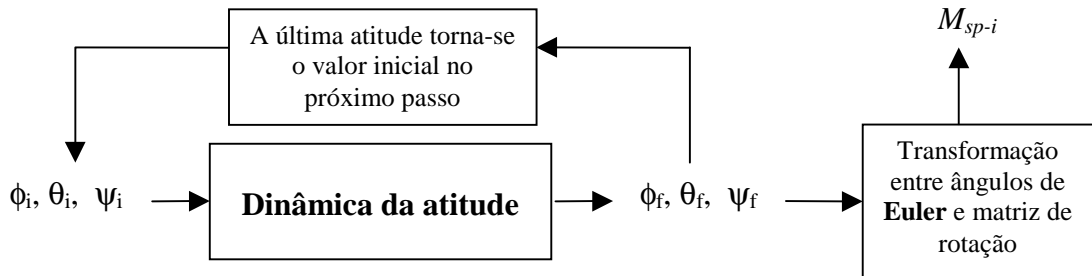


Fig. 2.34 - Modelo de geração dinâmica de atitude

## 2.8 SENSOR DE PRÉ-ESTIMATIVA

### 2.8.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O termo “sensor de pré-estimativa” aplicado aqui pode ser utilizado para se referir a qualquer sistema que forneça uma pré-estimativa da atitude da espaçonave, necessária a algumas técnicas de identificação de estrelas.

## 2.8.2 MODELO DE SENSOR DE PRÉ-ESTIMATIVA

Como os detalhes do funcionamento do sensor de pré-estimativa fogem ao escopo do trabalho, pode-se ter um modelo simplificado, sendo que a única característica considerada apenas se refere à precisão de posicionamento de atitude fornecida  $\sigma_{pe}$ . Este modelo fornece a atitude pré-estimada da espaçonave  $M_{pe}$  gerada com base na atitude real simulada  $M_{sp-i}$ . A esta aplica-se uma rotação com uma matriz de rotação  $R_{\sigma pe}$  definida a partir de um eixo  $e$  e ângulo  $\phi$  de rotação de **Euler** aleatórios com base em um erro de pré-estimativa  $\sigma_{pe}$  da mesma forma como descrito na Seção 2.7 (SIMULAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Assim, pode-se obter  $M_{pe}$  da seguinte relação:

$$M_{pe} = R_{\sigma pe} \cdot M_{sp-i} \quad (2.86)$$

Pode-se representar o modelo do sensor de pré-estimativa da seguinte forma (Ver Fig. 2.35):

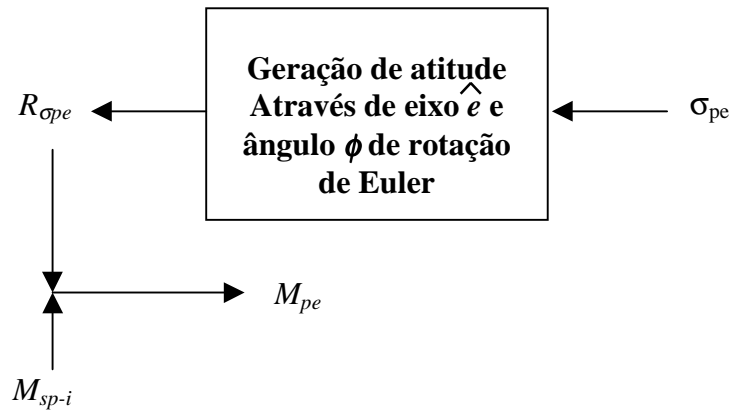


Fig. 2.35 - Modelo do sensor de pré-estimativa.

## CAPÍTULO 3

### TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS

#### 3.1 OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS

O universo de operação dos sistemas de identificação pode basicamente ser dividido em duas principais frentes:

- Operação com pré-estimativa de atitude - o algoritmo é responsável por identificar as estrelas observadas pelo sensor de estrelas baseando-se em informações presentes no catálogo de trabalho a bordo e na pré-estimativa da atitude provida por sensores auxiliares;
- Operação autônoma – é necessário que o algoritmo procure o padrão observado no catálogo todo para realizar a identificação sem nenhuma informação prévia disponível.

Além disso, pode-se considerar dois modos distintos na operação:

- Modo de aquisição - situação da espaçonave sem informação prévia;
- Modo de atualização – atualização da atitude obtida anteriormente pela espaçonave a partir da própria atitude como informação prévia.

Para a operação com pré-estimativa de atitude, o algoritmo é responsável por identificar as estrelas observadas pelo sensor de estrelas baseando-se em informações presentes no catálogo de trabalho a bordo e na pré-estimativa da atitude provida por sensores auxiliares. Neste caso, a eficiência da identificação recai em muito na precisão de pré-estimação, independentemente do algoritmo utilizado. Mesmo assim o uso de sensores de estrelas apresenta vantagem, pois a precisão requerida para a pré-estimativa ainda está muito aquém da precisão típica destes tipo de sensores.

Já para a operação autônoma, pode-se considerar a identificação em ambos os modos. O primeiro modo é mais demorado, pois deve situar a espaçonave sem nenhuma informação prévia disponível, sendo necessário que o algoritmo procure o padrão observado no catálogo todo para realizar a identificação. No entanto, pode-se levar em conta também a utilização de técnicas de otimização de varredura que aceleram o processo de busca no catálogo todo, diminuindo o tempo necessário para o algoritmo de identificação situar-se na região que contém o padrão observado.

Para o modo de atualização, as atitudes obtidas a cada instante são utilizadas como informação a priori, tornando o tempo de cálculo reduzido. Isso faz com que a operação para o instante seguinte recaia no caso com pré-estimativa de atitude. Assim, a diferença significativa de tempo de processamento entre a operação com pré-estimativa e a autônoma é apenas a aquisição de atitude, uma vez que para a primeira, a atitude já foi adquirida por um sistema auxiliar de pré-estimativa. Apesar disso, é importante ressaltar que o primeiro tipo de operação pode tornar-se até mais demorado, dependendo exclusivamente do tempo requerido para a obtenção da pré-estimativa pelo sistema que o auxilia. Dessa forma, com a independência com relação a uma atitude

pré-estimada, a precisão da identificação pode ser totalmente manipulada com foco no próprio sensor de estrelas e no algoritmo que implementa a técnica de identificação.

### **3.2 TÉCNICAS PRESENTES NA LITERATURA**

Com a revisão bibliográfica realizada foi possível adquirir conhecimentos sobre trabalhos já desenvolvidos além de selecionar as técnicas que se destinaram à implementação para estudo prático.

Assim, sob os aspectos descritos, foi possível avaliar as diferentes técnicas presentes na literatura e a forma como cada uma utiliza os diferentes métodos de identificação. Abaixo descreve-se de forma sucinta as características gerais de cada uma:

- A técnica apresentada por Wertz (1997) utiliza-se do método da justaposição direta. Esta técnica será detalhada na Seção 3.6. (MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).
- A técnica apresentada por Bank (1995) utiliza-se do método da justaposição de separações angulares e de uma base de dados previamente preparada contendo pares de estrelas catalogadas. Para cada par observado, extrai-se do catálogo instantâneo de pares aqueles com separações equivalentes, com os quais calcula-se uma atitude para verificar a equivalência com cada par observado. A técnica não necessita de uma região prévia de incerteza.
- A técnica apresentada por Bezooijen (1989) utiliza-se do método da justaposição de separações angulares e trata a identificação das estrelas através de uma comparação entre pares de estrelas observadas e catalogadas a partir de uma matriz na qual são atribuídas notas para as estrelas catalogadas. Esta técnica será detalhada na Seção 3.7.3.1 (AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA ACOPLADA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).
- A técnica apresentada por Scholl (1995) utiliza-se do método da justaposição de separações angulares e de uma tabela de triângulos formados de 3 em 3 estrelas, ordenados em ordem crescente das magnitudes e distâncias angulares de sua estrela mais brilhante. Triângulos com arestas maiores que o FOV são eliminados. Para cada linha da tabela construída com as estrelas observadas, procura-se as estrelas catalogadas cujas magnitudes sejam equivalentes, a menos de uma precisão, à estrela mais brilhante do triângulo representado pela linha. Com estas estrelas e suas vizinhas, constrói-se uma tabela de triângulos cujas arestas também sejam menores que o FOV. Assim para cada linha da tabela de triângulos de estrelas observadas tem-se uma tabela de triângulos de estrelas catalogadas. A técnica não necessita de uma região prévia de incerteza.
- A técnica apresentada por Baldini et al. (1993) utiliza-se do método da justaposição de separações angulares. Técnica semelhante é utilizada no apontamento do telescópio MASCO (Mejía; Villela; Braga, 1996). Esta técnica será detalhada na Seção 3.7.2 (TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).

- A técnica apresentada por Strikwerda et al. (1991) utiliza-se do método da justaposição de separações angulares e aplica uma divisão de células ao céu para uma montagem prévia de uma base de dados de estrelas catalogadas. Esta divisão acelera a montagem do subcatálogo, constituído das estrelas pertencentes às células selecionadas, para a região de apontamento pré-estimado, pois apenas as células da base de dados precisam ser verificadas. Esta técnica, basicamente, seleciona regiões de incerteza, podendo ser utilizada com técnicas que dela necessitem para proceder a identificação.
- A técnica apresentada por Williams et al. (1993) utiliza-se do método da justaposição de separações angulares e de uma métrica de padrão discretizado (ou padrão binário). Esta técnica será detalhada na Seção 3.7.3.2 (AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA DESACOPLADA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).
- A técnica apresentada por Mortari (1996) trata-se de uma técnica de otimização de varredura que pode ser utilizada com qualquer técnica que necessite da seleção prévia de uma região na identificação de um padrão. Esta técnica utiliza-se de uma ordenação crescente dos produtos escalares, e respectivos índices na matriz de produtos escalares, entre todos os versores posição das estrelas presentes no catálogo de trabalho. Deste vetor ordenado extrai-se, por aproximação linear entre o primeiro e o último elementos, um vetor de números inteiros representando o número de produtos escalares, no vetor ordenado, abaixo de um certo valor obtido pela aproximação linear com o índice de cada número do vetor. Assim, este vetor torna-se uma forma de busca rápida de modo que, de posse do produto escalar do par que deseja-se identificar, pode-se localizar facilmente, através dos índices armazenados das estrelas correspondentes a uma faixa de números inteiros, quais os pares de estrelas no catálogo que mais se aproximam do par observado. Com o conjunto pré-selecionado de pares, pode-se dar continuidade à identificação por qualquer outra técnica de identificação.
- A técnica apresentada por Ketchum (1995) trata-se de uma técnica de otimização de varredura que pode ser utilizada com qualquer técnica que necessite da seleção prévia de uma região na identificação de um padrão. Esta técnica utiliza-se de um icosaedro (poliedro de 20 faces triangulares equilaterais), inscrito na esfera celeste para dividi-la em diversas regiões denominadas subcatálogos. Esta técnica será detalhada na Seção 3.7.1 (TÉCNICA DE VARREDURA OTIMIZADA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS E TÉCNICAS

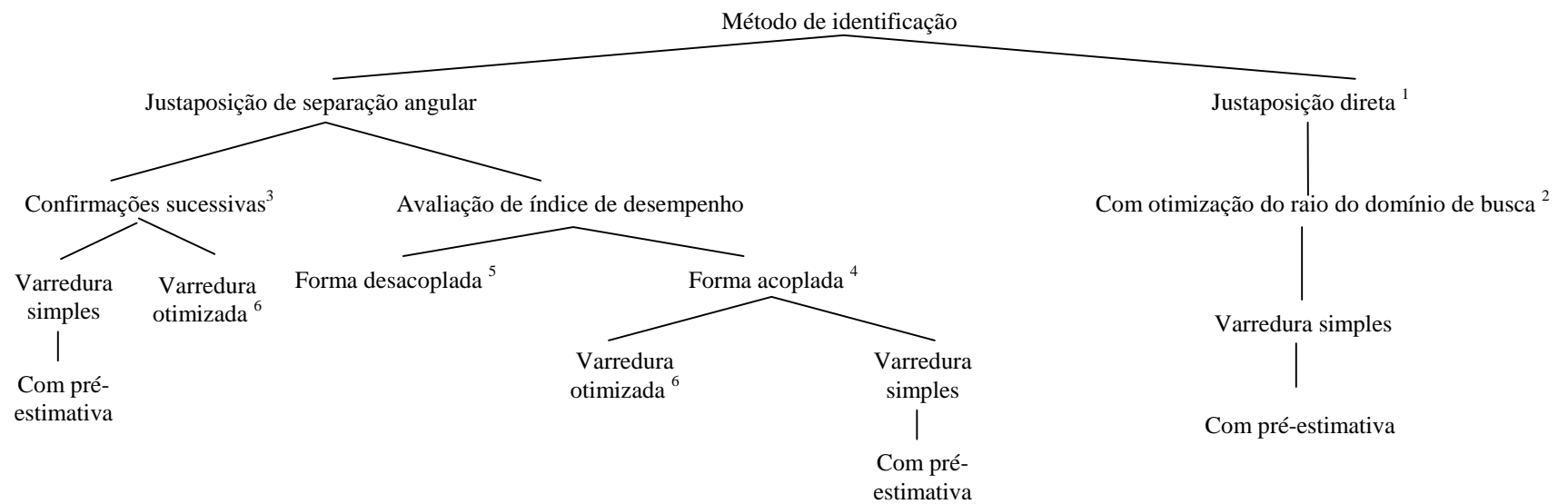
Da análise do material bibliográfico, pode-se classificar os métodos e técnicas da seguinte forma:

- Métodos de justaposição direta – a identificação é realizada por comparação de posicionamentos entre cada uma das estrelas observadas com cada uma das catalogadas individualmente. Para este método identificou-se a seguinte técnica:

- Método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza – a comparação entre cada uma das posições ocorre via utilização de um círculo definido em torno da estrela observada com um raio escolhido de forma a promover a otimização de identificações corretas e minimizar errôneas;
  - ⇒ varredura simples – utiliza-se de pré-estimativa para a definição de uma região do céu para estabelecimento dos pares a serem comparados com os pares observados;
- Métodos de justaposição de separações angulares – a identificação é realizada, basicamente, por comparação de separações angulares entre pares formados pelas estrelas observadas com pares formados pelas catalogadas. Para este método identificaram-se as seguintes técnicas:
  - Técnica de identificação por confirmações sucessivas – o processo de identificação ocorre por sucessão de verificações de pares de estrelas formados pelas estrelas mais brilhantes e suas vizinhas. As variações possíveis são:
    - ⇒ varredura simples – utiliza-se de pré-estimativa para a definição de uma região do céu para estabelecimento dos pares a serem comparados com os pares observados;
    - ⇒ varredura otimizada – utiliza-se de técnica especializada de varredura do céu para a definição da região mais adequada ao estabelecimento dos pares a serem comparados com os pares observados;
  - Técnica de identificação por avaliação de índice de desempenho – o processo de identificação ocorre associado à avaliação de índices que indiquem proximidade de padrões de estrelas no céu com o padrão de pares observado. As variações são:
    - ⇒ Forma acoplada – o índice de desempenho é avaliado de forma a produzir um resultado simultâneo para todas as estrelas envolvidas no padrão observado. As variações são:
      - varredura simples – utiliza-se de pré-estimativa para a definição de uma região do céu para estabelecimento dos pares a serem comparados com os pares observados;
      - varredura otimizada – utiliza-se de técnica especializada de varredura do céu para a definição da região mais adequada ao estabelecimento dos pares a serem comparados com os pares observados;
    - ⇒ Forma desacoplada – o índice de desempenho é avaliado de forma a produzir um resultado de forma sequencial para cada uma das estrelas envolvidas no padrão observado.

A hierarquia sugerida por esta classificação pode ser visualizada pela figura a seguir:





- 1- Wertz (1997)
- 2- Carvalho (1996)
- 3- Baldini et al. (1993)
- 4- Bezooijen (1989)
- 5- Williamns et al. (1993)
- 6- Ketchum (1995)

Fig. 3.1 - Classificação das técnicas de identificação de estrelas.

Assim, com os resultados deste estudo pode-se estabelecer critérios de forma a ajudar na seleção dos casos mais ilustrativos para implementação e testes que pudessem mostrar as nuances de funcionamento e requisitos operacionais de cada um.

A seguir apresentam-se as considerações gerais sobre tipos de identificação e características utilizadas na implementação e testes das técnicas. Em seguida, descreve-se o modelamento genérico das técnicas, seguido da implementação propriamente dita para cada técnica, e derivações, identificadas para implementação e testes.

### **3.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

#### **3.4.1 TIPOS DE IDENTIFICAÇÃO**

Antes de iniciar-se a tentativa de identificação de estrelas observadas por sensores estelares, deve-se atentar para as possibilidades de ocorrência de diferentes tipos de situações que podem envolver a identificação. Com isso, é possível prover os algoritmos com formas de tratamento para tais situações e melhorar o desempenho do sistema de determinação de atitude com o fornecimento de informações o mais corretas possível.

Para que uma estrela observada seja identificada como uma estrela do catálogo, é necessário que obtenha-se uma identificação unívoca, ou seja, uma, e apenas uma, estrela catalogada deve corresponder à observada em consideração.

Existem 4 tipos básicos para a classificação de tentativa de identificação de uma estrela observada com uma estrela do catálogo de trabalho:

- Correta – A estrela observada é relacionada à estrela do catálogo que lhe corresponde;
- Ambígua – A estrela observada é relacionada a duas ou mais estrelas do catálogo;
- Não identificação – A estrela observada não é relacionada a nenhuma estrela do catálogo;
- Errônea – A estrela observada é relacionada a uma única estrela do catálogo que porém não lhe corresponde.

Se necessário ainda pode-se reaproveitar as tentativas classificadas como ambíguas, para a extração de uma solução que resulte numa identificação unívoca. No entanto essa identificação unívoca pode resultar uma solução que leve a identificação a ser:

- Correta – A estrela observada é relacionada a duas ou mais estrelas do catálogo, tendo como solução unívoca a estrela do catálogo que lhe corresponde;
- Errônea – A estrela observada é relacionada a duas ou mais estrelas do catálogo, tendo como solução unívoca uma estrela do catálogo que não lhe corresponde.

Assim, caso se utilize algum critério para resolver ambiguidades, pode-se considerar que o universo de possibilidades de tipos de identificação passa a ser:

- Correta;
- Ambígua:
  - Correta;
  - Errônea;
- Não identificação;
- Errônea.

É importante atentar para o fato de que numa aplicação real não há como saber se a identificação unívoca é correta ou errônea, uma vez que não se tem a identidade real da estrela observada para que se possa comparar com a identificada no catálogo de trabalho. Essas classificações para a identificação ficam portanto apenas limitadas ao escopo de uma simulação, onde a identidade das estrelas observadas pelo sensor é previamente conhecida.

Num caso real a identificação errônea é a mais prejudicial, pois pode levar a espaçonave a se descontrolar. Daí a importância de que as técnicas de identificação de estrelas apresentem baixa probabilidade de identificação errônea.

### 3.4.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

#### a) Precisão de busca:

De forma geral adotaram-se tolerâncias fixas de busca para a precisão de posicionamento, pares de posicionamentos (separações angulares) e a magnitude, a não ser quando utilizou-se de funções de otimização. Essas tolerâncias foram estipuladas como a faixa estatística de 3 desvios padrão em torno da média da distribuição da característica que se deseja buscar.

Para a tolerância de busca de posicionamento para uma estrela individual tem-se :

$$tol = 3 \cdot \sigma_s \quad (3.1)$$

Onde  $\sigma_s$  representa o desvio padrão da distribuição de precisão de posicionamento das estrelas individualmente.

Para a tolerância de busca da separação angular entre pares de posicionamentos, precisa-se considerar a composição das distribuições de precisão de posicionamento de ambas as estrelas pertencentes ao par. Assim, para a distribuição composta, o desvio padrão será :

$$\sigma_{sep} = \sqrt{2} \cdot \sigma_s \quad (3.2)$$

Note-se que como a distribuição é a mesma para ambas as estrelas, pode-se agrupar os desvios como apresentado acima.

Assim, para a tolerância de busca de separação angular de pares de posicionamentos tem-se:

$$tol_{sep} = 3 \cdot \sigma_{sep} = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_s \quad (3.3)$$

Para a tolerância de busca de magnitude tem-se :

$$tol_M = 3 \cdot \sigma_{mag} \quad (3.4)$$

Onde  $\sigma_{mag}$  representa o desvio padrão da distribuição de precisão de magnitude das estrelas individualmente.

**b) Referências à diagonal do FOV:**

Com relação à referência à diagonal do FOV, onde precisou-se desta referência utilizou-se a seguinte forma, deduzida da trigonometria esférica, para calcular a abertura angular da metade da diagonal do FOV:

$$c_{Min} = (3 \cdot c_X^2 \cdot c_Y^2 - (c_X^2 + c_Y^2)) / (c_X^2 + c_Y^2 - c_X^2 \cdot c_Y^2) \quad (3.5)$$

$$F_S = \arccos(c_{Min}) / 2; \quad (3.6)$$

Onde  $c_X$  e  $c_Y$  são os cossenos das aberturas angulares da metade da largura e metade da altura do FOV respectivamente,  $c_{Min}$  representa o cosseno da abertura angular da diagonal (ou diâmetro) do FOV e  $F_S$  é a abertura angular da metade da diagonal (Ver Fig. 3.2).

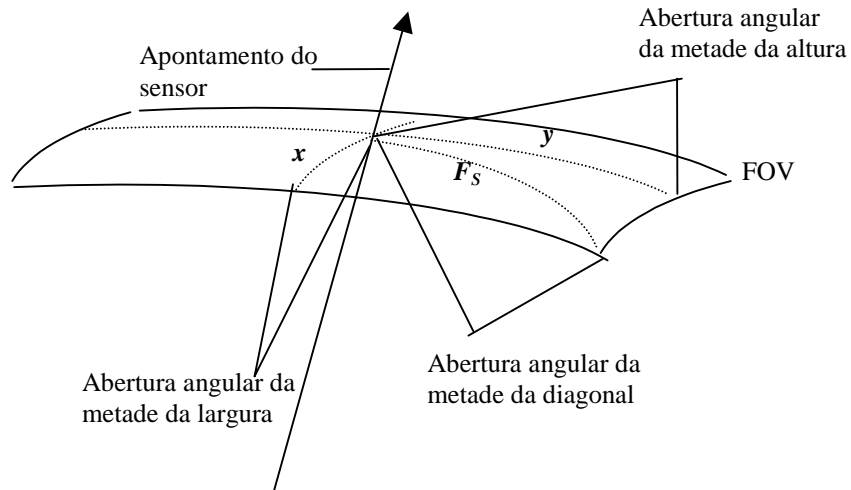


Fig. 3.2 - Obtenção da abertura angular da diagonal de um FOV.

**c) Verificação de condição espelho:**

Para alguns dos algoritmos que implementam técnicas baseadas no método da justaposição angular faz-se necessária a verificação de condição “espelho” para o conjunto de estrelas a serem identificadas com relação às observadas.

Essa verificação tem objetivo de evitar que um padrão identificado seja o inverso, ou seja, o “espelho” do padrão observado, pois apenas pela separação angular entre pares de estrelas não é possível detectar esta diferença como mostram as duas constelações catalogadas com relação à observada abaixo (Ver Fig. 3.3):

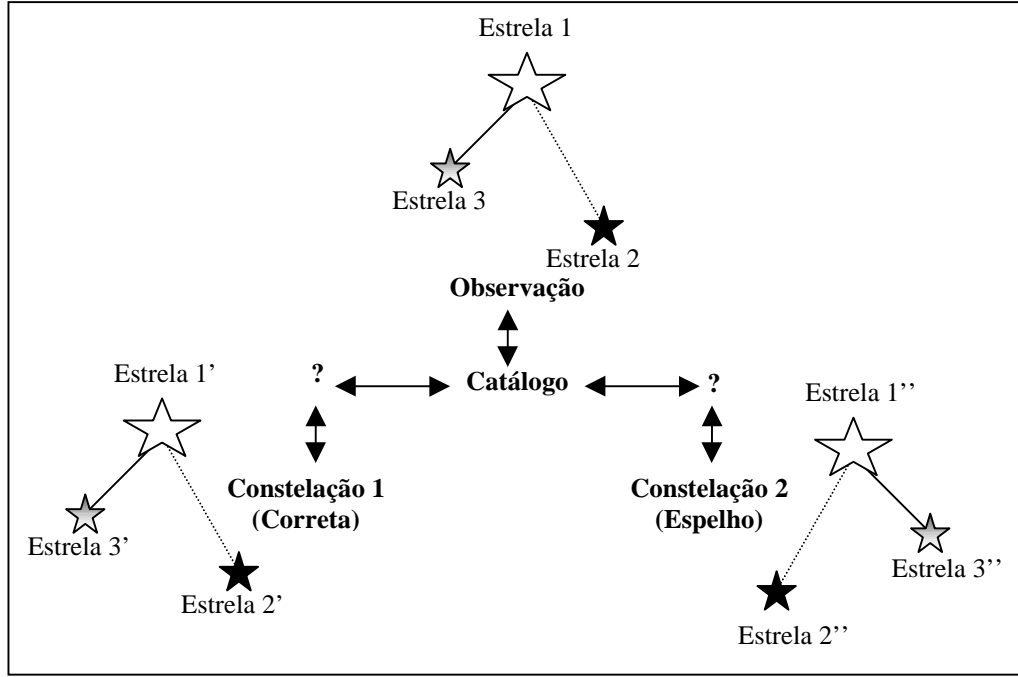


Fig. 3.3 - Ocorrência de condição espelho.

Assim, para verificar essa condição, pode-se utilizar dos dois conjuntos de  $N$  versores, observados  $O$  e identificados  $I$  (os dois conjuntos tem necessariamente as mesmas dimensões e no mínimo 3 versores cada um):

$$O = [ O_1 \ O_2 \ O_3 \ \dots ] \quad (3.7)$$

$$I = [ I_1 \ I_2 \ I_3 \ \dots ] \quad (3.8)$$

Para cada um dos conjuntos calcula-se o determinante numa combinação de 3 em 3 versores:

$$\det_O = [ O_i \ O_j \ O_k ] \quad (3.9)$$

$$\det_I = [ I_i \ I_j \ I_k ] \quad (3.10)$$

onde os índices (i,j,k) representam os versores nos conjuntos e obedecendo à seguinte regra:

$$i \in [1, N-2] \quad (3.11)$$

$$j \in [i+1, N-1] \quad (3.12)$$

$$k \in [j+1, N] \quad (3.13)$$

Assim, para cada combinação, deve-se analisar o produto dos determinantes:

$$\det_O \cdot \det_I \geq 0 \text{ - padrões não espelho} \quad (3.14)$$

$$\det_O \cdot \det_I < 0 \text{ - padrões espelho} \quad (3.15)$$

Deve-se atentar para o fato de que se ao menos um produto de determinantes resultar negativo, os padrões serão espelho, enquanto que é necessária a verificação de todos os produtos para concluir que os padrões não são espelho.

Este mesmo teste, ainda consegue resolver o caso que pode ocorrer com constelações onde as separações angulares e as magnitudes das estrelas sejam semelhantes. Neste caso a possibilidade de confusão entre as estrelas numa única constelação é considerável devido aos erros de observação.

### 3.4.3 CONFIGURAÇÕES DE IMPLEMENTAÇÃO

Como algumas das técnicas a serem consideradas a seguir utilizam-se de bases de dados e têm íntima ligação com as características do sensor, faz-se necessário neste instante mencionar as condições com as quais eles foram implementados.

Assim adotaram-se as seguintes configurações:

- Sensor de estrelas com um FOV de  $8^\circ \times 8^\circ$  e um catálogo de trabalho com 2873 estrelas variando de -1.47 a 5.5 de magnitude visual;
- Sensor de estrelas com um FOV de  $20^\circ \times 20^\circ$  e um catálogo de trabalho com 518 estrelas variando de -1.47 a 4 de magnitude visual;
- Sensor de estrelas com um FOV de  $8^\circ \times 8^\circ$  e FOV interno de  $4^\circ \times 4^\circ$  e um catálogo de trabalho com 2873 estrelas variando de -1.47 a 5.5 de magnitude visual;
- Sensor de estrelas com um FOV de  $20^\circ \times 20^\circ$  e FOV interno de  $10^\circ \times 10^\circ$  e um catálogo de trabalho com 518 estrelas variando de -1.47 a 4 de magnitude visual.

## 3.5 IDENTIFICAÇÃO

### 3.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Para um sistema de determinação de atitude baseado em sensores estelares, a identificação de estrelas tem papel determinante, visto que pode contribuir tanto para um bom desempenho, mesmo em sistemas onde o *hardware* não é muito favorável, ou degradar completamente a determinação em sistemas com *hardware* bem desenvolvido.

Apesar de a precisão das observações fornecidas pelo *hardware* influenciarem na determinação, o modo como estas observações são relacionadas às informações catalogadas é que determina o quão precisa será a atitude determinada, ou até mesmo se

é possível determiná-la. Assim, um dos objetivos da identificação é o de minimizar os efeitos das imprecisões do *hardware*.

Um dos objetivos da identificação é o de maximizar identificações corretas e minimizar principalmente as errôneas, além de ambíguas e não identificações, resultando em informação de qualidade que contribua para uma boa determinação de atitude. O direcionamento de uma técnica de identificação para essas tendências desejáveis pode ser obtido através de técnicas que otimizem o funcionamento para uma determinada situação como, por exemplo, o descrito na Seção 3.6.1. (TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DO RAIO DO DOMÍNIO DE BUSCA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).

Além de informações corretas, é necessário que a identificação seja o mais ágil possível. Essa necessidade ocorre devido às limitações quanto ao tempo de resposta de informações de atitude que o sistema de controle de atitude deve prover. Assim, além da identificação propriamente dita, pode-se utilizar de técnicas de varredura que otimizem o processo de busca em regiões mais favoráveis, diminuindo significativamente o tempo de resposta entre a observação das estrelas e a identificação das mesmas. Esse tipo de otimização é muito utilizado no caso de técnicas que possam ser utilizadas em aquisição de atitude sem pré-estimativa da mesma, quando o céu todo deveria ser vasculhado se não houvesse a redução com a aplicação de técnicas de otimização de varredura. Este tipo de técnica será abordado na Seção, 3.7.1. (TÉCNICA DE VARREDURA OTIMIZADA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).

Essas observações relativas à identificação ocorrem devido ao fato de que, sendo o processo de identificação dependente do resultado de um *software*, não há um modo definitivo de se conseguir a identificação das estrelas. Existem diversas técnicas que realizam exatamente a mesma tarefa de diversas formas. Com as mesmas medidas é possível conseguir tanto sucesso como insucesso na identificação e, por consequência, na determinação de atitude, conforme o que a técnica em questão considera e como procede aos seus cálculos, ou ainda qual a fonte de informações catalogadas utilizada.

Dessa forma, é necessária uma análise das técnicas de identificação com base nos requisitos de precisão, funcionamento, operação e recursos do sistema de determinação a ser implementado. Como mencionado anteriormente, este trabalho analisa técnicas de identificação aplicáveis a sistemas de determinação baseados em sensores estelares embutidos em espaçonaves triaxialmente estabilizadas. Também analisa o efeito da presença de sistemas que fornecem uma pré-estimativa da atitude, sendo que para algumas das técnicas analisadas essa característica é essencial para o procedimento de identificação, e para outras é totalmente irrelevante em modo de aquisição, porém necessária em modo de atualização.

A análise dos dados catalogados utilizados pelos algoritmos, apesar de exercerem grande importância na identificação, não será feita por este trabalho.

Apesar das diferenças e particularidades de cada técnica, é possível o modelamento de funcionamento de um algoritmo genérico que admita as informações fornecidas pelo sensor estelar como entrada e gere como saída o relacionamento entre as observações e

as informações catalogadas para as estrelas, ou seja, a identificação de cada estrela observada.

Com base nessa idéia, torna-se possível o uso de um grande conjunto de técnicas de identificação para um projeto de sistema de determinação de atitude por sensores estelares. Assim, a utilização resume-se apenas em definir qual a melhor técnica, segundo as características que se deseja para o sistema em projeto, com base nas análises e estudos realizados para as técnicas em avaliação.

### 3.5.2 MODELO DE IDENTIFICAÇÃO

Como dito acima, a identificação deve funcionar de forma a admitir como entrada os dados de saída dos sensores estelares e fornecer como saída os dados necessários ao determinador de atitude. Assim, neste trabalho, o modelamento da identificação está ajustado aos modelos descritos de sensor estelar na Seção 2.5 (SENSOR ESTELAR) e da determinação de atitude na Seção 2.4 (DETERMINAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

A saída fornecida pelo modelo do sensor estelar é um conjunto de coordenadas de matriz eletrônica  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  e a magnitude  $mag_s$ , e a entrada necessária ao modelo de determinação de atitude é representada por dois conjuntos de versores, estando um no referencial do sensor  $\hat{S}$  e o outro no referencial inercial  $\hat{V}$ . Assim, considera-se como entradas para o modelo de identificação de estrelas o conjunto de coordenadas de matriz eletrônica  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  e a magnitude  $mag_s$ . Já para a saída, apesar de suficientes os dois conjuntos de versores  $\hat{V}$  e  $\hat{S}$  para a determinação de atitude, também considera-se como saída as informações de quais as estrelas observadas foram univocamente identificadas  $O_I$ , os números de catalogação das estrelas associadas às observações univocamente identificadas  $C_I$  e o número de estrelas do catálogo candidatas à identificação para cada estrela observada  $N_I$  (mesmo as não identificadas univocamente). Essas informações adicionais apenas são necessárias para o estudo de desempenho do algoritmo e verificação da qualidade das identificações, não fazendo parte do conjunto de saídas fornecidas por um algoritmo de identificação em funcionamento num caso real. O fato da adição destas saídas não é relevante em termos de alteração de desempenho, visto que estas informações já são geradas internamente por necessidade do algoritmo. Assim, as medições de desempenho no estudo dos algoritmos não sofre prejuízo algum. Com base nas informações de entrada  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  e  $mag_s$  é possível a obtenção dos ângulos  $(\phi_s, \lambda_s)$ :

$$\phi_s = \arctg (\mathbf{u} / \mathbf{f}) \quad (3.16)$$

$$\lambda_s = \arctg (\mathbf{v} / \mathbf{f}) \cdot \cos \phi_s \quad (3.17)$$

Com estes, é possível a obtenção do versor  $\hat{S}$  (Ver equação 2-63).

Já a obtenção do versor  $\hat{V}$  ocorre a partir das coordenadas equatoriais  $(\alpha_s, \delta)$ , como descrito na Seção 2.2.2. (TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS NO MESMO REFERENCIAL) do Capítulo 2. (CONCEITOS



BÁSICOS), obtidas das estrelas catalogadas associadas com as observações pela identificação. Esta identificação é particular de cada algoritmo em específico.

As informações  $O_I$ ,  $C_I$  e  $N_I$  são geradas associando-se a cada estrela observada a sua posição  $O_I$  no grupo de estrelas observadas e o número de catalogação da catalogada associada pela identificação  $C_I$ , além do número de candidatas na catalogação para a observação em questão  $N_I$ .

Essas informações são úteis no sentido de verificar qual o tipo de identificação para cada observação. Essa verificação só pode ser feita em termos de ambiente de testes, uma vez que a atitude já é previamente conhecida da simulação. Em aplicações reais essa verificação não é possível.

Assim, pode-se representar o modelo genérico de identificação da seguinte forma:

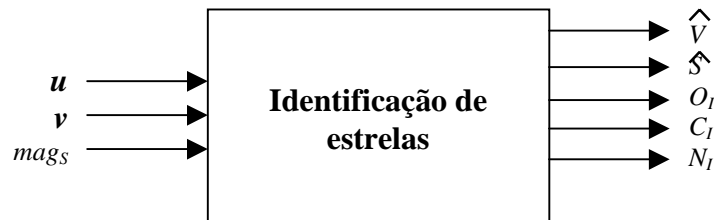


Fig. 3.4 - Modelo genérico de identificação de estrelas

Para verificar os tipos de identificação para cada observação do sensor estelar compara-se as informações  $O_I$ ,  $C_I$  e  $N_I$  com a informação adicional de quais foram realmente as estrelas catalogadas observadas pelo sensor  $O_C$  (Ver Modelo do Sensor Estelar).

As possibilidades de ocorrência são as seguintes:

- Identificação Correta – a estrela está incluída em  $O_I$ ,  $C_I$  corresponde a  $O_C$  e  $N_I$  é 1;
- Identificação Ambígua corretamente resolvida - a estrela está incluída em  $O_I$ ,  $C_I$  corresponde a  $O_C$  e  $N_I$  é maior1;
- Identificação Ambígua erroneamente resolvida - a estrela está incluída em  $O_I$ ,  $C_I$  não corresponde a  $O_C$  e  $N_I$  é maior1;
- Identificação Ambígua não resolvida - a estrela não está incluída em  $O_I$  e  $N_I$  é maior1;
- Não identificação - a estrela não está incluída em  $O_I$  e  $N_I$  é 0;
- Identificação Errônea - a estrela está incluída em  $O_I$ ,  $C_I$  não corresponde a  $O_C$  e  $N_I$  é 1.

É possível também realizar a classificação por coordenadas e magnitudes das estrelas, uma vez que há a possibilidade de o catálogo fonte de simulação não ser o mesmo que gerou o catálogo de trabalho, e assim podendo ocorrer variação nos números de catalogação para a mesma estrela, o que torna impossível a comparação por números de catalogação. Neste caso, a classificação foi feita neste trabalho utilizando-se de uma

precisão de 500'' para verificar coordenadas de posição e precisão de 0.5 de magnitude visual para a comparação das magnitudes. (Nota: esse tipo de comparação foi útil ao utilizar-se os dados reais do satélite **ROSAT** cujos números de catalogação diferem do catálogo utilizado neste trabalho).

Assim, para verificar os tipos de identificação para cada observação do sensor estelar compara-se as informações  $O_I$ ,  $N_I$  com a informação adicional de quais foram realmente as estrelas simuladas observadas pelo sensor  $O_S$  (Ver Modelo do Sensor Estelar).

As possibilidades de ocorrência são as seguintes:

- Identificação Correta – a estrela está incluída em  $O_I$ , a estrela corresponde em coordenadas e magnitude à estrela simulada correspondente à  $O_S$  e  $N_I$  é 1;
- Identificação Ambígua corretamente resolvida - a estrela está incluída em  $O_I$ , a estrela corresponde em coordenadas e magnitude à estrela simulada correspondente à  $O_S$  e  $N_I$  é maior1;
- Identificação Ambígua erroneamente resolvida - a estrela está incluída em  $O_I$ , a estrela corresponde em coordenadas e magnitude à estrela simulada correspondente à  $O_S$  e  $N_I$  é maior1;
- Identificação Ambígua não resolvida - a estrela não está incluída em  $O_I$  e  $N_I$  é maior1;
- Não identificação - a estrela não está incluída em  $O_I$  e  $N_I$  é 0;
- Identificação Errônea - a estrela está incluída em  $O_I$  a estrela corresponde em coordenadas e magnitude à estrela simulada correspondente à  $O_S$  e  $N_I$  é 1.

### 3.6 MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA

#### 3.6.1 TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DO RAI DO DOMÍNIO DE BUSCA

##### 3.6.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Esta técnica foi adaptada da descrição teórica apresentada por Levine (1996) de forma a otimizar as ocorrências dos tipos de identificação segundo faixas de critérios adotadas aplicadas ao raio do domínio de busca do método apresentado por Wertz (1997).

A otimização do raio do domínio de busca visa simultaneamente atingir alvos conflitantes: maximizar a probabilidade de identificação correta e minimizar a probabilidade de ocorrência dos demais tipos de identificação. Isto não é possível através das técnicas usuais de otimização onde há apenas um critério único que estabelece a situação ótima. Uma solução para este tipo de problema entretanto, pode ser obtida pela técnica dos múltiplos critérios (Levine, 1996).

A aplicação desta técnica ao problema de otimização do raio do domínio de busca utilizado no método da justaposição direta é um dos pontos alvo deste trabalho, pois através dela é possível otimizar a identificação das estrelas segundo critérios pré-determinados que satisfaçam os requisitos estipulados por projetistas ou pela própria

necessidade da missão, ou ainda pelas características construtivas do sistema e do *software*.

Esta técnica prevê e possibilita a aplicação de faixas de permissão aos vários tipos de identificação, estipulando como deve se comportar cada um de acordo com o critério para ele adotado.

Para a aplicação desta técnica, tem-se por ponto de partida as funções de probabilidade de ocorrência para os vários tipos de identificação (correta, errônea, ambígua e não identificação - identificações ambíguas correta ou erroneamente resolvidas devem ser computadas simplesmente como ambíguas) em função do raio de busca no método de justaposição direta (Wertz, 1997), (Lopes; Carvalho, 1996a). Utiliza-se da distribuição de **Poisson** para definir as probabilidades, ou seja, considera as estrelas uniformemente distribuídas no céu.

Para a ocorrência de cada tipo de identificação estipula-se uma faixa de porcentagens para as quais considera-se a ocorrência como boa ou ruim. Com os resultados da aplicação dessas faixas às probabilidades de identificação através de uma função linear, pode-se obter o valor para o qual a característica desejada é otimizada e que favoreça cada uma das identificações como descrito pelas faixas adotadas.

### 3.6.1.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO RAIOS DO DOMÍNIO DE BUSCA

Como o objetivo da implementação desta técnica neste trabalho está voltado à utilização do método da justaposição direta, considera-se a característica  $\varepsilon$  a otimizar como o raio  $r$  da área de busca em torno da posição observada da estrela. Este raio define uma calota esférica com centro na posição de observação da estrela.

Assim, define-se previamente:

- $R$  - valor do raio de busca;
- $r$  - faixa de valores do raio de busca que deseja-se otimizar. Representa a distância radial entre a estrela e o centro da calota esférica;
- $\vartheta$  - área de busca ou domínio de incerteza— área delimitada pelo raio de busca  $R$  em torno da posição da estrela observada;
- $\sigma$  - erro total de observação de posição associado ao sensor estelar e à incerteza da pré-estimativa da atitude associada ao sensor de pré-estimativa;
- $\rho$  - densidade estelar do catálogo de trabalho considerado;
- $q$  - probabilidade de que a estrela observada esteja no catálogo de trabalho:

$$q = P [\text{estrela} \in \text{Catálogo}] = 0.99 \text{ (adotado)} \quad (3.18)$$

- $\mu$  - número médio de estrelas presente na calota esférica e que estejam contidas no catálogo de trabalho:

$$\mu = 2 \pi (1 - \cos R) \cdot \rho \cdot q \quad (3.19)$$

- probabilidade de haver  $n$  estrelas dentro da área de busca:

$$P[N = n] = \mu^n \cdot e^{-\mu} / n! \quad (3.20)$$

- probabilidade de haver apenas uma estrela dado que há pelo menos uma estrela na área de busca:

$$P[N = 1 \mid N \geq 1] = P[N = 1] / (1 - P[N = 0]) = \mu \cdot e^{-\mu} / (1 - e^{-\mu}) \quad (3.21)$$

- probabilidade de que a estrela correta esteja na área de busca:

$$\begin{aligned} P[r \leq R] &= F(r) \\ &= \iint_{\vartheta} e^{-(x^2 + y^2)/2\sigma^2} \cdot dxdy / 2\pi\sigma^2 = \int_0^R \int_0^{2\pi} e^{-r^2/2\sigma^2} \cdot r \, d\theta \, dr / 2\pi\sigma^2 \\ &= \int_0^R e^{-r^2/2\sigma^2} \cdot r \, dr / \sigma^2 = 1 - e^{-R^2/2\sigma^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Abaixo definem-se as probabilidades:

- Probabilidade de identificação correta – Probabilidade de que a estrela correta esteja contida no catálogo de trabalho, esteja presente no domínio de incerteza e não existam outras estrelas catalogadas no domínio de incerteza:

$$\begin{aligned} P_c &= P[\text{Correta}] \\ &= P[\text{estrela} \in \text{Catálogo}] \cdot P[r \leq R] \cdot P[N = 1 \mid N \geq 1] \\ &= q \cdot F(r) \cdot \mu \cdot e^{-\mu} / (1 - e^{-\mu}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

- Probabilidade de não identificação – Probabilidade de que não há estrelas catalogadas no domínio de incerteza e a estrela correta ou não está contida no catálogo de trabalho ou não está presente no domínio de incerteza:

$$\begin{aligned} P_{ni} &= P[\text{não identificação}] \\ &= P[N = 0] \cdot \{1 - P[\text{estrela} \in \text{Catálogo}] \cdot P[r \leq R]\} \\ &= e^{-\mu} \cdot \{1 - q F(r)\} \end{aligned} \quad (3.24)$$

- Probabilidade de identificação errada – Probabilidade de que há uma única estrela catalogada no domínio de incerteza e a estrela correta ou não está contida no catálogo de trabalho ou não está presente no domínio de incerteza:

$$\begin{aligned}
Pe &= P[\text{errônea}] \\
&= P[N = 1] \cdot \{ 1 - P[\text{estrela} \in \text{Catálogo}] \cdot P[r \leq R] \} \\
&= \mu \cdot e^{-\mu} \cdot \{ 1 - q F(r) \} = \mu \cdot Pni
\end{aligned} \tag{3.25}$$

- Probabilidade de identificação ambígua – Probabilidade de que há mais de uma estrela catalogada no domínio de incerteza:

$$Pa = P[\text{ambígua}] = 1 - (Pi + Pni + Pe) \tag{3.26}$$

Para o desenvolvimento dos testes do trabalho, foram adotadas as faixas descritas na Tabela 3.1. No entanto, estes valores foram utilizados de forma ilustrativa não constituindo uma sugestão de uso. É importante lembrar que a cada projeto deve-se analisar as especificações de forma a definir as melhores faixas. Mesmo assim, de forma consensual, pode-se mencionar que estas faixas devem sempre buscar minimizar as identificações errôneas.

**TABELA 3.1 - FAIXAS DE APLICAÇÃO ÓTIMAS ÀS PROBABILIDADES DE IDENTIFICAÇÃO**

| (k) | Tipo de identificação | Bom % | Ruim % |
|-----|-----------------------|-------|--------|
| C   | Correta               | 100   | 65     |
| Ni  | Não identificação     | 0     | 15     |
| E   | Errônea               | 0     | 5      |
| A   | Ambígua               | 0     | 15     |

Essas porcentagens transformam-se em números reais (de 0 a 1) e são aplicadas a cada uma das probabilidades em uma função do raio de busca  $r$  de modo a se obter índices de desempenho normalizados:

$$f_k(r) = \frac{P_k(r) - Ruim_k}{Bom_k - Ruim_k} \tag{3.27}$$

Com os índices de desempenho normalizados (Ver Fig. 3.5 e 3.6), define-se o índice de desempenho crítico abaixo:

$$f(r) = \text{Min}(k) \{ f_k(r) \}, k \in \{c, ni, e, a\} \tag{3.28}$$

Assim, o índice de desempenho crítico leva em conta todos os “múltiplos critérios” a serem aplicados às funções de probabilidade de ocorrência dos tipos de identificação, ou seja, é uma função representativa de uma condição de característica de identificação desejada. Com ela é possível reduzir o problema a um único critério de otimização do raio de busca.

O valor otimizado é estipulado como o valor para o qual o índice de desempenho crítico é maximizado. O desvio um pouco à esquerda ou um pouco à direita (Ver Fig. 3.6), pode ser favorável segundo algum dos critérios, mas no entanto será prejudicial segundo alguns dos demais critérios, sendo maior o prejuízo que o ganho. Assim deve-se ter o máximo equilíbrio entre os critérios no ponto de máximo índice de desempenho crítico.

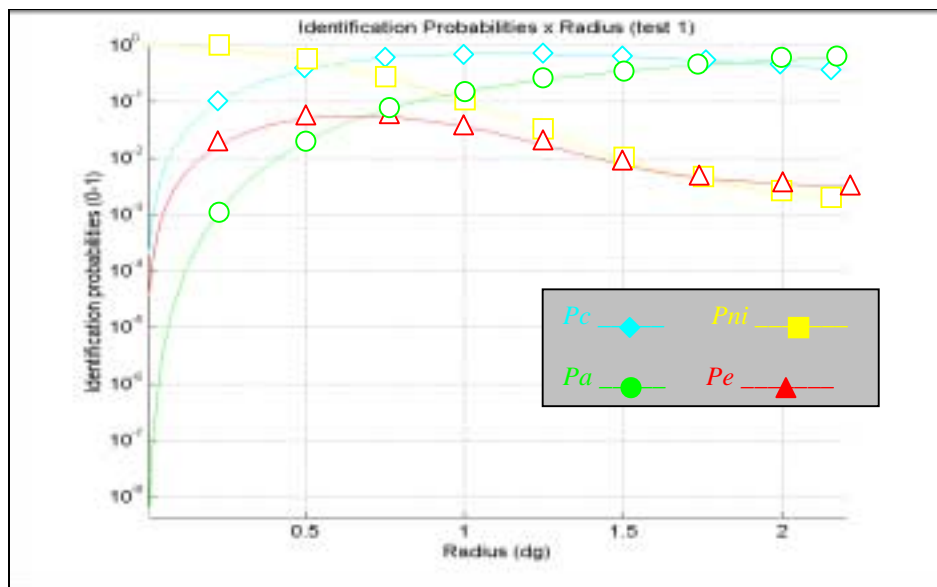


Fig. 3.5 - Probabilidades de identificação para a característica de raio de busca (Gráfico obtido de uma execução no *software* SIATS).

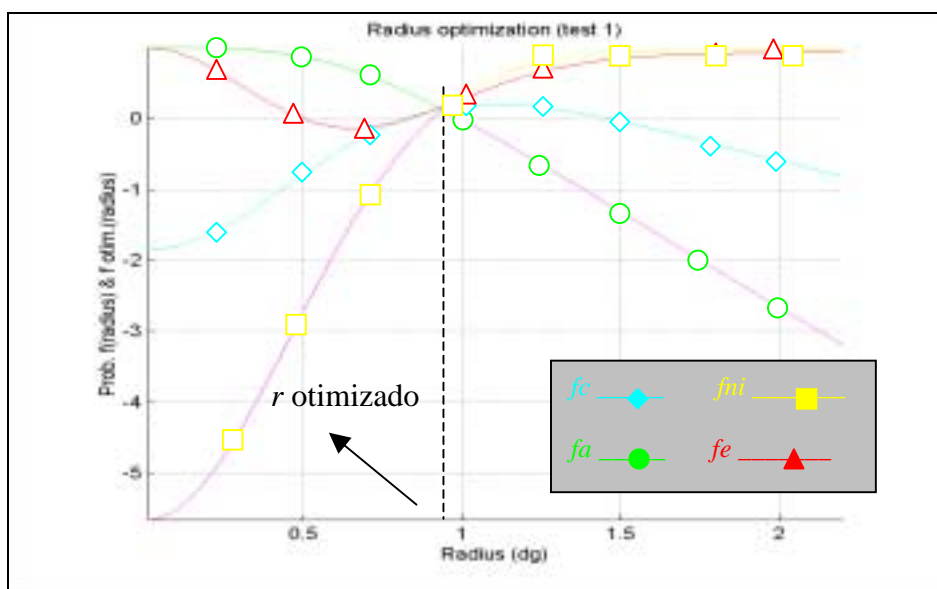


Fig. 3.6 - Índice de desempenho crítico, otimização e equilíbrio dos critérios para as probabilidades de identificação para o raio de busca (Gráfico obtido de uma execução no *software* SIATS).

Com estes resultados, pode-se então dar um melhor direcionamento e criar uma sistematização na pesquisa de identificação, otimizando-se a identificação segundo critérios previamente estabelecidos.

Assim, pode-se representar o modelo de otimização da seguinte forma (Ver Fig. 3.7):

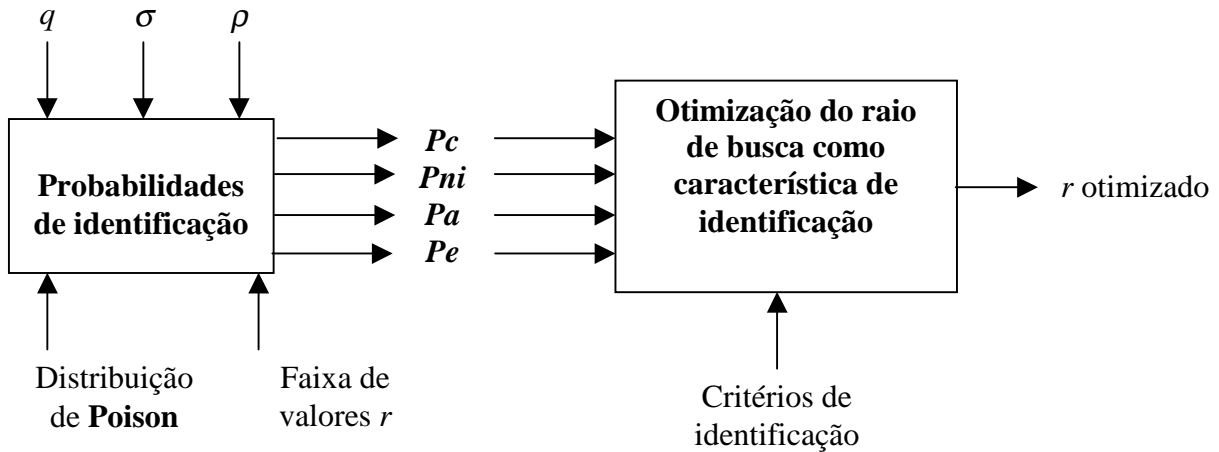


Fig. 3.7 - Modelo de otimização do raio de busca.

### 3.6.2 MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA COM OTIMIZAÇÃO DE DOMÍNIO DE INCERTEZA

A implementação desta técnica baseou-se na descrição teórica apresentada por Wertz (1997) e na implementação realizada em trabalho anterior (Lopes; Carvalho 1996a).

Em complemento, utilizou-se da técnica de otimização descrita anteriormente para a otimização das ocorrências dos tipos de identificação segundo faixas de critérios adotadas.

Das possíveis variações, há duas possibilidades que foram implementadas para esta técnica de identificação de estrelas. O primeiro algoritmo é o básico e que não resolve identificações ambíguas para obter identificações unívocas. Já o segundo, apesar de seguir a mesma implementação do primeiro, tem a preocupação em obter identificações unívocas a partir de identificações prévias tidas como ambíguas.

### 3.6.2.1 SEM RESOLUÇÃO DE IDENTIFICAÇÕES AMBÍGUAS

Para esta implementação, considera-se apenas as identificações unívocas e desconsidera-se todas as observadas que não tenham associação alguma ou que obtiveram mais de uma associação com as estrelas catalogadas (identificação ambígua).

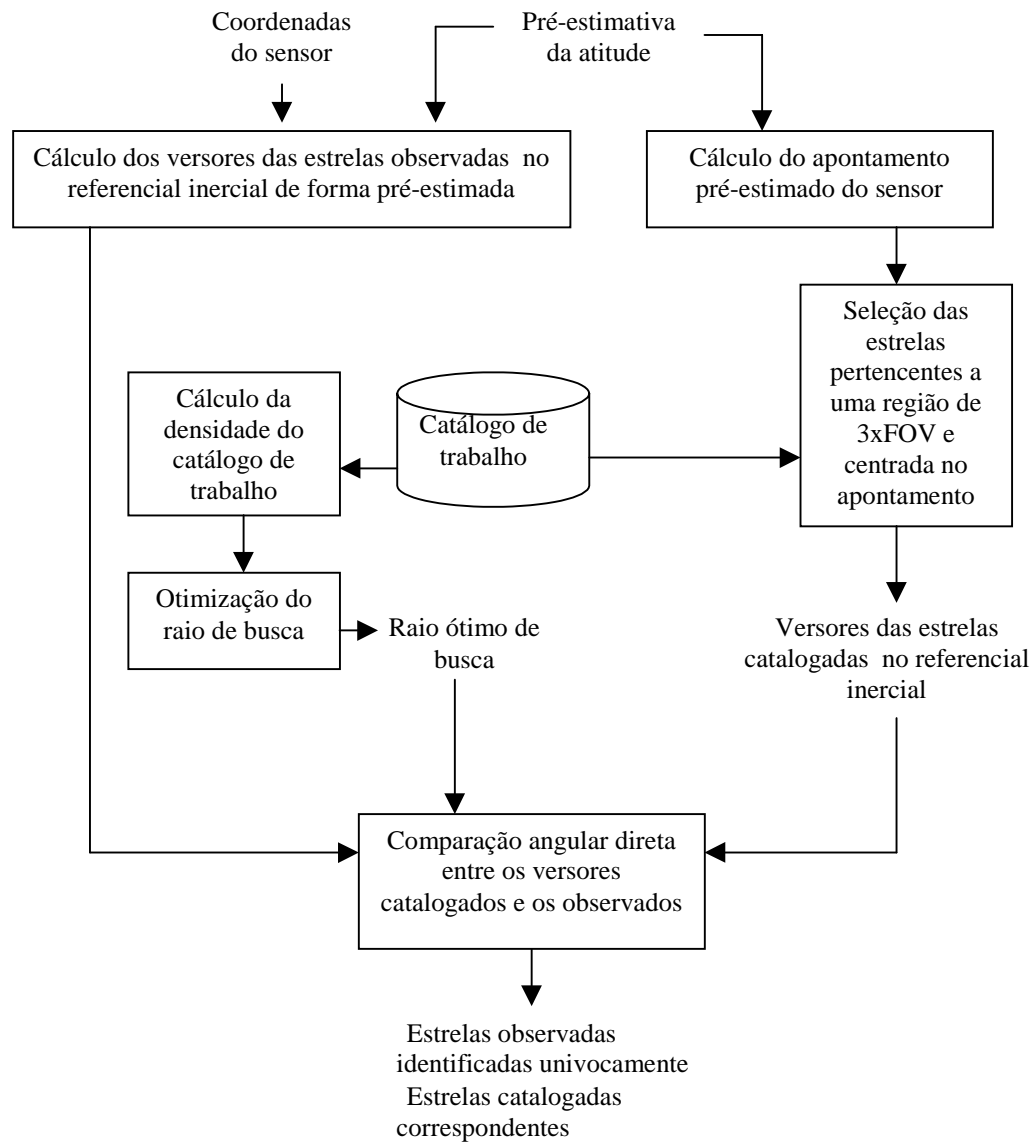


Fig. 3.8 - Sequência do método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza sem resolução de ambiguidades.

A sequência do algoritmo é a seguinte (Ver Fig. 3.8):

- 1) Com a pré-estimativa de atitude obtém-se o apontamento do sensor;
- 2) Com a saída de observação do sensor e a pré-estimativa de atitude obtém-se os versores das estrelas observadas no referencial inercial;



- 3) Obtém-se as estrelas do catálogo de trabalho numa região de  $3 \times \text{FOV}$  em torno do apontamento do sensor;
- 4) Com a densidade de estrelas do catálogo de trabalho, aplica-se a função de otimização e obtém-se o raio ótimo de busca;
- 5) Com as estrelas do catálogo de trabalho pertencentes à região definida obtém-se os seus versores no referencial inercial;
- 6) A identificação ocorre quando o versor de estrela observada tem produto escalar maior que o cosseno definido pelo raio ótimo de busca com apenas um versor de estrela catalogada (Em termos práticos isso significa que a identificação acontece quando uma única estrela catalogada está dentro do círculo definido pelo raio ótimo de busca em torno da estrela observada). Estrelas observadas com nenhuma ou mais de uma catalogada associada não são consideradas.

Deve-se notar que se a pré-estimativa de atitude é pobre, a posição inercial transformada das observações pode estar distante angularmente da posição real, o que dificulta ou torna até impossível a identificação.

O raio de busca (Ver Fig. 3.5 e 3.6) deve ser otimizado de modo a maximizar a probabilidade de que a estrela correta, e apenas ela, esteja dentro deste círculo. Para tanto, aplica-se ao raio de identificação a técnica de otimização apresentada na Seção 3.6.1. (TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DO RAIOS DO DOMÍNIO DE BUSCA).

Nesta técnica, para efetuar a otimização da busca do raio ótimo, necessita-se avaliar a função otimizada das probabilidades de identificação num domínio de valores que contenha o valor ótimo para o mesmo. Assim, assumiu-se que o domínio de avaliação da função otimizada seria definido entre os valores mínimo de raio nulo e o máximo como o raio que resulta na média em 3 estrelas no interior do círculo de busca. Acima deste valor o nível de ambiguidades é considerado totalmente inadequado à identificação.

A seguir encontra-se a representação esquemática onde apresentam-se (Ver Fig. 3.9):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis);
- posição pré-determinada do FOV do sensor estelar (em magenta);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV pré-estimado (círculos magenta);
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho);
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos);
- indicador de estrelas não presentes no catálogo de trabalho (asterisco azul);

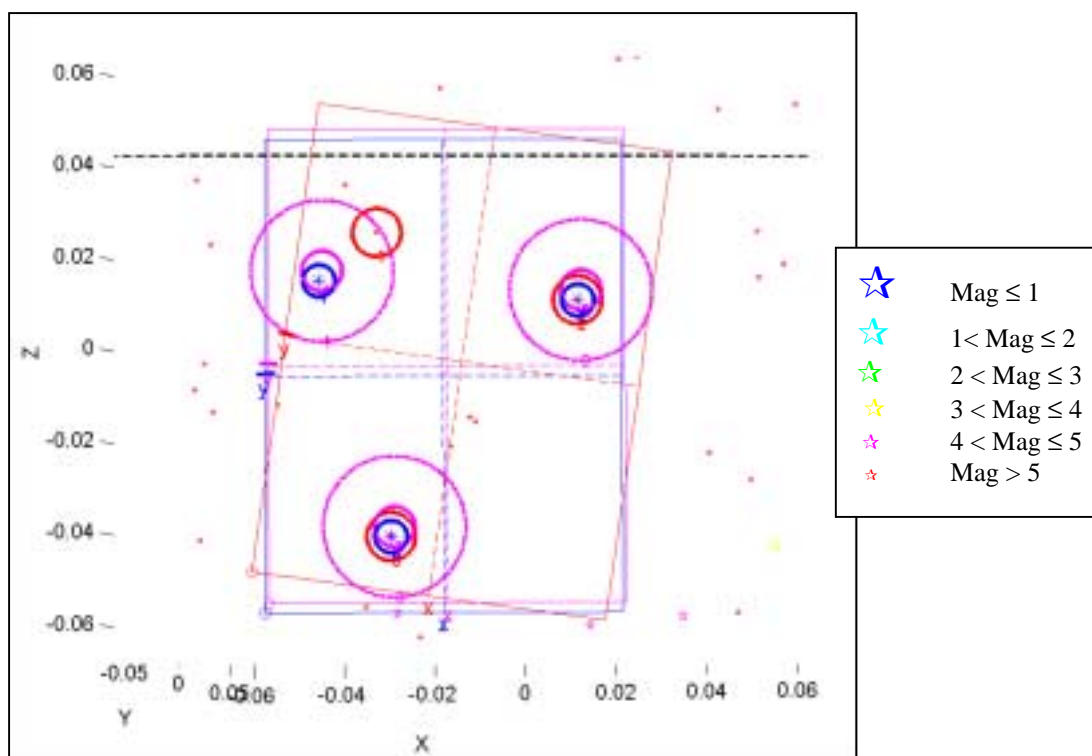


Fig. 3.9 - Representação gráfica do método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza.

### 3.6.2.2 COM RESOLUÇÃO DE IDENTIFICAÇÕES AMBÍGUAS

Para este caso, utiliza-se a mesma sequência de ações do caso anterior diferindo apenas na associação das estrelas observadas com as catalogadas. De forma distinta da anterior, este algoritmo, além de considerar as identificações unívocas e desconsiderar as observadas que não tenham associação alguma, aplica um critério às que obtiveram mais de uma associação com as estrelas catalogadas (identificação ambígua).

O critério adotado é o de considerar apenas a catalogada que esteja o mais próximo da observada em questão, eliminando a associação com todas as outras cuja separação angular seja maior.

A sequência do algoritmo é a seguinte (Ver Fig. 3.10) (As seqüências que diferem do algoritmo anterior apresentam-se em azul tracejado):

- Com a pré-estimativa de atitude obtém-se o apontamento do sensor;
- Com a saída de observação do sensor e a pré-estimativa de atitude obtém-se os versores das estrelas observadas no referencial inercial;
- Obtém-se as estrelas do catálogo de trabalho numa região de  $3 \times \text{FOV}$  em torno do apontamento do sensor;
- Com a densidade de estrelas do catálogo de trabalho, aplica-se a função de otimização e obtém-se o raio ótimo de busca;

- Com as estrelas do catálogo de trabalho pertencentes à região definida obtém-se os seus versores no referencial inercial;
- A identificação ocorre quando o versor de estrela observada tem produto escalar maior que o coseno definido pelo raio ótimo de busca com apenas um versor de estrela catalogada (Em termos práticos isso significa que a identificação acontece quando uma única estrela catalogada está dentro do círculo definido pelo raio ótimo em torno da estrela observada). Estrelas observadas com nenhuma catalogada associada não são consideradas. Para o caso de mais de uma associação, apenas considera-se a catalogada cuja separação angular com a observada seja a menor dentre todas as associações.

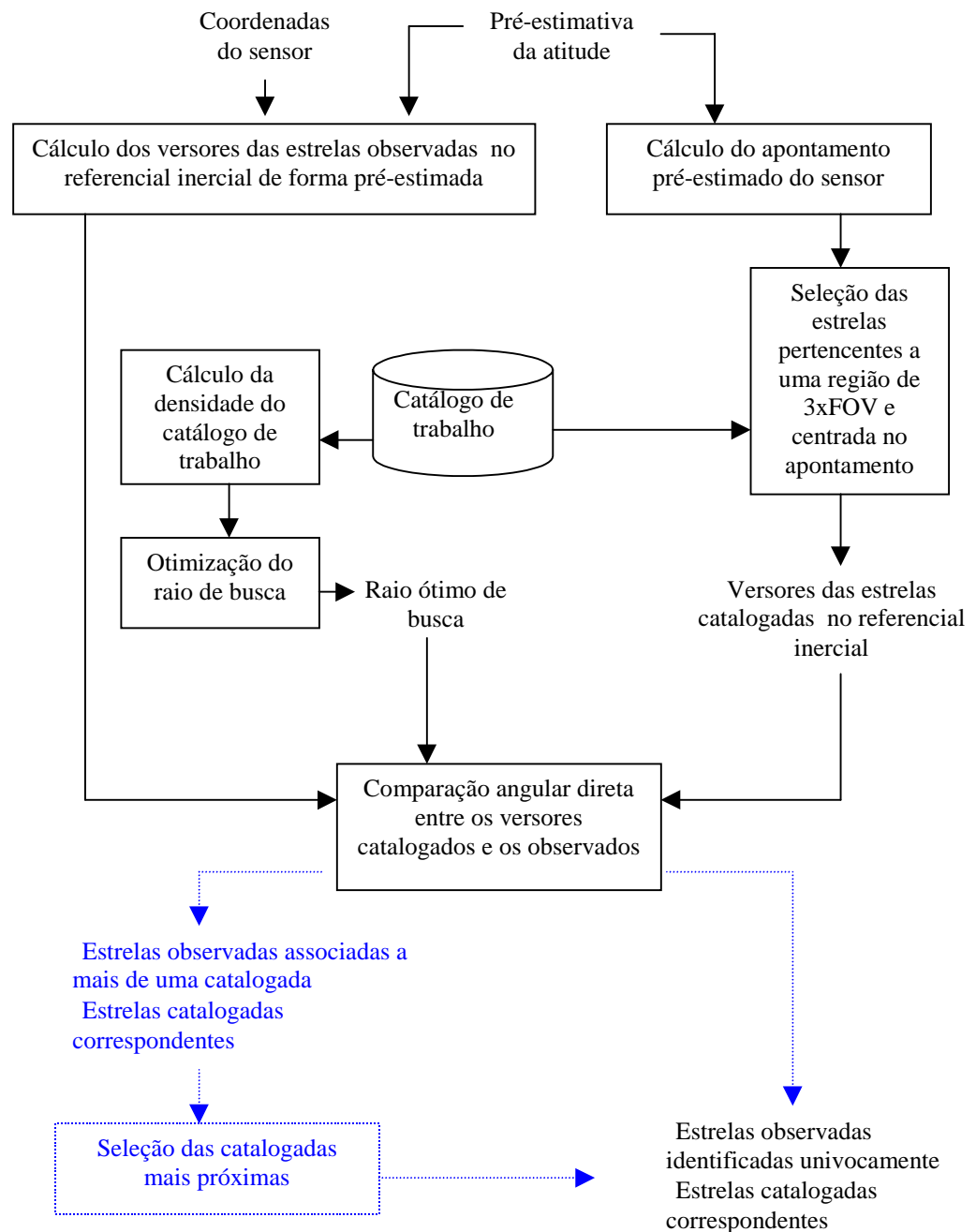


Fig. 3.10 - Sequência do método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza com resolução de ambiguidades.

### 3.7 MÉTODO DA JUSTAPOSIÇÃO DA SEPARAÇÃO ANGULAR

#### 3.7.1 TÉCNICA DE VARREDURA OTIMIZADA

Sempre que na implementação de uma dada técnica de identificação de estrelas surge a necessidade de fazer uma varredura do catálogo de trabalho, esta pode ser feita de várias formas, algumas bastante simples e diretas, outras mais elaboradas e otimizadas. Um exemplo de varredura simples é a varredura pela sequência de catalogação das estrelas, no entanto tomando um tempo excessivo em algumas aplicações.

Algumas técnicas de varredura tem então sido propostas (Mortari,1996) (Ketchum, 1995), sendo aqui descrita a técnica que baseou-se na descrição teórica apresentada por Ketchum (1995) de forma a otimizar a varredura necessária a algumas técnicas de identificação de estrelas na localização da região mais adequada à identificação.

Esta técnica, apesar de não se tratar de uma técnica de identificação propriamente dita, foi avaliada em especial neste trabalho como uma técnica auxiliar à identificação. Trata-se de uma técnica de otimização na varredura prévia da esfera celeste na seleção da melhor região de busca auxiliando qualquer técnica de identificação que necessite de uma região prévia de busca, visando-se otimizar o tempo de identificação.

A idéia é decompor o domínio de incerteza original em diversos sub-domínios reduzidos de fácil varredura. Estes sub-domínios passam a ser examinados por ordem decrescente da probabilidade de que contenham as estrelas observadas. Cada um desses sub-domínios são representados por subcatálogos obtidos a partir da divisão da esfera celeste com a utilização de um icosaedro (poliedro de 20 faces triangulares eqüilaterais).

Para cada uma das faces do icosaedro divide-se as arestas formando diversos triângulos menores (Ver Fig. 3.11).

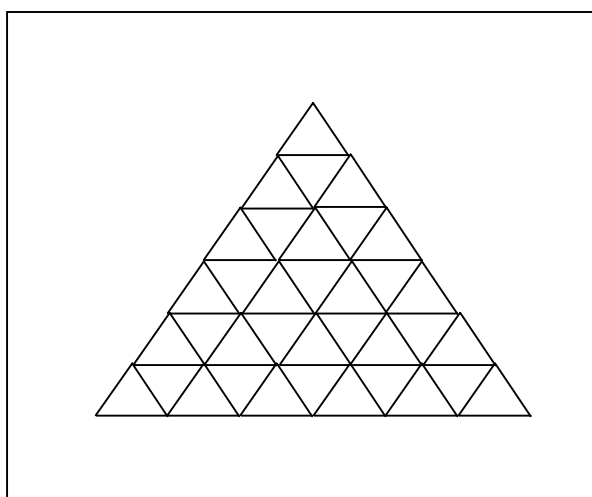


Fig. 3.11 - Face do icosaedro dividida em triângulos menores cujos vértices são centros de subcatálogos.

Cada um desses triângulos tem seus vértices adotados como centros de círculos que repartem a esfera celeste em pequenas regiões, quando projetados na mesma, denominadas subcatálogos.

No entanto, para garantir que qualquer ponto da esfera celeste esteja a uma distância angular menor que o raio do FOV  $r$  do centro de algum subcatálogo, o número de divisões das arestas deve se adequar ao tamanho (raio ou metade da diagonal) do FOV considerado. Dessa forma, para um determinado tamanho de FOV, deve-se utilizar um número determinado de divisões que resultem em triângulos, sendo que para cada número de triângulos, resulta num número de subcatálogos. A tabela a seguir (Ver Tabela 3.2) mostra uma relação entre o tamanho do FOV, o número de divisões necessário e o número de subcatálogos resultante para o caso de FOV circular (Ketchum, 1995). Caso o sensor possua FOV retangular, pode-se desconsiderar as estrelas fora do círculo inscrito ao FOV ou adotar o círculo que tangencia as extremidades da sua diagonal. Neste trabalho optou-se pela segunda maneira de implementação.

**TABELA 3.2 - RELAÇÃO DOS TAMANHOS DE FOV COM O NÚMERO DE DIVISÕES A SER UTILIZADO E NÚMERO DE SUBCATÁLOGOS RESULTANTES**

| <b>Raio mínimo do FOV (°)</b> | <b>n° de divisões da aresta</b> | <b>n° de subcatálogos</b> |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 19.427                        | 2                               | 42                        |
| 12.457                        | 3                               | 92                        |
| 10.572                        | 4                               | 162                       |
| 8.558                         | 5                               | 252                       |
| 6.968                         | 6                               | 362                       |
| 6.180                         | 7                               | 492                       |
| 5.422                         | 8                               | 642                       |
| 4.762                         | 9                               | 812                       |
| 4.351                         | 10                              | 1002                      |
| 3.960                         | 11                              | 1212                      |
| 3.604                         | 12                              | 1442                      |
| 3.355                         | 13                              | 1692                      |
| 3.117                         | 14                              | 1962                      |
| 2.895                         | 15                              | 2252                      |
| 2.729                         | 16                              | 2562                      |

Cada subcatálogo possui como atributo o valor da magnitude de sua estrela primária. Uma estrela primária é definida como sendo a estrela catalogada mais brilhante dentro de 1x raio de FOV a partir do centro do subcatálogo.

No entanto, para relacionar todas as estrelas do catálogo de trabalho que pertencem ao subcatálogo, utiliza-se o raio de subcatálogo que é definido como 3x raio do FOV, dessa forma garantindo que qualquer que seja a atitude do sensor, sempre que uma estrela

primária for observada, o FOV estará inteiramente contido no seu respectivo subcatálogo (Ver Fig. 3.12).

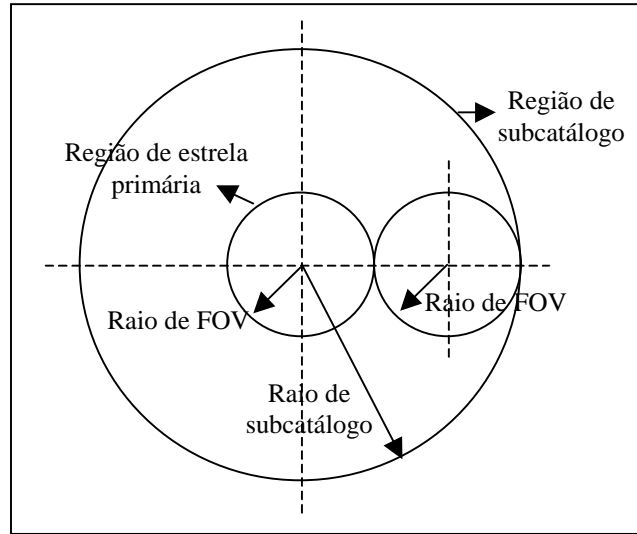


Fig. 3.12 - Representação da definição de regiões de subcatálogos e de estrelas primárias.

Dependendo da atitude do sensor, é possível que nenhuma estrela primária seja observada. Dessa forma necessita-se de estrelas secundárias, cuja definição exige que ela não deve ser classificada como primária e deve conter pelo menos um ponto com coordenadas  $(x,y)$  em seu domínio que obedeça às seguintes equações:

$$x^2 + y^2 < r^2 \quad (3.29)$$

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 > r^2 \quad (3.30)$$

Onde  $(x_i, y_i)$  são as coordenadas das estrelas vizinhas que sejam mais brilhantes que a própria secundária e que podem estar no máximo à  $2r$  de distância da mesma.

Assim, a solução  $(x, y)$  deve estar necessariamente dentro do círculo definido por  $r$  e fora dos círculos definidos pelas vizinhas (Ver Fig. 3.13). É importante notar que uma estrela secundária pode pertencer a mais de um subcatálogo simultaneamente.

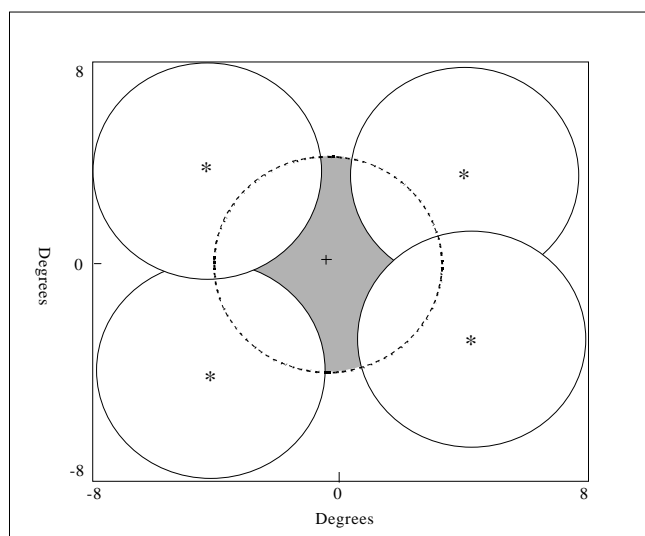


Fig. 3.13 - Definição de uma estrela secundária.

Fonte: Ketchum (1998, pg 23)

O peso das estrelas secundárias deve ser proporcional à área hachurada da figura anterior (Ver Fig. 3.13), que define a probabilidade delas serem as mais brilhantes observadas. Neste trabalho, adotou-se uma forma alternativa de discretização da área hachurada relacionada à estrela secundária através de um quadriculado de pontos.

Assim, os pontos que definem a estrela secundária foram obtidos dividindo-se o diâmetro do FOV em 11, de forma que resultasse num quadriculado com mais de 80 pontos no interior de 1x raio de FOV (Ketchum, 1998) com centro na estrela candidata a estrela secundária. Neste caso obteve-se 88 pontos.

O peso das estrelas secundárias foram então calculados dividindo-se o número de pontos que atendiam as condições anteriores pelo número total de pontos (88).

A figura a seguir apresenta a distribuição de pesos das estrelas secundárias para as duas configurações de implementação detalhadas a seguir (Ver Fig. 3.14).



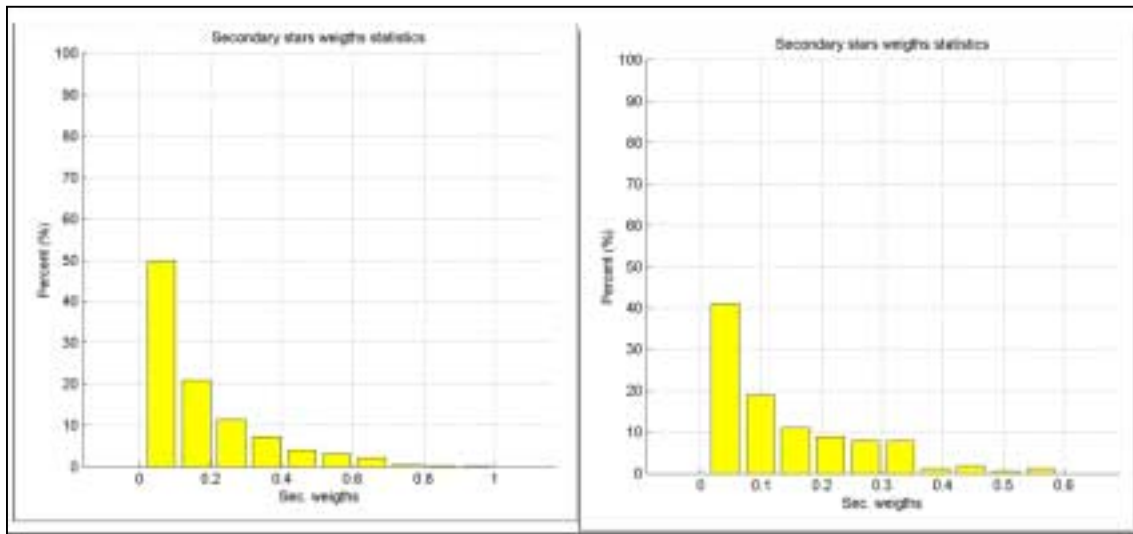


Fig. 3.14 - Distribuição dos pesos das estrelas secundárias em duas condições de implementação (Esquerda – FOV  $8^{\circ} \times 8^{\circ}$  e mag. Máx. 4, Direita - FOV  $20^{\circ} \times 20^{\circ}$  e mag. Máx. 5,5).

Com base nestas definições assegura-se que, qualquer que seja a atitude da espaçonave, a estrela mais brilhante observada pelo sensor de estrelas seja sempre uma estrela secundária. Além disso o FOV do sensor estará sempre inteiramente contido no subcatálogo associado a esta estrela, se ela for primária, ou que a contenha, se ela for secundária. Deste modo apenas um pequeno subconjunto dos subcatálogos precisa ser vasculhado: aqueles com estrelas primárias ou secundárias (no caso de falha na busca inicial com as primárias) na mesma faixa de magnitude da estrela mais brilhante observada. Na verdade, mesmo dentre estes, apenas uma pequena fração terá que ser efetivamente vasculhada até que a identificação ocorra, graças ao uso da magnitude e dos pesos (apenas secundárias) na ordenação da seqüência de subcatálogos.

A base de dados necessária a este caso é construída previamente e armazenada para sua utilização nas identificações .

A construção da base de dados ocorre da seguinte forma:

- Escolhe-se a menor dimensão do FOV a ser considerado na divisão da esfera celeste em subcatálogos (largura ou altura);
- Com esta dimensão obtém-se o número de divisões a serem feitas nas arestas das faces do icosaedro, assim como o raio do subcatálogo;
- Para cada subcatálogo determina-se a magnitude de sua estrela primária (a mais brilhante num círculo de raio  $r$  ao redor de seu centro), suas estrelas secundárias e os índices do catálogo de trabalho das estrelas contidas num círculo de raio  $3r$  ao redor de seu centro.

A base de dados construída é constituída por um conjunto de subcatálogos contendo:

- Coordenadas de ascensão reta e declinação dos centros de subcatálogo, magnitude da estrela primária associada (visual) e índice do subcatálogo;
- Índice da estrela do catálogo de trabalho correspondente à estrela primária relacionada a cada subcatálogo teoricamente. Pode ocorrer de não haver nenhuma estrela primária relacionada. Na prática porém isto seria indício de uma falha de projeto, pois implica na existência de pontos cegos na esfera celeste, onde o sensor não poderia observar nenhuma estrela;
- Estrelas do catálogo de trabalho que pertencem à região definida pelo subcatálogo. Pode ocorrer de não haver estrelas na região do subcatálogo (subcatálogo vazio). Aqui também vale o comentário anterior a respeito do projeto;
- Definições de estrelas secundárias relacionadas a cada subcatálogo contendo a magnitude da estrela secundária (visual), peso da estrela secundária, índices do catálogo de trabalho relacionados às estrelas secundárias. Pode ocorrer de não haver nenhuma estrela secundária relacionada ao subcatálogo.

Com as 2 configurações de implementação definidas, a base de dados contém:

- 162 subcatálogos com suas respectivas 162 estrelas primárias e 201 estrelas secundárias, para um sensor de estrelas com um FOV de  $8^\circ \times 8^\circ$  e um catálogo de trabalho com 2873 estrelas variando de -1.47 a 5.5 de magnitude visual.
- 1212 subcatálogos com suas respectivas 1212 estrelas primárias e 1018 estrelas secundárias, para um sensor de estrelas com um FOV de  $20^\circ \times 20^\circ$  e um catálogo de trabalho com 518 estrelas variando de -1.47 a 4 de magnitude visual.

A seguir encontra-se a representação esquemática da base de dados na esfera celeste para o caso do FOV de  $20^\circ \times 20^\circ$  e um catálogo de trabalho com magnitude visual limite 4 onde apresentam-se (Ver Fig. 3.15 e 3.16):

- pontos azuis representando centros de subcatálogo;
- pontos vermelhos representando as estrelas primárias;
- pontos pretos representando as estrelas secundárias;
- círculos magenta representando as regiões dos subcatálogo.

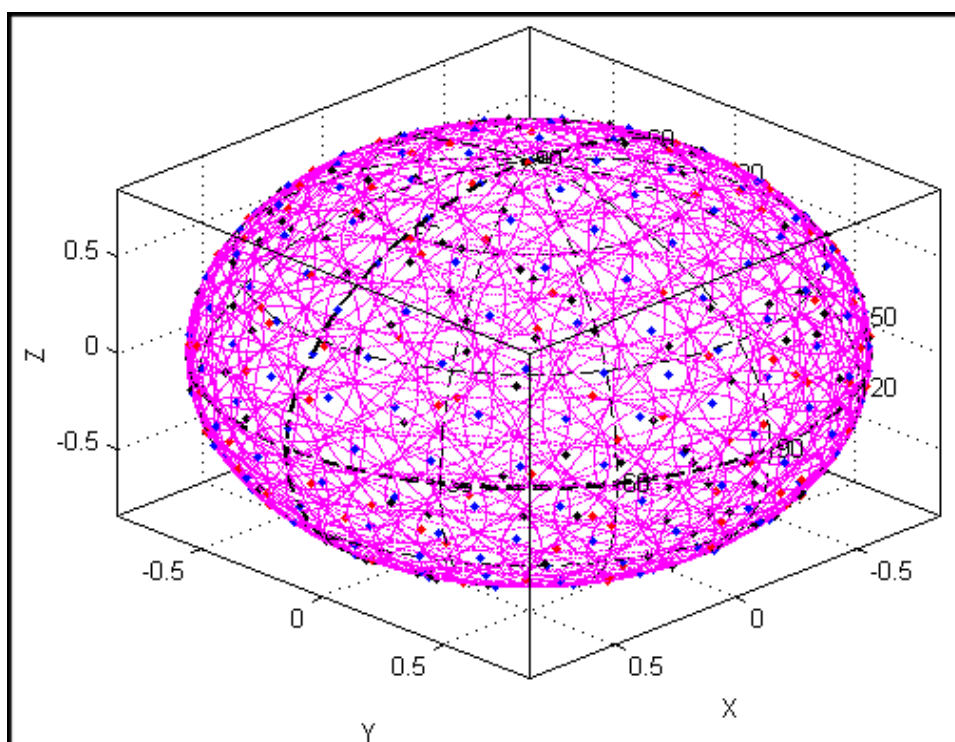


Fig. 3.15 - Representação gráfica 3D dos subcatálogos resultantes da divisão do icosaedro inscrito à esfera celeste.

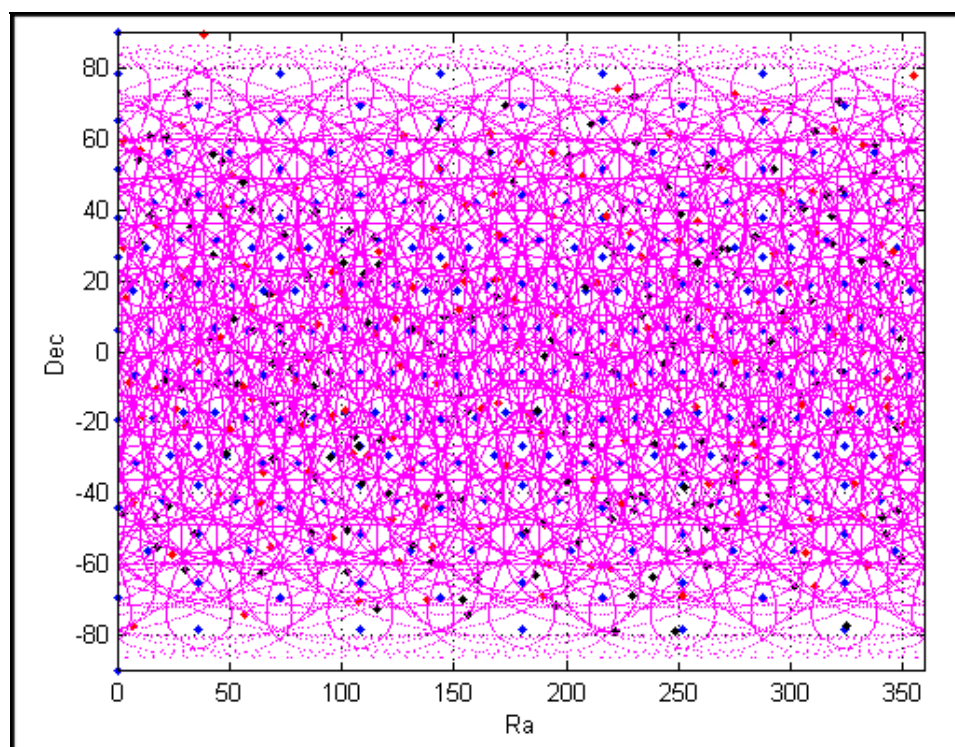


Fig. 3.16 - Representação gráfica 2D dos subcatálogos resultantes da divisão do icosaedro inscrito à esfera celeste.

Assim, com esta base de dados é possível utilizar qualquer uma das duas técnicas a serem testadas, conseguindo-se uma redução do domínio de incerteza das regiões a serem verificadas apenas com base na magnitude da estrela mais brilhante observada pelo sensor.

A sequência do algoritmo é a seguinte (Ver Fig. 3.17):

- 1) Com a saída de observação do sensor obtém-se a estrela observada mais brilhante;
- 2) Se é a primeira vez utiliza-se informações de estrela primária:
  - tomam-se todos os subcatálogos cuja estrela primária tenha magnitude semelhante à estrela observada mais brilhante dentro de uma tolerância;
  - ordenam-se os subcatálogos em ordem crescente de diferença de magnitude da estrela primária com relação à da estrela observada mais brilhante;
- 3) Se é a segunda vez utiliza-se informações de estrela secundária:
  - seleciona-se as estrelas secundárias com magnitude semelhante à mais brilhante observada dentro de uma tolerância;
  - seleciona-se os centros de subcatálogos relacionados às estrelas secundárias;
  - seleciona-se subcatálogos ainda não verificados;
  - ordena-se em ordem decrescente dos pesos das secundárias;
- 4) Para cada centro de subcatálogo selecionado:
  - relaciona-se as estrelas do catálogo de trabalho com os índices que compõem o subcatálogo;
  - utiliza-se um algoritmo de identificação com o grupo de estrelas obtido.

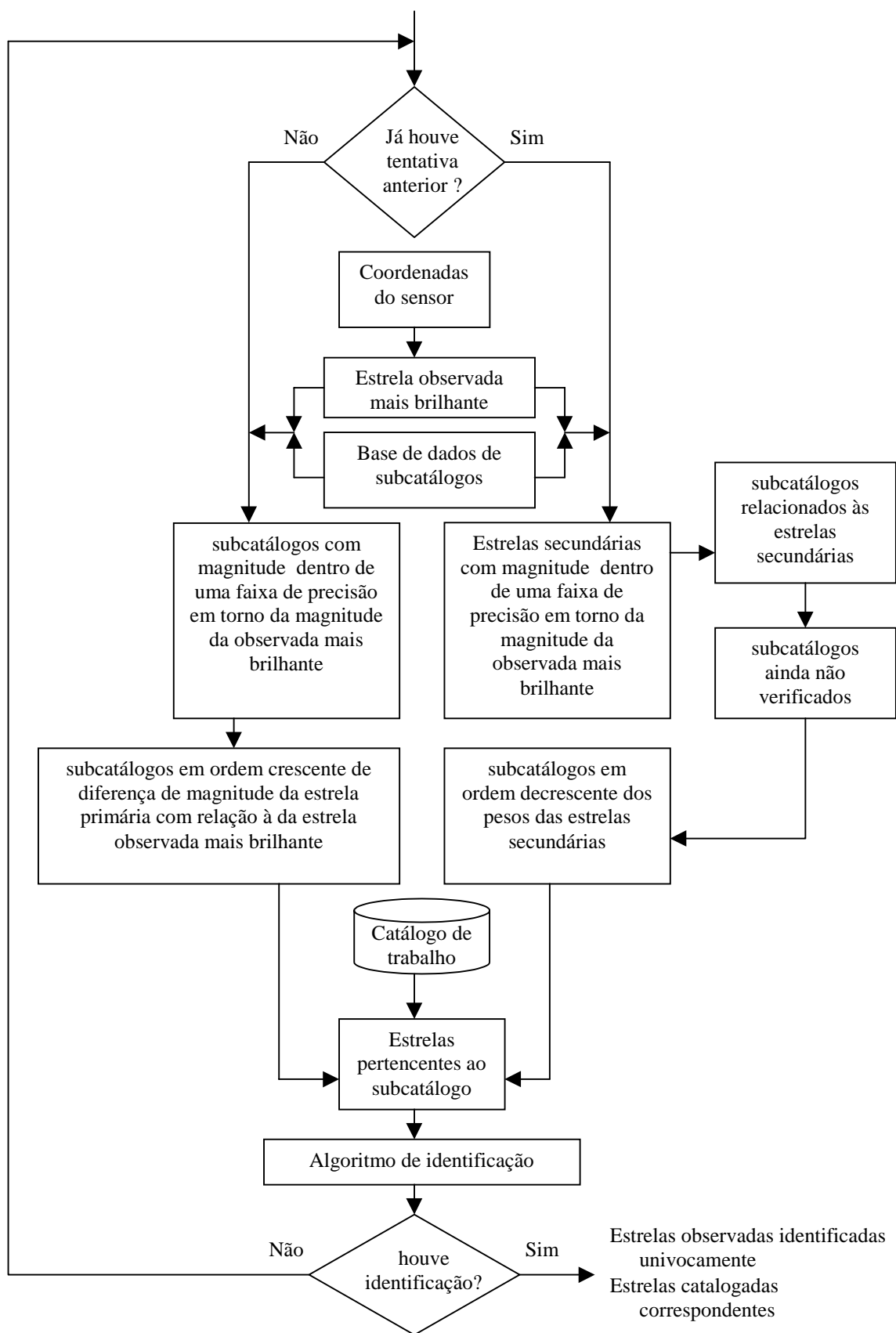


Fig. 3.17 - Sequência do algoritmo da técnica da varredura otimizada.

### 3.7.2 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS

A implementação desta técnica baseou-se na descrição teórica apresentada por Baldini et al. (1993).

Como existem muitas variações desta técnica, considerou-se para a implementação a variação baseada em identificação de triplas, já consagrada pelo uso como parte de outras técnicas mais complexas.

Para esta implementação, considera-se as identificações unívocas e desconsidera-se todas as observadas que não tenham associação alguma. Para o caso de mais de uma associação (identificação ambígua), apenas considera-se o par de estrelas catalogado cuja separação angular tenha a menor diferença com a separação angular do par observado dentre todas as associações.

Esta técnica baseia-se na comparação de separações angulares das estrelas observadas com relação à mais brilhante, ordenando-as em ordem decrescente de brilho, definindo pares com a mais brilhante. São calculadas as separações angulares entre as observadas e depois as separações do catálogo. As duas separações são comparadas até que se consiga um ajuste razoável, passando então para a comparação do próximo par. Ao final das verificações, verifica-se a separação angular entre os pares compostos pelas estrelas vizinhas à mais brilhante.

Basicamente esta técnica visa identificar uma tripla. Uma tripla é identificada quando dado 2 conjuntos de estrelas (a mais brilhante e suas vizinhas observadas e uma das mais brilhantes e suas vizinhas do catálogo):

- a separação angular entre a mais brilhante e pelo menos 2 vizinhas observadas coincide, dentro de uma tolerância, com a separação angular entre a mais brilhante e pelo menos 2 vizinhas dadas do catálogo em questão;
- a magnitude da mais brilhante observada coincide, dentro de uma tolerância, com a magnitude da mais brilhante dada do catálogo em questão;
- a separação angular entre pelo menos 2 destas vizinhas observadas e aprovadas no 1.o teste coincide, dentro de uma tolerância, com a separação angular de pelo menos 2 daquelas respectivas vizinhas dadas do catálogo em questão;
- os dois conjuntos de estrelas não estão em condições de espelho.

Além disso, a título de exemplo, considerou-se também a implementação com utilização de pré-estimativa e com varredura otimizada. Para ambas as variações, o algoritmo básico é o mesmo, apenas diferindo a fonte inicial de informações providas da região de incerteza.

A sequência do algoritmo é a seguinte (Ver Fig. 3.18):

- 1) Define-se o domínio de incerteza:
  - Se for com pré-estimativa:
    - ⇒ com a pré-estimativa de atitude obtém-se o apontamento do sensor;

- ⇒ A região de incerteza é considerada como a região interna a um raio de 3x raio do FOV em torno do apontamento dado pela estimativa a-priori;
- Se for com varredura otimizada:
  - ⇒ A região de incerteza é considerada como a região selecionada pela técnica de varredura otimizada;
- 2) Obtém-se as estrelas do catálogo de trabalho que pertencem ao domínio de incerteza;
- 3) Com a saída de observação do sensor obtém-se a estrela observada mais brilhante;
- 4) Selecionam-se como candidatas todas as catalogadas do domínio de incerteza cuja magnitude esteja dentro de uma tolerância em torno da magnitude da observada mais brilhante;
- 5) Com a observada mais brilhante constrói-se um conjunto de pares de estrelas constando a separação angular entre esta e todas as demais estrelas observadas;
- 6) Para cada estrela catalogada candidata:
  - Constrói-se um conjunto de pares de estrelas catalogadas constando a separação angular entre ela e todas as demais estrelas do domínio de incerteza;
  - Obtém-se para cada par observado, a relação de pares catalogados cuja diferença entre suas separações angulares esteja dentro de uma faixa de tolerância;
  - Para cada par observado, seleciona-se o par catalogado cuja diferença absoluta com a sua separação angular seja a menor dentre todas as associações encontradas;
  - Se houveram associações estabelecidas entre os pares observados e os catalogados referentes à estrela mais brilhante, então:
    - ⇒ Para cada estrela que forma um par selecionado com a mais brilhante, aplica-se o mesmo algoritmo para a seleção de seus próprios pares utilizando-se para isso de todo o conjunto de estrelas observadas exceto a observada mais brilhante e todo o conjunto de estrelas catalogadas exceto a catalogada mais brilhante em questão;
    - ⇒ Se houveram associações estabelecidas entre os pares de vizinhas observados e os de vizinhas catalogados, então:
      - Para cada estrela que forma um par selecionado de vizinhas, verifica-se se ela também forma um par selecionado com a mais brilhante, formando assim uma tripla de estrelas identificadas. Apenas as associações inalteradas são mantidas;
      - Verifica-se se o conjunto de estrelas observadas e catalogadas estão em condições de espelho. Se for detectada a condição, então não haverá identificação.

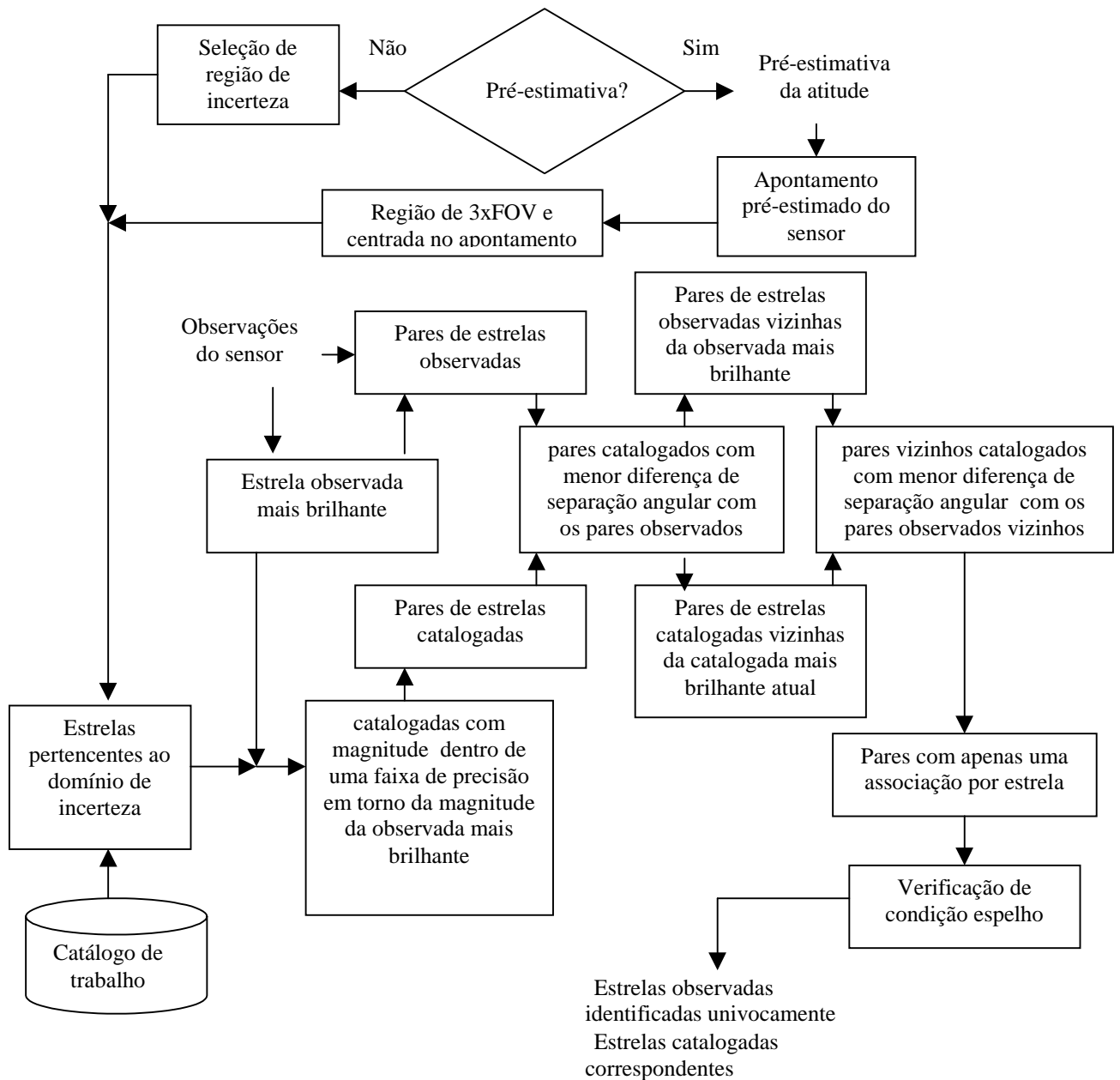


Fig. 3.18 - Sequência do algoritmo da técnica de identificação por confirmações sucessivas.

### 3.7.2.1 UTILIZAÇÃO COM PRÉ-ESTIMATIVA

Neste caso a região de incerteza é fornecida pela região selecionada a partir da pré-estimativa.



A seguir encontra-se a representação esquemática onde apresentam-se (Ver Fig. 3.19):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis);
- posição pré-determinada do FOV do sensor estelar (em magenta);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV pré-estimado (círculos magenta);
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho);
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos);
- indicador de pares de estrelas identificados (segmentos vermelhos);
- indicador de pares de estrelas observados identificados (segmentos magenta);

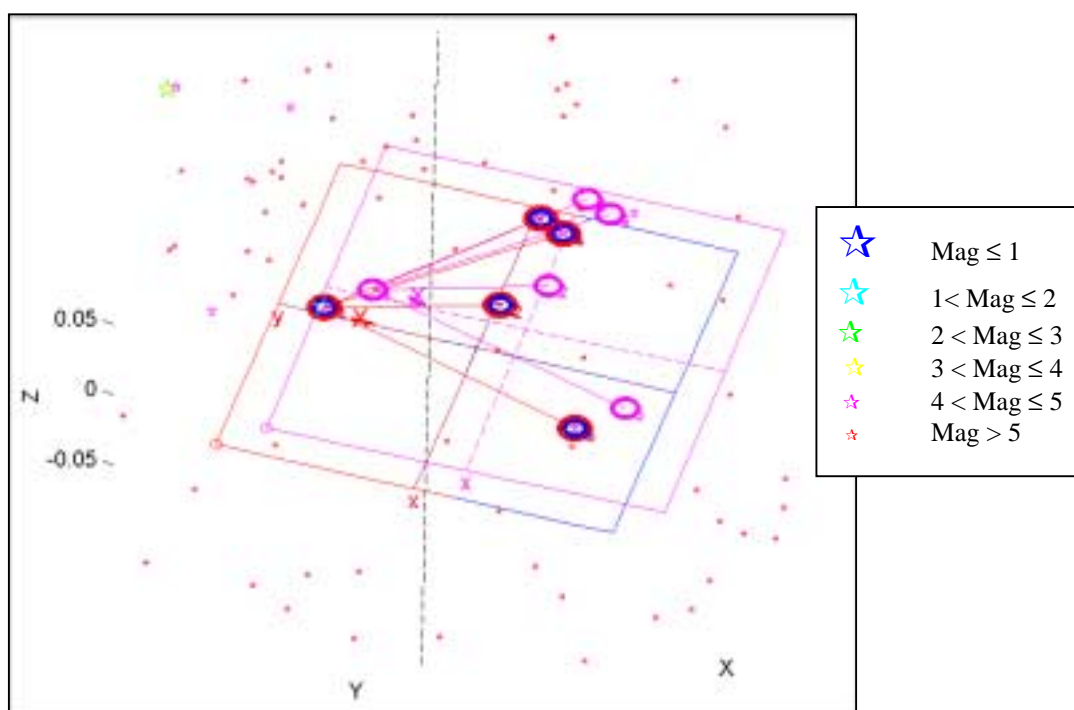


Fig. 3.19 - Representação gráfica da técnica de identificação por confirmações sucessivas.

### 3.7.2.2 UTILIZAÇÃO COM A TÉCNICA DE VARREDURA OTIMIZADA

Neste caso a região de incerteza é fornecida pelas regiões delimitadas pelos subcatálogos provindos da varredura otimizada.

A seguir encontra-se a representação esquemática onde apresentam-se (Ver Fig. 3.20):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis);
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho);
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos);
- indicador de pares de estrelas identificados (segmentos vermelhos);

- indicador de pares de estrelas observados identificados (segmentos azuis)';
- indicador de estrela primária (letra P em preto);
- indicador de estrela secundária (letra S em preto);
- indicador de estrelas pertencentes ao subcatálogo (círculos pretos);

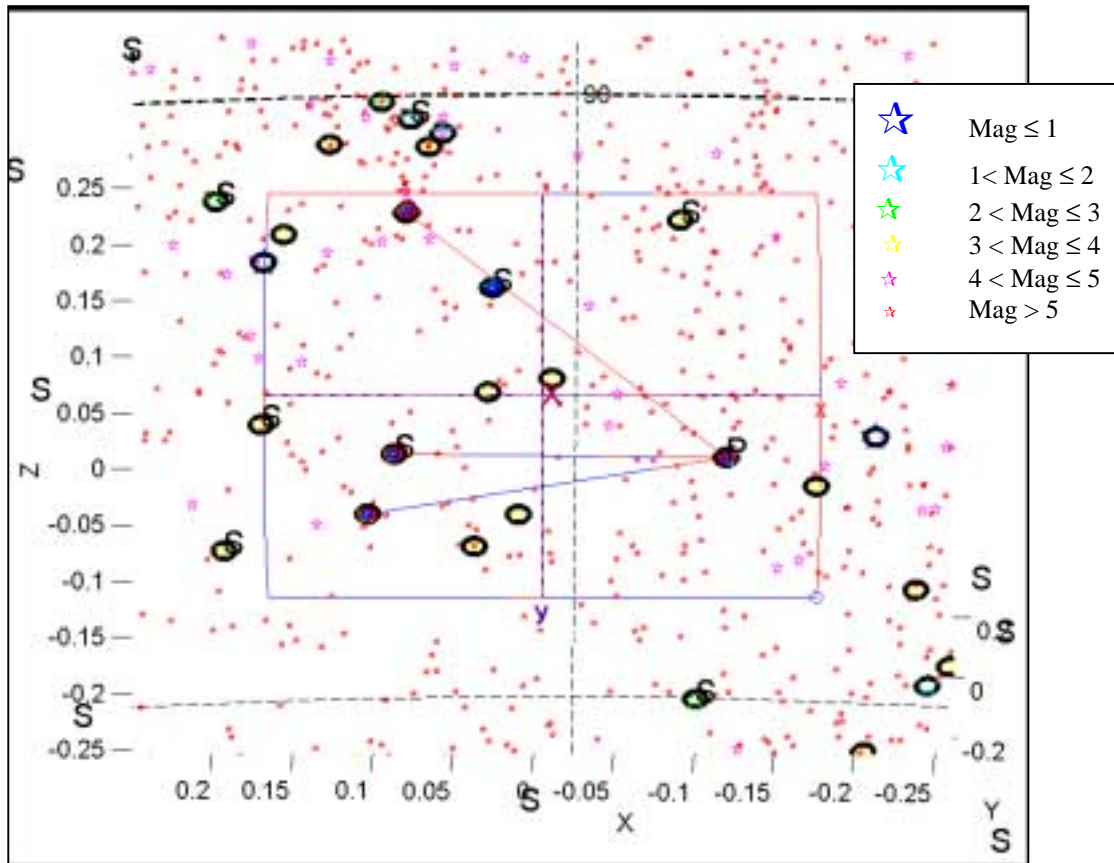


Fig. 3.20 - Representação gráfica da técnica de varredura otimizada conjugada com a técnica de identificação por confirmações sucessivas.

### 3.7.3 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DE ÍNDICE DE DESEMPENHO

#### 3.7.3.1 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA ACOPLADA

A implementação deste caso foi adaptada e baseada na técnica de Bezooijen (1989) e foi detalhadamente estudada pelo autor (Lopes; Carvalho, 1996b).

A título de exemplo, foram consideradas a implementação com utilização de pré-estimativa e com varredura otimizada. Para ambas as variações, o algoritmo básico é o mesmo, apenas diferindo a fonte inicial de informações provindas da região de incerteza.

O algoritmo implementado neste caso trata a identificação das estrelas através de uma comparação da separação angular entre pares de estrelas observadas e catalogadas a partir de uma matriz  $N^{o \times c}$ , onde  $o$  são as linhas que representam as estrelas observadas e  $c$  as colunas que representam as estrelas catalogadas. Os elementos desta matriz são uma espécie de nota da associação entre cada estrela observada e cada estrela catalogada (Ver Fig. 3.21).

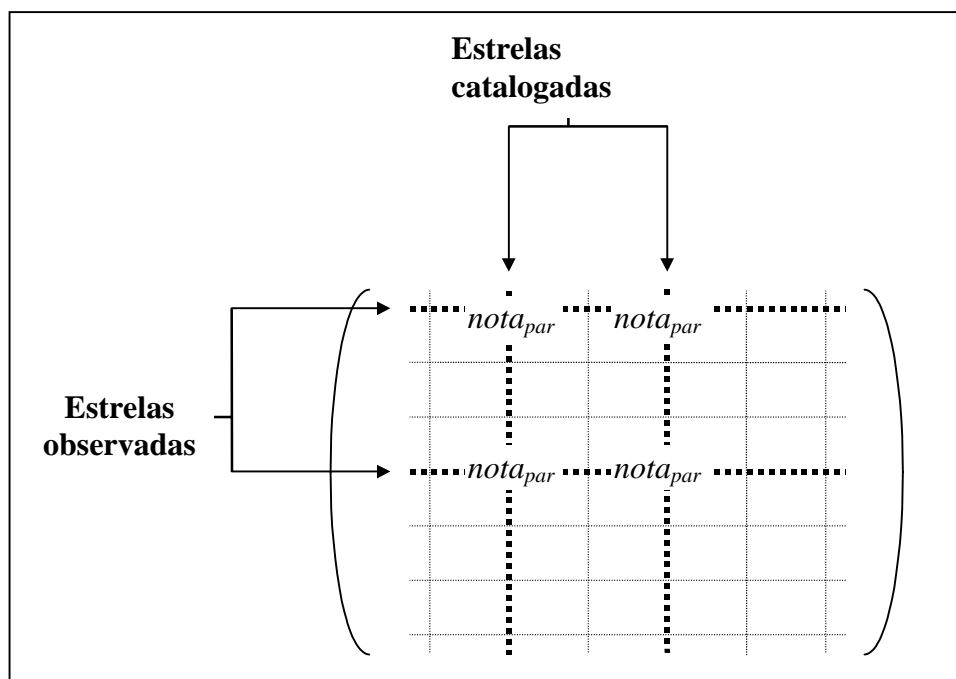


Fig. 3.21 - Representação gráfica da atribuição de notas na verificação de pares na matriz de Bezooijen.

A atribuição de notas ocorre conforme ocorra uma equivalência entre os pares catalogados e observados. Os pares observados equivalem aos pares catalogados quando:

- a separação angular dos pares observados é equivalente à separação dos pares catalogados dentro de uma faixa de tolerância no posicionamento de pares;
- a magnitude de cada estrela dos pares observados equivale à magnitude da estrela equivalente no par catalogado dentro de uma faixa de tolerância de magnitude (sendo este critério opcional).

Havendo equivalência entre um par de estrelas observadas ( $O_i, O_j$ ) e um par de estrelas catalogadas ( $C_I, C_J$ ), os elementos  $N_{i,I}$  e  $N_{j,J}$  da matriz de notas são acrescidos de uma unidade. Após todos os pares de estrelas observadas terem sido comparados com todos os pares de estrelas catalogadas associa-se a cada estrela observada a catalogada de maior nota.

No entanto, estatisticamente é possível que uma associação errônea receba a maior nota para uma dada estrela observada com a atribuição de notas original. Assim, este problema, quando atinge níveis relevantes, pode ser substancialmente reduzido pelo cálculo recursivo proposto para a matriz de notas (Lopes; Carvalho; Silva, 1998), conforme descrito a seguir.

O cálculo da matriz de notas na forma básica (não recursiva) é:

$$\begin{Bmatrix} N_{i,I} \\ N_{j,J} \end{Bmatrix} \leftarrow \begin{Bmatrix} N_{i,I} \\ N_{j,J} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \cdot D \quad (3.31)$$

Onde D representa uma função discriminante:

$$D = \begin{cases} 1, & \text{Se o par } (O_i, O_j) \text{ for equivalente ao par } (C_I, C_J) \\ 0, & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad (3.32)$$

Nota-se que o fator a ser acrescentado é sempre unitário e o valor inicial de cada elemento da matriz de notas é nulo.

Quando o cálculo da matriz de notas for recursivo, o valor inicial de todos os elementos da matriz de notas é unitário. A grande maioria deles porém, decai rapidamente a zero pela ação do processo iterativo.

Isto acontece porque o fator a ser acrescentado só será relevante se ambas as estrelas que compõem um par catalogado equivalente a um par observado tiveram boas notas para a mesma associação na iteração anterior. Assim a chance de uma pontuação elevada por ação do mero acaso requer uma dupla coincidência.

A iteração  $k$  do cálculo recursivo das notas pode ser representada por:

$$\begin{Bmatrix} N_{i,I}^k \\ N_{j,J}^k \end{Bmatrix} \leftarrow \begin{Bmatrix} N_{i,I}^k \\ N_{j,J}^k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \cdot \frac{D \cdot N_{i,I}^{k-1} \cdot N_{j,J}^{k-1}}{\sum_I \sum_{J \neq I} N_{i,I}^{k-1} \cdot N_{j,J}^{k-1}} \quad (3.33)$$

Neste trabalho, a título de exemplo, foram adotadas 10 iterações para o cálculo recursivo.

Ao final de cada iteração, cada linha é normalizada com a soma de todas as suas notas. Para a operação deste algoritmo deve-se definir uma região de incerteza na qual se insira o FOV do sensor estelar. Esta região de incerteza pode ser tanto uma região previamente definida por uma pré-estimativa de atitude ou uma seleção de uma região de busca, como ainda o céu todo numa operação autônoma.

No caso de haver uma região pré-selecionada ou pré-estimada, os pares das estrelas catalogadas devem ser obtidos no momento da tentativa de identificação. Porém, numa operação autônoma faz-se necessário o uso de uma base de dados previamente armazenada (o catálogo de pares de estrelas) uma vez que, devido à grande quantidade de dados a ser manipulada, a construção em tempo real torna-se inviável. Em contrapartida o tamanho do catálogo de pares de estrelas pode se tornar muito grande, especialmente em aplicações onde o sensor possua capacidade de observar estrelas de alta magnitude.

Assim, a base de dados necessária a este caso, para modo de operação autônomo, é construída previamente e armazenada para sua utilização nas identificações.

A construção da base de dados, tanto a armazenada para modo autônomo como a calculada em tempo real, ocorre da seguinte forma:

- Obtém-se o tamanho de FOV a ser considerado e calcula-se a maior abertura angular que o FOV comporta para um par de estrelas;
- Obtém-se os versores no referencial inercial das estrelas do catálogo de trabalho (Para tempo real apenas utiliza-se as estrelas constantes na região estipulada);
- Gera-se uma matriz de produtos escalares com os versores das estrelas;
- Determina-se quais os pares de estrelas que farão parte da base de dados, utilizando apenas aqueles cujo produto escalar indique uma separação angular menor que a abertura máxima considerada;
- Ordena-se os pares de estrelas em ordem crescente do tamanho de suas separações angulares.

A base de dados, ou catálogo de pares de estrelas, é constituída por uma matriz de pares de estrelas contendo:

- Linhas representando os pares com o índice do catálogo de trabalho de cada estrela e a separação angular entre elas (graus) (Índice estrela 1, índice estrela 2, separação angular do par).

Com as 2 configurações de implementação definidas, a base de dados armazenada para modo autônomo contém (Para tempo real depende-se do número de estrelas disponível na região estipulada):

- uma matriz de 46765 linhas, onde cada linha representa um par de estrelas, para um sensor de estrelas com um FOV de  $8^\circ \times 8^\circ$  e um catálogo de trabalho com 2873 estrelas variando de -1.47 a 5.5 de magnitude visual;
- uma matriz de 9129 linhas, onde cada linha representa um par de estrelas, para um sensor de estrelas com um FOV de  $20^\circ \times 20^\circ$  e um catálogo de trabalho com 518 estrelas variando de -1.47 a 4 de magnitude visual.

Assim, as possibilidades de utilização desse algoritmo considerando as variações introduzidas são as seguintes:

- Com pré-estimativa ou varredura otimizada:
  - Considerando-se as magnitudes:
    - ⇒ Cálculo de notas recursivo;
    - ⇒ Cálculo de notas não recursivo;
  - Não considerando-se as magnitudes:
    - ⇒ Cálculo de notas recursivo;
    - ⇒ Cálculo de notas não recursivo;
- Sem pré-estimativa da atitude (Modo autônomo):
  - Considerando-se as magnitudes:
    - ⇒ Cálculo de notas recursivo;
    - ⇒ Cálculo de notas não recursivo;
  - Não considerando-se as magnitudes:
    - ⇒ Cálculo de notas recursivo;
    - ⇒ Cálculo de notas não recursivo.

A sequência do algoritmo é a seguinte (Ver Fig. 3.22):

- 1) Se houver pré-estimativa da atitude ou seleção de uma região por varredura otimizada:
  - Se for com estimativa a-priori:
    - ⇒ com a pré-estimativa de atitude obtém-se o apontamento do sensor;
    - ⇒ A região de incerteza é considerada como a região interna a um raio de 3x raio do FOV em torno do apontamento dado pela estimativa a-priori;
    - ⇒ Obtém-se as estrelas do catálogo de trabalho que pertencem a esta região;
    - ⇒ Com estas estrelas monta-se um catálogo de pares cuja separação angular seja menor que a abertura angular da metade da diagonal (raio) do FOV;
  - Se for com seleção por varredura otimizada:
    - ⇒ A região de incerteza é considerada como a região selecionada;
    - ⇒ Obtém-se as estrelas do catálogo de trabalho que pertencem a esta região;
    - ⇒ Com estas estrelas monta-se um catálogo de pares cuja separação angular seja menor que a abertura angular da menor dimensão do FOV(largura ou altura);

- 2) Se não houver pré-estimativa ou seleção de uma região por varredura otimizada:
  - A região de incerteza é considerada como o céu todo;
  - Utiliza-se uma base de dados pré-determinada já armazenada de pares de estrelas do catálogo de trabalho;
- 3) Constrói-se um catálogo de pares observados;
- 4) Com os pares observados e os pares do catálogo de trabalho monta-se uma matriz de notas 0 (zero) com as estrelas observadas representadas em linha e as catalogadas em coluna;
- 5) Para cada par de estrelas observadas verifica-se se a separação angular dos pares observados equivale à separação angular dos pares catalogados dentro da faixa de tolerância de posicionamento de pares;
- 6) Se a opção for para verificar a magnitude:
  - Verifica-se se a magnitude de cada estrela dos pares observados equivale à magnitude da estrela equivalente no par catalogado equivalente dentro da faixa de tolerância de magnitude:
    - ⇒ Para cada observada forma-se um grupo de estrelas dedicadas que tenha magnitude equivalente dentro da faixa de tolerância da magnitude. Apenas este grupo é verificado para aquela observada;
- 7) A matriz tem seus elementos incrementados apenas quando ocorre uma equivalência entre os respectivos pares observados e os catalogados. Se houve equivalência:
  - Se a opção for por cálculo recursivo:
    - ⇒ Calcula-se os fatores com base nas notas já existentes na matriz;
  - Se a opção for por cálculo não recursivo:
    - ⇒ Considera-se os fatores com o valor 1;
  - Soma-se os fatores à nota preexistente na matriz;
- 8) Normaliza-se cada linha da matriz de notas com o valor da soma das notas da linha (se for recursivo);
- 9) Cada linha pode resultar em identificação, se for considerada após as seguintes verificações:
  - Se 2 ou mais catalogadas tiverem a mesma nota, nenhuma será considerada e não haverá identificação para a estrela observada relacionada;
  - Verifica-se se 2 observadas foram associadas à mesma catalogada. Caso isso ocorra, as duas observadas serão desconsideradas e não identificadas;
- 10) Cada estrela observada é identificada como sendo a estrela catalogada com maior nota associada;
- 11) No entanto, o conjunto só será dado por identificado se a verificação dos grupos de observadas e catalogadas associadas não resultar em condição espelho.

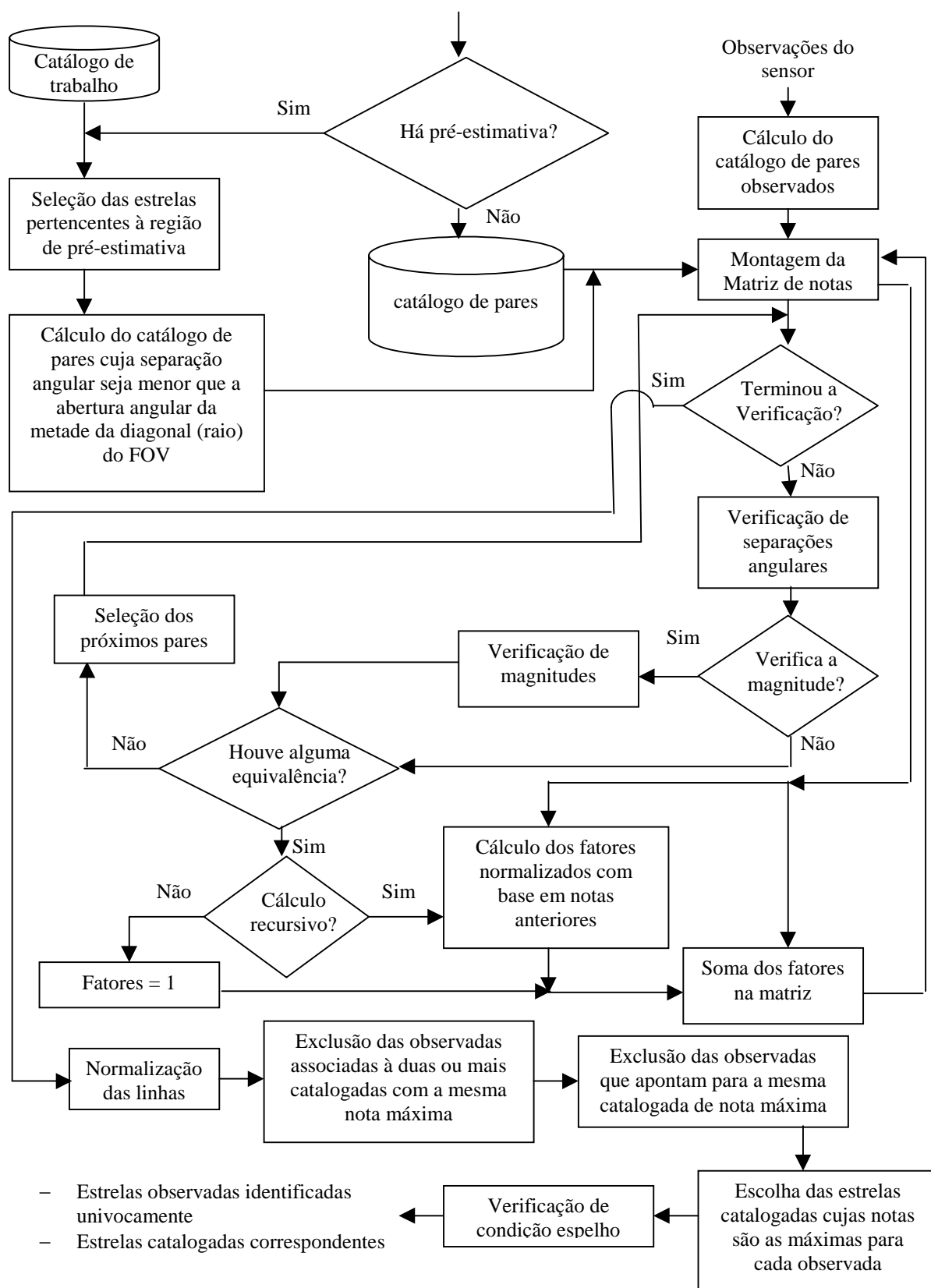


Fig. 3.22 - Sequência do algoritmo da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma acoplada.



### 3.7.3.1.1 UTILIZAÇÃO NA FORMA AUTÔNOMA (RECURSIVO COM MAGNITUDE)

Neste caso a região de incerteza é adotada como o céu (catálogo de trabalho) todo sem nenhuma região prévia de busca.

A seguir encontra-se a representação esquemática (Modo de operação autônomo não recursivo não considerando a magnitude) onde apresentam-se (Ver Fig. 3.23):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis);
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho);
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos);
- indicador de estrelas não presentes no catálogo de trabalho (asterisco azul);
- Notas de identificação de cada estrela;

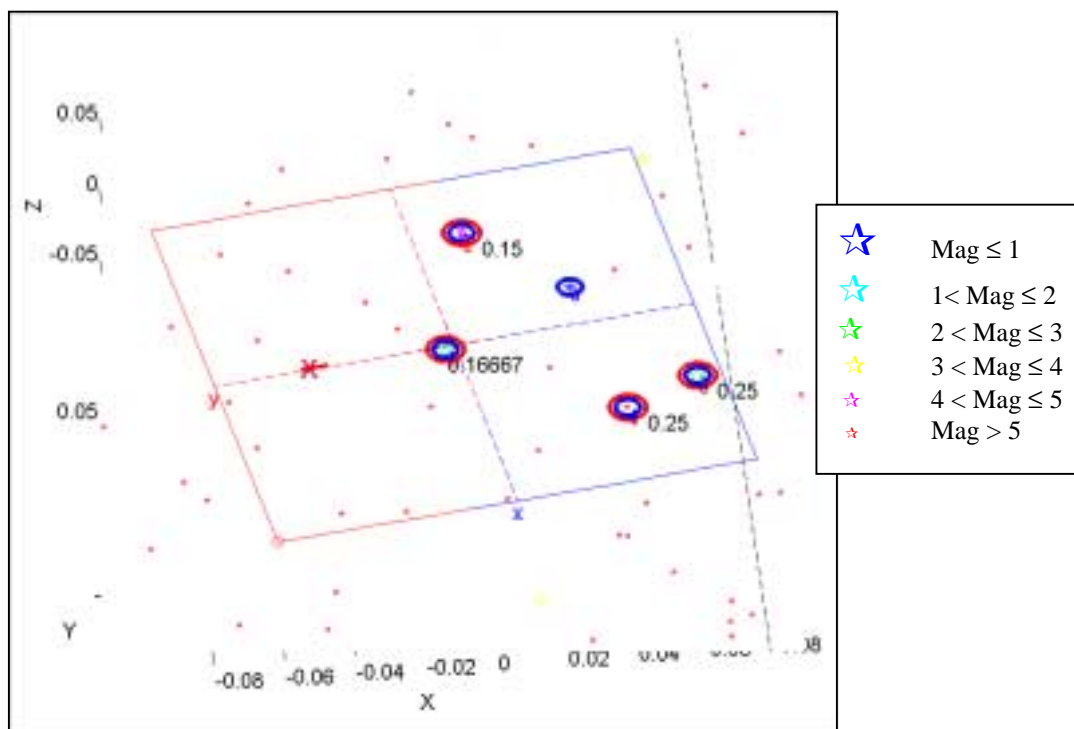


Fig. 3.23 - Representação gráfica da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma acoplada (Recursivo com magnitude).

### 3.7.3.1.2 UTILIZAÇÃO COM A TÉCNICA DE VARREDURA OTIMIZADA (NÃO RECURSIVO SEM MAGNITUDE)

Neste caso a região de incerteza é fornecida pelas regiões delimitadas pelos subcatálogos.

A seguir encontra-se a representação esquemática (Modo de operação com seleção de região de busca por varredura otimizada não recursivo não considerando a magnitude) onde apresentam-se (Ver Fig. 3.24):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis);
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho);
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos);
- Notas de identificação de cada estrela;
- indicador de estrela primária (letra P em preto);
- indicador de estrela secundária (letra S em preto);
- indicador de estrelas pertencentes ao subcatálogo (círculos pretos);

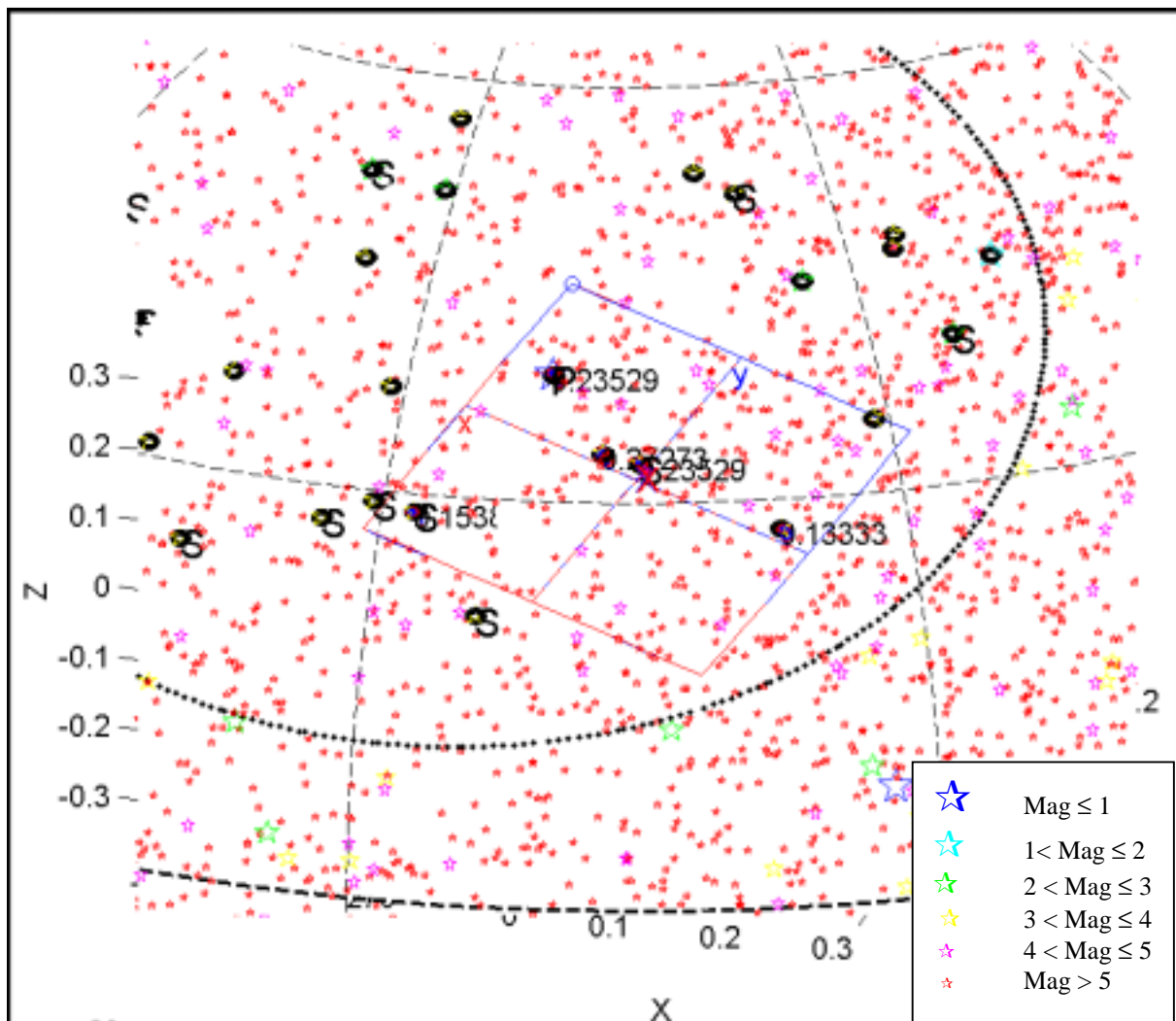


Fig. 3.24 - Representação gráfica da técnica de varredura otimizada conjugada com a técnica da avaliação do índice de desempenho na forma acoplada (Não recursivo sem magnitude).

### **3.7.3.2 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA DESACOPLADA**

A implementação deste caso foi adaptada e baseada na descrição teórica apresentada por Williams et al. (1993 ).

Esta técnica permite identificar estrelas individualmente atribuindo a cada uma delas uma representação binária do padrão formado por suas vizinhas num domínio circular de raio  $r$ .

A identificação é realizada pela minimização da “distância” entre o padrão observado e o catalogado, obtida através da aplicação de uma certa métrica.

A métrica utilizada é invariante a rotações, isto é, a “distância” obtida independe da atitude do sensor. Além disso, a métrica foi escolhida de modo a minimizar a ocorrências de identificações ambíguas. A grande vantagem desta técnica, porém, é que ela não requer catálogos de pares de estrelas.

Esta técnica visa identificar apenas estrelas chamadas guia, isto é, estrelas cuja magnitude é inferior a um limite preestabelecido. Adicionalmente, para garantir que todas as estrelas no domínio da estrela guia estejam dentro do FOV do sensor, esta deve estar contida numa região central denominada FOV interno, afastada de  $r$  de suas bordas (Ver Fig. 3.25).

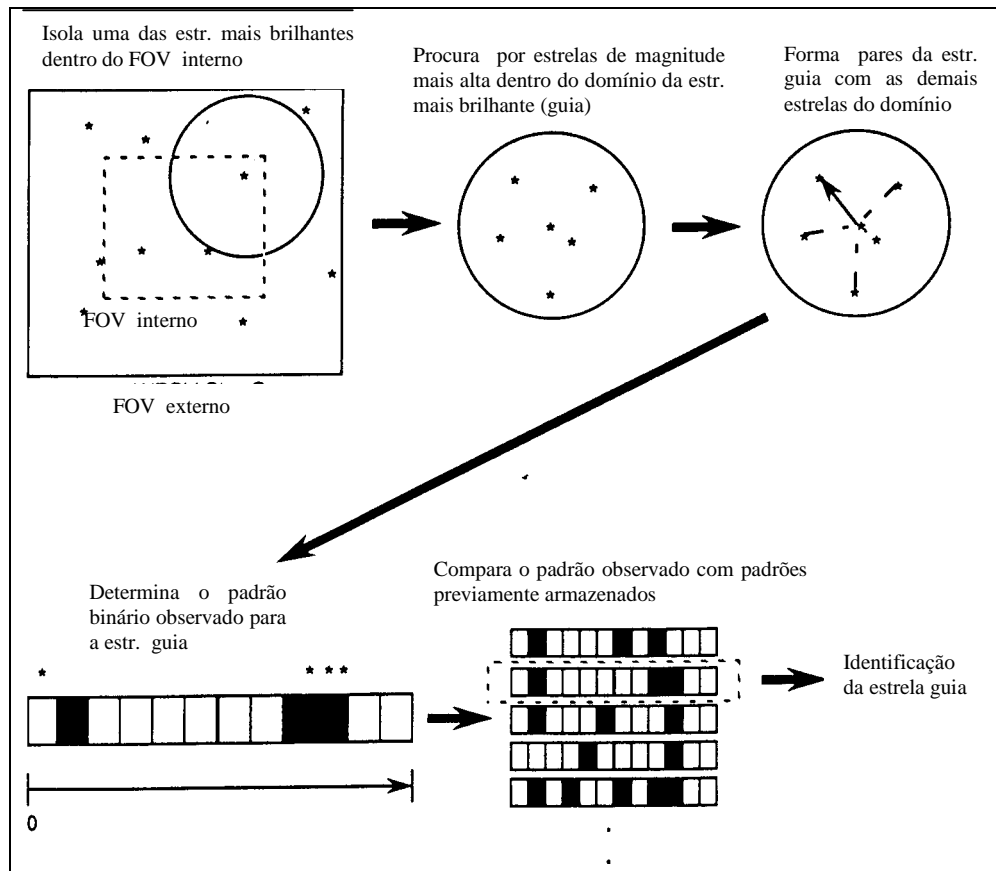


Fig. 3.25 - Conceito operacional da identificação via técnica de avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.

Fonte: adaptado de Williams et al. (1993, pg 45).

Como cada uma destas estrelas guia forma pares com as estrelas presentes no seu domínio circular, pode-se definir um padrão binário discretizando-se o raio do domínio circular e representando-o por um vetor binário discreto de número fixo de elementos denominados bins (anéis definidos no domínio). Estes elementos representam cada uma das faixas correspondentes aos anéis compreendidos entre duas distâncias angulares, a partir do centro do domínio circular da estrela guia. De acordo com Williams et al. (1993), para que a chance de identificação ambígua seja mínima, a largura dos anéis deve ser tal que suas áreas sejam todas iguais (Ver Fig. 3.26). O número de bins adotados deve se adequar à faixa de magnitudes observadas pelo sensor. Neste trabalho fixou-se este número em 32.

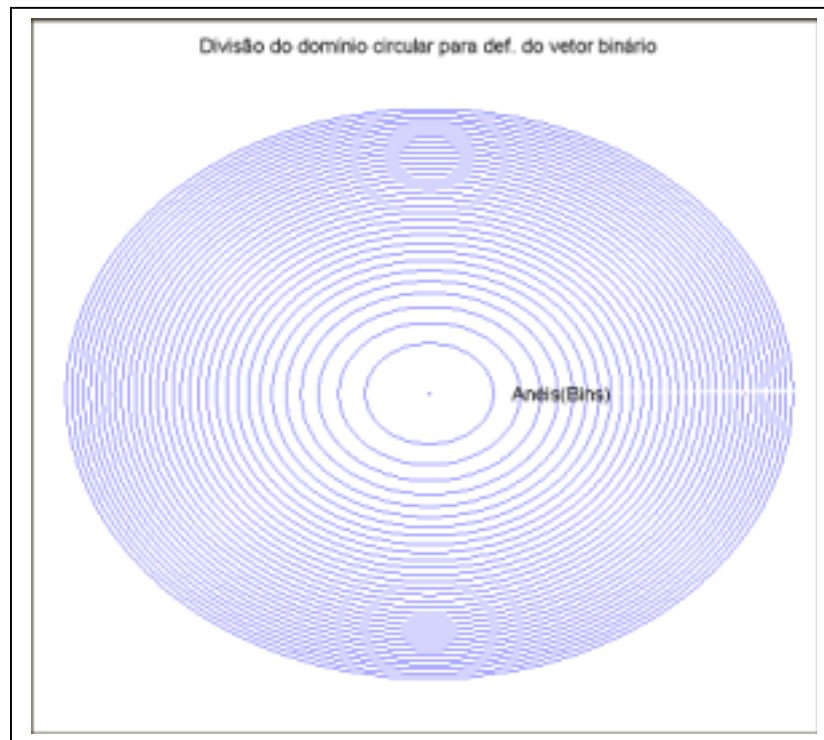


Fig. 3.26 - Exemplo de divisão do domínio circular em anéis para a definição do vetor binário (domínio =  $5^\circ$ , Número de bins = 32).

De posse desse vetor, pode-se representar o padrão associado a uma determinada estrela guia atribuindo-se a cada bin o valor 1 se existir pelo menos uma estrela vizinha contida no respectivo anel. Caso contrário o valor atribuído ao bin deve ser 0. É importante ressaltar que o vetor binário não contém a informação trivial correspondente à presença da própria estrela guia. Assim, utilizando-se de um primeiro raio não nulo para o primeiro anel, pode-se também utilizá-lo para armazenar informação útil com relação a estrelas presentes próximas à estrela guia. Desta forma adotou-se este raio com o valor angular de  $1'$ .

Com este vetor binário representa-se então o padrão das estrelas guia observadas que podem ser comparados a padrões previamente armazenados numa base de dados.

Com as 2 configurações de implementação definidas, a base de dados armazenada contém:

- um vetor de padrões binários de 32 bins representado em forma decimal com 2873 elementos, onde cada linha representa uma estrela do catálogo de trabalho, para um sensor de estrelas com um FOV externo de  $8^\circ \times 8^\circ$  e interno de  $4^\circ \times 4^\circ$  (sendo então o raio de domínio  $2^\circ$ ) e um catálogo de trabalho com 2873 estrelas variando de -1.47 a 5.5 de magnitude visual;
- um vetor de padrões binários de 32 bins representado em forma decimal com 518 elementos, onde cada linha representa uma estrela do catálogo de trabalho,

para um sensor de estrelas com um FOV externo de  $20^\circ \times 20^\circ$  e interno de  $10^\circ \times 10^\circ$  (sendo então o raio de domínio  $5^\circ$ ) e um catálogo de trabalho com 518 estrelas variando de -1.47 a 4 de magnitude visual.

A definição de equivalência entre os padrões observados e os armazenados ocorre conforme ocorra uma igualdade dos valores associados a cada um dos bins que representam os padrões. No entanto, como a comparação nem sempre resulta exata devido às imprecisões associadas às observações do sensor, faz-se necessária definir a equivalência entre os padrões armazenados e o padrão observado de duas formas:

- Forma exata – a equivalência ocorre por igualdade entre cada um dos bins dos padrões comparados;
- Forma aproximada – a equivalência ocorre com a escolha do padrão armazenado que mais possuir igualdades dos seus bins com os respectivos bins do padrão observado, havendo a ocorrência de bins correspondentes com valores diferentes.

A identificação da estrela guia com uma estrela correspondente do catálogo de trabalho ocorre quando ocorre a equivalência entre o padrão observado e o padrão armazenado, correspondente à uma estrela catalogada. É importante ressaltar que quando dois ou mais padrões armazenados são equivalentes a um padrão observado, não há como decidir qual dos padrões corresponde ao padrão correto, caracterizando dessa forma uma identificação ambígua.

A sequência do algoritmo é a seguinte (Ver Fig. 3.27):

- 1) Com a saída de observação do sensor obtém-se as estrelas observadas mais brilhantes (estrelas guia) dentro do FOV interno, abaixo da magnitude limite do sensor;
- 2) Com a saída de observação do sensor obtém-se todas as estrelas observadas dentro do FOV externo abaixo da magnitude limite do sensor;
- 3) Para cada estrela guia forma-se o padrão binário com todas as estrelas observadas dentro do seu domínio circular e converte-se em formato decimal;
- 4) Para cada estrela guia observada, verifica-se se há algum padrão previamente armazenado igual ao seu;
- 5) Verifica-se o número foi encontrado e:
  - Se houver um único (forma exata), considera-se a estrela catalogada associada ao padrão armazenado como a correspondente à estrela guia associada ao padrão observado;
  - Se não houver nenhum padrão igual, procura-se pelo padrão armazenado com menos número de bins diferentes em relação ao padrão observado (forma aproximada) e associa-se a estrela catalogada correspondente à estrela guia associada ao padrão observado;
  - Se houver mais de um único, considera-se como identificação ambígua;
- 6) As estrelas guias que tiverem correspondência unívoca (exata ou aproximada) entre os seus padrões observados e os padrões armazenados serão tidas como identificadas com as catalogadas associadas à estes padrões.

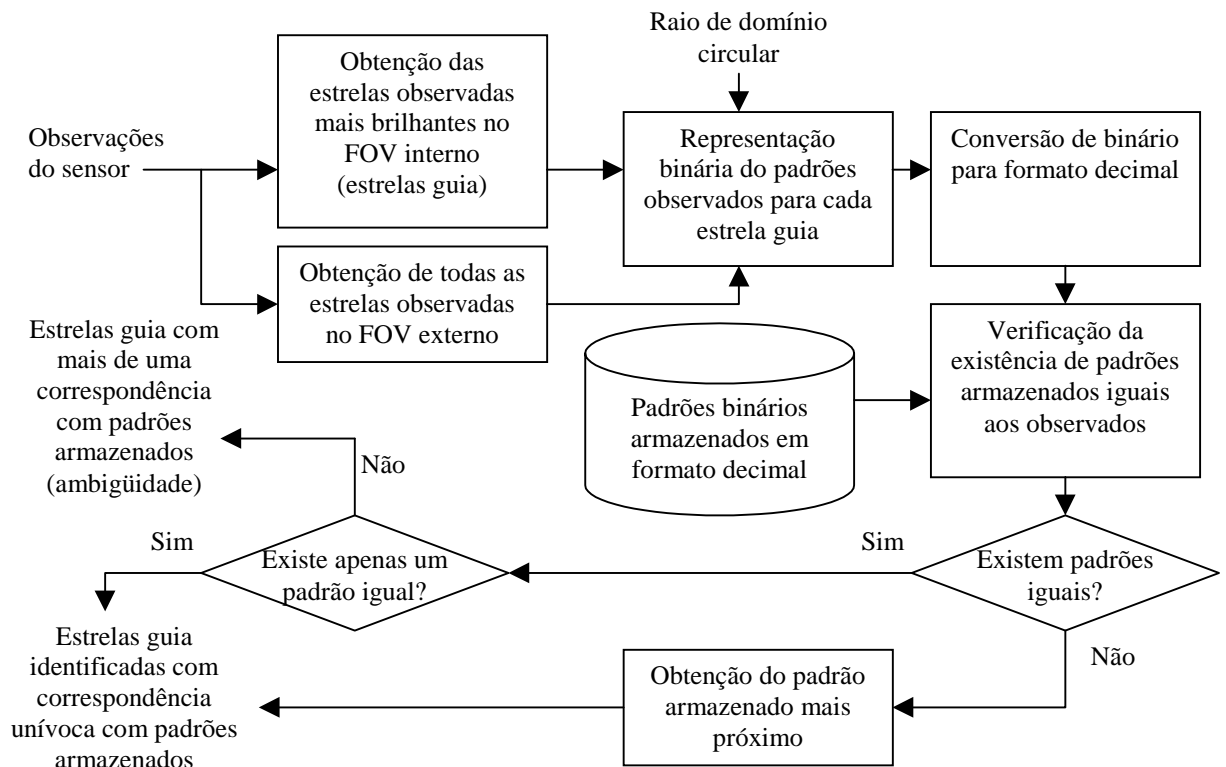


Fig. 3.27 - Sequência do algoritmo da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.

A seguir encontra-se a representação esquemática onde apresentam-se (Ver Fig. 3.28):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul);
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis);
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho);
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos);
- indicador de domínio de estrelas guia (círculos pretos maiores);
- indicador de estrelas pertencentes ao FOV externo (círculos pretos menores);
- indicador de FOV interno (quadrado preto interno ao FOV);

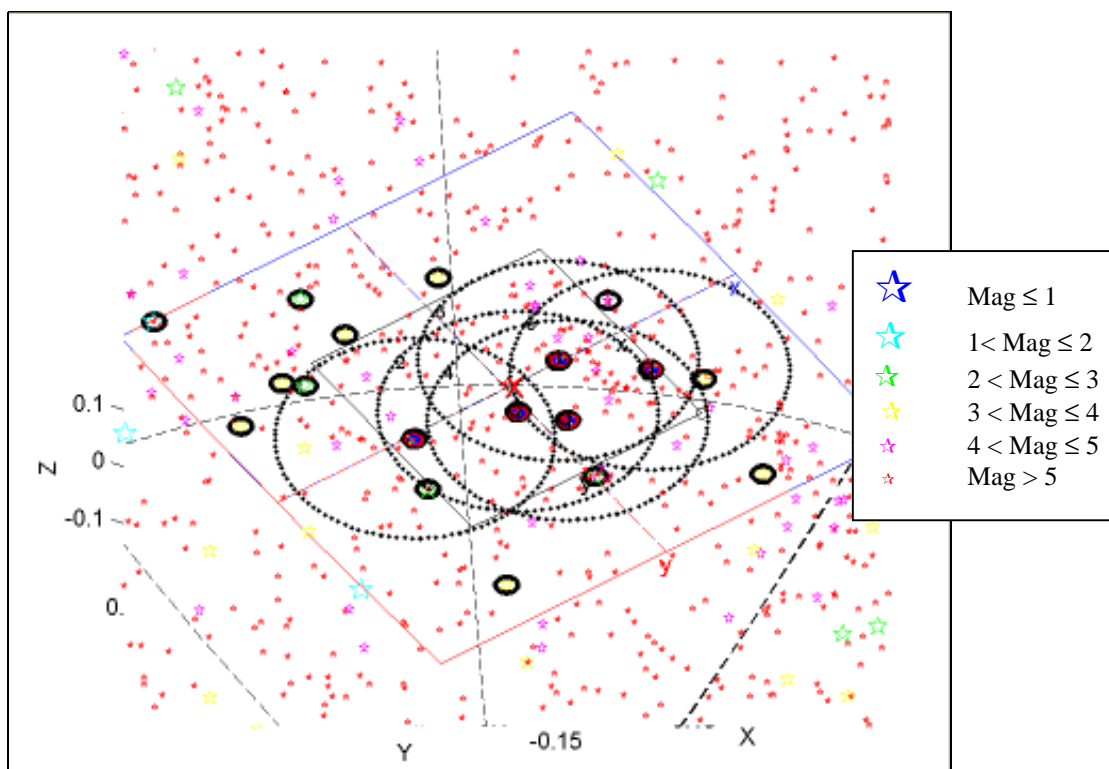


Fig. 3.28 - Representação gráfica da técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada.

### 3.8 ASPECTOS PRÁTICOS NA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS EM APLICAÇÕES REAIS

A título de exemplo de aplicação da identificação de estrelas em sistemas reais de determinação de atitude, utilizou-se dados do satélite **ROSAT** (cedidos pelo instituto alemão **DLR** – ver APÊNDICE B), com uma das técnicas implementadas. A técnica escolhida foi o método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza sem resolução de ambigüidades.

Com esses dados foi possível comprovar a similaridade de operação da técnica escolhida para os testes com dados reais e dados simulados.

No entanto, devido à diferença na adoção de sistemas de coordenadas, e à formatação do catálogo de trabalho utilizado pelo *software* **SIATS**, foi necessário o desenvolvimento de rotinas que pudessem traduzir os dados antes de proceder aos testes e transformar os resultados de volta para o formato original (Seção B.2 - IMPLEMENTAÇÃO DA INTERFACE COM DADOS ROSAT do APÊNDICE B).

Como os dados fornecidos representam uma situação de identificação já ocorrida, não há a necessidade de se simular um sensor. Assim, utilizou-se do conjunto de estrelas observadas como a região de observação a ser simulada para o processo de teste de identificação, utilizando-se das estrelas rastreadas como informação fornecida pelo



sensor (Ver Seção C.1.2. –SIMULATION - no APÊNDICE C). Além disso, a atitude pré-estimada necessária foi obtida com inclusão de erros aleatórios na própria atitude da espaçonave determinada pelo **DLR**.

Assim, com a mesma saída de sensor, é possível reconstituir a situação de identificação ocorrida na realidade, e testar a técnica que se deseja com dados reais. Com os resultados, é possível comparar as estrelas identificadas pelo teste e as estrelas identificadas originais, além da atitude determinada pelo teste através destas estrelas e a atitude original fornecida.

Assim, pode-se representar o modelo usado para os dados **ROSAT** da seguinte forma:

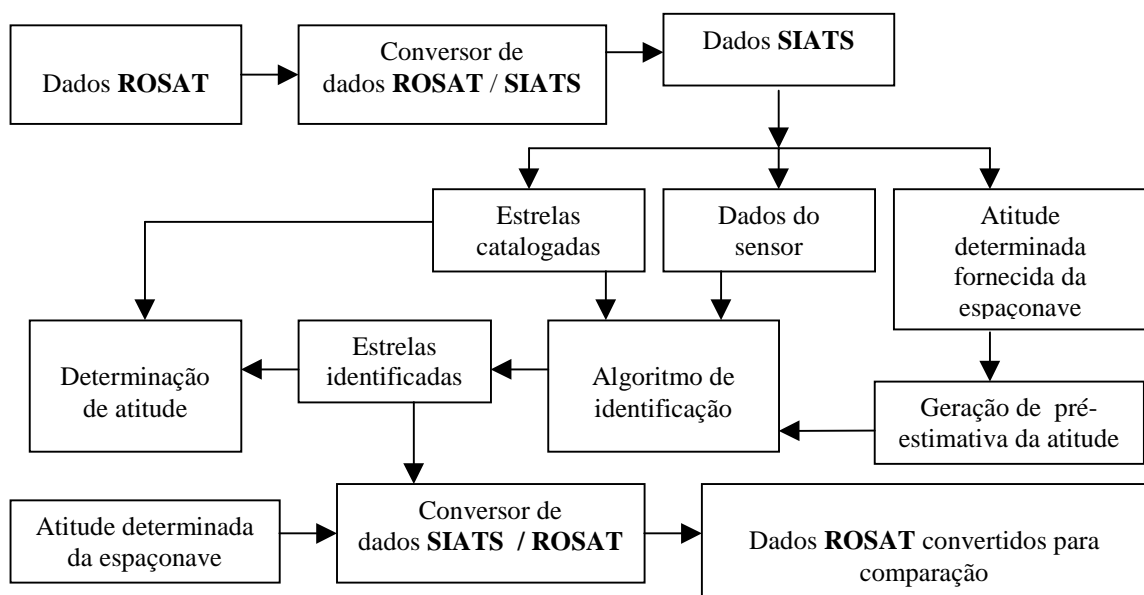


Fig. 3.29 - Modelo de interface com dados ROSAT.



## CAPÍTULO 4

### AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E TESTES

Para o desenvolvimento prático do estudo de algoritmos que implementam técnicas de identificação de estrelas realizado, faz-se necessária a elaboração de casos de teste que possam testar e fornecer resultados sobre o funcionamento dos mesmos. Com estes resultados torna-se possível a avaliação de desempenho tanto do próprio algoritmo como do sistema de sensores de estrela e pré-estimativa, quanto determinadores de atitude envolvidos e integrados em um sistema de determinação de atitude.

Como existem diversas combinações e possibilidades que influem no funcionamento deste sistema, diversos devem ser os testes necessários para averiguar cada uma das possibilidades a serem consideradas no projeto de um novo sistema.

Assim, é de grande interesse não só a elaboração dos casos de teste para cada uma das combinações, mas a possibilidade de simular e testar cada uma das configurações de parâmetros de interesse e modelos de cada uma das partes envolvidas, além de possibilitar o armazenamento dos resultados para posteriores análises com possíveis reexecuções de testes já realizados.

Dessa forma, uma ferramenta computacional contendo um ambiente de simulação e testes foi desenvolvida em ambiente *PC-Matlab* (The Math Works Inc.) para viabilizar não só o estudo prático deste trabalho como de possíveis trabalhos futuros, além de facilitar o projeto e avaliação de implementação de requisitos de sistemas de determinação de atitude baseados em sensores de estrelas. Esta ferramenta foi batizada com o nome de *Star Identification Algorithm Test Software (S.I.A.T.S)* (Ver Fig. 4.1).

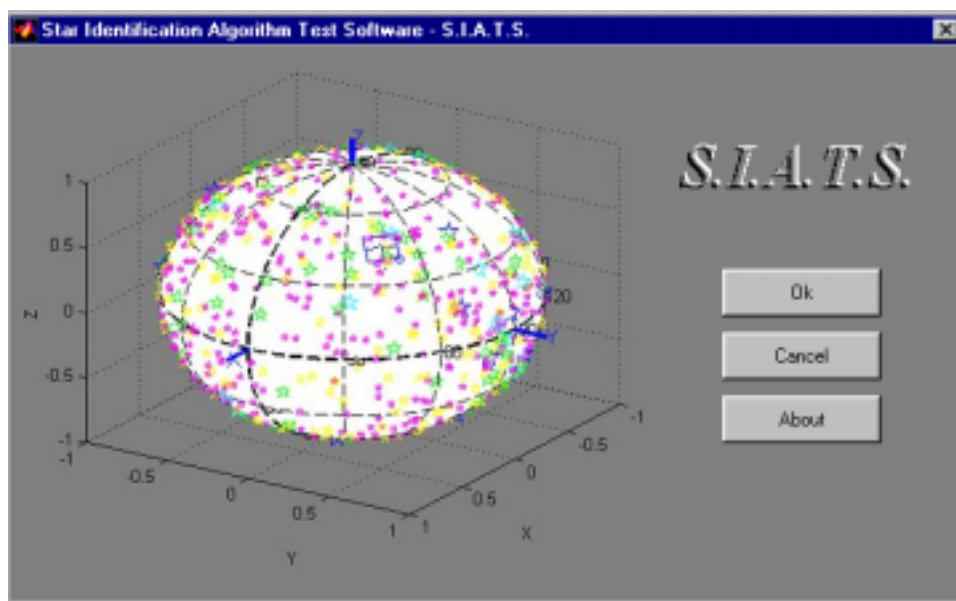


Fig. 4.1 - Ferramenta de simulação e testes desenvolvida.

A seguir apresentam-se a metodologia de desenvolvimento e gestão de configuração da ferramenta desenvolvida seguidos por uma descrição estrutural e funcional.

#### **4.1 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E GESTÃO DE CONFIGURAÇÃO**

Para o desenvolvimento tanto da ferramenta mencionada, como dos relatórios de teste e do próprio documento que constitui essa dissertação, foram adotadas práticas de gestão de configuração.

Estas práticas, muito comuns em desenvolvimentos de produtos de software, incluem uma metodologia de gestão do desenvolvimento englobando o *software* e os documentos relacionados ao mesmo. O objetivo principal é a recuperabilidade no decorrer do desenvolvimento, tendo como produto o histórico de todas as versões do *software* e de seus documentos. Com o histórico, qualquer versão anterior pode ser recuperada de uma forma auto-contida, isto é, é possível executar qualquer versão recuperada ou analisar informações sem que necessite-se recorrer a outras versões do produto.

A gestão da configuração é definida por Bersoff (Bersoff,1980) como sendo:

"(...) a disciplina de identificação de uma configuração de um sistema em pontos determinados no tempo, a fim de sistematicamente controlar mudanças nessa configuração e manter a integridade e rastreabilidade dessa configuração durante o ciclo de vida do sistema".

O processo de gestão de configuração adotado constitui-se basicamente da organização da estrutura do trabalho em áreas específicas constituídas de diretórios computacionais. Os diretórios podem basicamente ser divididos em duas categorias: desenvolvimento e histórico.

Em cada um dos diretórios de histórico constam as versões contendo toda a informação contida nos respectivos diretórios e subdiretórios de desenvolvimento referente a relatórios, dissertação e *software* em um determinado momento (entende-se por *software* aqui o conjunto constituído por código e dados) (Ver Fig. 4.2). O armazenamento de cada uma das versões é feito em arquivo datado de formato compactado. O formato escolhido para tal foi o de extensão '*zip*' gerado pelo *software* **WinZip 7.0**. (Niko Mak Computing).

Assim, a partir dos arquivos de versão datados é possível recuperar cada uma das versões em vigor em uma determinada data. Por exemplo, o arquivo com nome '*siats18052000.zip*' recupera toda a estrutura da ferramenta desenvolvida na versão do dia 18/05/2000. Da mesma forma ocorre com a dissertação e os relatórios de teste gerados.

Além destes arquivos de versão, também utilizou-se de arquivos texto, armazenados junto com cada versão, com a descrição de cada uma das pendências e dúvidas a serem solucionadas, abertas até o momento da geração da versão. Esses arquivos apenas foram

embutidos nas versões da ferramenta e da dissertação. Assim, é possível recuperar todo o histórico de questionamentos abertos no tempo do desenvolvimento.

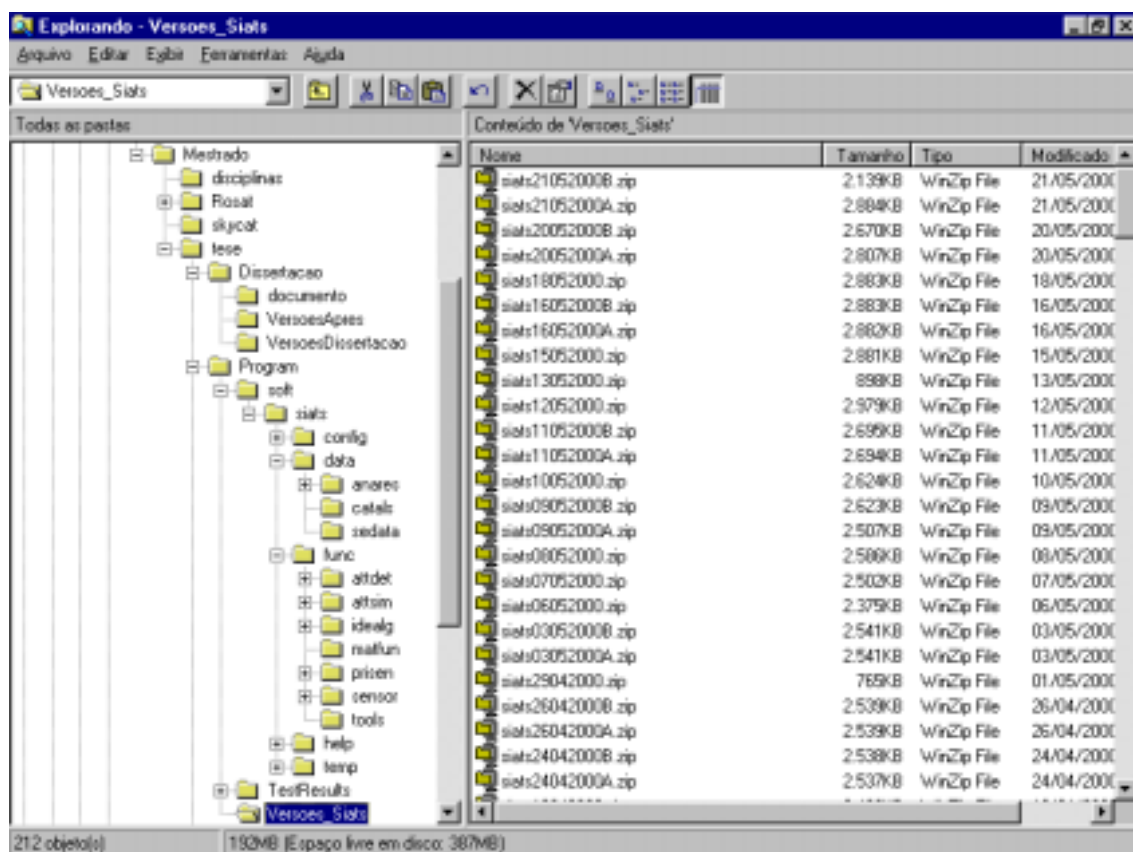


Fig. 4.2 - Estrutura computacional de desenvolvimento e gestão de configuração utilizada no trabalho.

Para o armazenamento, utilizou-se de *backups* com os quais pode-se garantir a integridade e preservação dos dados. O processo de armazenamento constituiu-se de gravações de cópias em pelo menos 2 disquetes diferentes para as últimas versões da ferramenta e da dissertação conforme foram atualizadas ao longo do tempo, sendo inclusive copiadas para um segundo computador. Assim foi possível evitar a perda de dados por danos físicos ou virtuais (tais como vírus) aos meios de armazenamento.

Com esta metodologia foi possível manter a rastreabilidade de cada uma das versões desenvolvidas durante o tempo e garantir que itens pendentes no desenvolvimento pudessem ser solucionados. Assim, pontos de dúvida e questionamento oriundos do próprio processo de desenvolvimento tiveram o devido direcionamento sem que houvesse perda de informação e detalhe durante todo o tempo do trabalho.

## 4.2 DESCRIÇÃO ESTRUTURAL E FUNCIONAL

Pode-se descrever a estrutura de *software* da ferramenta nos seguintes itens componentes (*Computer Software Components - CSCs*):

- Control Panel (CSC-1),
- *Simulation* (CSC-2),
- *Function Library* (CSC-3),
- *Tools* (CSC-4),
- *Data* (CSC-5).

Graficamente pode-se representar a estrutura de CSCs da seguinte forma (Ver Fig. 4.3):

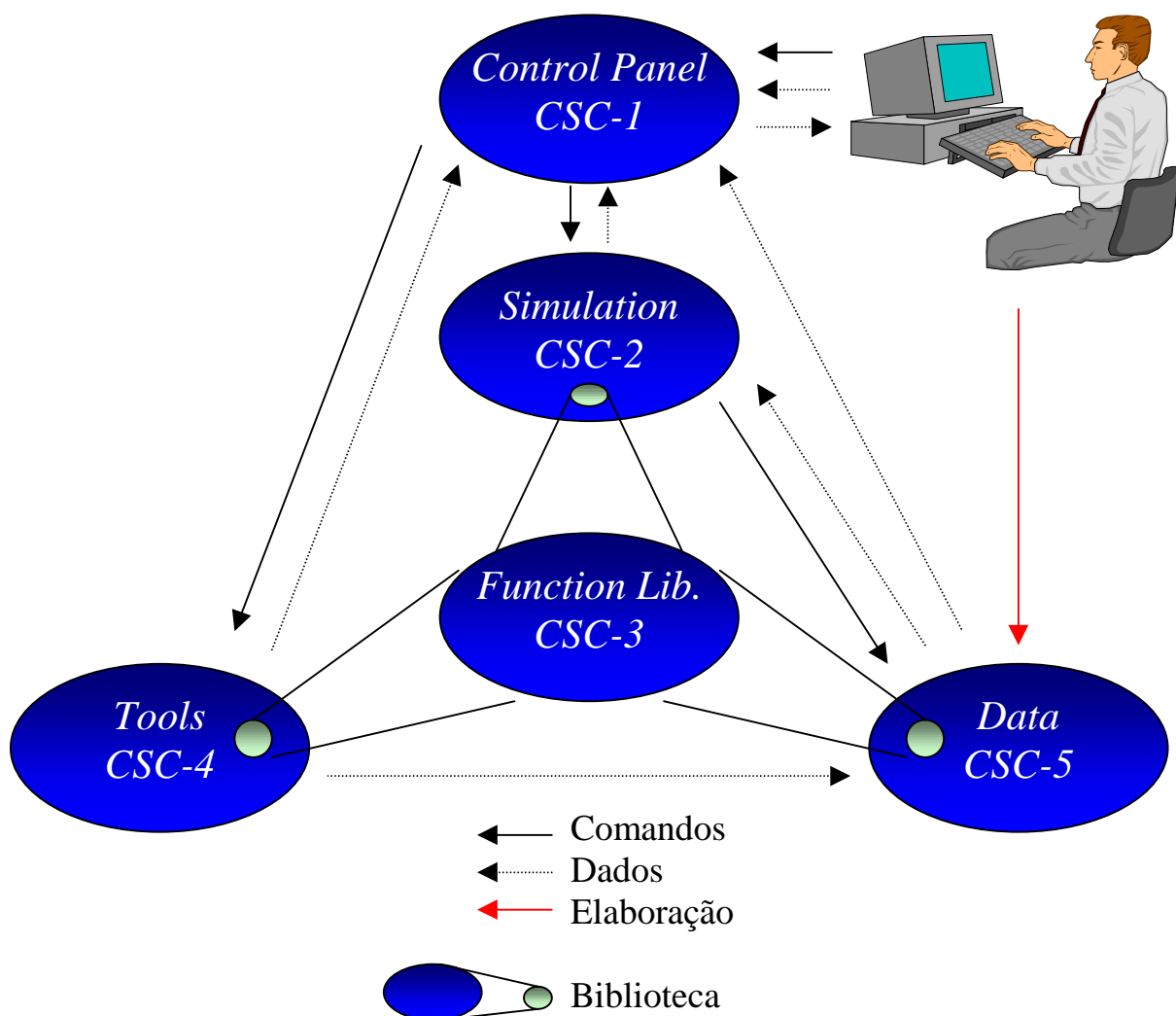


Fig. 4.3 - Estrutura funcional de CSCs do ambiente de simulação e testes SIATS.

Cada um desses componentes desempenha um papel determinado no conjunto que compõe todo o sistema do ambiente de simulação e testes.

Os detalhes de cada um dos componentes encontram-se no **APÊNDICE C**.

### **4.3 SIMULAÇÃO**

#### **4.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS**

O desenvolvimento do ambiente de simulação deve possibilitar a avaliação de diferentes algoritmos segundo critérios semelhantes que possibilitem a comparação entre os mesmos.

A sequência de simulação desenvolvida para testar os algoritmos de identificação baseia-se nas condições reais de funcionamento de sistemas de determinação de atitude que utilizam-se de sensores de estrelas.

Este funcionamento pode ser detalhado da seguinte forma:

- A espaçonave encontra-se em uma posição de atitude qualquer, a qual deseja-se determinar;
- Se a espaçonave possui algum outro sistema de determinação de atitude que forneça a pré-estimativa de atitude, esta pode ou não ser utilizada pelo sistema de identificação de estrelas relacionado ao sensor de estrelas;
- O sensor de estrelas montado sobre o corpo da espaçonave numa posição conhecida tem seu campo de visada voltado para uma região do céu de onde pode observar as estrelas presentes naquela região e fornecer uma saída contendo informações de observação relacionadas às mesmas;
- A saída do sensor é enviada ao computador no qual estão instalados o software que contém o algoritmo de identificação e as bases de dados necessárias para o processo de identificação tais como catálogos de estrelas;
- Inicia-se o processo de identificação da informação fornecida pelo sensor com relação ao catálogo, fornecendo informação que relaciona as estrelas no referencial do catálogo (inercial) e no referencial de observação (sensor). Como a posição do sensor com relação à espaçonave é conhecida, pode-se estabelecer o relacionamento das estrelas no referencial inercial e no referencial da espaçonave. Se a atitude já foi previamente determinada, pode-se utilizá-la como informação de pré-estimativa para melhorar o processo de identificação, caracterizando um modo de rastreamento. Caso contrário, o modo de funcionamento é o de aquisição;
- A saída do identificador é enviada ao software que contém o algoritmo de determinação de atitude que fornece a atitude da espaçonave relacionada àquela observação;
- Se a espaçonave está em movimento de atitude, uma nova observação é feita e com base na atitude anteriormente determinada, pode-se ter uma pré-estimativa para a nova determinação a ser feita.

### 4.3.2 MODELO DE SIMULAÇÃO

Com a descrição do funcionamento real do sistema de determinação de atitude, pode-se desenvolver uma simulação que utilize de forma integrada cada uma das etapas descritas e modeladas do funcionamento.

O modelamento da simulação pode ser detalhado da seguinte forma:

- Para simular a atitude da espaçonave, pode-se utilizar 4 maneiras distintas:
  - Simulação por arquivo de dados do sensor - com base em arquivo de dados já obtido de simulações anteriores ou até a partir de aplicações reais, há a reprodução exata das condições de atitude e observação provida pelo sensor. No entanto, como estes arquivos podem ser oriundos de aplicações reais, não há como recuperar a atitude real original, mas apenas a determinada através do sistema de determinação de atitude.
  - Simulação aleatória de atitude – a atitude é simulada de forma aleatória como descrito na Seção 2.7 (SIMULAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).
  - Entrada manual de atitude - a atitude é fornecida manualmente como descrito na Seção 2.7 (SIMULAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).
  - Simulação dinâmica de atitude - a atitude inicial é fornecida manualmente. Daí em diante a atitude segue uma dinâmica estipulada como descrito na Seção 2.7 (SIMULAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS), simulando-se o movimento de atitude da espaçonave.
- Dependendo da técnica de identificação que o algoritmo implementa, há a necessidade de um sensor de pré-estimativa da atitude. Assim, baseando-se em informações da atitude real, é possível gerar uma pré-estimativa através do modelo do sensor de pré-estimativa, como descrito na Seção 2.8 (SENSOR DE PRÉ-ESTIMATIVA) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS)
- Exceto para o caso de simulação por arquivo de dados, como as estrelas observadas tem coordenadas expressas no referencial inercial, suas posições podem gerar entradas para o modelo do sensor estelar, como descrito na Seção 2.6 (CATÁLOGO DE ESTRELAS) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).
- Exceto para o caso de simulação por arquivo de dados, através do modelo do sensor estelar é possível obter coordenadas de matriz eletrônica, assim como observações de magnitudes para cada uma das estrelas representadas na entrada fornecida ao sensor, como descrito na Seção 2.5. (SENSOR ESTELAR) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS)
- Com a saída fornecida pelo sensor estelar, ou a observação já existente presente em arquivo de dados para simulação por arquivo de dados, é possível o início do processo de identificação que irá fazer a associação das observações aos dados de estrelas catalogadas, como descrito na Seção 3.5 (IDENTIFICAÇÃO) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS). Porém, esta identificação pode estar sujeita a critérios de otimização que são adotados segundo requisitos da missão. Uma vez estabelecidos, estes caracterizam a priorização que é dada a cada tipo de identificação ao ser aplicado o algoritmo



que identifica as estrelas como descrito na Seção 3.6.1. (TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DO RAIOS DO DOMÍNIO DE BUSCA) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS).

- Uma vez feita a identificação das observações do sensor estelar, torna-se possível fazer a determinação de atitude da espaçonave com os versores das estrelas associados ao referencial da espaçonave e ao referencial inercial através da consulta a catálogos, como descrito na Seção 2.4 (DETERMINAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

Com base nestes conceitos é possível o desenvolvimento de um ambiente de simulação e testes que possa simular o funcionamento do sistema integrado e avaliar de forma comparativa o desempenho dos algoritmos a serem testados. O desenvolvimento deste ambiente descreve-se no Capítulo 4. (AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E TESTES).

Assim, pode-se representar o modelo de simulação da seguinte forma (Ver Fig. 4.4):

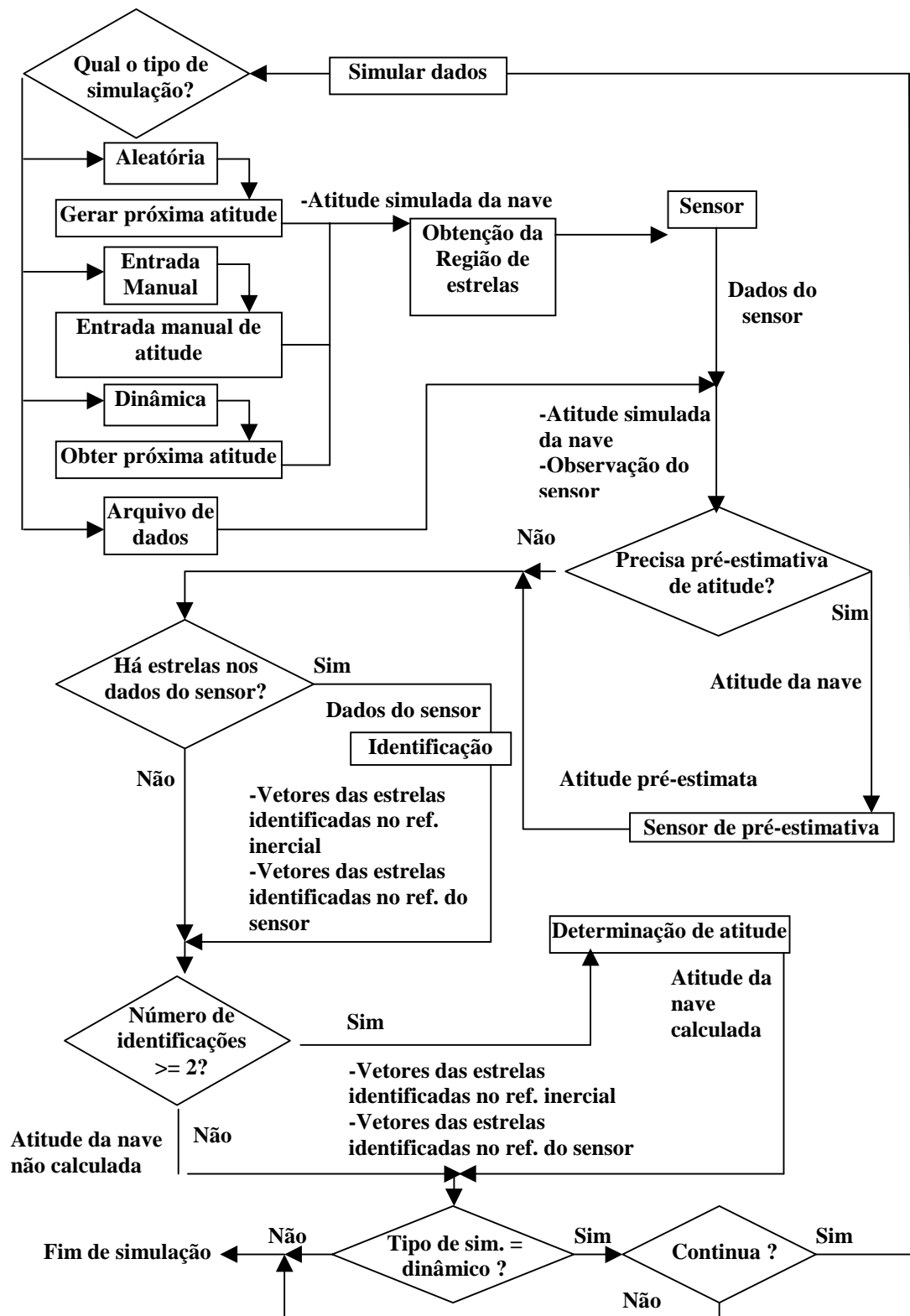


Fig. 4.4 - Modelo de simulação de funcionamento do sistema de determinação de atitude com sensores de estrelas.

## CAPÍTULO 5

### TESTE E ANÁLISE DE ALGORITMOS REPRESENTATIVOS

Com o auxílio do ambiente de simulação e testes descrito no Capítulo 4. (AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E TESTES), realizaram-se testes com resultados em complemento ao estudo teórico, viabilizando o estudo prático de cada técnica numa diversidade de situações escolhidas. Assim, obteve-se o embasamento experimental que mostrou na prática as características de funcionamento do sistema de identificação e suas influências no sistema de cálculo de atitude.

O objetivo deste Capítulo é duplo. Primeiramente ilustrar como pode-se utilizar a ferramenta computacional desenvolvida, **SIATS**, para fundamentar a escolha da técnica de identificação mais adequada a uma determinada aplicação. A comparação entre os parâmetros de avaliação obtidos para os algoritmos testados atende a este propósito para cada caso de simulação. Complementarmente, a comparação entre casos com diferentes FOVs e magnitude limite do sensor fornece subsídios à especificação do tipo de sensor mais apropriado a uma missão espacial. No entanto, deve-se lembrar que os testes foram definidos para ilustração de uma aplicação fictícia ilustrativa. Para o estudo dos algoritmos em cada aplicação deve-se definir os testes de forma que estes atendam às características reais desejadas às quais o algoritmo sob teste estará atrelado.

O segundo objetivo é, na medida do possível, extrair conclusões qualitativas de caráter geral sobre as principais características das técnicas observadas. A análise de todo o conjunto de casos testados serve a esta finalidade.

Sem dúvida uma caracterização completa e imparcial de todas as possíveis técnicas de identificação de estrelas seria uma pretensão impraticável. Acredita-se entretanto que os casos de teste selecionados sejam suficientes para manifestar as dificuldades básicas na aplicação de cada algoritmo e assim formar um quadro panorâmico introdutório ao assunto.

Estas são as principais contribuições do trabalho como um todo. Adicionalmente e como desdobramento natural, a análise dos resultados é útil na detecção de pontos críticos e na proposição de possíveis aperfeiçoamentos nos algoritmos de modo a melhor atender a requisitos de uma dada aplicação.

A seguir descrevem-se os algoritmos a serem testados, as condições em que os testes foram realizados, os parâmetros utilizados na avaliação dos algoritmos e os resultados obtidos.

#### 5.1 ALGORITMOS SOB TESTE

Os casos de teste foram direcionados para possibilitar a análise das categorias já identificadas. A Figura 5.1 apresenta a definição de cada um dos algoritmos sob teste que representam as várias técnicas de identificação sob algumas das possíveis variações escolhidas.

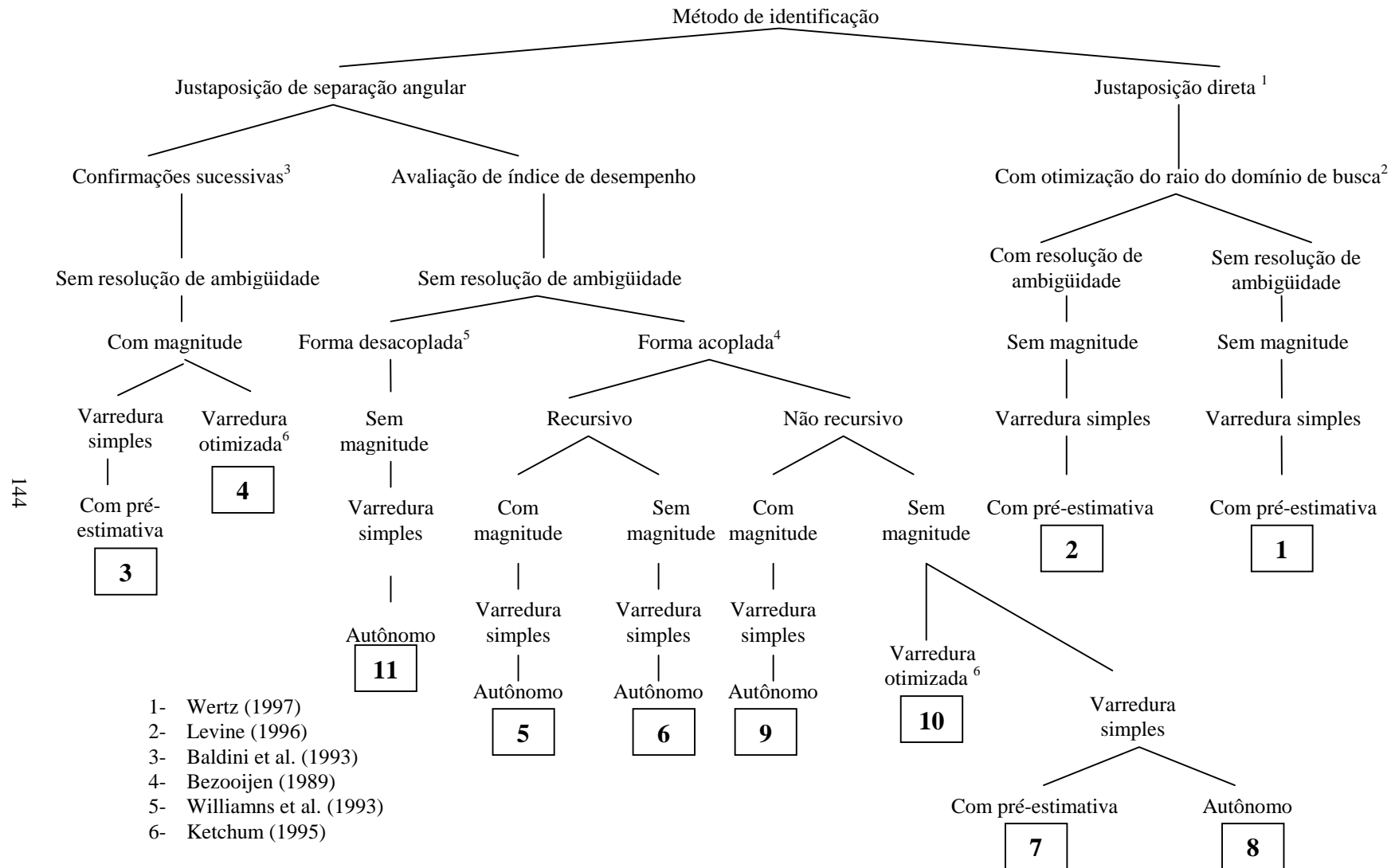


Fig. 5.1 - Definição dos algoritmos sob teste.

Cada um desses algoritmos foi aplicado às diferentes condições de teste necessárias para a obtenção de uma abrangência satisfatória. Cada teste foi definido com base nas características e aplicação de cada técnica obtidas do estudo teórico.

## 5.2 CONDIÇÕES DE TESTE

Todos os testes foram executados de maneira sistemática por simulação digital em computador com processador Pentium MMX 233 MHz e 64 Mb de *Random Access Memory* (RAM) com auxílio do *software SIATS* baseado no *software PC-Matlab 5.2* (The Math Works Inc.) como plataforma de programação.

As condições de teste tiveram por objetivo obter a maior abrangência possível para as prováveis situações de atitude em que pudesse se encontrar o sistema de determinação por sensores estelares a bordo de uma espaçonave estabilizada nos três eixos. Além disso, visto que os algoritmos podem ser aplicados a um grande conjunto de configurações de sistema, foram utilizadas, a título de exemplo, configurações distintas para o sensor estelar, representando aplicações distintas, e dessa forma possibilitando a avaliação dos algoritmos nas mesmas situações de atitude, porém trabalhando em condições de configuração de sistema diferentes.

As tabelas a seguir apresentam, respectivamente, as diferentes configurações aplicadas nos testes e a definição dos testes nas diferentes configurações e situações de simulação de atitude. Em seguida descrevem-se os tipos de simulação utilizados (Ver Tabela 5.1):

**TABELA 5.1 - DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE SISTEMA**

|                      |                             | Nome da Configuração de sensor |          |           |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------|-----------|
|                      |                             | FOV peq.                       | FOV gde. | ROSAT     |
| Sensor estelar       | Tamanho FOV (graus x graus) | 8 x 8                          | 20 x 20  | 5,9 x 4,4 |
|                      | Prec. Pos. (arcseg)         | 8                              | 20       | 2         |
|                      | Prec. Mag. (visual)         | 0,25                           | 0,25     | 0,25      |
|                      | Máx. Mag. (visual)          | 5,5                            | 4        | 7         |
|                      | Nº. estr. rastreadas        | 5                              | 5        | 3         |
| Catálogo de trabalho | Máx. Mag. (visual)          | 5,5                            | 4        | 6,5       |

Para os algoritmos com necessidade de informação de pré-estimativa utilizou-se de uma precisão de atitude de  $1^0$ .

No caso de necessidade de sensor de estrelas de formato redondo, definiu-se um sensor de FOV quadrado com diagonal igual à diagonal do FOV desejado.

Para a técnica de identificação por avaliação de índice de desempenho na forma desacoplada, desenvolveu-se uma leve alteração no modelo do sensor de forma a contemplar a saída de estrelas guia presentes no FOV interno. No entanto, apesar destes testes terem sido desenvolvidos com um modelo diferente de sensor em comparação aos demais testes, esta técnica pode ser aplicada com utilização de sensores comuns, sendo possível utilizar os mesmos parâmetros de sensor utilizados para os demais testes.

Afim de facilitar a citação aos diversos algoritmos, pode-se utilizar mnemônicos como descritos abaixo:

- \* **D**-Justaposição Direta
- \* **Or**-Otimização do raio de busca
- \* **Sa**-Justaposição de Separações Angulares
- \* **C**-Confirmações sucessivas
- \* **I**-Avaliação de Índice de desempenho
- \* **A**-Forma Acoplada
- \* **R**-Recursivo
- \* **De**-Forma Desacoplada
- \* **S**-Varredura Simples
- \* **O**-Varredura Otimizada
- \* **B**-uso de ambigüidade
- \* **M**-com Magnitude
- \* **P**-uso de Pré-estimativa
- \* **Au**-Autônomo

Assim, por exemplo, o conjunto “Sa-I-A-R-M-S-Au” representa o algoritmo de Justaposição de Separação angular por avaliação de Indice de desempenho na forma Acoplada com cálculo Recurssivo e uso de Magnitude utilizando varredura Simples de forma Autônoma.

**TABELA 5.2 - DEFINIÇÃO DOS TESTES**

| <b>Tipo Simulação</b> | <b>Nome Configuração</b> | <b>Nº. Alg.</b> | <b>Nº. Sim.</b> | <b>Nº. Teste</b> |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| <b>Aleatória</b>      | <b>FOV pequeno</b>       | <b>1</b>        | 100             | 1                |
|                       |                          | <b>2</b>        | 100             | 2                |
|                       |                          | <b>3</b>        | 100             | 3                |
|                       |                          | <b>4</b>        | 100             | 4                |
|                       |                          | <b>5</b>        | 100             | 5                |
|                       |                          | <b>6</b>        | 100             | 6                |
|                       |                          | <b>7</b>        | 100             | 7                |
|                       |                          | <b>8</b>        | 100             | 8                |
|                       |                          | <b>9</b>        | 100             | 9                |
|                       |                          | <b>10</b>       | 100             | 10               |
|                       |                          | <b>11</b>       | 100             | 11               |
|                       | <b>FOV grande</b>        | <b>1</b>        | 100             | 12               |
|                       |                          | <b>2</b>        | 100             | 13               |
|                       |                          | <b>3</b>        | 100             | 14               |
|                       |                          | <b>4</b>        | 100             | 15               |
|                       |                          | <b>5</b>        | 100             | 16               |
|                       |                          | <b>6</b>        | 100             | 17               |
|                       |                          | <b>7</b>        | 100             | 18               |
|                       |                          | <b>8</b>        | 100             | 19               |
|                       |                          | <b>9</b>        | 100             | 20               |
|                       |                          | <b>10</b>       | 100             | 21               |
|                       |                          | <b>11</b>       | 100             | 22               |
| <b>Dinâmica</b>       | <b>FOV pequeno</b>       | <b>1</b>        | 288             | 23               |
|                       |                          | <b>2</b>        | 288             | 24               |
|                       |                          | <b>3</b>        | 288             | 25               |
|                       |                          | <b>4</b>        | 288             | 26               |
|                       |                          | <b>5</b>        | 288             | 27               |
|                       |                          | <b>6</b>        | 288             | 28               |
|                       |                          | <b>7</b>        | 288             | 29               |
|                       |                          | <b>8</b>        | 288             | 30               |
|                       |                          | <b>9</b>        | 288             | 31               |
|                       |                          | <b>10</b>       | 288             | 32               |
|                       |                          | <b>11</b>       | 288             | 33               |
|                       | <b>FOV grande</b>        | <b>1</b>        | 288             | 34               |
|                       |                          | <b>2</b>        | 288             | 35               |
|                       |                          | <b>3</b>        | 288             | 36               |
|                       |                          | <b>4</b>        | 288             | 37               |
|                       |                          | <b>5</b>        | 288             | 38               |
|                       |                          | <b>6</b>        | 288             | 39               |
|                       |                          | <b>7</b>        | 288             | 40               |
|                       |                          | <b>8</b>        | 288             | 41               |
|                       |                          | <b>9</b>        | 288             | 42               |
|                       |                          | <b>10</b>       | 288             | 43               |
|                       |                          | <b>11</b>       | 288             | 44               |
| <b>dados ROSAT</b>    | <b>ROSAT</b>             | <b>1</b>        | 100             | 45               |

### **5.2.1 SIMULAÇÃO ALEATÓRIA**

O intuito deste tipo de simulação é a determinação de atitude numa situação aleatória de apontamento a partir do qual necessita-se saber a atitude da espaçonave para então posicioná-la corretamente.

Com esse tipo de simulação pode-se evitar privilegiar qualquer posicionamento de atitude em especial, sendo possível averiguar o funcionamento do algoritmo a partir de uma situação de atitude totalmente inesperada na esfera celeste.

Neste tipo, cada simulação constitui basicamente uma situação independente de apontamento sem nenhuma ligação com as situações anteriores.

Para este tipo de simulação foram executadas 100 simulações.

### **5.2.2 SIMULAÇÃO DINÂMICA**

O intuito deste tipo de simulação de atitude é a determinação numa situação de apontamento prevista pelo movimento conhecido da espaçonave, a partir do qual necessita-se saber a atitude da mesma para efeito de correções.

Assim, para averiguar o comportamento dos algoritmos, utilizou-se de simulações descritas por um movimento pré-determinado que posicionasse o sensor de estrelas num apontamento previsto na esfera celeste.

Neste tipo, cada simulação constitui uma parte do conjunto total de movimento da espaçonave, onde cada uma tem ligação com a anterior.

Assim, como cada região do céu tem uma determinada densidade e “entropia”(distribuição) de estrelas, para que fosse possível uma avaliação de forma independente da região de apontamento, utilizou-se um caso de teste que pudesse varrer toda a esfera celeste.

Como descrito na Seção 2.7.2.2 (GERAÇÃO DINÂMICA DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS), neste estudo apenas existe a preocupação quanto à observação das estrelas na esfera celeste e estas encontram-se muito distantes com relação ao tamanho do semi-eixo maior de órbita, pode-se considerar para efeito de estudo e testes uma órbita fictícia circular com preocupação apenas quanto ao posicionamento angular da observação não importando a posição espacial da espaçonave.

Para este fim foi adotada uma órbita polar circular, para efeito de teste considerada heliosíncrona, com horário de passagem 6:00 hs. Esta órbita foi discretizada em 24 pontos por órbita, sendo que o período de rotação do plano de órbita em torno do eixo da esfera celeste foi discretizado em 12 órbitas por ano, desta forma totalizando 288 simulações (Ver Fig. 2.33).



Considera-se a espaçonave com apontamento terrestre durante todo o período e o sensor de estrelas voltado para o zênite. Em tal configuração o Sol nunca aparece no FOV do sensor (órbita heliossíncrona).

### 5.2.3 SIMULAÇÃO COM DADOS REAIS DO SATÉLITE ROSAT

O último tipo de simulação, a título de exemplo, testou o método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza, sem resolução de ambiguidades, com os dados reais providos do satélite **ROSAT**.

Os dados recebidos, após analisados e convertidos para a formatação **SIATS**, foram testados para avaliação do algoritmo escolhido com dados provenientes de aplicações reais.

Os testes utilizaram-se dos valores de atitude e apontamento de sensor fornecidos pelos dados **ROSAT** com simulação aleatória de desvios na atitude original, além de utilizar os próprios valores das observações como catálogo de trabalho para proceder à uma reidentificação com o algoritmo escolhido. Posteriormente os resultados foram comparados com os dados originais.

No caso do algoritmo implementado para o método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza em especial, a otimização do raio de busca está baseada nas probabilidades de identificação, dependentes da densidade de estrelas considerada.

Como neste caso a densidade é dependente do posicionamento do FOV (devido à utilização dos próprios valores das observações como catálogo de trabalho), considera-se apenas a área interna ao FOV, modificando-se assim a densidade de estrelas a cada teste conforme o FOV muda de posição na região de observação.

Com isso, foi necessário considerar diferentes probabilidades na otimização do raio de busca a cada teste.

Para este tipo de simulação foram executadas 100 simulações.

## 5.3 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Para a avaliação de cada técnica consideraram-se duas características de parâmetros: gerais e específicos. Já para a avaliação global, consideraram-se apenas os parâmetros gerais. No entanto antes de qualquer análise mais aprofundada, é importante lembrar que os casos aqui em teste são executados num ambiente de linguagem interpretada. Para o caso de linguagem compilada, é possível que ocorram sensíveis alterações.

Os parâmetros gerais, no âmbito de cada técnica, foram avaliados de forma local. Já a avaliação global, aborda as técnicas de forma a evidenciar as diferenças entre o funcionamento de cada uma com as demais.

Já os específicos foram avaliados apenas no contexto de cada técnica em particular ao qual eles se aplicam, uma vez que nem sempre os mesmos eram aplicáveis a todas as técnicas, servindo apenas para comparação e avaliação entre as variações da mesma técnica.

### **5.3.1 PARÂMETROS GERAIS**

A análise dos resultados dos algoritmos baseou-se nos seguintes itens de interesse:

- se o número de estrelas identificadas corretamente aproxima-se ao número de estrelas observadas;
- se a identificação correta é otimizada com relação às identificações errôneas, não identificações e identificações ambíguas;
- se a precisão dada pelos algoritmos é satisfatória;
- se a precisão com relação às direções relativas ao apontamento do sensor é melhor desenvolvida na direção perpendicular (forma combinada xy) ou na paralela ao eixo de apontamento do sensor e a previsão teórica inicial com relação a este tipo de precisão do sensor é observada (O erro em atitude é uma composição dos erros nas 3 direções x, y e z);
- avaliação do tempo de processamento e a memória (de armazenamento) requerida;
- influência do tamanho do FOV no funcionamento dos algoritmos;
- influência da dinâmica da atitude no funcionamento dos algoritmos.

#### **5.3.1.1 AVALIAÇÃO GLOBAL**

A análise global dos resultados dos algoritmos baseou-se nos seguintes itens de interesse:

- avaliação do tempo de processamento;
- avaliação da memória (de armazenamento) requerida;
- influência do tamanho do FOV no funcionamento dos algoritmos;
- influência da magnitude no tamanho da base de dados;
- influência do tamanho da base de dados necessária ao funcionamento dos algoritmos;
- influência do uso de pré-estimativa ou varredura otimizada.

### **5.3.2 PARÂMETROS ESPECÍFICOS**

Para os parâmetros específicos podemos considerar as 3 técnicas de identificação:

#### **5.3.2.1 MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA COM OTIMIZAÇÃO DE DOMÍNIO DE INCERTEZA**

Os parâmetros específicos a esta técnica estão basicamente relacionados à otimização do raio de busca para a identificação.

A análise dos resultados específicos do algoritmo implementado para o método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza baseou-se nos seguintes itens de interesse:

- se o céu segue a hipótese inicial adotada de que seja seguida a distribuição de **Poisson**;
- se o desempenho de identificações é satisfatório quando se segue a hipótese adotada;
- se levar em consideração a resolução de ambiguidades favorece a identificação.

#### **5.3.2.2 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS**

A análise dos resultados específicos dos algoritmos implementados para a técnica de identificação por confirmações sucessivas baseou-se nos seguintes itens de interesse:

- se o algoritmo é robusto contra ocorrência de condição de espelho;
- qual o número médio necessário de verificações de estrelas guia para a identificação;
- qual o número médio necessário de verificações de estrelas vizinhas às estrelas guia para a identificação;
- qual o tipo de busca em subcatálogos mais comum quando em varredura otimizada;
- qual o número médio de verificações de subcatálogos necessárias à identificação quando em varredura otimizada;
- influência do tipo de varredura nos algoritmos.

#### **5.3.2.3 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO**

Para esta técnica pode-se considerar as duas formas de avaliação:

##### **5.3.2.3.1 FORMA ACOPLADA**

A análise dos resultados específicos dos algoritmos implementados para a técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma acoplada baseou-se nos seguintes itens de interesse:

- se o algoritmo é robusto contra ocorrência de condição de espelho;
- qual o tipo de busca em subcatálogos mais comum quando em varredura otimizada;
- qual o número médio de verificações de subcatálogos necessárias à identificação quando em varredura otimizada;

- qual o número médio de iterações necessário para convergir quando em modo de cálculo de notas recursivo;
- qual o número médio de estrelas observadas associadas a catalogadas com notas não nulas necessário à identificação;
- comportamento da média da relação entre a primeira e a segunda maiores notas associadas a cada estrela observada;
- se o fato de levar em consideração a magnitude das estrelas favorece a identificação;
- Influência do tipo de varredura nos algoritmos.

#### **5.3.2.3.2 FORMA DESACOPLADA**

A análise dos resultados específicos dos algoritmos baseados na técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada baseou-se nos seguintes itens de interesse:

- qual a influência e comportamento associados ao número de estrelas guias presente no FOV interno do sensor;
- qual a influência e comportamento associados ao número de estrelas presente no FOV externo do sensor;
- qual a influência e comportamento associados ao número de estrelas presente no domínio da estrela guia;
- se o padrão de identificação utilizado aproxima-se mais do exato ou do aproximado;
- qual o comportamento da média do número de bits errados na comparação de padrões quando há identificação;
- se a identificação por aproximação de bits favorece a identificação correta.

## 5.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Todos os resultados numéricos e gráficos foram colhidos diretamente da saída do *software SIATS* e armazenados com referência ao número de teste a que pertencem.

É importante ressaltar que o *software SIATS* permite, para cada teste realizado, a geração de relatórios texto e saídas gráficas para cada uma das simulações, além de relatório texto e saídas gráficas contendo avaliações globais incluindo todas as simulações. No entanto, por questão de espaço, não foi possível aqui apresentar todas as saídas textuais e gráficas, sendo escolhidas para apresentação apenas as mais significativas em cada caso. Alguns exemplos de saída são mostrados na Seção C.2 (EXEMPLOS DE SAÍDA SIATS) do APÊNDICE C.

A título de praticidade, os dados contidos nos relatórios globais texto de cada teste foram resumidos em tabelas, divididas em parâmetros gerais e específicos, de forma a facilitar a visualização de um panorama geral comparativo.

É importante ressaltar que os resultados referentes à precisão angular quanto à direção perpendicular ao apontamento e quanto à direção de apontamento entre a atitude determinada e a atitude original são mostrados limitados à faixa  $[1', 1']$  de forma que os casos de identificação errônea, e consequentemente determinação de atitude errônea, não obscurecessem a visualização da distribuição de erros para os casos onde a determinação foi correta.

Todos os resultados numéricos são apresentados com 4 casas decimais. No caso da precisões relativas às direções de apontamento, os resultados numéricos são mostrados em segundos de arco para enfatizar o resultado alcançado pelos algoritmos em situações de identificação, uma vez que não faz sentido essa análise no caso de erros na identificação, pois o erro pode ser tanto pequeno como grande. Já no caso dos gráficos, as informações foram disponibilizadas em graus e a precisão é tratada de modo global, mostrando as taxas de ocorrência de erros acumulados acima do valor de  $1'$ .

A seguir os resultados são disponibilizados, agrupados primeiramente por técnica de identificação de forma a comparar os resultados de desempenho entre os vários algoritmos derivados da mesma técnica, e por último uma avaliação global entre todas as técnicas de modo a evidenciar as diferenças operacionais entre elas.

#### 5.4.1 MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA COM OTIMIZAÇÃO DE DOMÍNIO DE INCERTEZA

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 e as Figuras de 5.2 a 5.5 a seguir trazem os resultados referentes aos algoritmos implementados para o método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza para os parâmetros gerais e específicos respectivamente. Em seguida são detalhados e comentados os resultados onde são apresentados gráficos para facilitar a visualização do comportamento dos algoritmos.

Para a simulação com dados **ROSAT**, devido à diferença de densidade de estrelas em cada teste, já mencionada, não há um valor teórico geral de probabilidades a ser considerado. Assim os valores apresentados referem-se a um teste em especial. A título de exemplo, foram adotados os valores da simulação de número 100 dentro do teste 45.

Para o desenvolvimento dos testes do trabalho, foram adotadas as faixas descritas na Tabela 3.1 da Seção 3.6.1.2 (MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO RAIO DO DOMÍNIO DE BUSCA) do Capítulo 3.

**TABELA 5.3 - PARÂMETROS GERAIS DE TESTE DO MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA COM OTIMIZAÇÃO DE DOMÍNIO DE INCERTEZA**

| Teste | Memória programa<br>(código + dados)<br>(Kb) | Memória catálogo<br>(Kb) | Tempo de process. (s) |               | Nº. de estrelas obs. |               | Nº. de estr. corr. Ident. |               | Precisão $\sigma_{xy}$ (arcseg) |               | Precisão $\sigma_z$ (arcseg) |               |
|-------|--|--------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|       |  |                          | Média                 | Desvio padrão | Média                | Desvio padrão | Média                     | Desvio padrão | Média                           | Desvio padrão | Média                        | Desvio padrão |
| 1     | 11,0000                                      | 135,0000                 | 0,9950                | 0,1180        | 3,6200               | 1,3241        | 1,2600                    | 1,1426        | 10,5314                         | 6,5504        | -0,9014                      | 7,2055        |
| 2     | 11,0000                                      | 135,0000                 | 1,0125                | 0,1260        | 3,5400               | 1,3515        | 1,3600                    | 1,1851        | 10,1224                         | 5,8604        | -0,0085                      | 9,3021        |
| 12    | 11,0000                                      | 25,0000                  | 0,5070                | 0,1040        | 3,8600               | 1,5043        | 2,6700                    | 1,4775        | 22,8394                         | 11,3099       | 0,3300                       | 23,5234       |
| 13    | 11,0000                                      | 25,0000                  | 0,4980                | 0,1000        | 3,4800               | 1,6786        | 2,3000                    | 1,4941        | 22,8580                         | 11,5186       | -2,1898                      | 22,5522       |
| 23    | 11,0000                                      | 135,0000                 | 1,0980                | 0,3170        | 3,4688               | 1,5502        | 1,3021                    | 1,3076        | 10,1945                         | 5,0711        | -0,2591                      | 7,9275        |
| 24    | 11,0000                                      | 135,0000                 | 1,0200                | 0,1280        | 3,4479               | 1,4854        | 1,2917                    | 1,2061        | 10,1696                         | 5,1750        | 0,3949                       | 8,2185        |
| 34    | 11,0000                                      | 25,0000                  | 0,5030                | 0,1050        | 3,5451               | 1,5788        | 2,3576                    | 1,5189        | 25,7462                         | 14,1028       | -0,5228                      | 20,4984       |
| 35    | 11,0000                                      | 25,0000                  | 0,5850                | 0,2300        | 3,5903               | 1,5366        | 2,4826                    | 1,4721        | 24,1403                         | 12,7864       | 0,9993                       | 20,4733       |
| 45    | 11,0000                                      | 419,0000                 | 0,2030                | 0,0390        | 3,0000               | 0,0000        | 1,0200                    | 0,9426        | 70,4749                         | 0,0000        | -21,8479                     | 0,0000        |

**TABELA 5.4 - OCORRÊNCIAS DOS TIPOS DE IDENTIFICAÇÃO NOS TESTES DO MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA COM OTIMIZAÇÃO DE DOMÍNIO DE INCERTEZA**

| Teste | Nº. de Identificações (%) |         |         |         |
|-------|---------------------------|---------|---------|---------|
|       | Real                      |         |         |         |
|       | Corr.                     | Amb.    | Não id. | Err.    |
| 1     | 34,8066                   | 37,2928 | 16,2983 | 11,6022 |
| 2     | 38,4181                   | 37,2881 | 17,5141 | 6,7797  |
| 12    | 69,1710                   | 17,3575 | 11,3990 | 2,0725  |
| 13    | 66,0920                   | 19,8276 | 12,0690 | 2,0115  |
| 23    | 37,5375                   | 35,1351 | 18,2182 | 9,1091  |
| 24    | 37,4622                   | 33,2326 | 20,3424 | 8,9627  |
| 34    | 66,5034                   | 14,0059 | 17,3359 | 2,1548  |
| 35    | 69,1489                   | 13,9265 | 14,7002 | 2,2244  |
| 45    | 34,0000                   | 46,0000 | 10,0000 | 10,0000 |



**TABELA 5.5 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS DE TESTE DO MÉTODO DE JUSTAPOSIÇÃO DIRETA COM OTIMIZAÇÃO DE DOMÍNIO DE INCERTEZA**

| Teste | Nº. de Identificações (%)<br>Teórico |         |         |         | raio ótimo<br>(graus) | Desvio padrão<br>raio ótimo<br>(graus) |
|-------|--------------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------|--|
|       | Corr.                                | Amb.    | Não id. | Err.    |                       |  |
| 1     | 54,43,58                             | 24,4018 | 13,0155 | 8,1469  | 1,7000                |  |
| 2     | 54,43,59                             | 24,4018 | 13,0155 | 8,1469  | 1,7000                |  |
| 12    | 81,8359                              | 8,3198  | 8,2915  | 1,5528  | 2,1900                |  |
| 13    | 81,8359                              | 8,3198  | 8,2915  | 1,5528  | 2,1900                |  |
| 23    | 54,43,58                             | 24,4018 | 13,0155 | 8,1469  | 1,7000                |  |
| 24    | 54,43,59                             | 24,4018 | 13,0155 | 8,1469  | 1,7000                |  |
| 34    | 81,8359                              | 8,3198  | 8,2915  | 1,5528  | 2,1900                |  |
| 35    | 81,8359                              | 8,3198  | 8,2915  | 1,5528  | 2,1900                |  |
| 45    | 43,5880                              | 32,7105 | 12,6418 | 11,0596 | 1,5600                | 0,0000                                 |

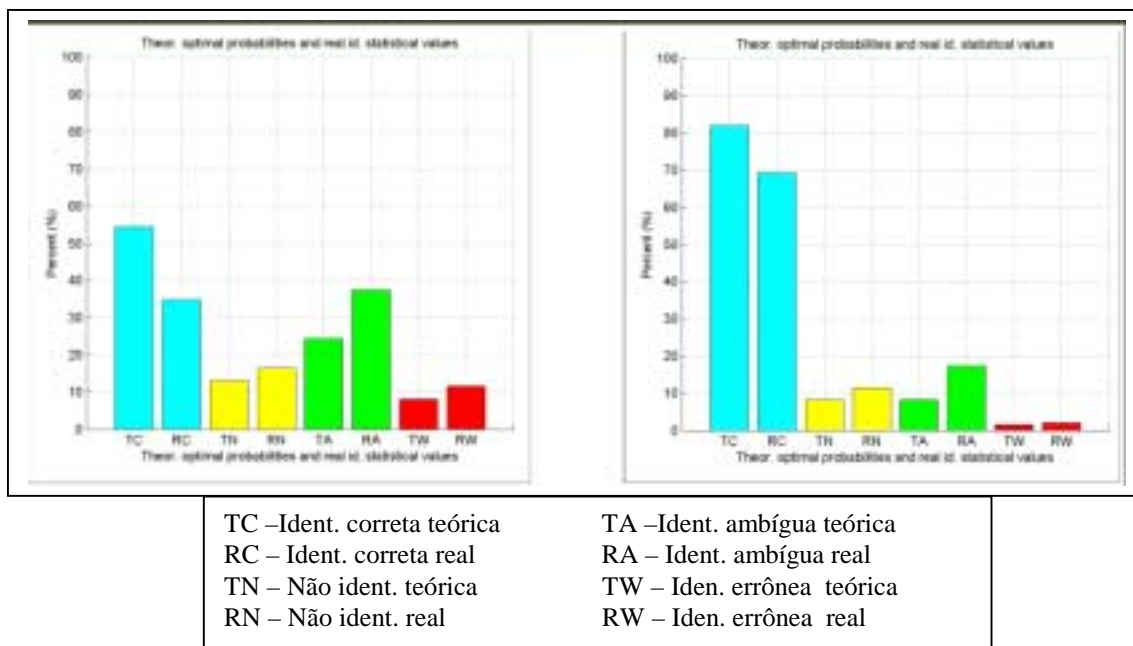


Fig. 5.2 - Probabilidades teóricas para os tipos de identificação e ocorrência real dos tipos de identificação (Esquerda – teste 1, Direita – teste 12). Algoritmo: D-Or-S-P.

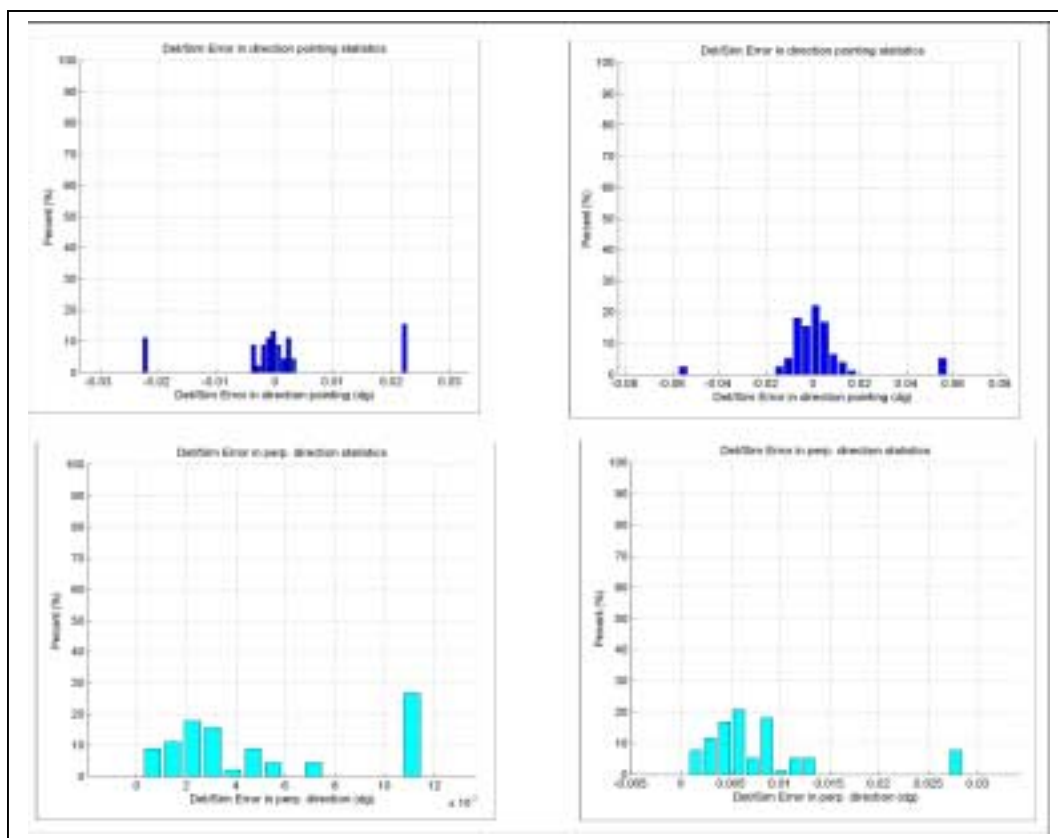


Fig. 5.3 - Precisão nas direções relativas ao apontamento (Em cima – z, Em baixo – xy) (Esquerda – teste 1, Direita – teste 12). Algoritmo: D-Or-S-P.

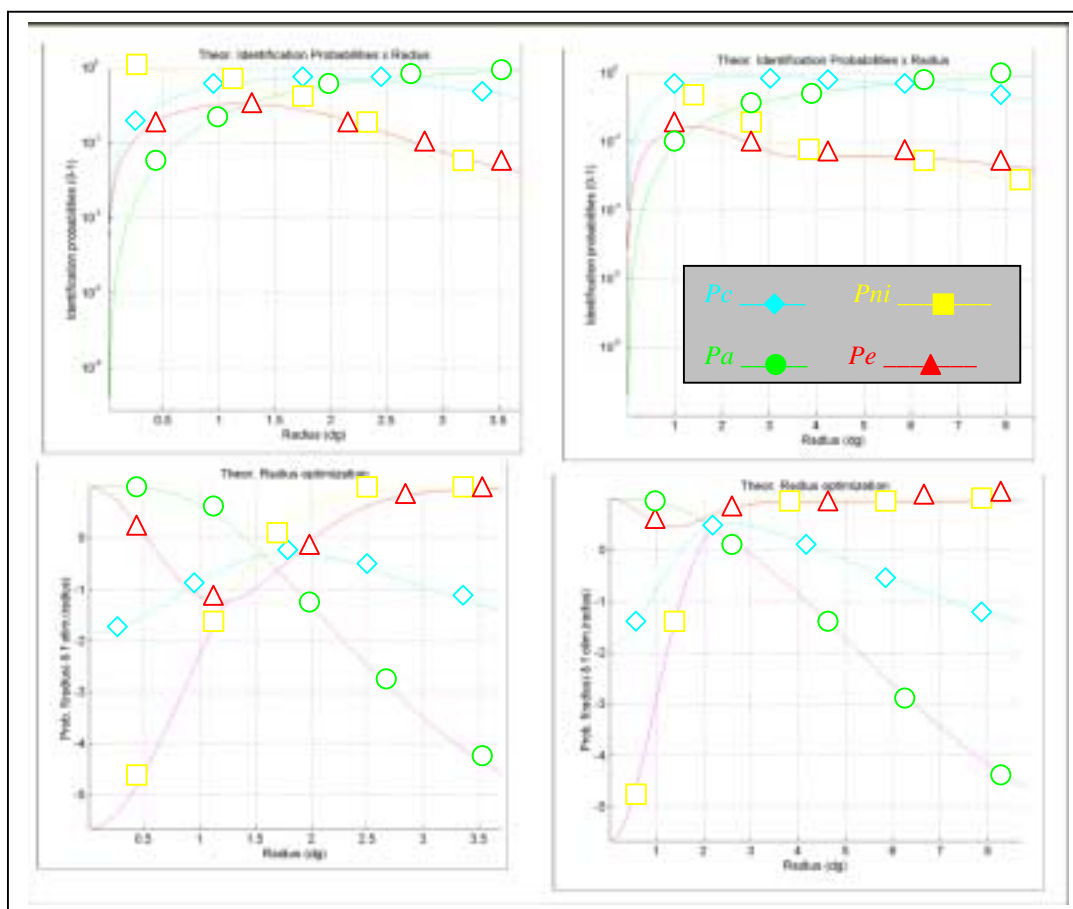


Fig. 5.4 - Probabilidades de identificação (Em cima) e otimização do raio de busca (Em baixo) (Esquerda – teste 1, Direita – teste 12). Algoritmo: D-Or-S-P.

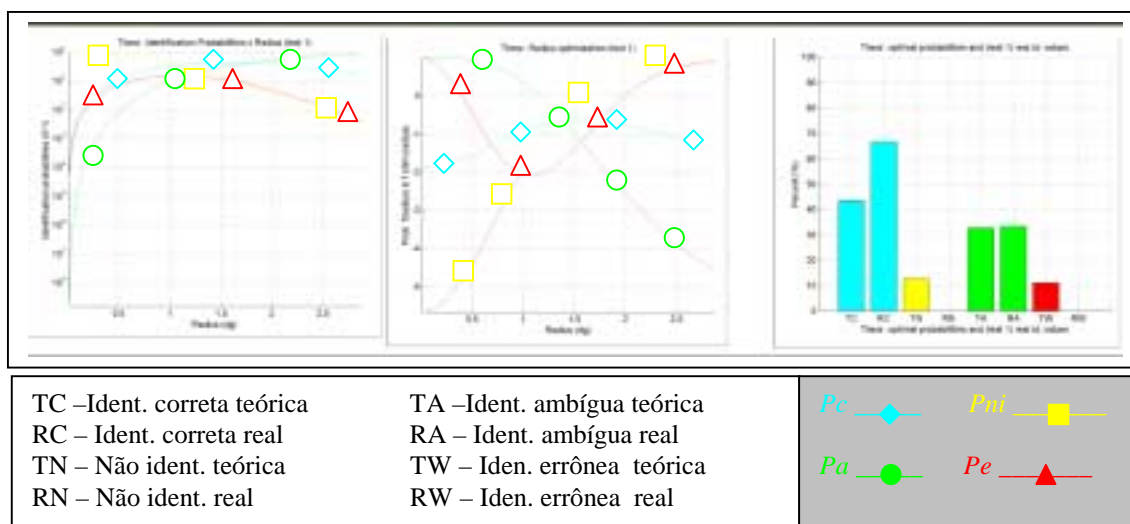


Fig. 5.5 - Probabilidades de identificação (Esquerda), otimização do raio de busca (Centro) e probabilidades teóricas para os tipos de identificação e ocorrência real dos tipos de identificação (Direita) (teste 45 – simulação n°. 100). Algoritmo: D-Or-S-P.

#### 5.4.1.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS

Os algoritmos desta técnica apresentam uma dependência clara entre o tamanho do FOV e a otimização de identificação correta com relação aos outros tipos de identificação, principalmente quando se usa o FOV grande, não importando se há resolução de ambigüidades. O FOV grande, contribui para maior ocorrência de identificações corretas além de favorecer a aproximação entre número de estrelas identificadas corretamente e número de estrelas observadas. No entanto o número de estrelas identificadas é sempre menor que o de observadas.

Pode-se considerar que a maior ocorrência de não identificações é atribuída à grande sensibilidade do sensor à magnitude. Esta deve estar abaixo da magnitude limite do catálogo de trabalho, de forma a evitar que ocorram observações não presentes no mesmo.

Como previsto, a precisão na direção perpendicular ao apontamento (xy) é mais sensível que a precisão na direção do apontamento (z) além de corresponder em ordem de grandeza à precisão do sensor e mostrando-se mais apurada que a precisão de pré-estimativa utilizada. O uso da resolução de ambigüidades em comparação com o algoritmo que não a usa mostra uma ligeira piora nesta precisão. No entanto, a precisão na direção perpendicular mostra-se mais sensível à precisão de pré-estimativa, com diminuição da sensibilidade com uso do FOV pequeno.

Apesar disso, a precisão de pré-estimativa mostrou-se um pouco alta para a aplicação desta técnica. Possivelmente algo em torno de  $0.5^0$  seria mais adequado.

No caso dos testes com dados **ROSAT**, deve-se levar em conta também o fato de que a densidade de estrelas local levou a otimização do raio de busca para um valor que comparativamente ao tamanho do FOV resultou numa tendência indesejável. Esta tendência causou, sobretudo, um aumento significativo nas ocorrências de ambigüidades e identificações errôneas. Provavelmente, testes do sensor **ROSAT** nas mesmas condições de simulação aleatória e dinâmica mostrariam resultados semelhantes e com a mesma tendência já percebida.

Como o programa não requer nenhuma base de dados, a memória de armazenamento requerida é sempre a mesma para ambos os casos, sendo que ambos necessitam do mesmo tamanho. Já o catálogo de trabalho, quanto maior a magnitude limite, maior a memória necessária para seu armazenamento.

#### 5.4.1.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ESPECÍFICOS

Percebe-se que com o FOV grande, os resultados tendem a se aproximar mais da previsão teórica. No entanto, as ocorrências de identificação correta sempre estiveram ligeiramente abaixo do cálculo teórico enquanto que as demais mantiveram-se ligeiramente acima. (Ver Fig. 5.2 e 5.4).

Observando que o comportamento dos algoritmos melhora com o FOV grande e este aproxima as ocorrências da previsão teórica, pode-se concluir que realmente a aproximação com a previsão teórica é benéfica. Esta situação ocorre devido à influência do tamanho relativo entre o FOV e o raio de busca otimizado. Quanto maior o FOV com relação a este raio, melhor com relação às ocorrências dos tipos de identificação.

#### **5.4.2 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS**

As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 e as Figuras de 5.6 a 5.12 a seguir trazem os resultados referentes aos algoritmos implementados para a técnica de identificação por confirmações sucessivas para os parâmetros gerais e específicos respectivamente. Em seguida são detalhados e comentados os resultados para cada um dos tipos de parâmetros onde são apresentados gráficos para facilitar a visualização do comportamento de alguns dos parâmetros avaliados.

**TABELA 5.6 - PARÂMETROS GERAIS PARA TESTE DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS**

| Teste | Memória programa<br>(código + dados)<br>(Kb) | Memória catálogo<br>(Kb) | Tempo de process. (s) |               | Nº. de estrelas obs. |               | Nº. de estr. corr. Ident. |               | Precisão $\sigma_{xy}$ (arcseg) |               | Precisão $\sigma_z$ (arcseg) |               |
|-------|--|--------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|       |  |                          | Média                 | Desvio padrão | Média                | Desvio padrão | Média                     | Desvio padrão | Média                           | Desvio padrão | Média                        | Desvio padrão |
| 3     | 21,0000                                      | 135,0000                 | 1,0340                | 0,2800        | 3,6900               | 1,4750        | 2,9700                    | 1,9199        | 9,7429                          | 5,4756        | 0,3277                       | 8,7857        |
| 4     | 846,0000                                     | 135,0000                 | 52,9720               | 152,7670      | 3,4400               | 1,4517        | 2,1400                    | 2,0401        | 10,7237                         | 5,4802        | 0,3885                       | 7,7079        |
| 14    | 21,0000                                      | 25,0000                  | 0,5680                | 0,2540        | 4,0100               | 1,2350        | 3,3100                    | 1,6859        | 24,1389                         | 12,14,75      | -3,3208                      | 21,1599       |
| 15    | 221,0000                                     | 25,0000                  | 17,4220               | 58,8610       | 3,7300               | 1,5166        | 2,6500                    | 2,1148        | 25,6439                         | 12,7817       | -0,0246                      | 19,5034       |
| 25    | 21,0000                                      | 135,0000                 | 1,0140                | 0,3520        | 3,4931               | 1,5256        | 2,7465                    | 1,8690        | 10,0502                         | 4,9343        | 0,2622                       | 7,5167        |
| 26    | 846,0000                                     | 135,0000                 | 83,1230               | 314,7250      | 3,4063               | 1,5387        | 2,0035                    | 2,0473        | 9,8918                          | 5,4771        | -1,2307                      | 8,7311        |
| 36    | 21,0000                                      | 25,0000                  | 0,5570                | 0,2630        | 3,6007               | 1,5450        | 2,7569                    | 1,9939        | 25,0000                         | 12,9178       | 1,8418                       | 18,8078       |
| 37    | 221,0000                                     | 25,0000                  | 26,1470               | 63,0840       | 3,5903               | 1,5366        | 2,5313                    | 2,0292        | 24,6238                         | 14,1367       | -2,4897                      | 20,6193       |

**TABELA 5.7 - OCORRÊNCIAS DOS TIPOS DE IDENTIFICAÇÃO NOS TESTES DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS**

| Teste     | Nº. de Identificações (%) |        |         |         |
|-----------|---------------------------|--------|---------|---------|
|           | Real                      |        |         |         |
|           | Corr.                     | Amb.   | Não id. | Err.    |
| <b>3</b>  | 82,0442                   | 0,0000 | 17,9558 | 0,0000  |
| <b>4</b>  | 62,2093                   | 0,0000 | 20,0581 | 17,7326 |
| <b>14</b> | 83,1658                   | 0,0000 | 15,8291 | 1,0050  |
| <b>15</b> | 71,0456                   | 0,0000 | 17,6944 | 11,2601 |
| <b>25</b> | 81,0451                   | 0,0000 | 17,4180 | 1,5369  |
| <b>26</b> | 58,8175                   | 0,0000 | 23,1397 | 18,0428 |
| <b>36</b> | 78,8481                   | 0,0000 | 18,5700 | 2,5819  |
| <b>37</b> | 70,5029                   | 0,0000 | 20,5996 | 8,8975  |



**TABELA 5.8 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS PARA TESTE DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR CONFIRMAÇÕES SUCESSIVAS**

| Teste     | Espelho (%) |          | Ver. Brilhantes (%) |               | Ver. Vizinhas (%) |               | Tipo de busca (%) |         |        | Ver. Subcat. (%) |               | Raio Subcat (graus) |
|-----------|-------------|----------|---------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------|--------|------------------|---------------|---------------------|
|           | Sim         | Não      | Média               | Desvio Padrão | Média             | Desvio Padrão | Nenhum            | Prim.   | Sec.   | Média            | Desvio Padrão |                     |
| <b>3</b>  | 0,0000      | 100,0000 | 2,4300              | 2,5000        | 0,8400            | 0,3600        |                   |         |        |                  |               |                     |
| <b>4</b>  | 0,0000      | 100,0000 | 4,0700              | 5,2200        | 0,9600            | 0,2100        | 12,2449           | 87,7551 | 0,0000 | 425,8061         | 229,9955      | 12,0000             |
| <b>14</b> | 0,0000      | 100,0000 | 3,2200              | 3,5900        | 0,9100            | 0,2900        |                   |         |        |                  |               |                     |
| <b>15</b> | 0,0000      | 100,0000 | 4,8400              | 6,4900        | 0,9600            | 0,2100        | 13,2653           | 85,7143 | 1,0204 | 88,5306          | 49,2744       | 30,0000             |
| <b>25</b> | 0,0000      | 100,0000 | 3,2400              | 3,9800        | 0,8800            | 0,3300        |                   |         |        |                  |               |                     |
| <b>26</b> | 0,0000      | 100,0000 | 5,3800              | 6,4800        | 0,9600            | 0,2000        | 15,9574           | 84,0426 | 0,0000 | 404,3085         | 237,2769      | 12,0000             |
| <b>36</b> | 0,0000      | 100,0000 | 3,3500              | 3,6500        | 0,8600            | 0,3500        |                   |         |        |                  |               |                     |
| <b>37</b> | 0,0000      | 100,0000 | 4,4100              | 5,2700        | 0,9100            | 0,2800        | 16,9065           | 83,0935 | 0,0000 | 93,9712          | 47,8764       | 30,0000             |

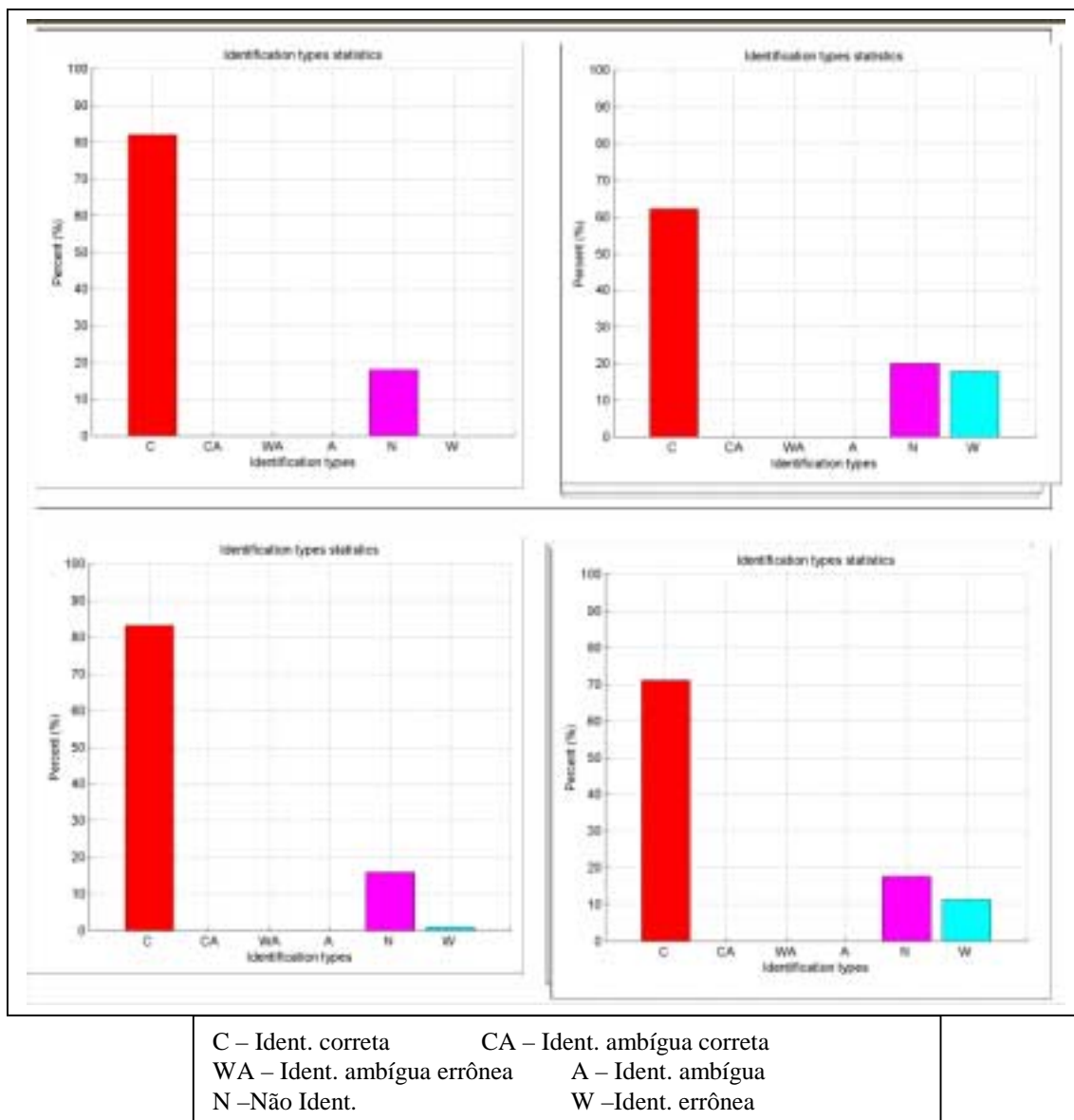


Fig. 5.6 - Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação com relação ao FOV (Em cima – FOV pequeno – testes 3 e 4, Em baixo – FOV grande – testes 14 e 15). Algoritmos Sa-C-M-S-P e Sa-C-M-O.

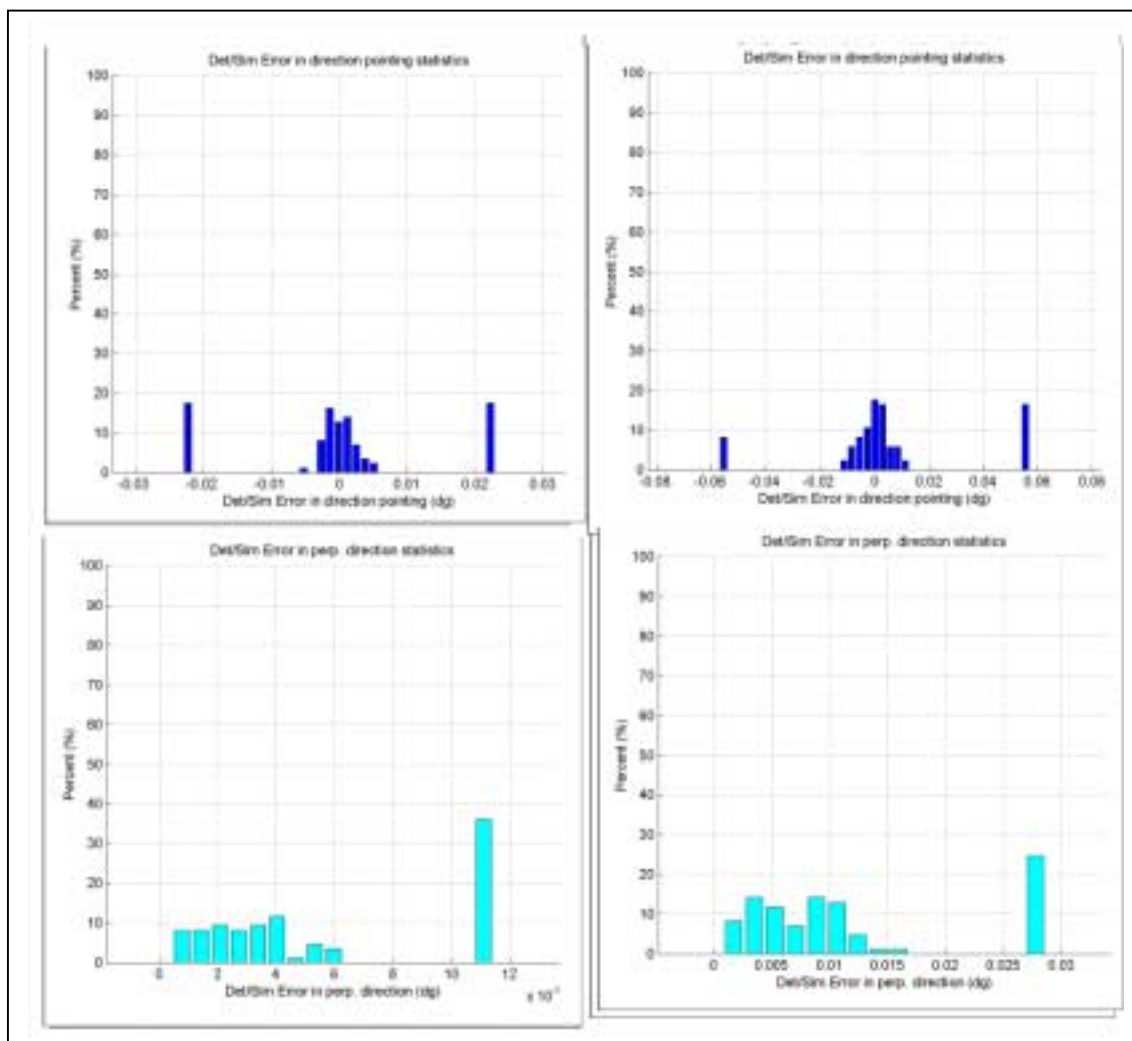


Fig. 5.7 - Precisão nas direções de apontamento (Em cima – z, Em baixo - xy) (Esquerda – teste 4, Direita – teste 15). Algoritmo: Sa-C-M-O.

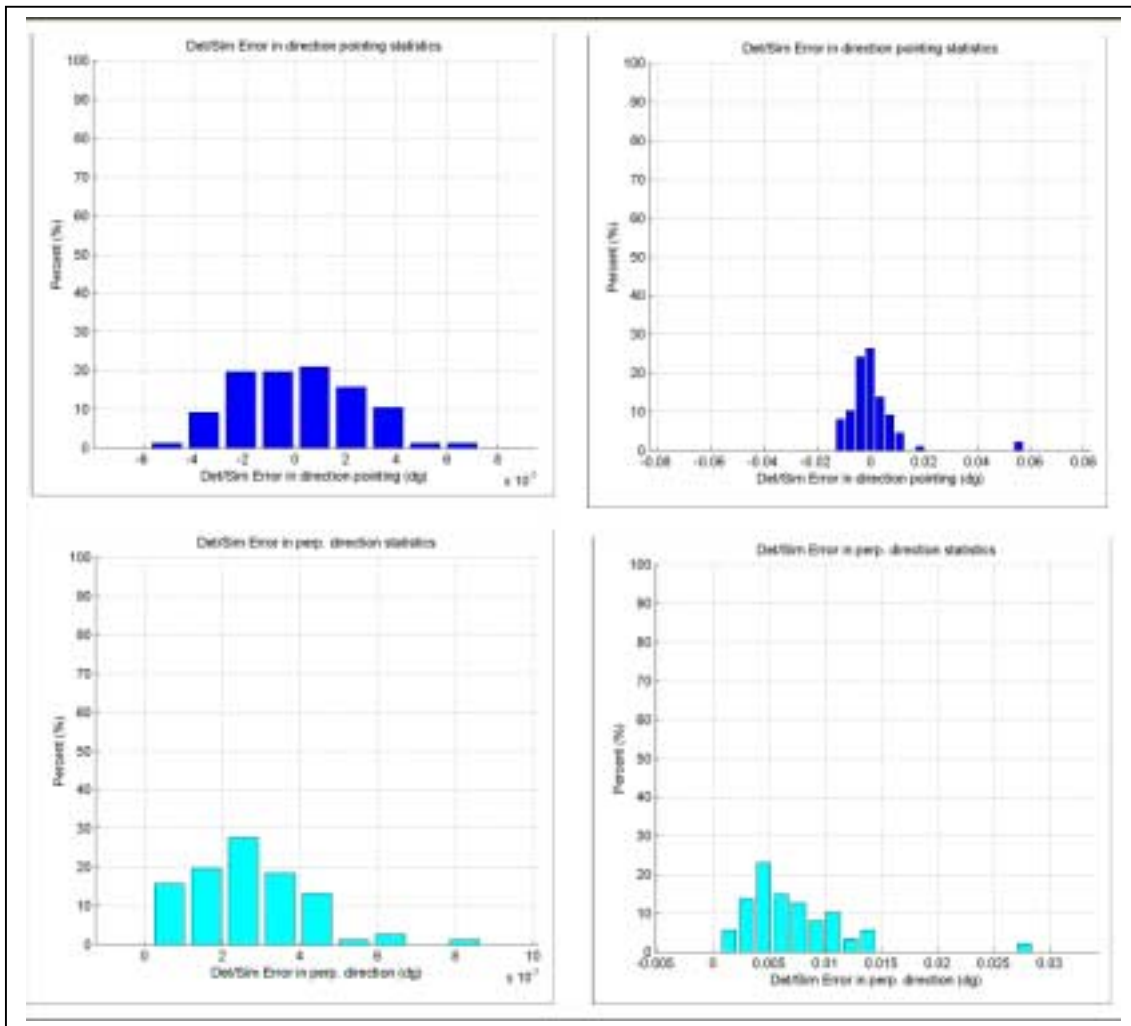


Fig. 5.8 - Precisão nas direções de apontamento (Em cima – z, Em baixo - xy) (Esquerda – teste 3, Direita – teste 14). Algoritmo: Sa-C-M-S-P.

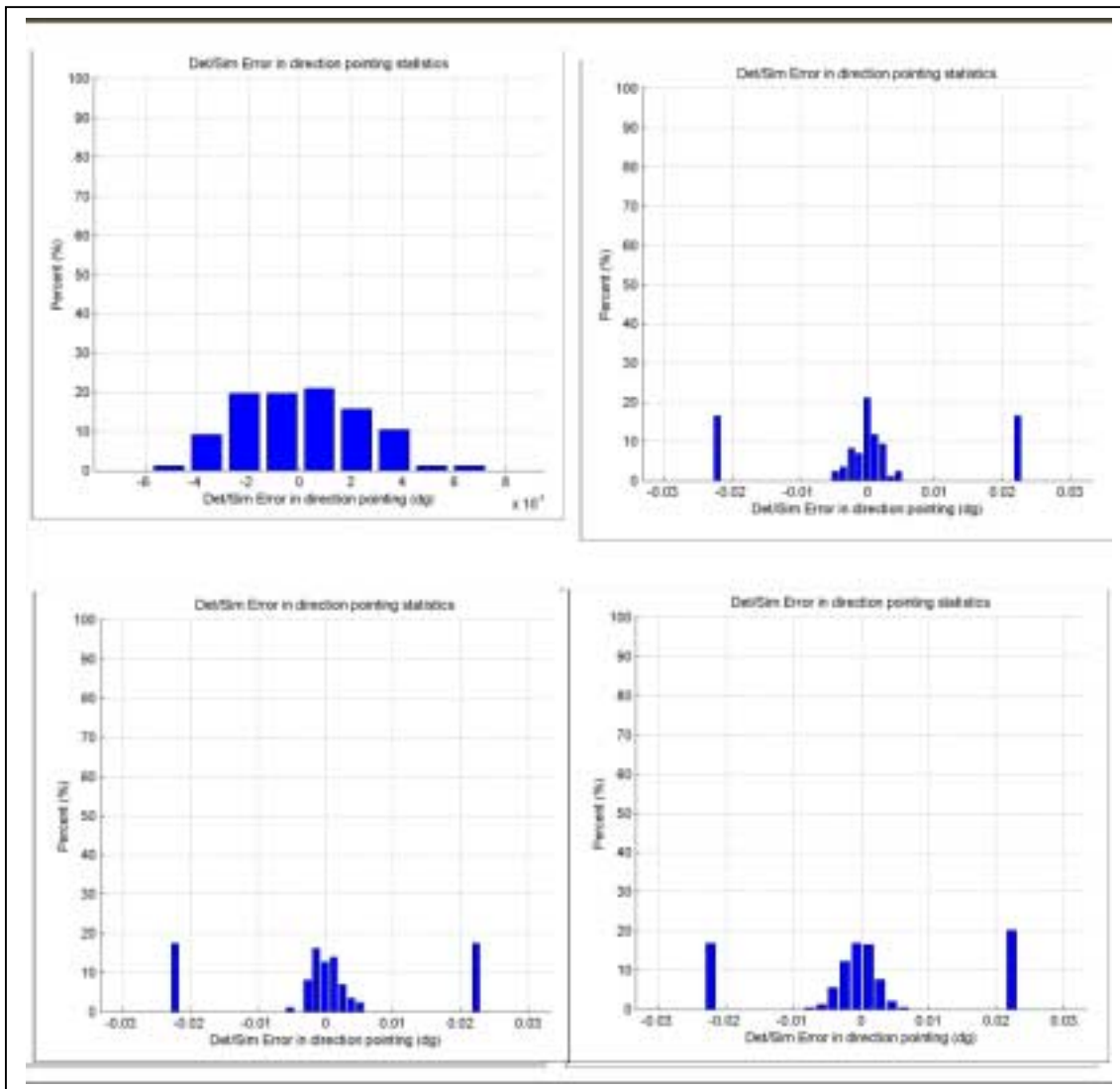


Fig. 5.9 - Precisão na direção de apontamento com FOV pequeno (Em cima – sim. aleatória, Em baixo – sim. dinâmica) (Esquerda – varredura simples - testes 3 e 4, Direita – varredura otimizada - testes 25 e 26). Algoritmos Sa-C-M-S-P e Sa-C-M-O.

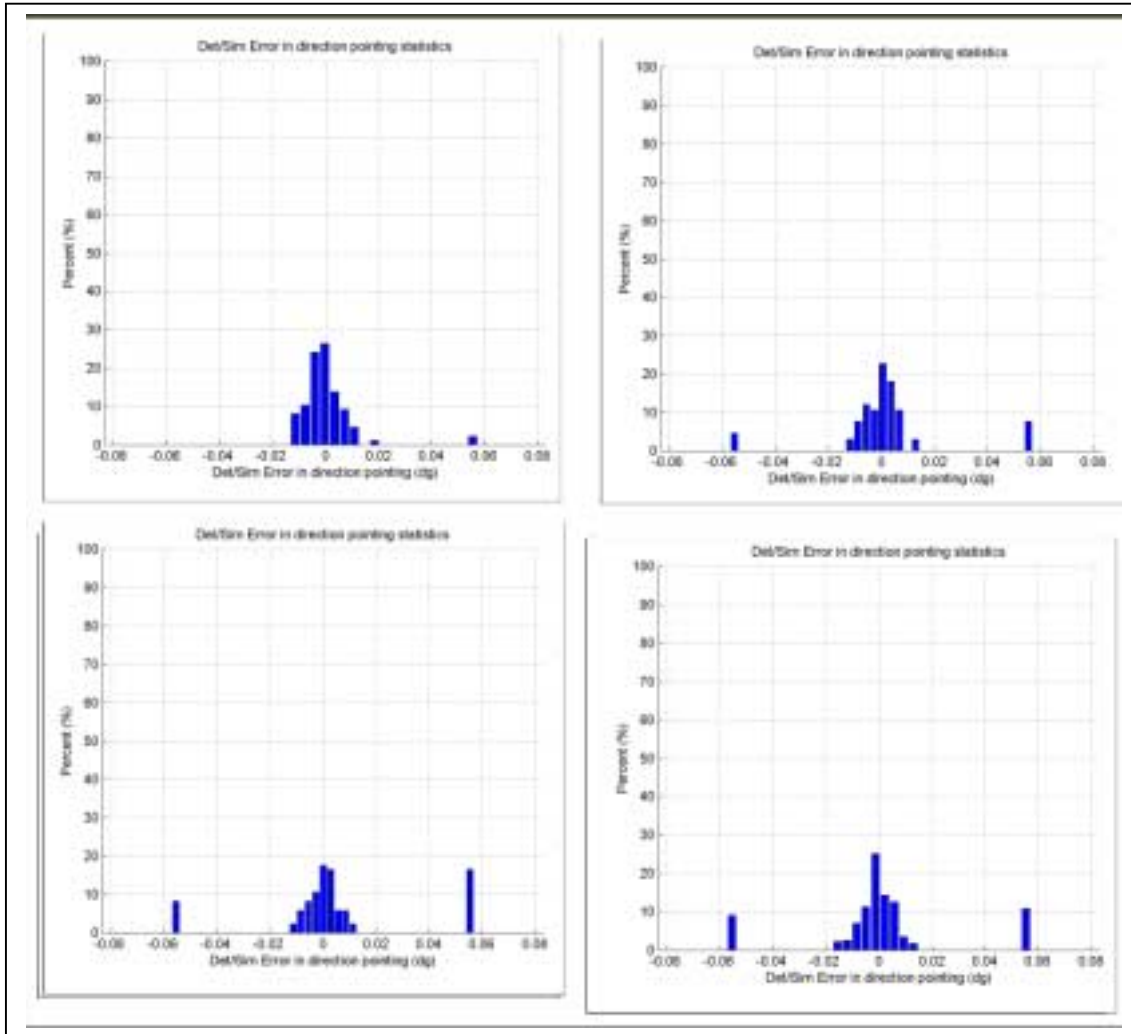


Fig. 5.10 - Precisão na direção de apontamento com FOV grande (Em cima – sim. aleatória, Em baixo – sim. dinâmica) (Esquerda – varredura simples - testes 14 e 15, Direita – varredura otimizada - testes 36 e 37). Algoritmos Sa-C-M-S-P e Sa-C-M-O.

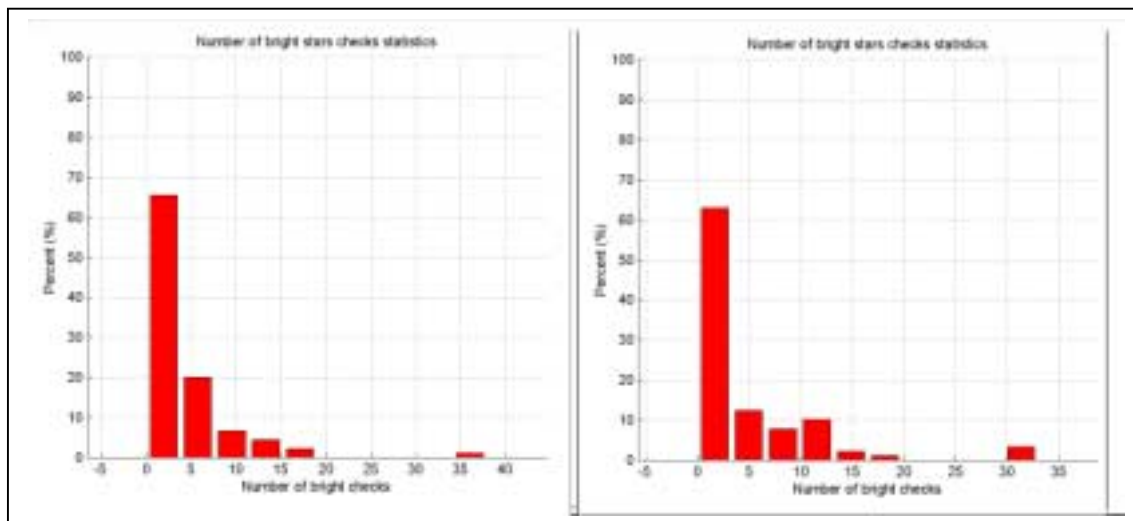


Fig. 5.11 - Número de verificações de estrelas guia para varredura otimizada com relação ao FOV (Esquerda – teste 4, Direita – teste 15). Algoritmo: Sa-C-M-O.

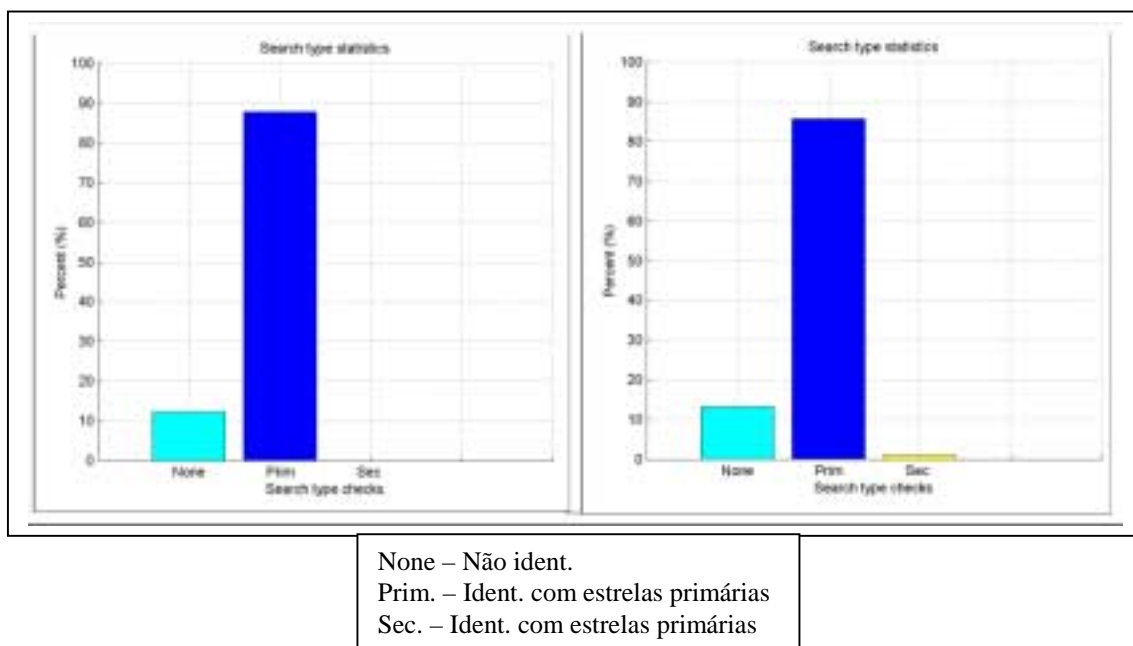


Fig. 5.12 - Tipos de busca em subcatálogo para varredura otimizada com relação ao FOV (Esquerda – teste 4, Direita – teste 15). Algoritmo: Sa-C-M-O.

#### **5.4.2.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS**

Para esta técnica deve-se lembrar que não é possível comparar os dois algoritmos, uma vez que aquele com pré-estimativa é beneficiado em relação ao autônomo. É possível que se o algoritmo com pré-estimativa fosse colocado em situação de autonomia sem o uso de técnica de otimização de varredura, o resultado fosse uma identificação demorada ou até incapacidade de identificação.

Os algoritmos desta técnica são indiferentes ao tamanho do FOV quando utilizados com varredura simples. Porém, quando utilizados com o FOV grande e varredura otimizada, apresentam melhores ocorrências para os tipos de identificação (Ver Fig. 5.6). De forma geral a técnica é robusta às identificações ambíguas em qualquer varredura. O tamanho do FOV não influi na relação entre o número de estrelas observadas e de estrelas identificadas corretamente. No entanto o número de estrelas identificadas é sempre menor que o de observadas.

Como previsto, a precisão na direção perpendicular ao apontamento (xy) é mais sensível que a precisão na direção do apontamento (z), além de corresponder em ordem de grandeza à precisão do sensor e mostrando-se mais apurada que a precisão de pré-estimativa utilizada no caso de varredura simples. De forma geral o FOV grande causa uma piora nas precisões nas direções relativas ao apontamento do sensor.

Para ambos os casos de varredura com o FOV pequeno observou-se uma sensível piora na precisão na direção de apontamento entre a simulação aleatória e a dinâmica (Ver Fig. 5.9), enquanto que para o FOV grande registrou-se uma melhoria (Ver Fig. 5.10).

O tamanho do FOV e a baixa magnitude a ele associada influenciam significativamente no tempo quando utiliza-se varredura otimizada. Isso ocorre por causa da diferença do tamanho do subcatálogo que deve ser verificado em cada caso. FOV grande significa maior rapidez e menor memória de armazenamento requerida tanto para a base de dados quanto para o próprio catálogo de trabalho. Como em varredura simples o programa não requer nenhuma base de dados, a memória de armazenamento requerida é sempre a mesma, ao contrário da varredura otimizada que utiliza-se de uma base de dados de subcatálogos. Já o catálogo de trabalho, quanto maior a magnitude limite, maior a memória necessária para seu armazenamento.

#### **5.4.2.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ESPECÍFICOS**

Percebe-se que a técnica é robusta às ocorrências de condições de espelho, pois praticamente esta situação não ocorreu.

O caso com varredura simples é indiferente, qualquer que seja o FOV, ao número de estrelas guia, não ocorrendo o mesmo com varredura otimizada que necessita de um número menor com o FOV grande (Ver Fig. 5.11). No entanto, para ambos os casos de varredura, qualquer que seja o FOV, ao número de estrelas vizinhas é indiferente.



Praticamente não notou-se diferença para o tipo de busca em subcatálogos por estrelas primárias ou secundárias para os dois casos de FOV (Ver Fig. 5.12). O número de subcatálogos verificados, como previsto, é maior no caso do FOV pequeno, devido ao tamanho de subcatálogo utilizado nesta configuração.

Para o uso com varredura otimizada e FOV grande, o comportamento não foi adequado, visto que como o FOV é muito grande ( $20^0 \times 20^0$ ). Isso acaba influenciando no tamanho de subcatálogo ( $60^0$  de raio) e dessa forma a esfera celeste acaba sendo varrida completamente várias vezes. Como o FOV pequeno tem tamanho de  $8^0 \times 8^0$ , isso implica num subcatálogo muito menor e dessa forma melhor eficiência na busca.

### **5.4.3 TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO**

Os resultados desta técnica são divididos nas duas formas de acoplamento:

#### **5.4.3.1 FORMA ACOPLADA**

As Tabelas de 5.9 a 5.12 e as Figuras de 5.13 a 5.20 a seguir trazem os resultados referentes aos algoritmos implementados para a técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma acoplada para os parâmetros gerais e específicos respectivamente. Em seguida são detalhados e comentados os resultados para cada um dos tipos de parâmetros onde são apresentados gráficos para facilitar a visualização do comportamento de alguns dos parâmetros avaliados.

**TABELA 5.9 - PARÂMETROS GERAIS PARA TESTE DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA ACOPLADA**

| Teste | Memória Programa<br>(código + dados)<br>(Kb) | Memória catálogo<br>(Kb) | Tempo de process. (s) |               | Nº. de estrelas obs. |               | Nº. de estr. corr. Ident. |               | Precisão $\sigma_{xy}$ (arcseg) |               | Precisão $\sigma_z$ (arcseg) |               |
|-------|--|--------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|       |  |                          | Média                 | Desvio padrão | Média                | Desvio padrão | Média                     | Desvio padrão | Média                           | Desvio padrão | Média                        | Desvio padrão |
| 5     | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 14,2790               | 11,7320       | 3,1600               | 1,3707        | 1,8900                    | 2,2825        | 10,1100                         | 5,0568        | -1,3299                      | 8,0178        |
| 6     | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 8,1120                | 5,1890        | 3,8100               | 1,4263        | 2,2500                    | 2,2355        | 10,9172                         | 5,6559        | 0,0240                       | 8,8095        |
| 7     | 23,0000                                      | 135,0000                 | 1,1350                | 0,1970        | 3,5200               | 1,5274        | 2,0700                    | 2,1614        | 10,0455                         | 5,0155        | 1,6140                       | 8,3173        |
| 8     | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 1,8160                | 0,7430        | 3,7900               | 1,3431        | 0,3100                    | 0,7480        | 7,7525                          | 2,0585        | 4,7631                       | 4,7925        |
| 9     | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 1,7950                | 0,8130        | 3,6700               | 1,4568        | 0,4200                    | 1,0068        | 10,5592                         | 4,6263        | 1,5613                       | 10,0960       |
| 10    | 846,0000                                     | 135,0000                 | 147,2010              | 516,0800      | 3,6400               | 3,5210        | 0,1000                    | 0,6435        | 7,7051                          | 2,3417        | 5,0278                       | 14,2590       |
| 16    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 1,5040                | 0,7740        | 3,8500               | 1,4026        | 2,5500                    | 2,2669        | 25,2277                         | 12,1684       | -2,3233                      | 21,7096       |
| 17    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 1,5420                | 0,9140        | 3,7400               | 1,4745        | 2,4500                    | 2,1852        | 24,4892                         | 14,2540       | 4,3607                       | 21,6391       |
| 18    | 23,0000                                      | 25,0000                  | 0,4890                | 0,0920        | 3,7600               | 1,3862        | 2,2500                    | 2,0170        | 24,5533                         | 13,4104       | -0,7392                      | 20,7981       |
| 19    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 0,5450                | 0,1430        | 3,7300               | 1,4345        | 0,9400                    | 1,4201        | 28,3571                         | 15,7892       | -1,9313                      | 21,8884       |
| 20    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 0,5810                | 0,1420        | 3,9500               | 1,3286        | 1,1100                    | 1,6871        | 20,9147                         | 11,8476       | 7,2455                       | 22,4116       |
| 21    | 221,0000                                     | 25,0000                  | 4,0110                | 11,0720       | 4,0500               | 1,2340        | 0,7000                    | 1,5341        | 25,0512                         | 12,9277       | 4,2461                       | 19,5358       |
| 27    | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 8,5190                | 6,8030        | 3,5174               | 1,4955        | 1,8160                    | 2,2253        | 10,2144                         | 5,4756        | 1,6687                       | 8,3589        |
| 28    | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 7,4110                | 5,0410        | 3,5451               | 1,5042        | 1,9097                    | 2,2675        | 10,1787                         | 4,7717        | 0,5318                       | 7,0741        |
| 29    | 23,0000                                      | 135,0000                 | 1,1150                | 0,2250        | 3,5243               | 1,5094        | 2,1389                    | 2,0890        | 9,4211                          | 4,8883        | -0,3722                      | 8,3647        |
| 30    | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 1,6570                | 0,7900        | 3,4896               | 1,4933        | 0,1597                    | 0,5431        | 10,0702                         | 4,6278        | 3,0876                       | 9,0712        |
| 31    | 1.120,0000                                   | 135,0000                 | 1,7640                | 0,8160        | 3,5938               | 1,4692        | 0,3090                    | 0,8745        | 10,4471                         | 5,6837        | 0,2802                       | 8,2226        |
| 32    | 846,0000                                     | 135,0000                 | 184,2630              | 480,6050      | 3,5139               | 1,4745        | 0,1806                    | 0,7977        | 10,6249                         | 5,4910        | 3,4048                       | 10,3022       |
| 38    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 1,4350                | 0,8130        | 3,5590               | 1,5981        | 2,2396                    | 2,2666        | 24,1651                         | 13,0202       | 0,2283                       | 18,0563       |
| 39    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 1,4730                | 0,8390        | 3,5868               | 1,5436        | 2,2778                    | 2,2753        | 23,9420                         | 13,2035       | 1,1501                       | 20,5940       |
| 40    | 23,0000                                      | 25,0000                  | 0,4970                | 0,1090        | 3,5417               | 1,5432        | 2,1563                    | 2,0651        | 24,0471                         | 12,6163       | -0,2938                      | 20,5541       |
| 41    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 0,5310                | 0,1700        | 3,5729               | 1,5756        | 0,7743                    | 1,4559        | 23,5317                         | 12,3011       | 1,0175                       | 17,7877       |
| 42    | 238,0000                                     | 25,0000                  | 0,5510                | 0,1700        | 3,5625               | 1,5605        | 0,9549                    | 1,6721        | 23,1398                         | 12,5839       | 2,6261                       | 19,1373       |
| 43    | 221,0000                                     | 25,0000                  | 5,6220                | 16,0710       | 3,5417               | 1,5364        | 0,6667                    | 1,4314        | 23,1423                         | 12,0796       | -1,8786                      | 17,9650       |

**TABELA 5.10 - OCORRÊNCIAS DOS TIPOS DE IDENTIFICAÇÃO NOS TESTES DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA ACOPLADA**

| Teste | Nº. de Identificações (%) |         |         |         |
|-------|---------------------------|---------|---------|---------|
|       | Real                      |         |         |         |
|       | Corr.                     | Amb.    | Não id. | Err.    |
| 5     | 53,5411                   | 11,3314 | 28,8952 | 6,2323  |
| 6     | 60,1604                   | 6,4171  | 29,6791 | 3,7433  |
| 7     | 59,8266                   | 33,5260 | 6,0694  | 0,5780  |
| 8     | 8,3558                    | 72,2372 | 6,4690  | 12,9380 |
| 9     | 11,7647                   | 61,9048 | 17,6471 | 8,6835  |
| 10    | 2,7473                    | 48,3516 | 6,3187  | 42,5824 |
| 16    | 67,6393                   | 3,1830  | 23,8797 | 5,3050  |
| 17    | 66,9399                   | 7,3770  | 22,9508 | 2,7322  |
| 18    | 61,1413                   | 34,5109 | 2,7174  | 1,6304  |
| 19    | 25,5435                   | 58,4239 | 8,1522  | 7,8804  |
| 20    | 28,2443                   | 57,7608 | 7,3791  | 6,6158  |
| 21    | 17,2840                   | 43,2099 | 3,4568  | 36,0494 |
| 27    | 52,9889                   | 12,5633 | 26,9504 | 7,4975  |
| 28    | 55,4995                   | 9,7881  | 28,0525 | 6,6599  |
| 29    | 62,1594                   | 29,6670 | 7,0636  | 1,1100  |
| 30    | 4,7325                    | 77,2634 | 8,0247  | 9,9794  |
| 31    | 8,8032                    | 72,7003 | 7,2206  | 11,2760 |
| 32    | 5,1383                    | 47,0356 | 8,3992  | 39,4269 |
| 38    | 64,9547                   | 9,0634  | 21,3494 | 4,6324  |
| 39    | 65,0794                   | 10,9127 | 20,1389 | 3,8690  |
| 40    | 62,4121                   | 32,1608 | 4,3216  | 1,1055  |
| 41    | 22,3896                   | 57,5301 | 11,9478 | 8,1325  |
| 42    | 27,5275                   | 57,0571 | 8,0080  | 7,4074  |
| 43    | 18,8235                   | 42,9412 | 5,4902  | 32,5471 |

**TABELA 5.11 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS (1) PARA TESTE DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA ACOPLADA**

| Teste | Espelho (%) |          | Tipo de busca (%) |         |        | Ver. Subcat. (%) |               | Raio Subcat (graus) | Num. It. Conv |               |
|-------|-------------|----------|-------------------|---------|--------|------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|
|       | Sim         | Não      | Nenhum            | Prim.   | Sec.   | Média            | Desvio Padrão |                     | Média         | Desvio Padrão |
| 5     | 27,1739     | 72,8261  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,9800        | 1,4356        |
| 6     | 27,7778     | 72,2222  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,9483        | 1,5381        |
| 7     | 2,2222      | 97,7778  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 8     | 5,4945      | 94,5055  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 9     | 14,6067     | 85,3933  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 10    | 0,0000      | 100,0000 | 23,7113           | 76,2887 | 0,0000 | 427,0682         | 245,7661      | 12,0000             |               |               |
| 16    | 24,7191     | 75,2809  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,5161        | 1,2771        |
| 17    | 21,3483     | 78,6517  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,5968        | 1,4872        |
| 18    | 1,0989      | 98,9011  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 19    | 6,5217      | 93,4783  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 20    | 6,2500      | 93,7500  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 21    | 0,0000      | 100,0000 | 15,0000           | 84,0000 | 1,0000 | 99,1300          | 45,2255       | 30,0000             |               |               |
| 27    | 23,9216     | 76,0784  |                   |         |        |                  |               |                     | 5,1308        | 1,6537        |
| 28    | 26,0000     | 74,0000  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,9291        | 1,4275        |
| 29    | 2,7344      | 97,2656  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 30    | 6,4257      | 93,5743  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 31    | 5,8366      | 94,1634  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 32    | 0,0000      | 100,0000 | 27,3050           | 72,6950 | 0,0000 | 448,3511         | 244,7740      | 12,0000             |               |               |
| 38    | 20,2479     | 29,7521  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,6581        | 1,3311        |
| 39    | 18,2540     | 81,7460  |                   |         |        |                  |               |                     | 4,5679        | 1,4224        |
| 40    | 1,9841      | 98,0159  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 41    | 10,0806     | 89,9194  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 42    | 6,4257      | 93,5743  |                   |         |        |                  |               |                     |               |               |
| 43    | 0,0000      | 100,0000 | 22,1014           | 77,8986 | 0,0000 | 94,1268          | 48,7387       | 30,0000             |               |               |

**TABELA 5.12 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS (2) PARA TESTE DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA ACOPLADA**

| Teste | Num. Obs. C/ nota não nula |               | Média do rank de notas |               |
|-------|----------------------------|---------------|------------------------|---------------|
|       | Média                      | Desvio Padrão | Média                  | Desvio Padrão |
| 5     | 3,5657                     | 1,4857        | ∞                      | -             |
| 6     | 3,8557                     | 1,4577        | ∞                      | -             |
| 7     | 3,4896                     | 1,6026        | 1,6462                 | 0,7272        |
| 8     | 3,7475                     | 1,4870        | 1,1032                 | 0,0931        |
| 9     | 3,6061                     | 1,6277        | 1,1197                 | 0,1142        |
| 10    | 3,6186                     | 1,6166        | 1,4297                 | 0,2523        |
| 16    | 3,8866                     | 1,4569        | ∞                      | -             |
| 17    | 3,7732                     | 1,5310        | ∞                      | -             |
| 18    | 3,6667                     | 1,6036        | 1,6484                 | 0,5408        |
| 19    | 3,7938                     | 1,4211        | 1,1668                 | 0,1578        |
| 20    | 3,9898                     | 1,3199        | 1,2005                 | 0,2015        |
| 21    | 3,9900                     | 1,3446        | 1,5172                 | 0,3439        |
| 27    | 3,5125                     | 1,5949        | ∞                      | -             |
| 28    | 3,5393                     | 1,6193        | ∞                      | -             |
| 29    | 3,4143                     | 1,7122        | 1,7032                 | 0,6138        |
| 30    | 3,4468                     | 1,6486        | 1,0962                 | 0,1085        |
| 31    | 3,5979                     | 1,5556        | 1,1176                 | 0,4140        |
| 32    | 3,4504                     | 1,5781        | 1,4082                 | 0,2806        |
| 38    | 3,6241                     | 1,6578        | ∞                      | -             |
| 39    | 3,6390                     | 1,5879        | ∞                      | -             |
| 40    | 3,5162                     | 1,6781        | 1,6373                 | 0,5553        |
| 41    | 3,5445                     | 1,7172        | 1,1877                 | 0,2096        |
| 42    | 3,6196                     | 1,6080        | 1,2355                 | 0,2214        |
| 43    | 3,5725                     | 1,6040        | 1,4847                 | 0,3791        |

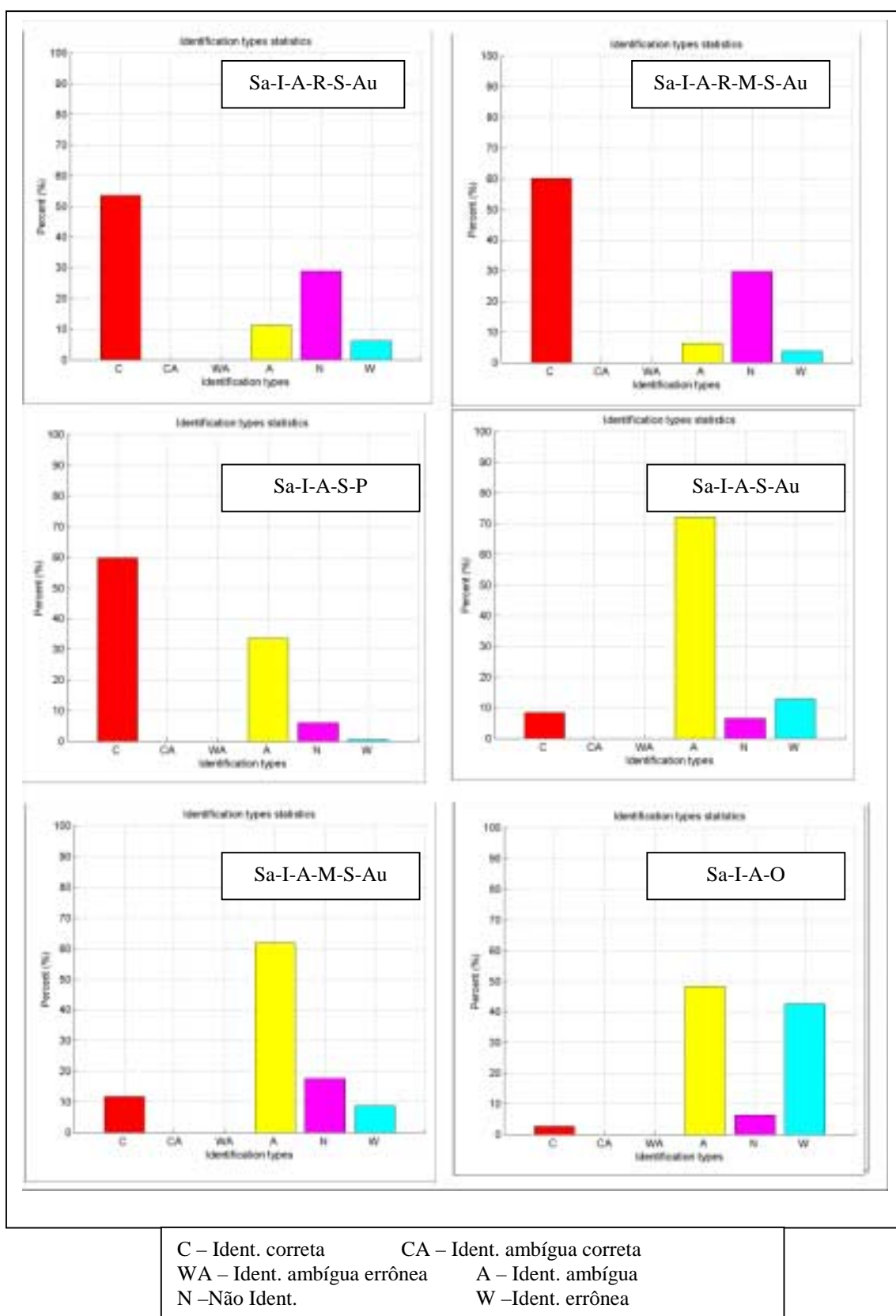


Fig. 5.13 - Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação com FOV pequeno (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 5 a 10).

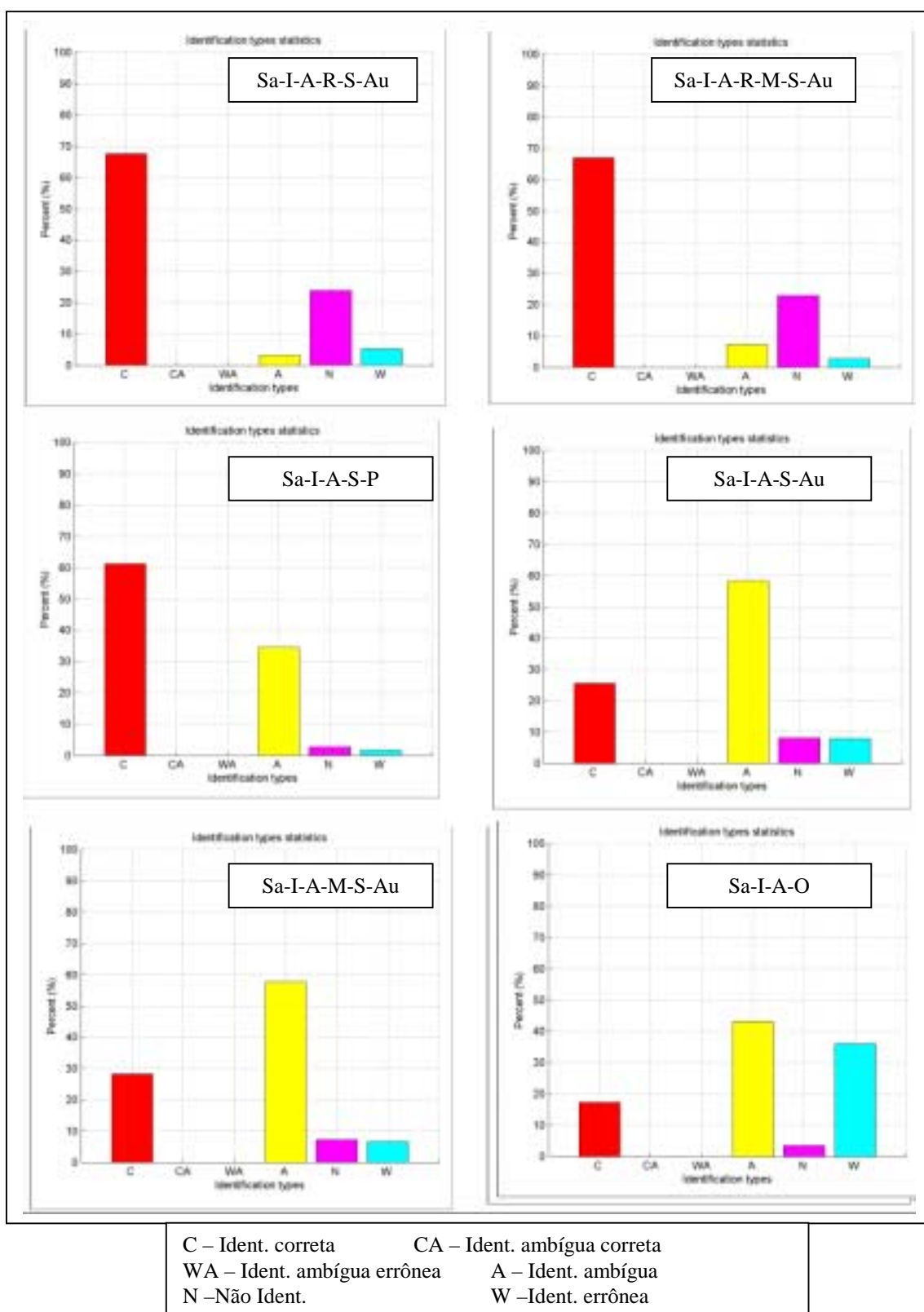


Fig. 5.14 - Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação com FOV grande (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 16 a 21).



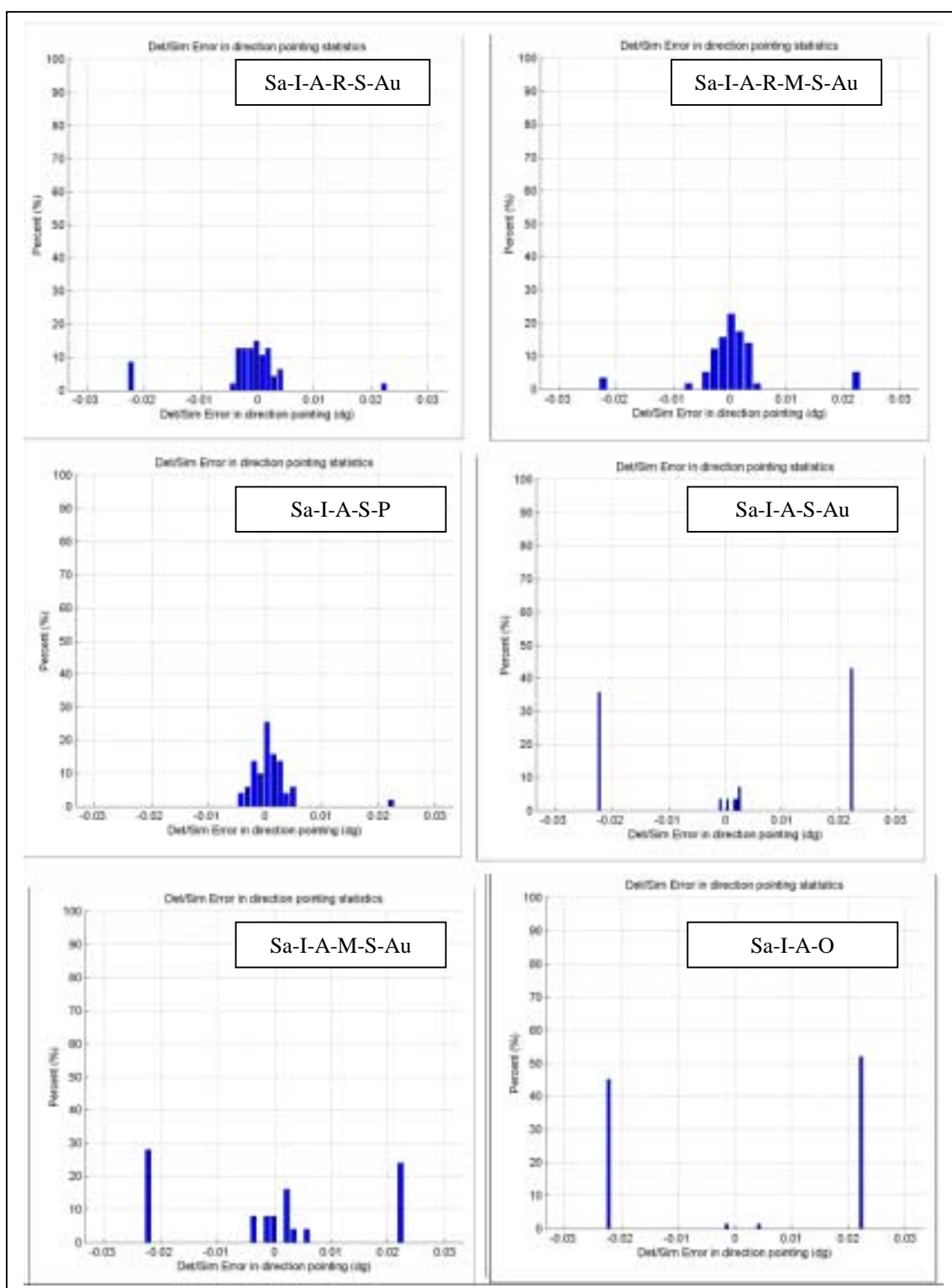


Fig. 5.15 - Precisão na direção de apontamento com FOV pequeno (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 5 a 10).

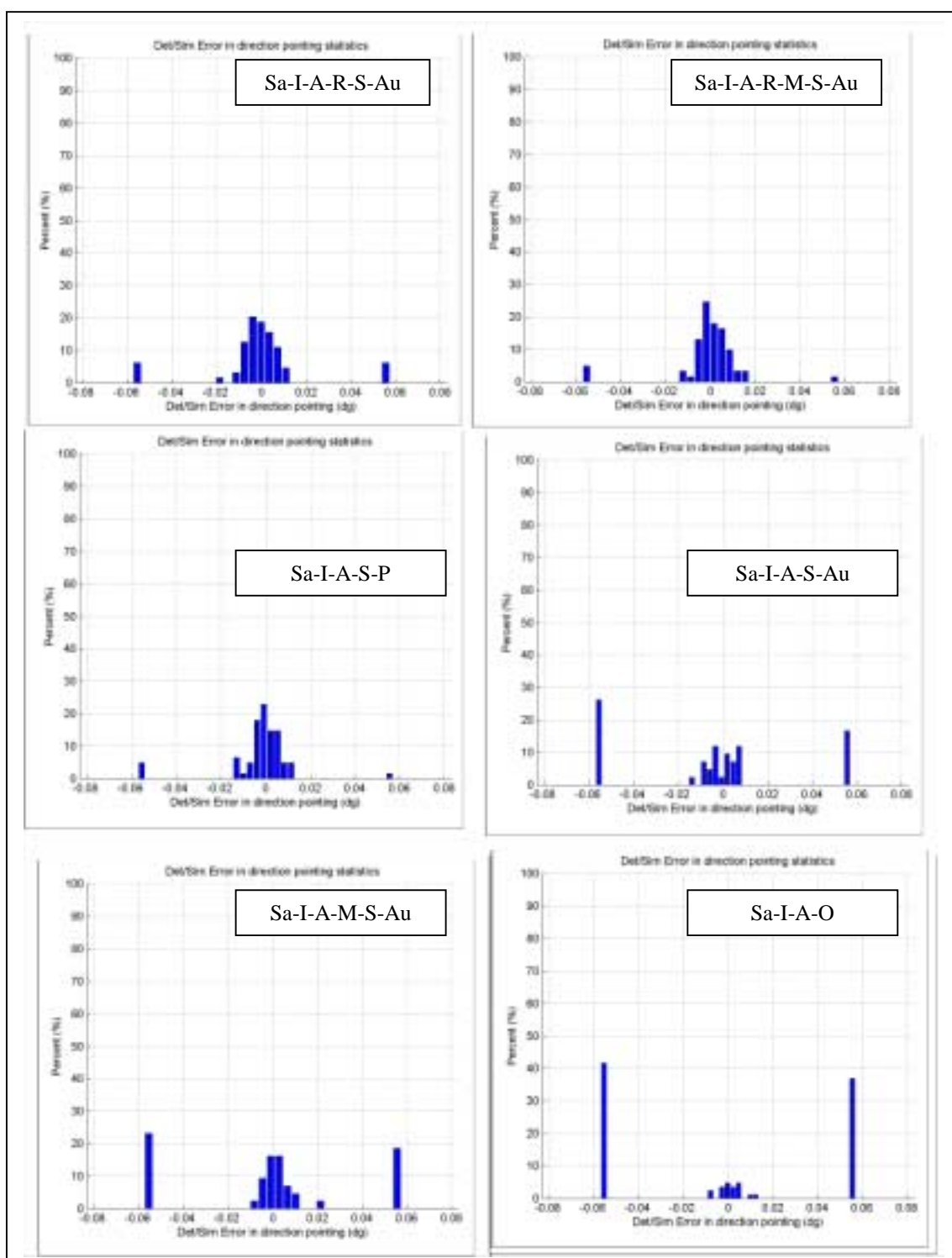


Fig. 5.16 - Precisão na direção de apontamento com FOV grande (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 16 a 21).

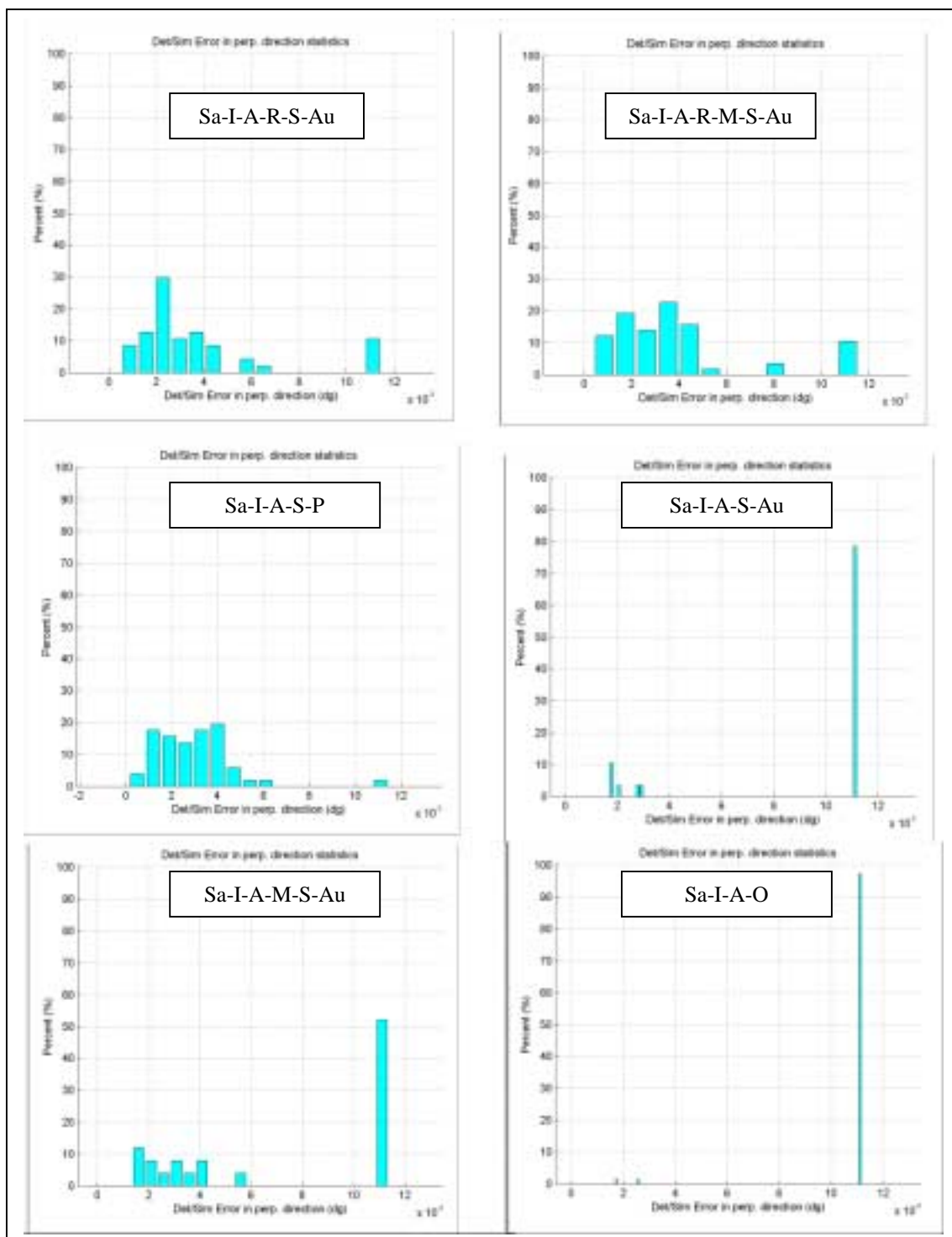


Fig. 5.17 - Precisão na direção perpendicular ao apontamento com FOV pequeno (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 5 a 10).

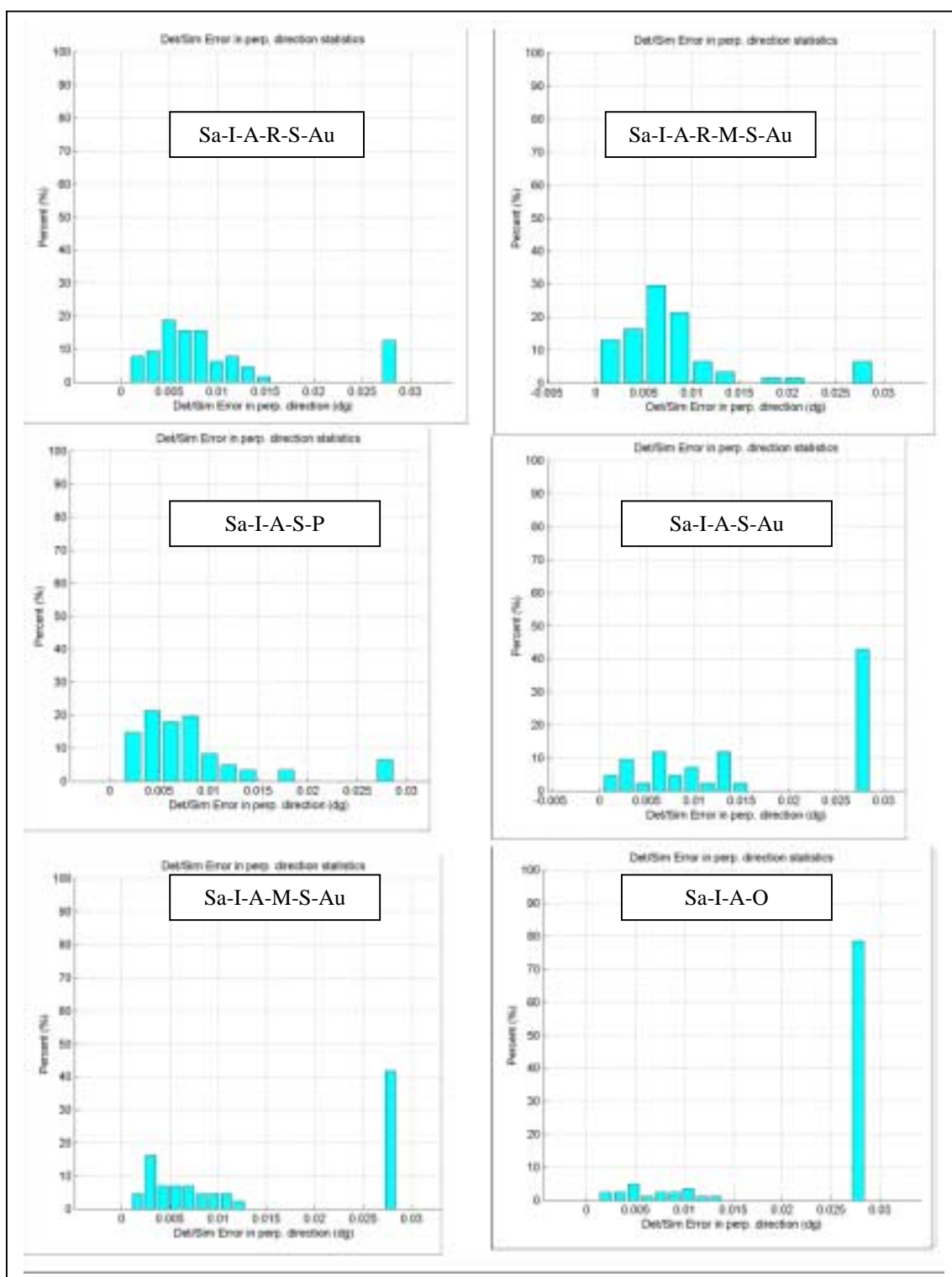


Fig. 5.18 - Precisão na direção perpendicular ao apontamento com FOV grande (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 16 a 21).

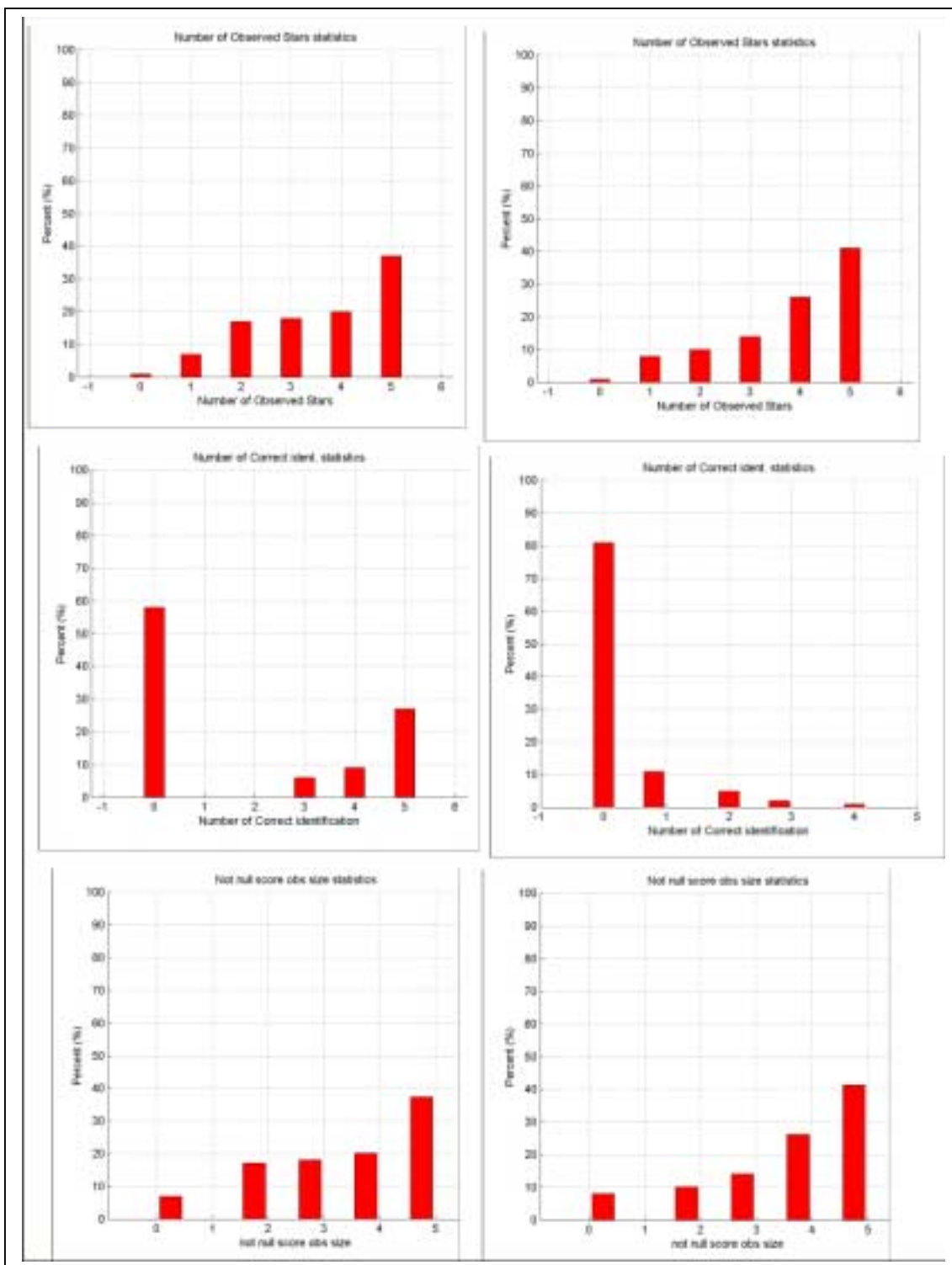
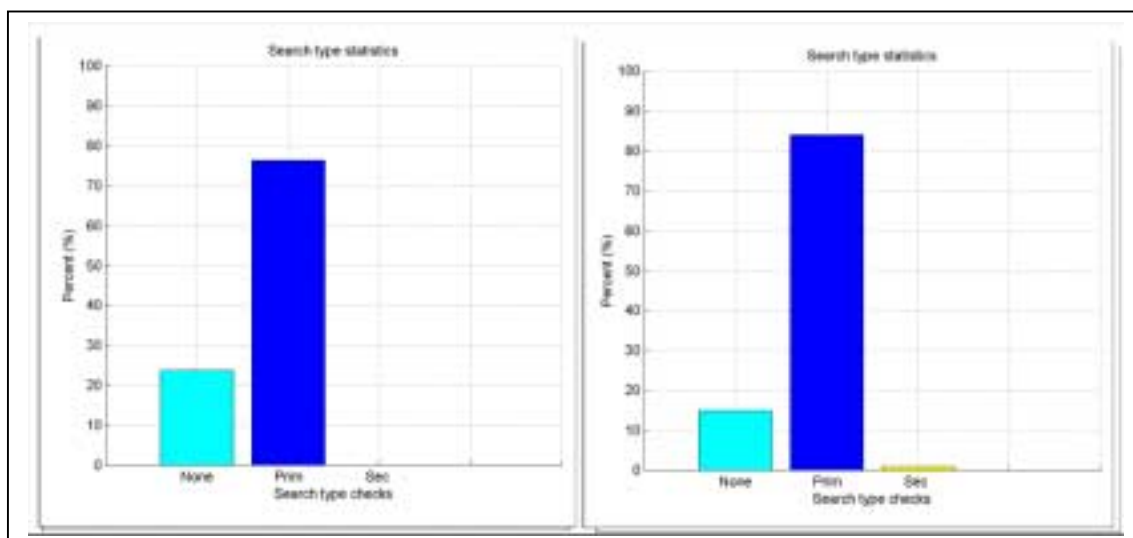


Fig. 5.19 - Número de observações (Em cima), número de identificações corretas (Centro e número de estrelas observadas com nota não nula (Em baixo) (Esquerda – teste 5, Direita – teste 8). Algoritmos Sa-I-A-R-S-Au e Sa-I-A-S-Au.



None – Não ident.  
 Prim. – Ident. com estrelas primárias  
 Sec. – Ident. com estrelas primárias

Fig. 5.20 - Tipos de busca em subcatálogo para varredura otimizada com relação ao FOV (Esquerda – teste 10, Direita – teste 21). Algoritmo: Sa-I-A-O.

#### 5.4.3.1.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS

Os algoritmos implementados para esta técnica são indiferentes ao tamanho do FOV para a relação entre o número de estrelas observadas e o número de estrelas identificadas corretamente. No entanto percebe-se claramente dois grupos de algoritmos com diferentes comportamentos.

O primeiro grupo, que inclui os recursivos e o não recursivo com varredura simples tem boa aproximação entre as observações e as identificações corretas além de apresentar boas ocorrências dos tipos de identificação. Já o segundo, que inclui os não recursivos autônomos e o não recursivo com varredura otimizada apresenta média de identificações corretas baixa frente ao número de observações (Ver Fig. 5.19) além de apresentar muitas ambigüidades sendo que o último apresenta também uma alta taxa de identificações errôneas (Ver Fig. 5.13 e 5.14).

Fica claro que a associação entre o FOV pequeno e o uso da magnitude melhora os algoritmos recursivos (Ver Fig. 5.13 e 5.14). Disso pode-se concluir que o uso da recursividade aumenta as ocorrências de identificações corretas no caso de algoritmos autônomos sendo o uso da magnitude levemente benéfico. No entanto, os não recursivos apenas são aconselháveis quando se dispõe de pré-estimativa.

No caso dos algoritmos recursivos, o uso da magnitude parece melhorar as ocorrências dos tipos de identificação favorecendo as identificações corretas apenas no caso do FOV pequeno, enquanto que não há melhora notável no caso do FOV grande (Ver Fig. 5.13 e 5.14). No caso dos não recursivos autônomos, o uso da magnitude parece não oferecer diferença, qualquer que seja o FOV (Ver Fig. 5.13 e 5.14).

Como previsto, a precisão na direção perpendicular ao apontamento (xy) é mais sensível que a precisão na direção do apontamento (z), além de corresponder em ordem de grandeza à precisão do sensor e mostrando-se mais apurada que a precisão de pré-estimativa utilizada no caso de varredura simples.

O tamanho do FOV e a magnitude a ele associada influenciam significativamente no tempo quando utiliza-se varredura otimizada. Isso ocorre por causa da diferença do tamanho do subcatálogo que deve ser verificado em cada caso. FOV grande significa maior rapidez e menor memória de armazenamento requerida tanto para a base de dados quanto para o próprio catálogo de trabalho. Como em varredura simples o programa não requer nenhuma base de dados, a memória de armazenamento requerida é sempre a mesma, ao contrário da varredura otimizada que utiliza-se de uma base de dados de subcatálogos. A mesma conclusão pode ser adotada para o caso do catálogo de pares de estrelas. Já o catálogo de trabalho, quanto maior a magnitude limite, maior a memória necessária para seu armazenamento.

Pode-se perceber que uma grande desvantagem nesta técnica é o tamanho do catálogo de pares. Para uso com magnitude limite alta, o número de pares cresce muito, requerendo memória de armazenamento e tempo de processamento mais altos. No caso dos algoritmos que funcionam de forma autônoma, o tamanho do FOV influencia no

tamanho da base de dados de pares de estrelas que deve ser consultada. FOV grande significa maior rapidez e menor memória de armazenamento requerida.

Percebe-se que a recursividade influencia no tempo de processamento com relação aos algoritmos sem iterações no cálculo de nota. Como adotou-se 10 iterações para os testes e percebe-se um fator de 10 entre os algoritmos com iteração e os sem iteração, pode-se deduzir que cada passo acrescentado aumenta o tempo de processamento com um fator de 1.

#### **5.4.3.1.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ESPECÍFICOS**

Notou-se uma grande taxa de ocorrências de condições de espelho sendo que, para algoritmos não recursivos, a presença de magnitude parece favorecer as ocorrências, enquanto que o uso de pré-estimativa as reduzem sensivelmente. No entanto, a varredura otimizada parece evitar ocorrências desta condição.

Apesar disso, a técnica parece não funcionar a contento com varredura otimizada, uma vez que neste caso ocorreram muitas ambigüidades e identificações errôneas.

Para o caso de varredura otimizada há uma alta taxa de identificações utilizando-se de estrelas primárias nos subcatálogos. Com FOV pequeno as situações que utilizam secundárias são menores que com o FOV grande (Ver Fig. 5.20). FOV pequeno favorece o tipo de busca de forma que aumenta a ocorrência de identificações com busca por estrela primária.

O número de subcatálogos verificados, como previsto, é maior no caso do FOV pequeno, devido ao tamanho de subcatálogo utilizado nesta configuração.

Deve-se atentar que a utilização desta técnica com varredura otimizada requer um certo cuidado com relação à consideração das identificações como corretas, uma vez que a primeira associação encontrada é dada por identificação, enquanto que ainda não foram checados os demais subcatálogos. Neste caso, para considerar uma estrela como identificada, não basta apenas considerar que é a que tenha a maior nota dentre todas numa coluna. Se isso ocorrer, pode haver margem a identificações errôneas quando toda a linha da matriz tem notas baixas. Assim, um estudo na adoção de notas de corte, acima das quais considera-se a estrela de maior nota como identificada, pode viabilizar meios para identificações mais seguras. Para cada tipo de cálculo de notas deve-se ter uma determinada nota de corte que tenha por objetivo eliminar ao máximo as ocorrências de identificações errôneas.

Com isso haveriam mais números de verificações em subcatálogos, uma vez que a nota de corte eliminaria identificações prévias sem um mínimo de nota para atingir o ponto de corte.

O uso da magnitude nos diversos algoritmos mostrou, de modo geral, ligeira melhoria. Para o funcionamento autônomo, além da influência da magnitude, o fato de haver iterações melhora razoavelmente o desempenho.



O número médio de iterações manteve-se em torno da metade do valor de número de iterações adotado para os testes.

O número médio de estrelas observadas com notas não nulas manteve-se próximo ao número de estrelas observadas para todos os casos enquanto que comparativamente ao número de estrelas corretamente identificadas houveram variações significativas entre os algoritmos não recursivos autônomos e com varredura otimizada (Ver Fig. 5.19).

De modo geral, esta relação não atingiu o nível de posicionar a maior nota como o dobro da segunda maior nota. Porém para algoritmos recursivos, devido à própria natureza do cálculo das notas por iteração, a relação entre as notas é expressiva, fazendo com que a segunda maior nota caia praticamente a zero e gerando uma relação muito alta. O uso da magnitude reforça de forma expressiva essa relação. Fica clara a influência desta relação, disparada nos recursivos, nas ocorrências de identificação correta e errônea.

#### **5.4.3.2 FORMA DESACOPLADA**

As Tabelas 5.13 a 5.16 e as Figuras de 5.21 a 5.24 a seguir trazem os resultados referentes aos algoritmos implementados para a técnica de identificação por avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada para os parâmetros gerais e específicos respectivamente. Em seguida são detalhados e comentados os resultados para cada um dos tipos de parâmetros onde são apresentados gráficos para facilitar a visualização do comportamento de alguns dos parâmetros avaliados.

**TABELA 5.13 - PARÂMETROS GERAIS PARA TESTE DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA DESACOPLADA**

| Teste | Memória programa<br>(código + dados)<br>(Kb) | Memória catálogo<br>(Kb) | Tempo de process. (s) |               | Nº. de estrelas obs. |               | Nº. de estr. corr. Ident. |               | Precisão $\sigma_{xy}$ (arcseg) |               | Precisão $\sigma_z$ (arcseg) |               |
|-------|--|--------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|       |  |                          | Média                 | Desvio padrão | Média                | Desvio padrão | Média                     | Desvio padrão | Média                           | Desvio padrão | Média                        | Desvio padrão |
| 11    | 133,0000                                     | 135,0000                 | 0,9600                | 2,1360        | 1,0900               | 1,1290        | 0,2000                    | 0,7107        | 9,0732                          | 4,7293        | 0,4293                       | -3,3502       |
| 22    | 41,0000                                      | 25,0000                  | 0,4400                | 0,2530        | 0,9300               | 0,9667        | 0,0900                    | 0,3786        | 15,4708                         | 4,4130        | -13,5096                     | 4,8349        |
| 33    | 133,0000                                     | 135,0000                 | 0,4800                | 0,9550        | 0,9236               | 0,9812        | 0,0972                    | 0,4769        | 12,0814                         | 9,3889        | -1,4953                      | 12,9010       |
| 44    | 41,0000                                      | 25,0000                  | 0,3580                | 0,2210        | 1,0694               | 1,1815        | 0,2639                    | 0,8714        | 22,8272                         | 12,4060       | 2,0752                       | 24,9850       |

**TABELA 5.14 - OCORRÊNCIAS DOS TIPOS DE IDENTIFICAÇÃO NOS TESTES DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA DESACOPLADA**

| Teste     | Nº. de Identificações (%) |         |         |         |
|-----------|---------------------------|---------|---------|---------|
|           | Real                      |         |         |         |
|           | Corr.                     | Amb.    | Não id. | Err.    |
| <b>11</b> | 18,3486                   | 74,3119 | 0,0000  | 7,3394  |
| <b>22</b> | 9,6774                    | 77,4194 | 0,0000  | 12,9032 |
| <b>33</b> | 10,5263                   | 85,3383 | 0,0000  | 4,1353  |
| <b>44</b> | 24,6753                   | 66,8831 | 0,0000  | 8,4416  |

**TABELA 5.15 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS REFERENTES ÀS ESTRELAS NOS TESTES DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA DESACOPLADA**

| Teste     | Número de estrelas guia |               | Número de estrelas externas |               | Média do núm. de estr. no domínio |               |
|-----------|-------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
|           | Média                   | Desvio Padrão | Média                       | Desvio Padrão | Média                             | Desvio Padrão |
| <b>11</b> | 1,6769                  | 0,9860        | 5,9692                      | 2,8938        | 0,9756                            | 1,2968        |
| <b>22</b> | 1,5246                  | 0,7875        | 5,9508                      | 2,7894        | 0,6516                            | 0,8936        |
| <b>33</b> | 1,4944                  | 0,8387        | 4,8764                      | 2,9757        | 0,6379                            | 0,8823        |
| <b>44</b> | 1,7111                  | 1,0649        | 5,8889                      | 3,7010        | 0,9319                            | 1,0975        |

**TABELA 5.16 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS REFERENTES AOS PADRÕES BINÁRIOS NOS TESTES DA TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO NA FORMA DESACOPLADA**

| Teste | Padrão de identificação (%) |            | Média do número de bits errados |               |
|-------|-----------------------------|------------|---------------------------------|---------------|
|       | Exato                       | Aproximado | Média                           | Desvio Padrão |
| 11    | 46,4286                     | 53,5714    | 0,0077                          | 0,2775        |
| 22    | 47,6190                     | 52,3810    | 0,0984                          | 0,2925        |
| 33    | 53,8462                     | 46,1538    | 0,0394                          | 0,0171        |
| 44    | 68,6275                     | 31,3725    | 0,0774                          | 0,2198        |

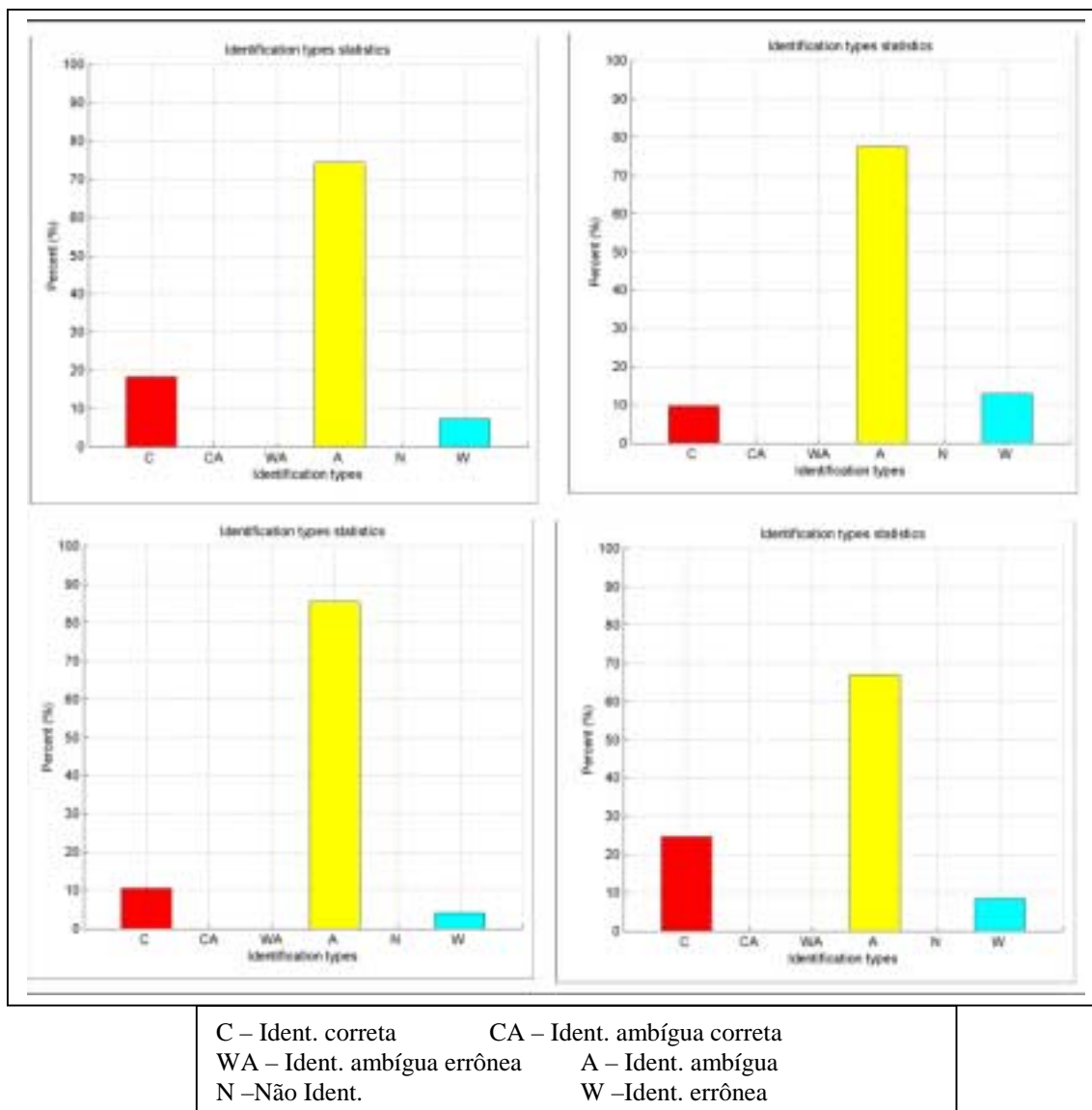


Fig. 5.21 - Diferenças na ocorrência real dos tipos de identificação (Esquerda -FOV pequeno, Direita – FOV grande, Em cima – sim. Aleatória, Em baixo – sim. Dinâmica) (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 11, 22, 33 e 44). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.

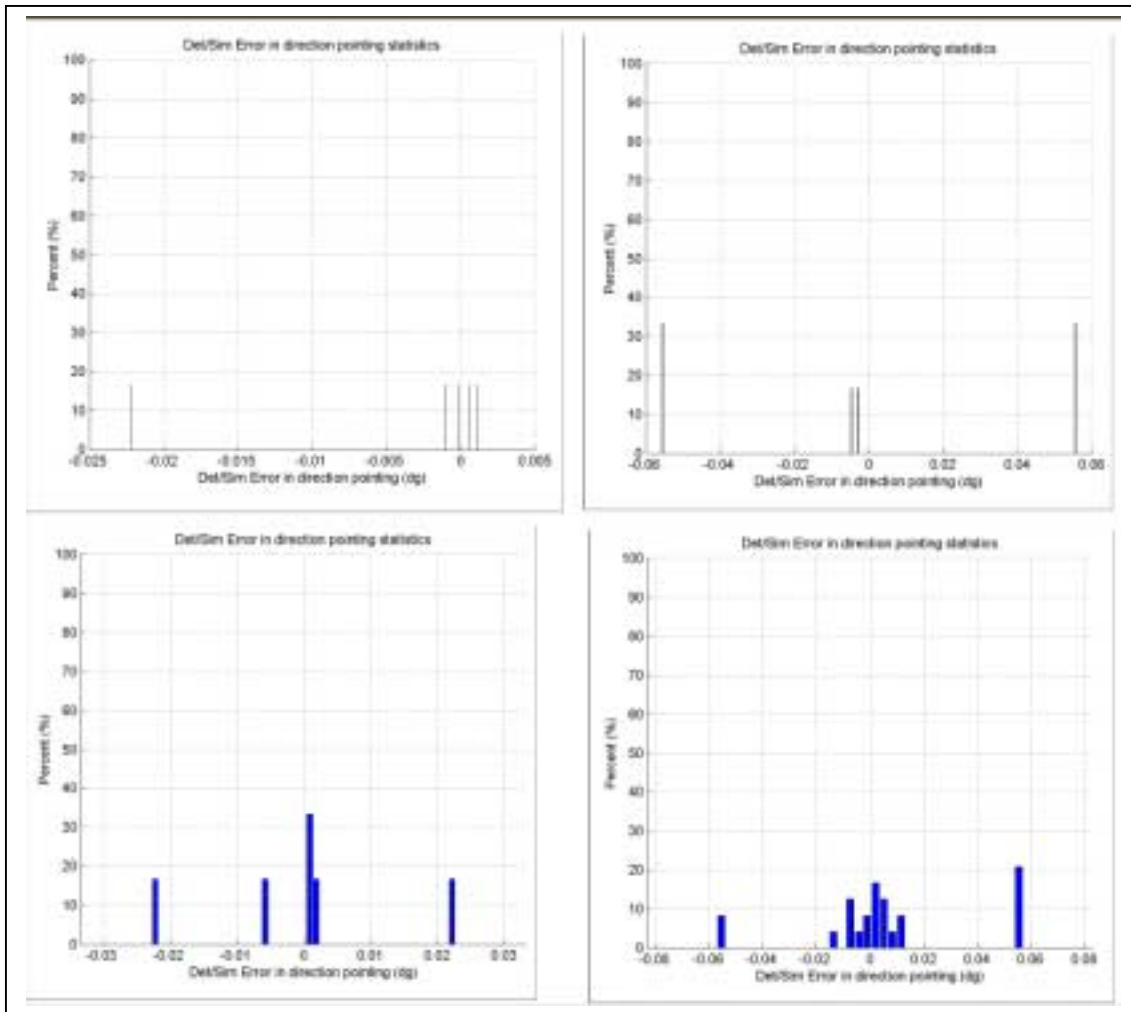


Fig. 5.22 - Precisão na direção de apontamento (Esquerda -FOV pequeno, Direita – FOV grande, Em cima – sim. Aleatória, Em baixo – sim. Dinâmica) (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 11, 22, 33 e 44). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.



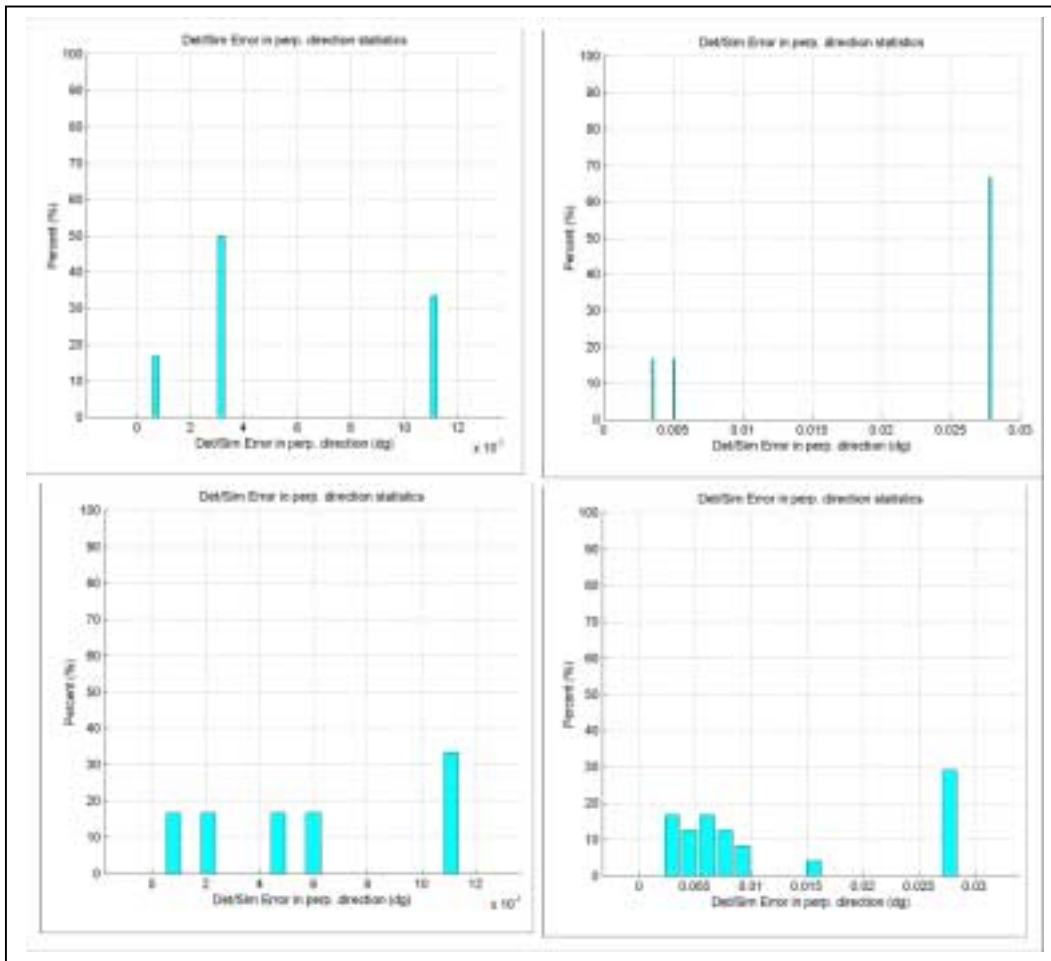


Fig. 5.23 - Precisão na direção perpendicular ao apontamento (Esquerda -FOV pequeno, Direita – FOV grande, Em cima – sim. Aleatória, Em baixo – sim. Dinâmica) (De cima para baixo da esquerda para direita - testes 11, 22, 33 e 44). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.

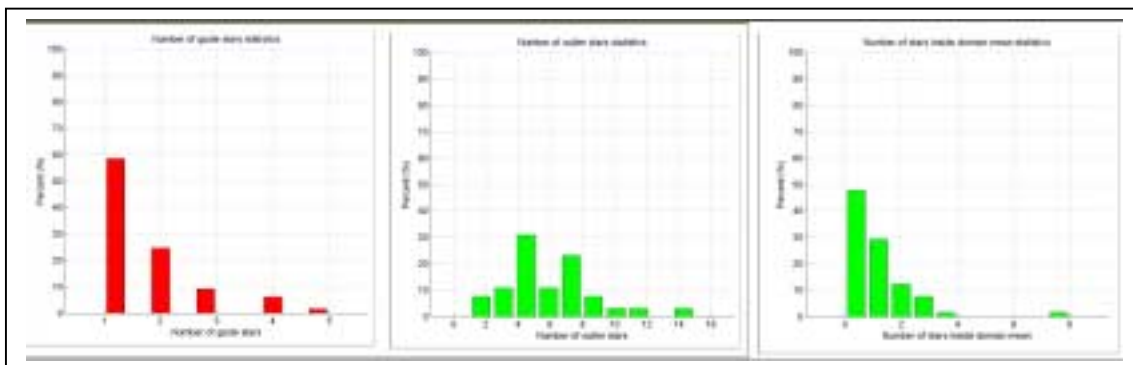


Fig. 5.24 - Número de estrelas guia no FOV interno (Esquerda), número de estrelas no FOV externo (Centro) e número de estrelas dentro do domínio da guia (Direita) (teste 11). Algoritmo: Sa-I-De-S-Au.

#### **5.4.3.2.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS**

Esta técnica apresenta uma certa inversão de comportamento para as ocorrências dos tipos de identificação com relação ao tipo de simulação e ao FOV (Ver Fig. 5.21). O FOV grande parece piorar o desempenho quando em simulação aleatória, enquanto que parece melhorar quando em simulação dinâmica.

De forma geral, os algoritmos implementados para esta técnica apresentam muitas ambigüidades e equivalência nas ocorrências entre identificações corretas e errôneas, no entanto apresentando mais corretas que errôneas.

Como previsto, a precisão na direção perpendicular ao apontamento (xy) é mais sensível que a precisão na direção do apontamento (z), além de corresponder em ordem de grandeza à precisão do sensor. Porém esta precisão apresentou uma ligeira piora para o caso de simulação dinâmica (Ver Fig. 5.22).

O número de estrelas observadas manteve-se muito abaixo do esperado, indicando que o número de estrelas guia presentes no FOV interno do sensor foi insuficiente. Talvez uma forma de melhorar esse desempenho fosse o de aumentar a magnitude limite do sensor e catálogo de trabalho acima do valor utilizado para cada tamanho de sensor testado. Como consequência, o número de estrelas identificadas corretamente também manteve-se muito abaixo do esperado.

É importante notar que o tamanho do FOV e a magnitude a ele associada influenciam significativamente no tamanho da base de dados que deve ser verificada em cada caso. FOV pequeno significa maior memória de armazenamento requerida tanto para a base de dados quanto para o próprio catálogo de trabalho devido à magnitude limite associada mais alta. Porém pode-se dizer que uma grande vantagem nesta técnica é o tamanho da base de dados. Para uso com magnitude limite alta, apesar do número de estrelas ser grande, a utilização de representação dos padrões com números decimais reduz bastante a memória de armazenamento necessária.

Dessa forma, a técnica é altamente dependente da relação entre o tamanho do FOV e a magnitude limite. Esta relação influi significativamente de forma a aumentar ou diminuir o número de estrelas guia observadas e desta forma o número possível de identificações corretas.

#### **5.4.3.2.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ESPECÍFICOS**

Como o número de estrelas observadas foi baixo, o número de estrelas guia, por consequência, também manteve-se baixo, o que inviabilizou o bom funcionamento da técnica, uma vez que as identificações ocorrem em cima destas estrelas. Uma ação direta que pode ser tomada é o estudo de formas de aumentar o número de estrelas guia disponíveis no FOV interno do sensor (Ver Fig. 5.24).

Por exemplo, para o caso do sensor em configuração com FOV grande, com uso de FOV interno, a abertura é de  $20^0 \times 20^0$  e a magnitude limite de 4 (cerca de 520 estrelas no

catálogo de trabalho), sendo o tamanho do FOV interno de  $10^0 \times 10^0$ . Já para o caso do sensor em configuração com FOV pequeno, sem uso de FOV interno, a abertura é de  $8^0 \times 8^0$  e a magnitude limite de 5.5 (cerca de 2800 estrelas no catálogo de trabalho). Em termos comparativos, nota-se que o FOV interno no primeiro caso é aproximadamente do mesmo tamanho do FOV no segundo caso, tendo porém a ele associada a magnitude utilizada com o FOV externo que é o dobro do tamanho. Isso significa que o tratamento de magnitudes deve ser particularizado para FOV externo e interno, dessa forma colocando ambos em situações de equivalência em números de observações.

Ao contrário do número de estrelas guia, o número de estrelas observadas relativas ao FOV externo foi satisfatório e suficiente para formar os padrões com as estrelas guia para a ocorrência de possibilidade de identificação (Ver Fig. 5.24). Porém, o número de estrelas presente dentro do domínio da estrela guia foi insuficiente.

Esse comportamento na formação dos padrões não é benéfico, uma vez que o número de ambiguidades resultantes é muito alto devido ao grande número de padrões possíveis (Ver Fig. 5.24).

De forma geral, houve equivalência nos padrões de identificação, o que resultou no comportamento equivalente entre identificações corretas e errôneas. O ideal seria que o exato fosse favorecido em relação ao aproximado, de forma a beneficiar as identificações corretas. Nesses casos, a média do número de bits errados mostrou uma certa dependência com o FOV. FOV grande aumenta o número de bits errados.

#### **5.4.4 AVALIAÇÃO GLOBAL**

As Tabelas 5.17 e 5.18 a seguir trazem os resultados comparativos entre os algoritmos implementados para as técnicas de identificação de estrelas implementadas para os casos aleatório e dinâmico respectivamente. Em seguida são detalhados e comentados os resultados.

**TABELA 5.17 - AVALIAÇÃO GLOBAL DAS TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS – CASO ALEATÓRIO**

| Algoritmo       | FOV pequeno   |                                 |                          |                  | FOV grande   |                                 |                          |                  |
|-----------------|---|---------------------------------|--------------------------|------------------|--|---------------------------------|--------------------------|------------------|
|                 | Memória<br>programa<br><br>(código + dados)<br><br>(Kb) | Memória<br>catálogo<br><br>(Kb) | Tempo de<br>process. (s) |                  | Memória<br>programa<br><br>(código +<br>dados)<br><br>(Kb) | Memória<br>catálogo<br><br>(Kb) | Tempo de<br>process. (s) |                  |
|                 |   |                                 | Média                    | Desvio<br>padrão |  |                                 | Média                    | Desvio<br>padrão |
| D-Or-S-P        | 11  | 135                             | 1,0                      | 0,1              | 11   | 25                              | 0,5                      | 0,1              |
| D-Or-B-S-P      | 11  | 135                             | 1,0                      | 0,1              | 11   | 25                              | 0,5                      | 0,1              |
| Sa-C-M-S-P      | 21  | 135                             | 1,0                      | 0,3              | 21   | 25                              | 0,6                      | 0,3              |
| Sa-C-M-O        | 981   | 135                             | 53,0                     | 152,8            | 246  | 25                              | 17,4                     | 58,9             |
| Sa-I-A-R-M-S-Au | 1.120   | 135                             | 14,3                     | 11,7             | 238  | 25                              | 1,5                      | 0,8              |
| Sa-I-A-R-S-Au   | 1.120   | 135                             | 8,1                      | 5,2              | 238  | 25                              | 1,5                      | 0,9              |
| Sa-I-A-S-P      | 23  | 135                             | 1,1                      | 0,2              | 23   | 25                              | 0,5                      | 0,1              |
| Sa-I-A-S-Au     | 1.120   | 135                             | 1,8                      | 0,7              | 238  | 25                              | 0,5                      | 0,1              |
| Sa-I-A-M-S-Au   | 1.120   | 135                             | 1,8                      | 0,8              | 238  | 25                              | 0,6                      | 0,1              |
| Sa-I-A-O        | 981   | 135                             | 147,2                    | 516,1            | 246  | 25                              | 4,0                      | 11,1             |
| Sa-I-De-S-Au    | 133   | 135                             | 1,0                      | 2,1              | 41   | 25                              | 0,4                      | 0,3              |

- Uso de pré-estimativa
- Uso de varredura otimizada
- Algoritmo autônomo

**TABELA 5.18 - AVALIAÇÃO GLOBAL DAS TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS – CASO DINÂMICO**

| Algoritmo              | FOV pequeno                             |                             |                          |                  | FOV grande                                 |                             |                          |                  |
|------------------------|---|-----------------------------|--------------------------|------------------|--|-----------------------------|--------------------------|------------------|
|                        | Memória<br>programa<br>(código + dados) | Memória<br>catálogo<br>(Kb) | Tempo de<br>process. (s) |                  | Memória<br>programa<br>(código +<br>dados) | Memória<br>catálogo<br>(Kb) | Tempo de<br>process. (s) |                  |
|                        | (Kb)                                    |                             | Média                    | Desvio<br>padrão | (Kb)                                       |                             | Média                    | Desvio<br>padrão |
| <b>D-Or-S-P</b>        | 11                                      | 135                         | 1,1                      | 0,3              | 11   | 25                          | 0,5                      | 0,1              |
| <b>D-Or-B-S-P</b>      | 11                                      | 135                         | 1,0                      | 0,1              | 11   | 25                          | 0,6                      | 0,2              |
| <b>Sa-C-M-S-P</b>      | 21                                      | 135                         | 1,0                      | 0,4              | 21   | 25                          | 0,6                      | 0,3              |
| <b>Sa-C-M-O</b>        | 981                                     | 135                         | 83,1                     | 314,7            | 246  | 25                          | 26,1                     | 63,1             |
| <b>Sa-I-A-R-M-S-Au</b> | 1.120                                   | 135                         | 8,5                      | 6,8              | 238  | 25                          | 1,4                      | 0,8              |
| <b>Sa-I-A-R-S-Au</b>   | 1.120                                   | 135                         | 7,4                      | 5,0              | 238  | 25                          | 1,5                      | 0,8              |
| <b>Sa-I-A-S-P</b>      | 23                                      | 135                         | 1,1                      | 0,2              | 23   | 25                          | 0,5                      | 0,1              |
| <b>Sa-I-A-S-Au</b>     | 1.120                                   | 135                         | 1,7                      | 0,8              | 238  | 25                          | 0,5                      | 0,2              |
| <b>Sa-I-A-M-S-Au</b>   | 1.120                                   | 135                         | 1,8                      | 0,8              | 238  | 25                          | 0,6                      | 0,2              |
| <b>Sa-I-A-O</b>        | 981                                     | 135                         | 184,3                    | 480,6            | 246  | 25                          | 5,6                      | 16,1             |
| <b>Sa-I-De-S-Au</b>    | 133                                     | 135                         | 0,5                      | 1,0              | 41   | 25                          | 0,4                      | 0,2              |

- Uso de pré-estimativa
- Uso de varredura otimizada
- Algoritmo autônomo

#### 5.4.4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS

Para facilitar a análise global, os algoritmos foram divididos em 3 categorias principais (Ver Tabelas 5.17 e 5.18). A saber:

- Algoritmos com uso de pré-estimativa;
- Algoritmos com uso de varredura otimizada;
- Algoritmos autônomos.

É importante notar que os resultados obtidos refletem as configurações escolhidas para teste. Dessa forma, podem ocorrer alterações caso as configurações sejam alteradas. Com isso é possível que algoritmos que apresentaram algum tipo de desvantagem com relação aos outros, possam vir a apresentar vantagem em uma configuração diversa.

É fácil perceber que os algoritmos que se utilizam de pré-estimativa, por se basearem em informações externas providas por sensores auxiliares, encontram-se possivelmente em situação melhor de identificação. Dessa forma não é necessário nenhum tipo de base de dados que deva se armazenado. Isso contribui no tamanho reduzido de memória requerido. Assim, como não há necessidade de se processar base de dados, o tempo de processamento torna-se bastante reduzido.

Nos algoritmos com varredura otimizada, por não se beneficiarem de informações prévias da atitude, há a necessidade de uma técnica auxiliar e uma base de dados para promover a varredura do catálogo de forma a posicionar o algoritmo na melhor região possível para o processo de identificação. Assim, nota-se um aumento expressivo no tamanho da memória requerida e do tempo para processar os dados.

Nos algoritmos autônomos, da mesma forma que naqueles com varredura otimizada, por não se beneficiarem de informações prévias da atitude, também há necessidade de uma base de dados para promover a varredura do catálogo de forma a posicionar o algoritmo na melhor região possível para o processo de identificação. No entanto, ao contrário daqueles que usam a varredura otimizada auxiliar, os algoritmos autônomos utilizam-se de suas próprias bases de dados e processo de varredura do catálogo. Assim, também nota-se um aumento expressivo no tamanho da memória requerida e do tempo para processar os dados.

Porém, é importante notar o algoritmo Sa-I-De-S-Au (Identificação por separações angulares com avaliação de índice de desempenho na forma desacoplada autônomo). Este algoritmo, apesar de apresentar a mesma característica de autonomia dos demais, requer uma base de dados menor e dessa forma também um tempo de processamento menor. Isso ocorre graças ao formato decimal de armazenamento da sua base de dados. Pode-se destacar uma vantagem na sua utilização sobre os algoritmos com pré-estimativa no que tange ao tempo e memória. Apesar de necessitar de um sensor específico, este algoritmo não requer sensor auxiliar e gasta o mesmo tempo e quase o mesmo tamanho de memória que aqueles que utilizam-se de pré-estimativa.

Notam-se diferenças significativas nos tamanhos das bases autônomas e da varredura otimizada quando utilizam-se configurações diferentes de FOV e magnitude limite de

catálogo, uma vez que o número de estrelas a ser observado muda tanto pela magnitude limite observável, como pela área de observação do FOV. Além disso, alteram-se também os tempos de processamento necessários. Quanto menor a magnitude limite menor o número de estrelas e assim menor o tamanho da base de dados e o tempo para processamento. Já no caso do tamanho do FOV, maiores tamanhos de FOV para a varredura otimizada significam menor número de subcatálogos, enquanto que para os algoritmos autônomos o número de pares de estrelas observados cresce. Isso mostra que é importante ponderar entre esses fatores, aplicados a cada algoritmo individualmente.

Pode-se notar também que os algoritmos recursivos Sa-I-A-R-M-S-Au (Identificação por separações angulares com avaliação de índice de desempenho na forma acoplada com cálculo recursivo e utilização de magnitudes autônomo) apresentam maior tempo de cálculo que os respectivos não recursivos, uma vez que o tempo utilizado nas iterações de cálculo é tanto maior quanto maior o número de iterações. Assim, pode-se concluir que, se há informação prévia de atitude disponível, não seria necessário o uso de forma recursiva de cálculo, uma vez que isto apenas contribuiria para o aumento do tempo de processamento.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Neste Capítulo apresentam-se as conclusões finais do estudo teórico dos métodos e técnicas de identificação, técnica de otimização de varredura e testes realizados para cada uma das variações implementadas.

Apresentam-se também menções às lições aprendidas durante o desenvolvimento do trabalho, tanto no aspecto técnico como aspectos que envolvem o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado na produção de um trabalho de pesquisa científica.

Por fim, propostas de melhorias e trabalhos futuros são apresentados com base na experiência obtida no desenvolvimento, abordando pontos que relacionam-se com a determinação de atitude através de observações de sensores de estrelas, mas que não encontram-se dentro do escopo proposto para este trabalho.

#### 6.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Da análise individual das técnicas foi possível extrair os pontos de maior relevância para cada técnica de identificação de estrelas.

Primeiramente, foi possível constatar, de forma preliminar, a validade da ferramenta através da coerência entre os resultados apresentados para os testes via simulação e com a utilização de dados reais provindos do satélite alemão **ROSAT**.

A influência do tamanho relativo entre o FOV e o raio de busca otimizado no caso do método da justaposição direta com otimização do raio do domínio de busca é efetiva no sentido de aproximar as ocorrências para os tipos de identificação com a previsão teórica segundo as faixas dos múltiplos critérios. No entanto, o estabelecimento das faixas para os múltiplos critérios deve estar vinculado tanto ao tamanho do FOV utilizado como à magnitude limite do catálogo de trabalho.

Os resultados apresentados para o algoritmo com resolução de ambiguidades mostraram que este problema deve ser sistematicamente estudado para que se defina uma estratégia aceitável para tratamento de identificações ambíguas. A simples consideração da estrela mais próxima pode levar o algoritmo a cometer uma identificação errônea e dessa forma piorar o desempenho do sistema de determinação.

Os testes apresentados para a técnica de identificação por confirmações sucessivas demonstraram o bom desempenho com a utilização de pré-estimativa. Além disso, notou-se também a possibilidade de identificações mesmo sem a presença da pré-estimativa com a utilização de técnica de otimização da varredura. No entanto, percebeu-se notavelmente que a utilização da pré-estimativa requer menos verificações de pares de estrelas formados com a mais brilhante, uma vez que a técnica encontra-se numa situação prévia melhor para executar a identificação. É importante notar que o tamanho do FOV em conjunto com uma maior sensibilidade do sensor à magnitude

também contribui significativamente para o número de estrelas no campo e dessa forma aumentando o número de verificações necessárias.

Em geral, o comportamento dos algoritmos demonstrou que a relação entre FOV e magnitude limite é marcante. A utilização de magnitudes, a menos de particularidades referentes ao algoritmo, deve ser vinculada ao tamanho do FOV de forma a manter uma relação de equivalência quanto ao número médio de estrelas observadas. Sensores com FOV pequeno devem ser mais sensíveis à magnitude que aqueles com FOV grande. Isso deve ser refletido também para o catálogo de trabalho que cada um deles for utilizar

Deve-se também considerar que a maior ocorrência de não identificações é atribuída à grande sensibilidade do sensor à magnitude. Assim, esta deve estar abaixo da magnitude limite do catálogo de trabalho, de forma a evitar que ocorram observações não presentes no mesmo. Caso contrário, um catálogo com maior magnitude limite deve ser providenciado.

Em alguns casos a relação entre o tamanho do FOV e a magnitude limite é de extrema importância, como é o caso da técnica de avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada. Neste caso, a relação entre o tamanho do FOV interno e a magnitude limite definida de forma geral para o sensor prejudicou o funcionamento do mesmo devido ao número baixo de estrelas guia presente no FOV interno e necessárias para a identificação de estrelas.

Notou-se também a importância do tamanho do FOV quanto aos algoritmos que se utilizaram da técnica de varredura otimizada. Nestes casos, a utilização de FOVs grande não se mostrou satisfatória, visto que estes acabam gerando subcatálogos de raios muito grande e que por sua vez acabam por abranger uma região ampla na esfera celeste. O efeito prático disso é que o algoritmo de identificação, ao varrer diversos subcatálogos, acaba varrendo a esfera celeste toda diversas vezes. FOVs menores implicam em subcatálogos menores e dessa forma melhor eficiência na busca.

Para os casos onde há necessidade de bases de dados extras, o tamanho do FOV e a magnitude a ele associada influenciam significativamente no tamanho da memória requerida pelo algoritmo e sua base de dados. Da mesma forma, por consequência, há uma influência direta no tempo de processamento. Em geral FOVs maiores significam maior rapidez e menor memória de armazenamento requerida tanto para a base de dados quanto para o próprio catálogo de trabalho.

Para os casos com varredura otimizada ou com utilização de pares de estrelas essa regra é notavelmente forte, apresentando certa desvantagem na utilização em casos com magnitude limite alta, onde o número de estrelas é elevado. Com isso a memória requerida e o tempo de processamento são mais altos.

No entanto é importante notar que essa regra pode ser quebrada quando observa-se a técnica de avaliação do índice de desempenho na forma desacoplada. Esta técnica apresenta uma grande vantagem em memória de armazenamento na utilização com magnitudes altas devido à extrema compactação de sua base de dados através da

formação de padrões binários armazenados de forma decimal. Apesar desta técnica requerer um processamento especial de forma a contemplar a saída de estrelas guia presentes no FOV interno, ela pode ser aplicada com utilização de sensores comuns, sendo possível utilizar os mesmos sensores utilizados para os demais testes.

Como previsto, a precisão na direção perpendicular ao apontamento (xy) mostrou-se mais sensível que a precisão na direção do apontamento (z), além de corresponder em ordem de grandeza à precisão do sensor e mostrando-se mais apurada que a precisão de pré-estimativa utilizada no caso de varredura simples.

## **6.2 LIÇÕES APRENDIDAS**

Durante o desenvolvimento, um dos pontos mais marcantes foi a utilização de uma metodologia de trabalho com regras que auxiliassem e disciplinassem o desenvolvimento, promovendo o controle de configuração tanto para o *software* como para este documento.

O principal resultado prático dessa metodologia foi obtido com a conclusão deste trabalho sem que, no entanto, ocorresse a perda dos detalhes, idéias e sugestões que ocorreram durante o desenvolvimento do mesmo.

A importância de uma metodologia de controle de configuração reflete-se, não apenas pela recuperação de dados, como também na prevenção contra perda ou danificação dos mesmos por efeitos externos físicos ou virtuais.

Como idéia geral prática do processo, pode-se mencionar, desde o início do desenvolvimento até o término, um total de 257 versões do *software* variando de 325 Kb a 6377 Kb de tamanho, e 137 deste documento de dissertação variando de 518 Kb a 3658 Kb de tamanho.

Outro ponto marcante foi o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação e testes que pudesse ajudar em outros trabalhos ou mesmo em projetos reais. Dessa forma, uma ferramenta computacional contendo um ambiente de simulação e testes foi desenvolvida para viabilizar não só o estudo prático deste trabalho como de possíveis trabalhos futuros, além de facilitar o projeto e avaliação de implementação de requisitos de sistemas de determinação de atitude baseados em sensores de estrelas

O desenvolvimento desta ferramenta, justificou-se na geração automática e padronizada dos resultados dos casos de teste elaborados, além de possibilitar que os mesmos fossem armazenados de uma forma sistemática para posteriores análises. Isso enfatiza um grande ganho para o aprendizado de engenharia de testes.

Com o desenvolvimento desta ferramenta, alguns detalhes necessitaram de uma atenção que não lhes seria dispensada caso não houvesse a preocupação com a generalidade no desenvolvimento das interfaces entre os modelos utilizados. Este tipo de preocupação forçou uma análise mais detalhada tanto dos modelos das técnicas de identificação como dos demais modelos envolvidos no sistema de determinação de atitude.

Dessa forma, houve um maior entendimento das reais necessidades e possibilidades para cada modelo, além de promover uma investigação envolvendo possíveis necessidades futuras em técnicas a serem desenvolvidas e estudadas com o auxílio da ferramenta.

Como pode-se perceber, houve um ganho real com o desenvolvimento dessa ferramenta, mostrando a importância da avaliação deste tipo de desenvolvimento em trabalhos científicos. Se da avaliação resultar que pode haver um ganho significativo para a contribuição científica pretendida pelo trabalho, os autores dos mesmos, em conjunto com seus respectivos orientadores, devem se auto desafiar a promover o máximo de contribuição que o trabalho pode gerar. Isso se mostrou possível e altamente satisfatório na prática.

Pode-se mencionar também a percepção de um aspecto relativamente marcante na pesquisa científica. Quando um trabalho é finalizado, muitos pontos de estudo são abertos, até mais do que antes do início do mesmo. Espera-se que este tenha contribuído com o seu propósito e aberto importantes questões para pesquisas futuras na área.

### **6.3 MELHORIAS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Durante o desenvolvimento deste trabalho, muitas questões surgiram com respeito a pontos que poderiam ser explorados com mais detalhes, sendo no entanto considerados como melhorias ou temas para possíveis trabalhos futuros.

Em particular, a metodologia utilizada auxiliou no registro das idéias que surgiram durante o decorrer do trabalho, como é comum ocorrer no desenvolvimento de qualquer trabalho científico, evitando que as mesmas fossem esquecidas ou até mesmo causassem a perda de foco no objetivo proposto.

As idéias consideradas como melhorias são as abaixo listadas:

- Modelagem dos movimentos de corpos na esfera celeste tais como planetas, cometas, asteroídes, Sol, Lua e demais que possam ser observados no FOV do sensor e que não se enquadram na categoria de estrelas catalogadas. Dessa forma, torna-se possível a minimização de erros por observações não constantes do catálogo de estrelas;
- Modelagem mais completa do sensor de pré-estimativa;
- Modelagem do tratamento eletrônico da CCD à resposta dos pixels com cálculo de centróides e consideração das relações entre magnitude instrumental e visual;
- Permitir ao usuário inserir suas próprias funções, aumentando a biblioteca de funções disponíveis;
- Disponibilizar documentação de *help* e manual em formato hipertexto (html) e colocar menu para acesso a um *browser* de hipertexto;
- Evoluir o *software* para possibilitar o estudo dos demais modelos (Sensor estelar, Sensor de pré-estimativa, Determinação de atitude e Simulação dinâmica de atitude). Assim, a ferramenta desenvolvida poderia tornar-se mais abrangente e com sua capacidade aumentada para servir como um integrador de modelos

para o sistema de determinação de atitude de uma espaçonave através de simulações por computador.

- Migração do *software* para uma linguagem compilada tal como C/C++.

As idéias consideradas como propostas para trabalhos futuros são as abaixo listadas:

- Utilização da ferramenta desenvolvida em outros possíveis trabalhos com ajuda do quadro de avaliação comparativa das diferentes categorias analisadas, contendo informações úteis para a formulação de estratégias racionais de identificação de estrelas para as diferentes fases de uma dada missão espacial;
- Estudo do desempenho considerando, além das estrelas catalogadas no catálogo fonte, os movimentos próprios dos astros significativos, tais como planetas, cometas, asteróides, o Sol e a Lua.;
- Na técnica de varredura otimizada, quando utiliza-se um sensor com um FOV diferente, faz-se necessário um arranjo específico capaz de cobrir todo o céu de acordo com o tamanho do FOV. Assim, um estudo pode ser feito no que se diz respeito ao número de centros de subcatálogos determinados pelo número de triângulos resultantes da divisão da aresta de uma face do icosaedro;
- Estudo da aplicação de faixas de cálculo de otimização para o método da justaposição angular;
- Na técnica de avaliação do índice de desempenho na forma acoplada, para considerar uma estrela como identificada, não basta apenas considerar que é a que tenha a maior nota dentre todas numa coluna. Se isso ocorrer, pode haver margem à identificações errôneas quando toda a linha da matriz tem notas baixas. Assim, um estudo na adoção de notas de corte, acima das quais considera-se a estrela de maior nota como identificada, pode viabilizar meios para identificações mais seguras. Para cada tipo de cálculo de notas deve-se ter uma determinada nota de corte que tenha por objetivo eliminar ao máximo as ocorrências de identificações errôneas;
- Estudo dos dados catalogados utilizados pelos algoritmos;
- Estudo comparativo entre várias dinâmicas de atitude;
- Estudo comparativo com um modelo mais completo para o sensor de pré-estimativa;
- Estudo comparativo considerando o tratamento eletrônico da CCD à resposta dos pixels com cálculo de centróides e consideração das relações entre magnitude instrumental e visual;
- Estudo comparativo com diferentes conjuntos de faixas para o cálculo da otimização do raio do domínio de busca para o método da justaposição direta que ajude a elaboração de regras de estabelecimento dos múltiplos critérios para os tipos de identificação com base nos tamanhos de FOV e magnitude limite do catálogo de trabalho;
- Estudo comparativo com diferentes estratégias de determinação de atitude;
- Estudo de identificação com cálculo de densidade estelar local no método de justaposição direta com otimização do raio do domínio de busca;
- Estudo comparativo para a técnica de avaliação do índice de desempenho na forma acoplada com inclusão de verificação para a condição de rotação em ângulo de fase em torno da direção de apontamento do sensor;

- Realização de testes com o sensor **ROSAT** nas mesmas condições de simulação aleatória e dinâmica que os testes realizados;
- Estudo sobre possíveis alterações que possam promover otimização nos algoritmos contra a alta sensibilidade aos erros na direção perpendicular ao apontamento do sensor;
- Estudo de estratégias de resolução de identificações ambíguas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baldini, D. et al. A new star-constellation matching algorithm for satellite attitude determination. **ESA Journal**, v. 17, n. 2, p. 185-198, 1993.
- Bank, T. All stellar attitude Estimation using a Ball CT-633 star tracker. In: AAS/AIAA Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Keystone, CO, Feb. 1-5, 1995. **Proceedings**. San Diego, CA: American Astronautical Society, 1995. v. 88, p. 59-66.
- Bersoff, E. H.; Henderson, V. D.; Siegel, S. G. **Software configuration management**. N.J: Englewood Cliffs Prentice-Hall, 1980.
- Bollner, M. **Star Identification techniques used for attitude determination and control of the x-ray satellite ROSAT**. Oberpfaffenhofen: German Space Operations Center, 1989. 8 p. (8031 / FRG).
- Briel, UG et al. **ROSAT User's Handbook** [online].  
<<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/ruh/handbook/handbook.html>>. Aug. 2000.
- Carvalho, Gustavo B. **Identificação de estrelas observadas por sensores estelares**. São José dos Campos. 59 p. Relatório (Iniciação científica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Ketchum, E. A.; Tolson, R. H. **Autonomous Navigation Recovery for Fine Pointing Low Earth Orbiting Spacecraft**. Washington. 177 p. Thesis (Doctor of Science) - The School of Engineering and Applied Science of The George Washington University, 1998.
- Ketchum, E. A.; Tolson, R. H. Onboard star identification without a priori attitude information. **Journal of Guidance, Control and Dynamics**, v. 18, n. 2, p. 242-246, Mar.-Apr. 1995.
- Kosik, J. C. Star pattern identification onboard on inertially stabilized spacecraft. **Journal of Guidance, Control and Dynamics**, v. 14, n. 2, p. 230-235, Mar.- Apr. 1991.
- Levine, Wilian S. **The Control Handbook**. Florida: CRC Press, 1996.
- Lopes, R. V. F.; Carvalho, G. B. **Otimização do Raio de Busca na Identificação de Estrelas**. Santos, 1996. Poster no VIII Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital Seção A em nov. 1996.
- Lopes, R. V. F.; Carvalho, G. B.; Silva, A. R. Star Identification for Three-Axis Attitude Estimation of French-Brazilian Scientific Micro-Satellite. **Advances in The Astronautical Sciences**, v. 100, n. 2, p. 805-819, 1998.

- Lopes, R. V. F.; Carvalho, G. B. **Elaboração de Catálogos Estelares Dedicados a Satélites Artificiais**. Santos, 1996. Poster no VIII Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital Seção B em nov. 1996.
- Markley, F. L. Attitude Determination Using Vector Observations and the Singular Value Decomposition **The Journal of Astronautical Sciences**, v. 36, n. 3, p. 245-258, July-Sept. 1988.
- Mejía, J.; Villela, T.; Braga, J. **The CCD stellar sensor of the MASCO telescope pointing system**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Astrofísica, São José dos Campos, 1996). Comunicação Pessoal.
- Mortari, D. A Fast On-Board Autonomous Attitude Determination System Based On A New Star-ID Technique For A Wide FOV Star Tracker. **Advances in The Astronautical Sciences**, v. 93, n. 2, p. 893-903, 1996.
- Niko Mak Computing. **WinZip 7.0**. [Programa de computador]. s.n.t.
- Petre, R. **Main ROSAT Images page** [online].  
<[http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/rosat\\_images.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/rosat_images.html)>. Aug. 2000
- Petre, R. **ROSAT Images: Satellite** [online].  
<[http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/rosat\\_sat.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/rosat_sat.html)>. Aug. 2000.
- Purll, D.; Gradmann, N.; Bollner, M.. The ROSAT star-tracker - flight experience. In: ESA Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems, U.K., 1991. **Proceedings**. U.K., 1991. N92-24432 15-18, p. 551-556
- Rupp, T.; Bollner, M. In-flight sensor performance of the ROSAT spacecraft and consequences for the attitude reconstruction on ground. In: International Astronautical Congress, 42<sup>nd</sup>, Montreal, Canada, Oct. 5-11, 1991. **Proceedings**. IAF, 1991, IAF Paper 91-353, 9 p.
- Rupp, T.; Feucht, U. **ROSAT a posteriori attitude determination**. Wessling: DLR / German Space Operations Center, 1995. 6 p. (D-82234).
- Scholl, M. S. Star-field Identification for Autonomous Attitude Determination. **Journal of Guidance, Control and Dynamics**, v. 18, n. 1, p. 61-65, Jan.-Feb. 1995.
- Shuster, M. D. **Introduction to spacecraft attitude determination**. Laurel, MD: The Johns Hopkins University, 1989.
- Shuster, M. D.; Oh, S. D. Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations. **Journal of Guidance, Control and Dynamics**, v. 4, n. 1, p. 70-77, 1981.
- Shuster, M. D. **Uninformative Attitude Distributions**. Maryland: Orbital Sciences Corporation, 2000.



- Sky Publishing. **SKY Catalogue 2000.0**. [Programa de computador]. s.n.t.
- Strikwerda, T. E. et al. Autonomous star identification and spacecraft attitude determination with CCD star trackers. In: ESA International Conference ESTEC, 1st, Noordwijk, the Netherlands. **Proceedings**. Laurel, MD: Johns Hopkins Univ., June 1991. v. 4-7, p. 195-200.
- The Math Works **Matlab 5.2**. [Programa de computador]. s.n.t.
- The Microsoft. **Qbasic DOS 6.22**. [Programa de computador]. s.n.t.
- Van Bezooijen, R. W. H. Autonomous star referenced attitude determination. **Journal of Guidance, Control and Dynamics**, v. 68, p. 31-52, 1989.
- Wahba, G. Problem 65-1: A least squares estimate of spacecraft attitude. **Sian Review**, v. 7, n. 3, p. 409, July 1965.
- Wertz, J. R. **Spacecraft attitude determination and control**. London: D. Reidel, 1997.
- Williams, D. R. **Clementine to the Moon** [online].  
<<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/clementine1.htm>>. Aug. 2000.
- Williams, D. R. **NSSDC Master Catalog: Experiment** [online].  
<<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/database/www-nmc?94-004A-07>>. Aug. 2000.
- Williams, K. E. et al. Design study: Parallel architectures for autonomous star pattern identification and tracking. **Advances in the Astronautical Sciences**, v. 82, part I, p. 22-24.



## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Allen, C.W. **Astrophysical Quantities**. Great Britain: Willian Clowes, 1973. 310 p.

Brownlee, K. A. **Statistical theory and methodology in science and engineering**. New York: John-Wiley, 1967. 590 p.

Universidade de S. Paulo (USP) / Instituto de Química e Física (IFQSC). **Introdução a Astronomia**: apostila do curso de introdução à astronomia do observatório de São Carlos-SP. São Carlos, 1. Maio de 1992. 100 p.

Freeman, H. **Introduction to statistical inference**. London: Addison-Wesley, 1963.

Hughes, P. C. **Spacecraft attitude dynamics**. New York: John-Wiley, 1986.

Jasc Software. **Paint Shop Pro 5.0**. [Programa de computador].

Kane, T. R.; Linkins, P. W. ; Levinson, D. A. **Spacecraft dynamics**. New York: Mc Graw-Hill, 1983.

Netscape Communications. **Netscape Communicator 4.5**. [Programa de computador].

Rinrott, F. P. J. **Introductory attitude dynamics**. New York: Spring Verlag, 1989.

The Microsoft. **Word for Windows 97**. [Programa de computador].



## APÊNDICE A

### MAGNITUDES

A magnitude  $m$  de uma estrela é definida por uma relação com o negativo do logaritmo da intensidade de brilho  $F$  que ela apresenta (Wertz, 1997):

$$m = -2,5 \cdot \text{Log } F + m_0 , \quad (\text{A-1})$$

Onde  $m_0$  é uma constante.

Assim, quanto mais brilhante a estrela, menor a sua magnitude, e quanto mais fraco o brilho, maior a magnitude

É possível a definição de dois tipos de magnitude, sendo um a magnitude absoluta e o outro a magnitude aparente. Convenciona-se magnitude absoluta como o brilho que um determinado objeto apresentaria se estivesse a 1 *parsec* ou 3,26 *anos-luz* de distância da Terra. Já a magnitude aparente é relacionada com o brilho percebido de um determinado objeto visto a partir da Terra e que inter-relaciona os brilhos de objetos celestes vistos todos da Terra.

Porém, em termos práticos, a magnitude absoluta em nada ajuda. Assim, utiliza-se na prática os valores de magnitude aparente nos catálogos. As estrelas mais brilhantes possuem magnitude visual aparente  $v$  com valores práticos abaixo que 5.5 para o olho humano e dependente do sensor no caso da espaçonave. Para um sistema de determinação de atitude que utiliza-se de catálogos de estrelas, deve-se utilizar valores de magnitude aparente, pois é esse o tipo a ser observado pelo sensor na realidade, sendo assim possível a comparação e identificação das observações.

No entanto, a resposta do sensor é diferente em termos de magnitude, pois os elementos das CCDs são em geral mais sensíveis à faixa abaixo do vermelho no espectro, sendo então denominado o brilho percebido como magnitude instrumental.

A magnitude instrumental é relacionada com a magnitude visual aparente  $v$  e a magnitude azul  $B$  que ocorre na faixa de 350 - 550 *nm* de comprimento de onda luminoso. A magnitude instrumental precisa ser calculada de forma a gerar um arquivo de estrelas não muito extenso, mas que inclua todas as que podem ser bem distinguidas. Também é necessária para o modelamento da resposta.

Um modelo aproximado para a magnitude instrumental é dado por Wertz (1997):

$$m_i = h \cdot v + (1 - h) \cdot B , \quad (\text{A-2})$$

Onde  $v$  é a magnitude visual aparente,  $B$  é a azul e  $h$  é um fator empírico adaptado para que a distribuição instrumental melhor se encaixe à distribuição teórica de magnitudes estelares, ou até que se obtenha a máxima nitidez.

O sinal de saída  $I$  é relacionado com a magnitude instrumental da seguinte forma (Wertz, 1997):

$$\text{Log } I = c_i + d_i \cdot m_i , \quad (\text{A-3})$$

Onde  $c_i$  e  $d_i$  são coeficientes dependentes do sensor e são geralmente fornecidos em sua calibração.

Um outro fator complicador está relacionado à classe espectral das estrelas, denotada por letras nos catálogos. Uma estrela com baixa magnitude visual pode ter alta magnitude instrumental e vice-versa, dependendo de sua classe espectral, que afeta a faixa do espectro em que a luz do estudo se concentra. Por fim, existem ainda estrelas de magnitude variável.

Assim, na maioria das vezes, do ponto de vista prático, evita-se ao máximo o uso da magnitude nas técnicas de identificação de estrelas.

## APÊNDICE B

### ROSAT

#### B.1. UTILIZAÇÃO DE SENSORES DE ESTRELAS EM APLICAÇÕES REAIS

Foram analisados alguns artigos referentes à descrição das principais características que constituem o sistema de determinação de atitude do satélite alemão ROSAT (Ver Fig. B.1), aproveitando oportunidades abertas pelo “German-Brazilian Workshop on Aerospace Technology (1998)” para cooperação INPE-DLR.

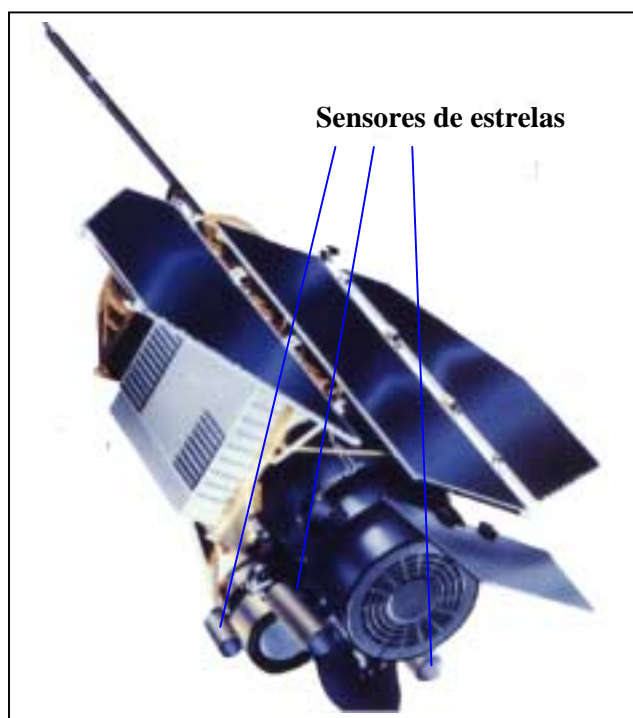


Fig. B.1 - Satélite alemão ROSAT.  
Fonte: Petre (2000).

##### a) Determinação de atitude a posteriori do satélite ROSAT - (Rupp; Feucht, 1995)

Este artigo concentra-se na análise de determinação de atitude em solo por 4 anos de missão e descreve as principais características que constituem o sistema de determinação de atitude. O satélite ROSAT:

- constitui um satélite triaxialmente estabilizado, mas com possibilidade de rotação em torno de seu eixo x (que aponta para o Sol) ;
- tem determinação de atitude a bordo e em solo;
- possui um telescópio de raios-X com 83 cm de abertura apontado na direção do eixo z do satélite (no sentido oposto ao Sol);
- possui uma câmera ultravioleta;
- possui 2 contadores de imagem e 1 detetor de canal plano de alta resolução;

- possui 4 giros, um em cada eixo e um quarto na direção -x, y, z;
- possui modos de varredura e apontamento;
- possui 2 cameras de estrelas desalinhadas de  $3^0$  do eixo do telescópio e separadas de  $90^0$  em torno do diâmetro do telescópio. Suas principais características são:
  - constituem-se de CCDs de  $385 \times 288$  pixels e campo de visada de  $5,9^0 \times 4,4^0$  ( $55 \times 55$  (" / pixel));
  - origem de sistema de coordenadas no centro da matriz;
  - eixo y na direção de varredura, eixo z perpendicular à matriz e eixo x perpendicular a y e z no sentido de produto vetorial  $y \times z$  positivo;
  - coordenadas (x,y) das estrelas na matriz são obtidas por interpolação;
  - são medidas no máximo 3 estrelas simultaneamente;
  - 10" para erros sistemáticos e 5" para erros aleatórios (ruído) na varredura;
  - 2" para erros sistemáticos e 1" para erros aleatórios (ruído) no apontamento;
  - 5' para erros de montagem e desalinhamento no lançamento;

Houve a perda total de uma camera de estrelas seguida de um mal funcionamento (erros fora do estipulado) no giroscópio do eixo x do satélite, sendo então apenas utilizados na determinação de atitude os 3 giros remanescentes até que o giro y falhou completamente e teve-se que retornar ao uso do giro x. Isto causou um erro de apontamento de  $0,5^0$ . Dessa forma foi adaptado um algoritmo de controle que pudesse funcionar com apenas um giro, o que foi benéfico quando, mais tarde, ocorreu uma perda do giro z.

O catálogo utilizado possui 17.000 estrelas corrigidas para a época da missão (1990), pelo movimento próprio, e convertidas para magnitude instrumental que preenchem os seguintes requisitos:

- não tem magnitude variável;
- tem acuracidade de posição melhor que 1";
- tem magnitude entre 0 e 6,5;
- não tem nenhuma estrela vizinha mais perto do que  $0,1^0$ ;
- pertencem às classes espectrais A,B,G,F,K e M.

A atitude a bordo é manipulada e calculada com base nas observações de estrelas e medidas dos giros com o auxílio de notação de quaternions para evitar erros agregados às manipulações trigonométricas. Esses quaternions são utilizados como entradas para o algoritmo de determinação de atitude em solo que é baseado no filtro de Kalman.

Os resultados para a determinação de atitude foram os seguintes:

- Modo de varredura:
  - desvio máximo de 16" para o apontamento do telescópio;
  - redução de estrelas observadas de 3 para 1,5 por segundo por causa da perda de uma camera;
  - intervalo de tempo de até 5 min para determinação em solo, e perda de atitude com as não-identificações. Isto causa a necessidade de alteração para maiores valores nos pesos das medidas dos giros no filtro de Kalman;



- os resíduos no filtro de Kalman ficaram abaixo de 10“ em 94% das vezes.
- Modo de apontamento:
  - desvio máximo de 5“ para o apontamento do telescópio;
  - principais contribuições de erros foram devido às medidas de posição erradas da camera remanescente;
  - os resíduos no filtro de Kalman ficaram abaixo de 5“ em 88% das vezes.

**b) Desempenho em voo do sensor da espaçonave ROSAT e conseqüências para a reconstrução de atitude em Terra - (Rupp; Bollner, 1991)**

Este artigo concentra-se na análise de determinação de atitude em solo e descreve algumas características que constituem o sistema de determinação de atitude. O satélite ROSAT:

- constitui um satélite triaxialmente estabilizado, mas com possibilidade de rotação em torno de seu eixo x em ambos os sentidos de rotação. A manobra de alteração de sentido é chamada de reversão de varredura (scan reversal);
- foi lançado numa órbita circular com 53<sup>0</sup> de inclinação e 580 km de altitude;
- tem determinação de atitude a bordo e em solo;
- possui modos de varredura e apontamento;
- possui um telescópio de raios-X com 83 cm de abertura apontado na direção do eixo z do satélite;
- possui uma camera de ultravioleta;
- possui 2 contadores de imagem e 1 detetor de canal plano de alta resolução;
- possui 4 giros e 2 cameras de estrelas;
- as cameras de estrelas são desalinhadas de 3<sup>0</sup> do eixo do telescópio e separadas de 90<sup>0</sup> em torno do diâmetro do telescópio com alguma superposição de seus FOVs. Suas principais características são:
  - são medidas no máximo 3 estrelas simultaneamente;
  - existem desalinhamentos de -250“ em torno do eixo x, 270” em torno de y e -300” em torno de z da camera 2 determinados através das observações das duas cameras;

Em fins de setembro de 1990 houve uma perda total de uma camera de estrelas, diminuindo a observação de um total de 6 estrelas por segundo para 3 em modo de varredura. No modo de apontamento, caiu de 3 para 1,5 estrelas por segundo e o fator de piora foi de 2 para os erros sistemáticos. No entanto, uma vez que ainda é possível obter 2 medidas no FOV da camera 1, o algoritmo apenas teve uma perda na acuracidade do apontamento, não havendo perdas significantes na determinação de atitude como um todo. Em 85% dos casos, foi constatada a presença de pelo menos 3 estrelas no FOV da camera 1. Em casos onde durante 42 min não houveram medidas de estrelas disponíveis, a determinação de atitude apenas foi mantida pelas medidas dos giros, o que resultou num desvio máximo de 0,5<sup>0</sup> que é o máximo erro permitido no caso de determinação em apontamento. Constatou-se também que ao proceder uma manobra em torno do eixo x depois da perda do giro y, havia uma perda de atitude com um desvio de 7“/seg devido ao mal funcionamento do giro do eixo x.

Em agosto de 1991, houve um período de 10 dias no qual o modo de varredura não pode ser realizado por razões de mecânica celeste. Nesta mesma época, um novo *software* foi carregado, permitindo dessa forma erros de até  $1.2^0$  e não mais  $0,5^0$  depois de uma manobra.

Como o eixo x é o eixo de rotação principal, não foi necessária uma calibração de fator de escala para os giros dos eixos y e z.

Para a calibração do posicionamento das estrelas foi utilizado um procedimento de alinhamento de borda para que fossem alinhadas as duas cameras de estrelas com os contadores proporcionais. Para o alinhamento da camera 1 com o contador proporcional 1 foram utilizadas 2 medidas de estrelas em cada um dos sistemas. Porém, como o FOV do contador é muito pequeno para conter 2 estrelas de alta radiação-X, foram medidas uma estrela de fonte óptica na camera e uma de raio-X no contador em diferentes pontos dos FOVs dos equipamentos, pois a posição relativa dessas duas fontes já são conhecidas e catalogadas. Isto resultou um desalinhamento de  $254''$  em torno do eixo x e  $50''$  em torno de y da camera 1, sendo impossível no entanto medir o desalinhamento em z, pois este eixo na camera é apontado para a mesma direção que o do contador.

Para prover a acuracidade desejada na determinação em solo, uma fonte de estrela chamada Fiducial provinda do telescópio foi introduzida por meios óticos nas cameras para obter os desalinhamentos das mesmas devido ao fator térmico e anomalias de períodos de iluminação solar e eclipses. Com um filtro de Kalman, foi possível obter esses desalinhamentos baseados nos posicionamentos mapeados das estrelas fiduciais obtidas no telescópio. O resultado foi uma amplitude máxima de  $2''$ . Dessa forma, constatou-se que esses erros poderiam ser negligenciados no modo de varredura em comparação com outras fontes de erros.

Para a identificação off-line on ground no modo de varredura foram detectados alguns problemas em situações desfavoráveis onde passaram-se 5 min sem nenhuma medida de estrela ou apenas medições causadas por erros e ruídos. Dessa forma, uma maneira de minimizar esses efeitos foi aumentar o peso dos giros no algoritmo de determinação.

c) Rastreador de estrelas da espaçonave ROSAT - experiência de vôo - (Purll; Gradmann; Bollner, 1991)

Este artigo concentra-se na análise e descrição do equipamento de sensoriamento estelar e suas características no satélite ROSAT.

O satélite possui um sistema estelar constituído por 2 cameras de estrelas montadas aproximadamente coaxiais com o telescópio para fornecer maior estabilidade na montagem, e desalinhadas de  $3^0$  do eixo do telescópio sendo separadas de  $90^0$  em torno do diâmetro do telescópio. Suas principais características são:

- $1''$  para acuracidade e  $0,5''$  para ruído por eixo no apontamento;

- constituem-se de CCDs de  $385 \times 288$  pixels e campo de visada de  $5,9^0 \times 4,4^0$  ( $55 \times 55$  (” / pixel)) colocadas no plano focal de lentes refrativas e resfriadas a  $-40^0$  C para reduzir o ruído de fundo;
- sensível a estrelas de magnitude até 7;
- A posição no plano focal fornece uma imagem borrada de diâmetro de 2 larguras de pixel, causando a imagem da estrela num bloco de  $3 \times 3$  píxeis, sendo dessa forma as coordenadas planares (x,y) das estrelas na matriz obtidas por técnica de interpolação por centróide para obtenção de maior precisão que a fornecida apenas pelo tamanho dos píxeis da matriz CCD. Os fatores usados são 1/27 da largura do pixel e 1/55 para ângulo equivalente de ruído no modo de apontamento;
- há um equipamento de periscópio na frente de cada sensor que coleta estrelas do FOV do telescópio (denominadas fiduciais) para efeitos de alinhamento dos equipamentos;
- possuem um processador 80C86;

O sistema conseguiu fazer uma varredura completa do céu inteiro em 6 meses de varredura.

Os modos de operação do sistema são:

- Mapeamento: é realizado um mapa do FOV, fornecendo coordenadas e brilho de até 3 estrelas reais detectadas abaixo da magnitude limite e uma estrela fiducial.
- Apontamento: são rastreadas até 3 estrelas reais e uma fiducial com um deslocamento sem perdas de até  $25''$ /seg. A melhor performance é obtida com  $5''$ /seg. Janelas de detecção de novas estrelas entrando no FOV são posicionadas ao longo de determinada aresta do FOV dependendo do sentido do movimento;
- Varredura: são rastreadas até 3 estrelas com um deslocamento sem perdas de até  $5''$ /seg nos dois sentidos da varredura. O movimento causa uma imagem borrada alongada da estrela na direção do movimento de um tamanho de até 6 píxeis. Janelas de detecção de novas estrelas entrando no FOV são posicionadas ao longo da aresta do FOV dependendo do sentido do movimento;

A computação das separações entre as estrelas no FOV são feitas em 3 estágios:

- cálculo da posição das estrelas através do algoritmo do centróide com uma acuracidade de fração de pixel. Esta saída não é linear conforme a imagem se desloca devido às diferenças estruturais e óticas na matriz;
- implementa-se uma polinomial para converter a posição na CCD para unidades angulares. Os coeficientes da polinomial são ajustados para compensar as não-linearidades da matriz, distorções óticas da lente e não linearidades do algoritmo de centróide obtidos numa calibração prévia;
- aplica-se aos dados uma função spline obtida por redução de dados de teste para corrigir algumas discrepâncias ainda presentes nos dados;

Os ângulos equivalentes de ruído são entendidos como variações dependentes do tempo em leituras da camera de estrelas causados por ruídos provenientes de todo o

equipamento em geral e que estão presentes em cada pixel e que causam a incerteza da medida quando computados em todos os píxeis em conjunto.

A acuracidade é medida como o quão perto a medida da estrela está da sua posição no campo na ausência de ruído. A precisão é diminuída por duas fontes principais de erros. A primeira são variações sistemáticas pelo campo como distorções óticas que são previamente calibradas em testes de solo. A segunda é representada por efeitos de variações aleatórias causadas pelo detetor como não uniformidade de pixel para pixel e microscópicas distorções óticas dentro de cada pixel. Não podem ser calibrados e ditam a mais fina acuracidade possível sendo que numa única medida não podem ser distintos do ruído.

Outros efeitos devido a fatores de construção das cameras como montagem e a própria acuracidade do catálogo de estrelas também influenciam a acuracidade das medidas e reconstrução da atitude desejada.

Os resultados para os testes de solo ditam que para o modo de apontamento, 75% dos resultados da acuracidade estavam dentro de 1" e 98% dentro de 2". Para o modo de varredura não é possível separar o efeito do ruído de outras fontes de erros uma vez que eles se mesclam na medida das estrelas conforme elas passam pelo campo numa velocidade relativamente alta. Para a magnitude, os erros estiveram dentro do especificado de 0,25 de magnitude visual em ambos os modos.

Em resultados de desempenho de vôo não é possível separar os ângulos equivalentes de ruído pois estes se mesclam entre o movimento da própria estrela pela CCD e o movimento da espaçonave. Porém tanto no modo de apontamento quanto no de varredura as especificações de acuracidade foram alcançadas e o máximo desvio de magnitude foi 0,56 de magnitude visual e ainda foi possível varrer uma estrela a  $6,5^0$  do centro da Lua e  $5^0$  do limbo iluminado da Terra enquanto os requisitos ditam  $14,5^0$ .

**d)** Técnicas de identificação de estrelas usadas para a determinação de atitude e controle do satélite ROSAT - (Bollner, 1989)

Este artigo concentra-se na análise da técnica de identificação de estrelas utilizada pelo equipamento de sensoriamento de estrelas do satélite ROSAT.

As características principais do satélite são:

- constitui um satélite triaxialmente estabilizado utilizando-se de rodas de reação, giroscópios e sensores de estrelas como equipamento principal de determinação de atitude.

A identificação de estrelas é processada em quatro situações diferentes:

- em órbita em um computador de bordo para identificação de estrelas:
  - em varredura;
  - em apontamento.

- em solo :
  - depois da aquisição de estrelas para derivar a atitude inercial;
  - na reconstituição final de atitude.

De todos os modos, o mais complexo é a terceira situação onde constitui a identificação de medidas de estrelas completamente desconhecidas pela comparação com o catálogo.

O subsistema de controle e medida de atitude (*Attitude Measurement and Control System* - AMCS) é um sistema de controle digital baseado em um computador de bordo. Utiliza-se de um sistema strapdown com notações de quaternions que é realimentado pelo sistema de varredura de estrelas.

Os requisitos de acuracidade para o controle de atitude são:

- menor que 8' em modo de varredura;
- menor que 3' e 5"/seg de deslocamento em modo de apontamento.

Os equipamentos de atitude são os seguintes:

- *Attitude Measurement and Control Data* (AMCD) (Sistema de dados de controle e medida de atitude) - microcomputador baseado em sistema de processamento digital com as tarefas de aquisição de dados do sensor e determinação de atitude;
- 2 cameras de estrelas - como referência para realimentação do sistema de controle strapdown, com três matrizes eletrônicas CCD.

O AMCD possui três modos de funcionamento:

- Modo de segurança - provê capacidade de sobrevivência para evitar a perda da espaçonave em panes gerais ou do AMCS. Mantém orientação solar de atitude em dois eixos. A referência de três eixos é perdida;
- Modo de espera - provê estabilização grosseira da razão de giro e desaturação da roda de reação. Usado para aquisição de estrelas para a derivação da referência inercial;
- Modo Normal - cobre as operações normais de varredura e apontamento com razões de giro entre 3 e 5'/seg em torno do eixo x da espaçonave, comando de reversão de varredura e definições de apontamento.

Como parte do AMCS, foi desenvolvida uma camera de estrelas de alta precisão. São montadas com um desvio axial do eixo do telescópio de 3° e separadas 90° no diâmetro do mesmo e de forma que seu eixo y esteja paralelo com o eixo y do satélite na direção que é feita a varredura. Os FOVS das cameras se sobrepõem em parte e também sobrepõem os FOVs dos instrumentos. Possuem uma CCD refrigerada e lentes refratoras de 82 mm de distância focal. Rastreiam até 3 estrelas simultaneamente num campo de 5,9° x 4,4°. Uma quarta estrela artificial projetada dentro do FOV fora do plano focal pode ser monitorada simultaneamente para alinhamento das cameras e do telescópio. A CCD tem uma matriz de 385 x 288 píxeis, dessa forma cada pixel

cobrindo 55 x 55 ("). Para aumentar a precisão na medida de posição, a imagem é borrada numa área de 3 x 3 píxeis dessa forma sendo calculado o centro por um processo de interpolação levando em consideração a posição da estrela, cor e ainda a resposta do pixel dependendo da cor da estrela. A acuracidade conseguida é inferior a 2" para apontamento. O sensor é capaz de varrer estrelas de 0 a 7 de magnitude visual com uma acuracidade de 0,25 de magnitude. A integração de imagem é feita a cada 1 s.

Os modos de operação são os seguintes:

- Mapeamento: o sensor provê um mapeamento do FOV. A saída é o conjunto das coordenadas e magnitudes das 3 estrelas mais brilhantes acima de magnitude 0.
- Apontamento: O sensor pode varrer até 4 estrelas acima de uma magnitude pré-determinada e procurar em torno de uma posição pré-estipulada dentro da metade de um cone de 2.3';
- Varredura: o sensor pode procurar e rastrear até 3 estrelas acima de uma magnitude pré-estipulada e procurar dentro de 3 janelas pré-estipuladas.

Quatro tipos de catálogos de estrelas operacionais são requisitos para os 4 tipos diferentes de identificação. São derivados de um catálogo principal de 250.000 estrelas com base em 2000.0. A correção devido a aberrações é aplicada na fase final de reconstituição de atitude. Magnitude instrumental também está prevista a ser suprida. As estrelas nos catálogos devem suprir os seguintes requisitos:

- baixa variação de magnitude;
- acuracidade de posição abaixo de 1";
- magnitude instrumental entre 0 e 6,5;
- não possuir vizinhas dentro de 0,05° de distância (a menos que esta tenha mag > 4).

O AMCS necessita de alimentação em apontamento e varredura a partir do solo.

Os 4 tipos de catálogos são os seguintes:

- Catálogo de apontamento: O apontamento requer pelo menos 6 referências por apontamento (3 em cada FOV). Um catálogo intermediário é gerado com todas as estrelas num raio de 7° em torno do apontamento desejado. É selecionada a estrela mais brilhante e em seguida sempre a mais brilhante remanescente distante de pelo menos 1° das já escolhidas até que se complete 3. Finalmente as estrelas são ordenadas em esquema de prioridade sendo a mais brilhante e mais distante das outras a mais alta;
- Catálogo de varredura: A varredura requer referências inerciais e magnitudes instrumentais para aproximadamente 500 estrelas numa faixa de 7° de largura no sentido de pólo-a-pólo da eclíptica perpendicular ao eixo de varredura. De um catálogo intermediário primeiro escolhe-se a estrela mais brilhante e depois sempre a mais brilhante remanescente distante de pelo menos 1° ao longo da faixa e 0,5° no sentido perpendicular das já escolhidas;

- Catálogo de aquisição: É produzido similarmente ao de varredura com a diferença de que nenhum limite de magnitude é imposto;
- Catálogo de reconstituição de atitude: Utilizado para a reconstituição final de atitude. Contém todas as estrelas do céu baseadas em 2000.0 com os critérios acima apresentados para seleção de estrelas.

A aquisição de estrelas é um procedimento para determinar a referência da atitude inercial no solo. É necessária depois do lançamento ou se o satélite está em modo de espera ou de segurança. O estado inicial para o modo de aquisição é o modo de espera.

Uma varredura em torno do eixo x que aponta para o Sol é comandada e procedida durante aproximadamente 15 min. Essa varredura inicia-se numa direção arbitrária não conhecida a partir do solo. Uma camera rastreia até 3 estrelas simultaneamente que entrem no FOV através de uma das arestas do mesmo. As coordenadas e magnitudes são enviadas ao solo para o processo de identificação. Depois do comando de aquisição, as estrelas medidas durante a varredura são monitoradas a bordo nas seguintes condições:

- O sensor tem no mínimo uma estrela em 2 das 3 janelas de varredura;
- Todas as estrelas tem uma distância da aresta da janela de rastreio de pelo menos  $1^0$ ;
- Quaisquer 2 estrelas têm uma distância entre si de  $1,5^0$ .

Se estas condições são satisfeitas, o satélite altera seu modo de varredura para apontamento e concentra-se no campo dessas 3 estrelas. Dessa forma, essas 3 estrelas são identificadas e o quaternion da atitude é enviado ao computador de determinação de atitude do satélite.

Para a reconstituição de atitude, a referência é o catálogo de reconstituição que possui todas as estrelas de todo o céu. A reconstituição é baseada num filtro de Kalman modificado no qual o modelo dinâmico do estado normal é substituído devido às medidas a bordo da razão de giro do satélite estarem disponíveis e que contém a integração de todos os torques disponíveis no satélite.

Para a identificação há 4 processos diferentes, sendo 2 a bordo para varredura e apontamento e 2 em solo para aquisição e reconstituição. A aquisição é totalmente distinta das demais devido ao fato do desconhecimento de posicionamento dos 3 eixos do satélite. Os processos são os seguintes:

- Apontamento - As estrelas adquiridas pelo sensor são identificadas através de comparação de suas coordenadas e magnitudes com as estrelas armazenadas no catálogo de modo de apontamento. Até 6 estrelas são identificadas (3 em cada sensor) nas janelas comandadas de apontamento. Os passos da identificação são os seguintes:
  - Para cada janela é definido um grau de identificação dependendo do status da janela, número da estrela no catálogo, magnitude no catálogo e a magnitude medida;

- Se há no mínimo uma estrela disponível, são feitos cálculos de comparação de distância quadrática entre pares de estrelas e se estiverem abaixo de um certo limite, é ajustado um ponto para este item;
- Para cada janela, um indicador de sucesso é definido dependendo do grau de identificação e do ponto de comparação de distâncias quadráticas de pares;
- Varredura - As estrelas constantemente entram e saem do FOV devido ao movimento do satélite em torno de seu eixo x. As estrelas adquiridas pelo sensor são identificadas através de comparação de suas coordenadas e magnitudes com as estrelas armazenadas no catálogo de modo de varredura.
- Aquisição - O propósito é determinar a atitude inercial em medidas adquiridas por telemetria em solo, estando o satélite em estado de espera, e medidas em modo de apontamento depois do comando de aquisição. Durante o pré-processamento, são adquiridas informações de razão de varredura, tempo de medida, indicador de validade do sensor, coordenadas e magnitudes das estrelas, modo do AMCD e se está em modo de apontamento, indicador de estado de espera e número de estrelas referência achadas. Existem três modos diferentes dependendo do modo dos ciclos atual e anterior:
  - Modo de espera no ciclo n e n-1 - para cada janela cada medida válida dá origem a um vetor referenciado ao sistema do satélite. Para cada nova medida válida o vetor obtido é recalculado no primeiro referencial no tempo em vista a razão de giro do satélite. Se a distância for menor que  $0,2^0$ , é assumido que a medida se deve à mesma estrela. Isto é feito até que não haja medida dentro de 10 s ou que o desvio seja muito grande. Depois disso, todas as coordenadas dos vetores e magnitudes identificadas são armazenadas e servem de base para a identificação, entrando então em modo de apontamento;
  - Modo de espera no ciclo n-1 e apontamento em n - É utilizado apenas uma vez quando o critério de aquisição é atingido e o modo de apontamento é comandado. O conjunto de estrelas em modo de espera é finalizado e todas as estrelas com menos de 6 medidas válidas são removidas;
  - Modo de apontamento no ciclo n-1 e n - Basicamente é feito o mesmo procedimento que no modo de espera com a diferença de que a razão de giro do satélite pode ser negligenciada. Se nenhuma medida mais estiver disponível, as medidas de apontamento são suspensas e comparadas com as medidas de varredura comparando a coordenada x com a coordenada x de todas as medidas de espera.

O procedimento de identificação pode ser descrito da seguinte forma:

- As estrelas são divididas em 4 classes de magnitude (0-4,4-4.5,etc.) sendo que se uma classe está vazia, é tomada a próxima e assim por diante;
- Compara-se com estrelas do catálogo: as estrelas medidas são organizadas em pares e comparadas com o catálogo em termos de separações angulares e magnitudes dentro de faixas de tolerância especificadas.
- A identificação é dada como sucesso se no máximo houver 4 não identificações de pares.



O processo de determinação de atitude é procedido com base nas coordenadas das estrelas identificadas na referência do satélite e suas correspondentes no referencial do catálogo. Com base nisso pode-se calcular os quaternions:

- Reconstituição de atitude - baseado nas coordenadas de todas as estrelas medidas nos diferentes modos é feita uma identificação no céu todo e determinada a referência de atitude com base no catálogo total.

## B.2. IMPLEMENTAÇÃO DA INTERFACE COM DADOS ROSAT

Para a utilização dos dados **ROSAT** foi necessário desenvolver o entendimento dos sistemas de referência envolvidos na definição dos mesmos.

O entendimento sobre os referenciais dos sensores estelares com relação aos referenciais da espaçonave foi obtido a partir de informações encontradas nos artigos analisados e no Capítulo “XRT Star Trackers (STC)” de um manual disponível na internet sob o endereço:

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/ruh/handbook/handbook.html>

Abaixo apresenta-se o resumo do significado dos dados disponíveis e complementares:

- Data – matriz de dados **ROSAT** com as seguintes informações:
  - SKYMAP – número de catalogação da estrela
  - RA – ascensão reta (graus)
  - DEC – declinação (graus)
  - IN – magnitude (visual)
  - SCI – código de classe espectral
  - X1 – abscissa da coordenada de matriz de sensor (adimensional)
  - Y1 – ordenada da coordenada de matriz de sensor (adimensional)
- SpfFromSenpoint – matriz de rotação que leva o referencial de apontamento do sensor para o da espaçonave
- SpfFromInfRDR - representação da atitude no sistema equatorial de atitude (asc. Reta, decl., fase) (graus) da direção de apontamento do eixo Z sistema da espaçonave
- ObservedTrackedIndex – índices das estrelas observadas que foram rastreadas
- PosPrec – precisão de observação de posição (graus)
- MagPrec – precisão de observação de magnitude (visual)
- SensorMaxMag – máxima magnitude observada pelo sensor (visual)
- SensorMaxNumOfStars – número máximo de estrelas rastreáveis
- FocalLength – distância focal (m)
- FovSizeAperture – abertura angular do FOV (graus)
- MagMax – magnitude máxima do catálogo de trabalho (visual)

➤ Data:

| SKYMAP   | RA       | DEC     | IN   | SCI   | X1    | Y1    |
|----------|----------|---------|------|-------|-------|-------|
| 18430160 | 280.9055 | -1.5591 | 6.48 | 60(M) | 1.53  | -1.19 |
| 18560078 | 284.0937 | -1.7998 | 6.46 | 10(B) | -1.66 | -0.94 |
| 18470034 | 281.7935 | -4.7479 | 3.91 | 40(G) | 0.65  | 2     |
| 18500036 | 282.5352 | -3.6929 | 6.45 | 50(K) | -0.09 | 0.88  |
| 18520124 | 283.1069 | -3.7258 | 6.48 | 50(K) | -0.66 | 0.99  |
| 18410117 | 280.3933 | -3.1186 | 6.5  | 50(K) | 2.04  | 0.37  |
| 18510110 | 282.842  | -3.318  | 6.15 | 30(F) | -0.4  | 0.58  |
| 18570015 | 284.2651 | -5.8462 | 4.52 | 50(K) | -1.81 | 3.11  |
| 18490141 | 282.4043 | 0.8359  | 6.45 | 20(A) | 0.03  | -3.58 |
| 18440165 | 281.1599 | -6.5362 | 5.94 | 50(K) | 1.27  | 3.79  |
| 18470102 | 281.8704 | -5.7051 | 4.72 | 40(G) | 0.57  | 2.96  |
| 18390040 | 279.8062 | -1.952  | 6.81 | 50(K) | 2.63  | -0.79 |
| 19000196 | 285.189  | -0.4552 | 6.84 | 40(G) | -2.76 | -2.28 |
| 18490160 | 282.4204 | -5.9127 | 5.45 | 50(K) | 0.03  | 3.17  |
| 18480124 | 282.1641 | -6.0066 | 6.62 | 20(A) | 0.28  | 3.26  |
| 18400161 | 280.197  | -4.4966 | 6.97 | 50(K) | 2.24  | 1.75  |
| 18550192 | 283.9639 | -0.7394 | 6.98 | 50(K) | -1.53 | -2    |
| 18440236 | 281.2327 | -0.3733 | 6.99 | 0(O)  | 1.2   | -2.37 |
| 18570131 | 284.3992 | -0.5265 | 7    | 50(K) | 1.97  | -2.23 |
| 18410096 | 280.3606 | 0.5642  | 7.02 | 50(K) | 2.07  | -3.31 |
| 18580097 | 284.6069 | 1.198   | 7.07 | 20(A) | -2.18 | -3.94 |

➤ SpfFromSenpoint:

```
0.99932379  -0.00073049  -0.03676180
-0.00067621  0.99926842  -0.03823824
0.03676283   0.03823724   0.99859221
```

➤ SpfFromInfRDR:

```
[280.3298  -2.7099  267.8857]
```

➤ ObservedTrackedIndex:

```
[1  2  3]
```

- FOVSizeAperture: [5.9 4.4 ] (graus)
- FocalLength: 0.082 (m)
- SensorMaxNumOfStars: 3
- MagMax: 6.5 (visual)
- SensorMaxMag: 7.0 (visual)
- MagPrec: 0.25 (visual)
- PosPrec: 2 (arcsec)

A definição dos referenciais adotados nos dados é (Ver Fig. B.2):

- O referencial do sensor, o de apontamento do sensor e o da matriz CCD do sensor coincidem

- O sensor de estrelas aponta numa direção quase paralela ao eixo Z da espaçonave, formando um ângulo de  $3^0$  entre este eixo e sua direção de apontamento
- O eixo de apontamento do sensor estelar é o eixo z do referencial do sensor
- O eixo z do referencial do sensor estelar aponta para fora a partir do centro da esfera celeste.

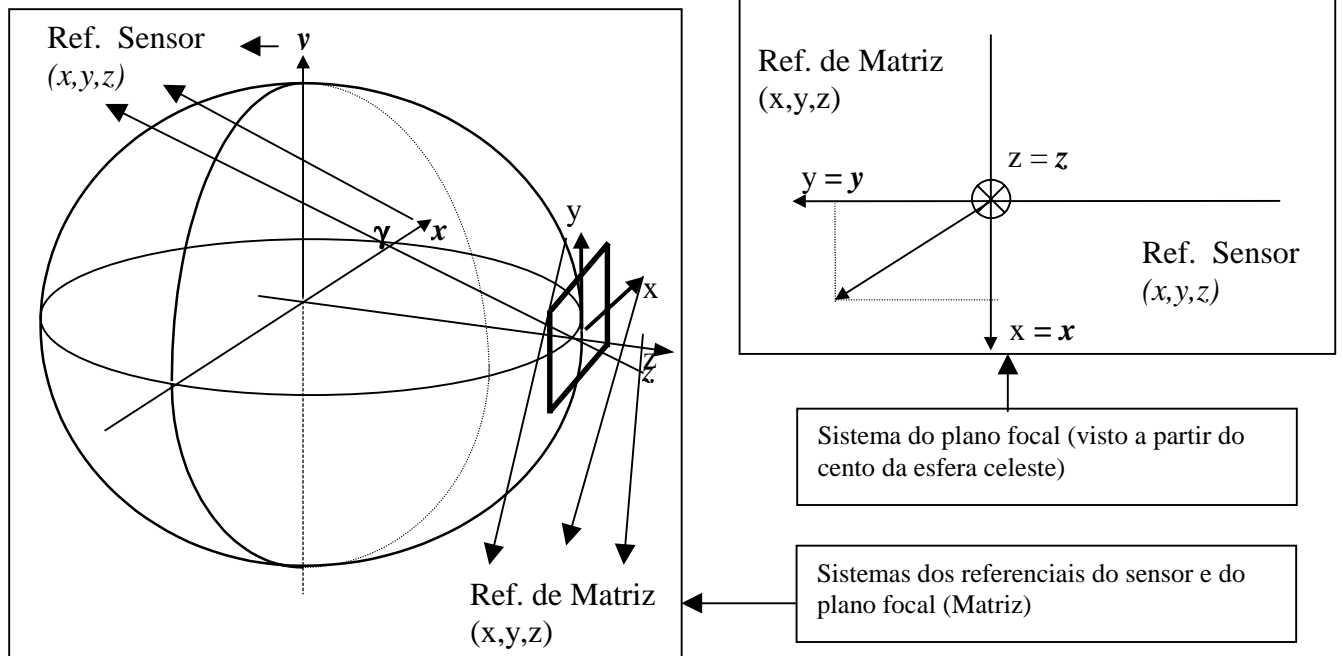
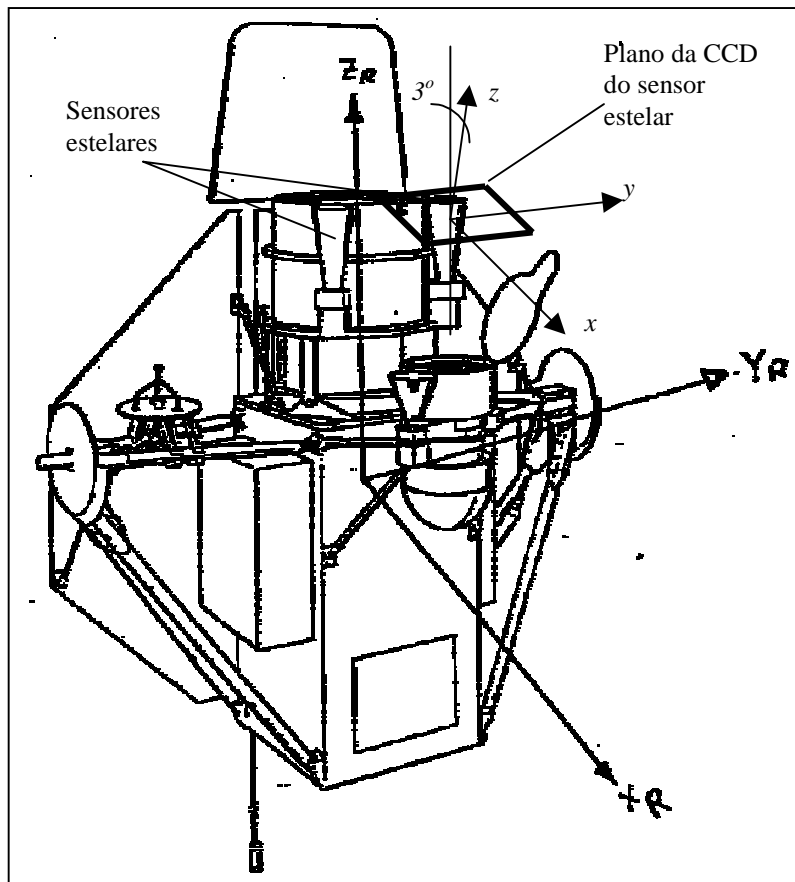


Fig. B.2 - Convenção dos referenciais ROSAT.

Já a definição dos referenciais adotados no *software SIATS* segue a descrição no Capítulo 2. (**CONCEITOS BÁSICOS**) (Ver Fig. B.3):

- O referencial do sensor e o da matriz CCD do sensor não coincidem
- O referencial do sensor e o da espaçonave podem não coincidir e assim o sensor de estrelas pode apontar numa direção qualquer com relação ao eixo X da espaçonave
- O eixo de apontamento do sensor estelar é o eixo y do referencial do do sensor
- O eixo z do referencial da matriz CCD do sensor estelar aponta para dentro em direção ao centro da esfera celeste na mesma direção do eixo y do referencial do sensor, porém em sentido oposto, enquanto que os eixos x dos dois sistemas apontam na mesma direção e sentido.

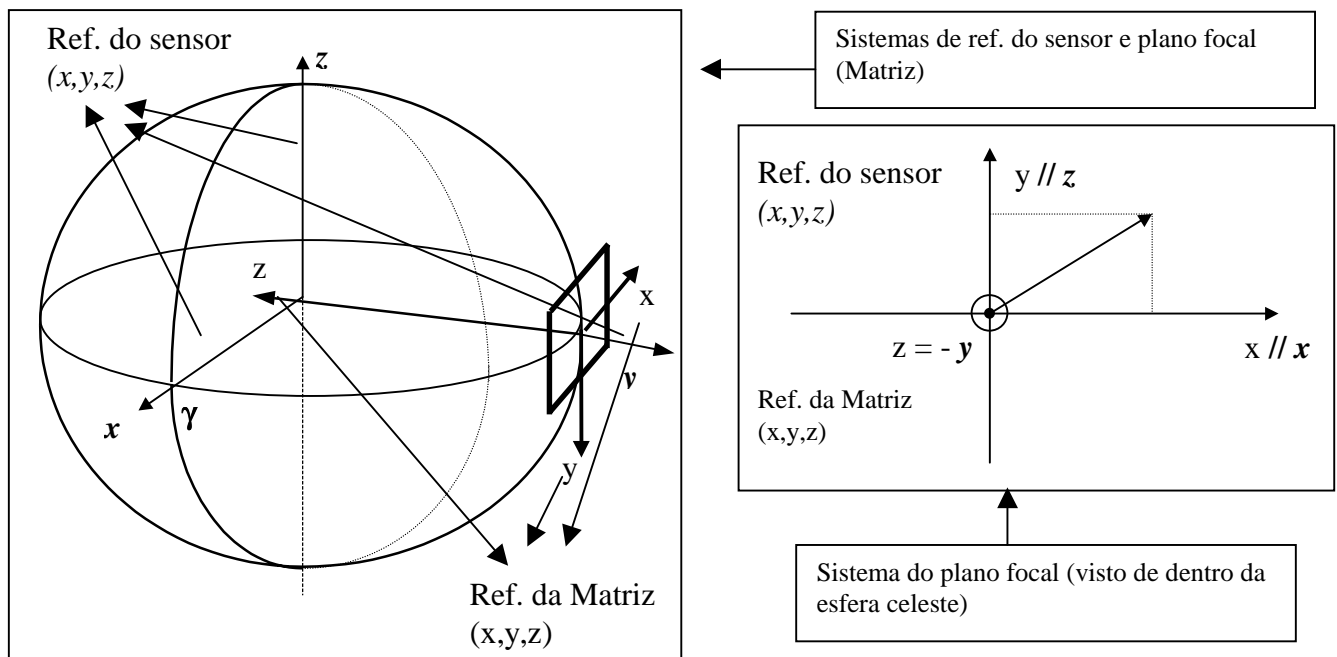


Fig. B.3 - Convenção dos referenciais SIATS.

Assim, para compatibilizar as informações entre as duas definições foi necessário adotar-se os valores X1 e Y1 dos dados **ROSAT** como os valores Y e X respectivamente para os dados **SIATS**. Os valores de observação (X,Y) foram então considerados como os valores dos ângulos ( $\phi, \lambda$ ) entre o versor das observações e o eixo de apontamento do sensor, ao mesmo tempo em que foi calculada a saída do sensor para esses dados e representada por SensorCoordData.

Dessa forma, com os valores de observações (X,Y), a matriz SpfFromSenpoint e a atitude SpfFromInfrDR foi possível obter os valores para as observações no sistema equatorial de coordenadas conjugado com a respectiva magnitude (Ascensão reta, Declinação, Magnitude). Ainda, com a atitude SpfFromInfrDR e a matriz SpfFromSenpoint foi possível calcular o apontamento do sensor, representado no sistema equatorial de atitude por SensorPointingDir.

Com essas transformações, gerou-se um novo conjunto de dados **SIATS**, baseados nos originais do **ROSAT**, que pudessem ser utilizados nas simulações e avaliações do algoritmo a ser testado.

Abaixo apresenta-se o resumo do significado dos dados convertidos:

- Stars – matriz de dados **SIATS** representando a região de observação com as seguintes informações:
  - CATNUMBER – número de catalogação da estrela
  - RA – ascensão reta (graus)
  - DEC – declinação (graus)
  - MAG – magnitude (visual)
  - BVD – diferença de magnitudes “Blue” e visual (assumido 0)
  - SPC – código de classe espectral
  - Fi (valores X) – ângulo entre a projeção do versor de observação no plano xy e o eixo de apontamento do sensor (graus)
  - Lambda (valores Y) – ângulo entre a projeção do versor de observação no plano yz e o eixo de apontamento do sensor (graus)
- IdentObsStarData – matriz de dados representando as estrelas identificadas com as seguintes informações:
  - CATNUMBER – número de catalogação da estrela
  - RA – ascensão reta (graus)
  - DEC – declinação (graus)
  - MAG – magnitude real (visual)
  - BVD – diferença de magnitudes “Blue” e visual (assumido 0)
  - SPC – código de classe espectral
  - Fi (valores X) – ângulo entre a projeção do versor de observação no plano xy e o eixo de apontamento do sensor (graus)
  - Lambda (valores Y) – ângulo entre a projeção do versor de observação no plano yz e o eixo de apontamento do sensor (graus)
  - OBSMAG – magnitude de observação (visual)
- SensorCoordData - matriz de dados representando as estrelas identificadas com as seguintes informações:
  - X – abscissa da coordenada de matriz de sensor (adimensional)
  - Y – ordenada da coordenada de matriz de sensor (adimensional)
  - MAG – magnitude (visual)
- ObservedIndex – índices das estrelas observadas da região de observação
- SpfFromSenpoint – matriz de rotação que leva o referencial de apontamento do sensor para o da espaçonave
- SensorPointingDir – representação da atitude no sistema equatorial de atitude (asc. reta, decl., fase) (graus) da direção de apontamento do eixo Y sistema do sensor
- SensorAt – ângulos de **Euler** em rotação 312 para a atitude do sistema de referência do sensor com relação ao sistema da espaçonave
- PosPrec – precisão de observação de posição (graus)
- MagPrec – precisão de observação de magnitude (visual)
- SensorMaxMag – máxima magnitude observada pelo sensor (visual)

- SensorMaxNumOfStars – número máximo de estrelas rastreáveis
- FocalLength – distância focal (m)
- FovSizeAperture – abertura angular do FOV (graus)
- MagMax – magnitude máxima do catálogo de trabalho (visual)

➤ Stars:

| CATNUMBER | RA      | DEC    | MAG   | BVD | SCI | Fi     | Lambda |
|-----------|---------|--------|-------|-----|-----|--------|--------|
| 18430160  | 280.906 | -1.559 | 6.480 | 0   | 60  | -1.190 | 1.530  |
| 18560078  | 284.094 | -1.800 | 6.460 | 0   | 10  | -0.940 | -1.660 |
| 18470034  | 281.793 | -4.748 | 3.910 | 0   | 40  | 2.000  | 0.650  |
| 18500036  | 282.535 | -3.693 | 6.450 | 0   | 50  | 0.880  | -0.090 |
| 18520124  | 283.107 | -3.726 | 6.480 | 0   | 50  | 0.990  | -0.660 |
| 18410117  | 280.393 | -3.119 | 6.500 | 0   | 50  | 0.370  | 2.040  |
| 18510110  | 282.842 | -3.318 | 6.150 | 0   | 30  | 0.580  | -0.400 |
| 18570015  | 284.265 | -5.846 | 4.520 | 0   | 50  | 3.110  | -1.810 |
| 18490141  | 282.404 | 0.836  | 6.450 | 0   | 20  | -3.580 | 0.030  |
| 18440165  | 281.160 | -6.536 | 5.940 | 0   | 50  | 3.790  | 1.270  |
| 18470102  | 281.870 | -5.705 | 4.720 | 0   | 40  | 2.960  | 0.570  |
| 18390040  | 279.806 | -1.952 | 6.810 | 0   | 50  | -0.790 | 2.630  |
| 19000196  | 285.189 | -0.455 | 6.840 | 0   | 40  | -2.280 | -2.760 |
| 18490160  | 282.420 | -5.913 | 5.450 | 0   | 50  | 3.170  | 0.030  |
| 18480124  | 282.164 | -6.007 | 6.620 | 0   | 20  | 3.260  | 0.280  |
| 18400161  | 280.197 | -4.497 | 6.970 | 0   | 50  | 1.750  | 2.240  |
| 18550192  | 283.964 | -0.739 | 6.980 | 0   | 50  | -2.000 | -1.530 |
| 18440236  | 281.233 | -0.373 | 6.990 | 0   | 0   | -2.370 | 1.200  |
| 18570131  | 284.399 | -0.526 | 7.000 | 0   | 50  | -2.230 | -1.970 |
| 18410096  | 280.361 | 0.564  | 7.020 | 0   | 50  | -3.310 | 2.070  |
| 18580097  | 284.607 | 1.198  | 7.070 | 0   | 20  | -3.940 | -2.180 |

➤ IdentObsStarData:

| CATNUMBER | RA      | DEC    | MAG   | BVD | SCI | Fi     | Lambda |
|-----------|---------|--------|-------|-----|-----|--------|--------|
| 18430160  | 280.906 | -1.559 | 6.480 | 0   | 60  | -1.190 | 1.530  |
| 18560078  | 284.094 | -1.800 | 6.460 | 0   | 10  | -0.940 | -1.660 |
| 18470034  | 281.793 | -4.748 | 3.910 | 0   | 40  | 2.000  | 0.650  |

➤ SensorCoordData:

| X      | Y      | MAG   |
|--------|--------|-------|
| -0.002 | 0.002  | 6.480 |
| -0.001 | -0.002 | 6.460 |
| 0.003  | 0.001  | 3.910 |

➤ SpfFromSenpoint:

|             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|
| 0.99932379  | -0.00073049 | -0.03676180 |
| -0.00067621 | 0.99926842  | -0.03823824 |
| 0.03676283  | 0.03823724  | 0.99859221  |

➤ SensorPointingDir:

|           |         |           |
|-----------|---------|-----------|
| [282.4391 | -2.7470 | 270.1783] |
|-----------|---------|-----------|

- SensorAt:
- [ 269.961   2.107   2.193 ]
- ObservedTrackedIndex:
- [1   2   3]
- FOVSizeAperture: [5.9   4.4 ] (graus)
- FocalLength: 0.082 (m)
- SensorMaxNumOfStars: 3
- MagMax: 6.5 (visual)
- SensorMaxMag: 7.0 (visual)
- MagPrec: 0.25 (visual)
- PosPrec: 2 (arcsec)

A Fig. B.4 abaixo representa as observações e valores de estrelas catalogadas para os dados:

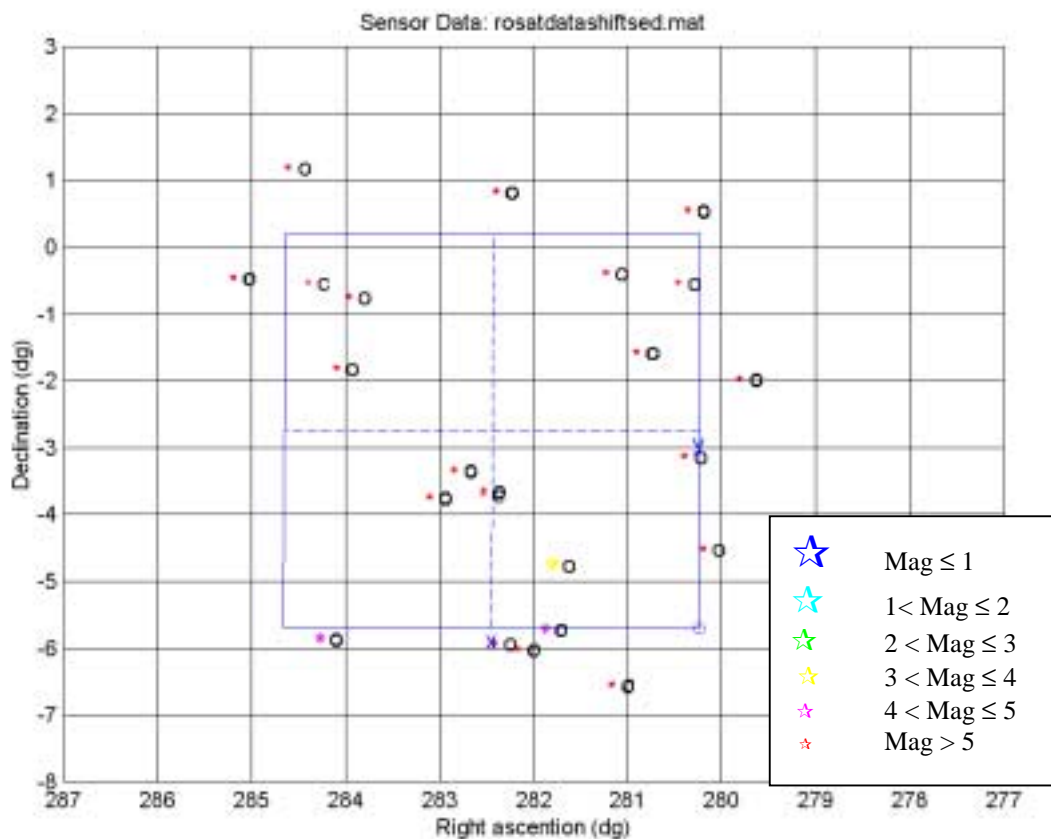


Fig. B.4 - Observações e FOV do sensor (eixos x e y do FOV estão representados com a convenção de eixos para SIATS). C representa os valores (RA,DEC) para as estrelas do catálogo (2.a e 3.a colunas da matriz Stars) e O os valores (X,Y) (7.a e 8.a colunas da matriz Stars).



A Fig. B.5 abaixo representa as posições do FOV e a atitude da espaçonave em 3D para os dados:

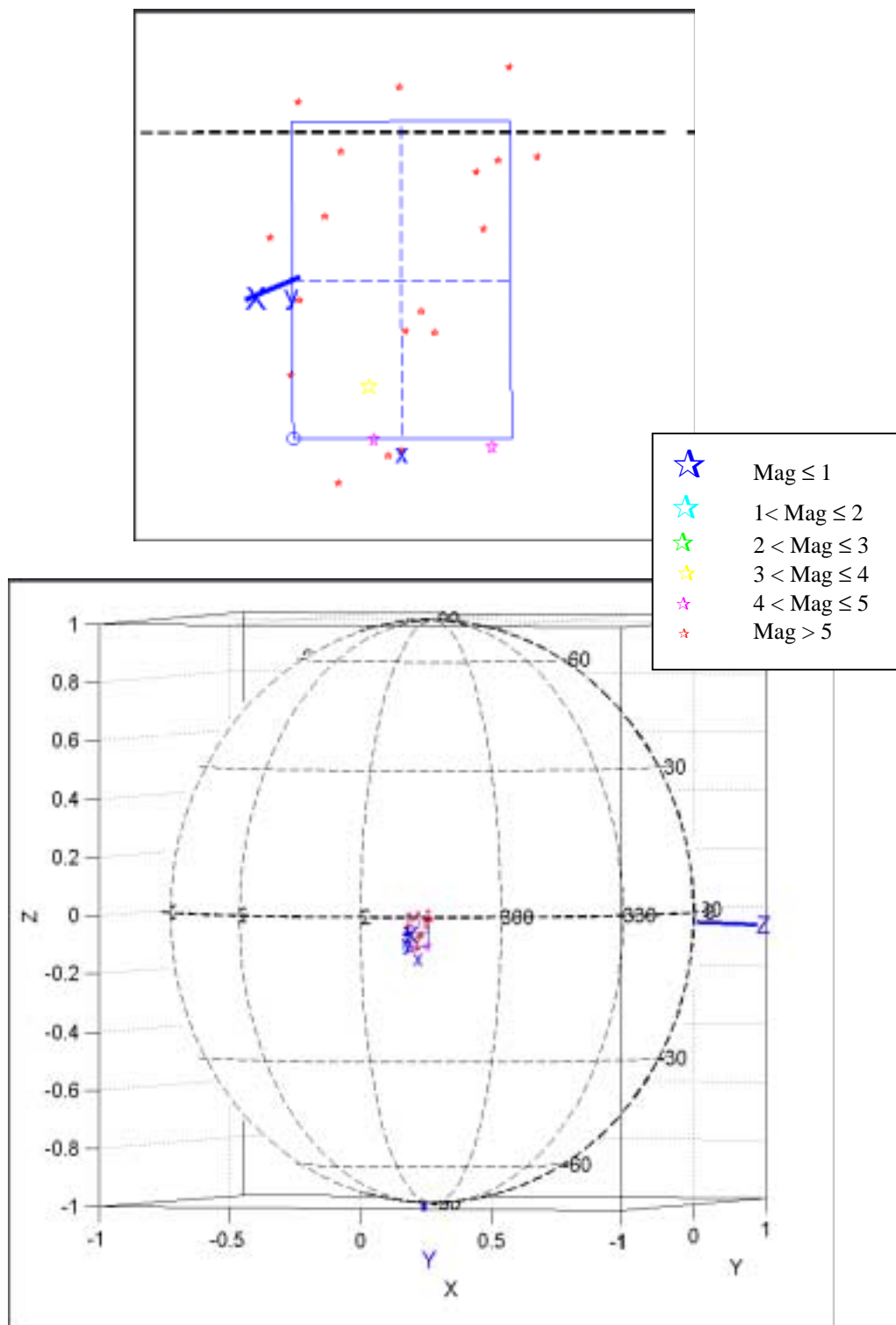


Fig. B.5 - Representação 3D da atitude e FOV (Eixos azuis maiores são relacionados ao referencial da espaçonave, enquanto que os menores são relacionados à matriz CCD do FOV).



## APÊNDICE C

### SIATS

Pode-se descrever a estrutura de software da ferramenta SIATS nos seguintes itens componentes (Computer Software Components - CSCs):

- *Control Panel* (CSC-1),
- *Simulation* (CSC-2),
- *Function Library* (CSC-3),
- *Tools* (CSC-4),
- *Data* (CSC-5).

Graficamente pode-se representar a estrutura de CSCs da seguinte forma (Ver Fig. C.1):

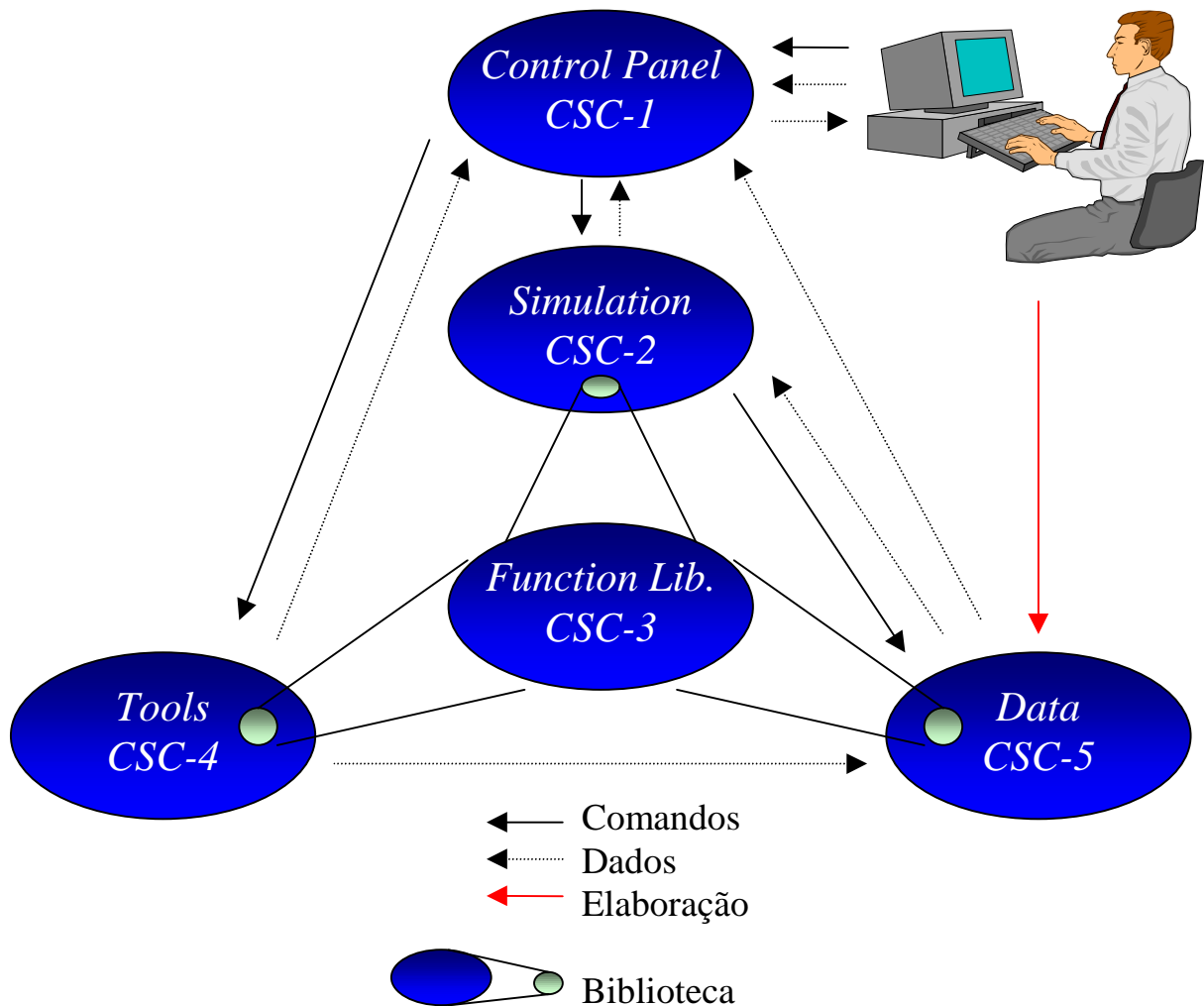


Fig. C.1 - Estrutura funcional de CSCs do ambiente de simulação e testes SIATS.

Cada um desses componentes desempenha um papel determinado no conjunto que compõe todo o sistema do ambiente de simulação e testes. O idioma adotado no desenvolvimento foi o inglês. A seguir são descritos em detalhe cada um dos componentes. Exemplos de saídas do *software* são mostradas em seguida como exemplo.

## C.1. COMPONENTES SIATS

### C.1.1. CONTROL PANEL

Este CSC representa a estrutura principal da ferramenta. É nele que todas as ações e interfaces com o usuário ocorrem, sendo constituído por todas as janelas que compõem a ferramenta.

Na janela principal apresentam-se a barra de menus e os botões que dão acesso às funcionalidades, além da própria visualização 3D, textual e gráfica do resultados de testes executados (Ver Fig. C.2).

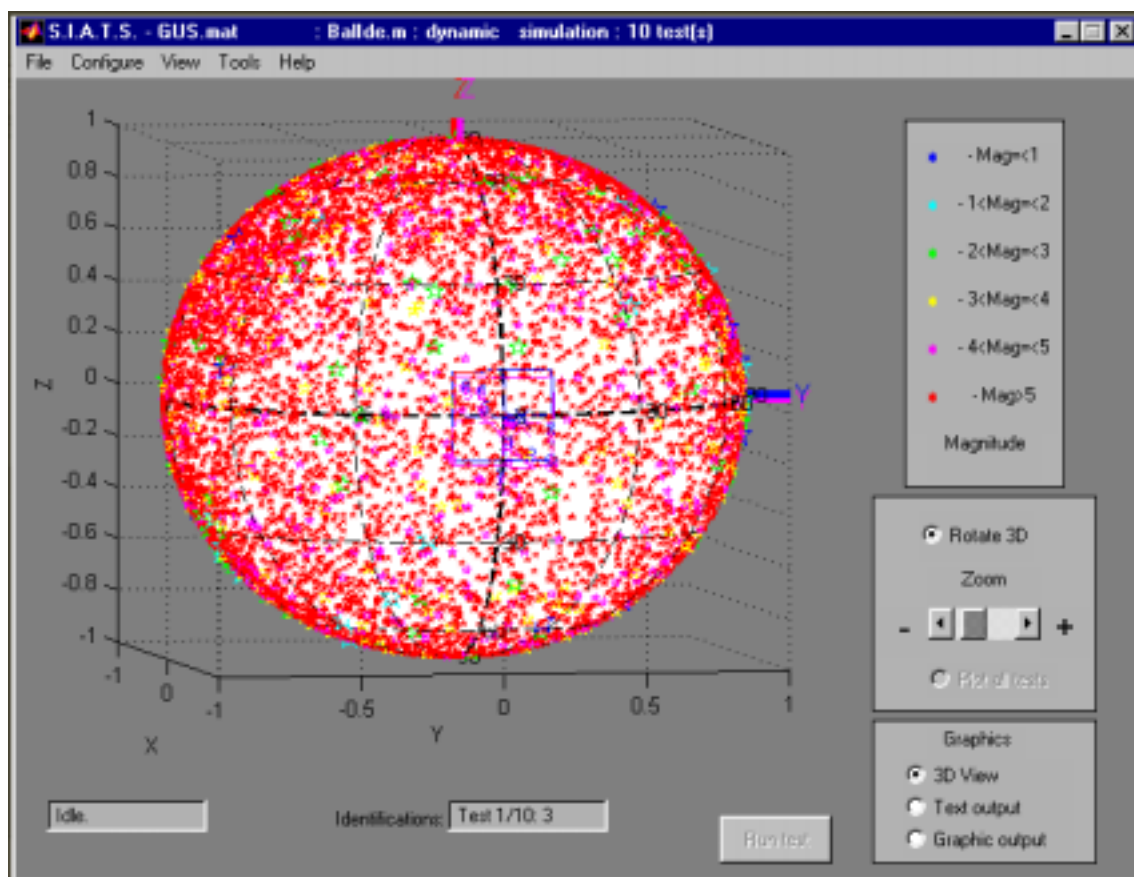


Fig. C.2 - Janela principal de interface da ferramenta SIATS.

Através desta janela é possível ter acesso a 3 diferentes formas de visualizar os resultados:

- Painel 3D:

No painel 3D exibe-se tri-dimensionalmente as condições do teste. Neste painel pode-se visualizar o seguinte (Ver Fig. C.3):

- Esfera celeste e sua repartição no sistema equatorial de coordenadas,
- estrelas presentes no céu (tamanhos e cores conforme a magnitude),
- posição real do FOV do sensor estelar (em azul),
- atitude real da espaçonave representada pelos seus 3 eixos XYZ (em azul),
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis),
- posição pré-determinada do FOV do sensor estelar (em magenta),
- atitude pré-estimada da espaçonave representada pelos seus 3 eixos XYZ (em magenta),
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV pré-estimado (círculos magenta),
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho),
- atitude determinada da espaçonave representada pelos seus 3 eixos XYZ (em vermelho),
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos).

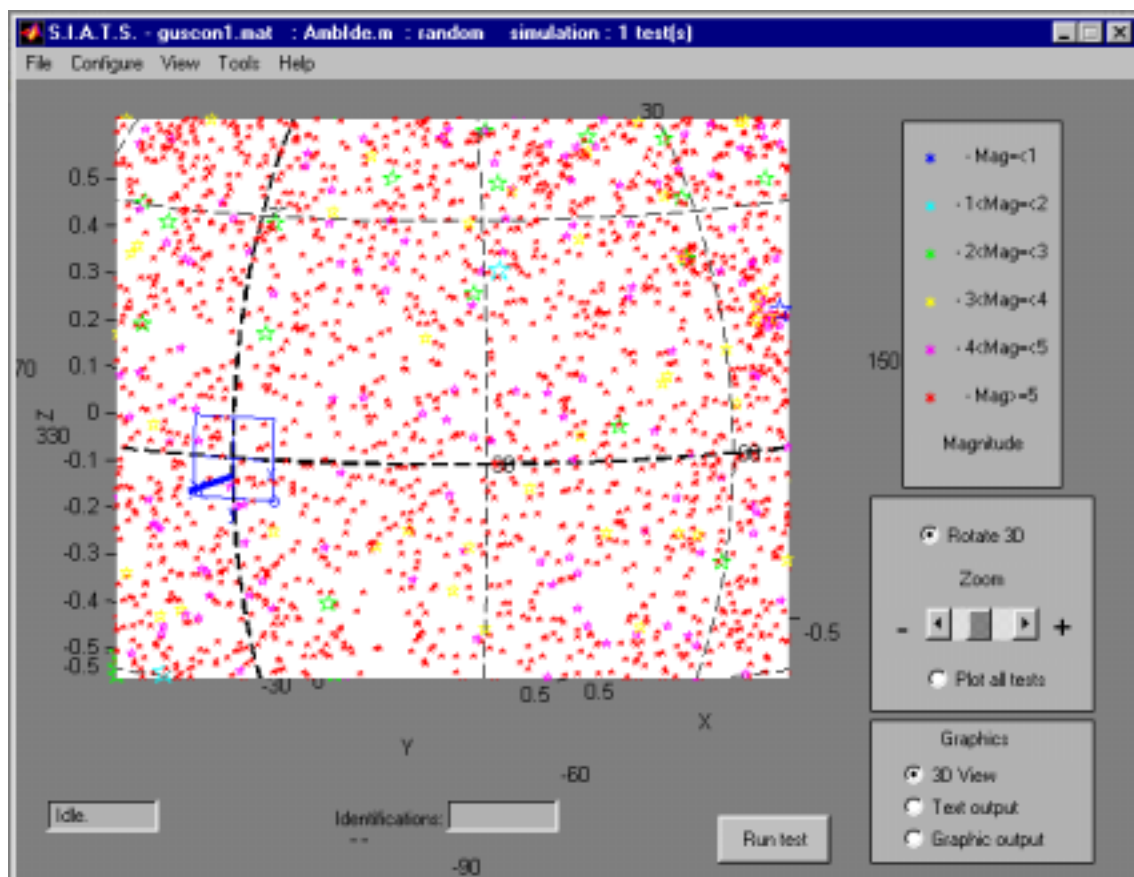


Fig. C.3 - Visualização 3D (ampliada) dos resultados de teste.

É possível também visualizar qualquer estrutura desenhada por rotinas específicas fornecidas pelo usuário (Círculos grande magenta na Fig. C.2 referentes ao método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza. Ver Seção C.1.5. - DATA).

Além disso há a possibilidade de se comandar uma ampliação/redução ou rotação na imagem através de comandos disponíveis no painel, além de habilitar/desabilitar a visualização 3D para cada teste (Ver Seção C.1.2. -SIMULATION).

- Painel Textual:

No painel textual exibe-se em formato texto as condições do teste. Neste painel pode-se visualizar o seguinte (Ver Fig. C.4):

- Relatórios unitários para cada teste,
- Relatórios gerais englobando todos os testes.

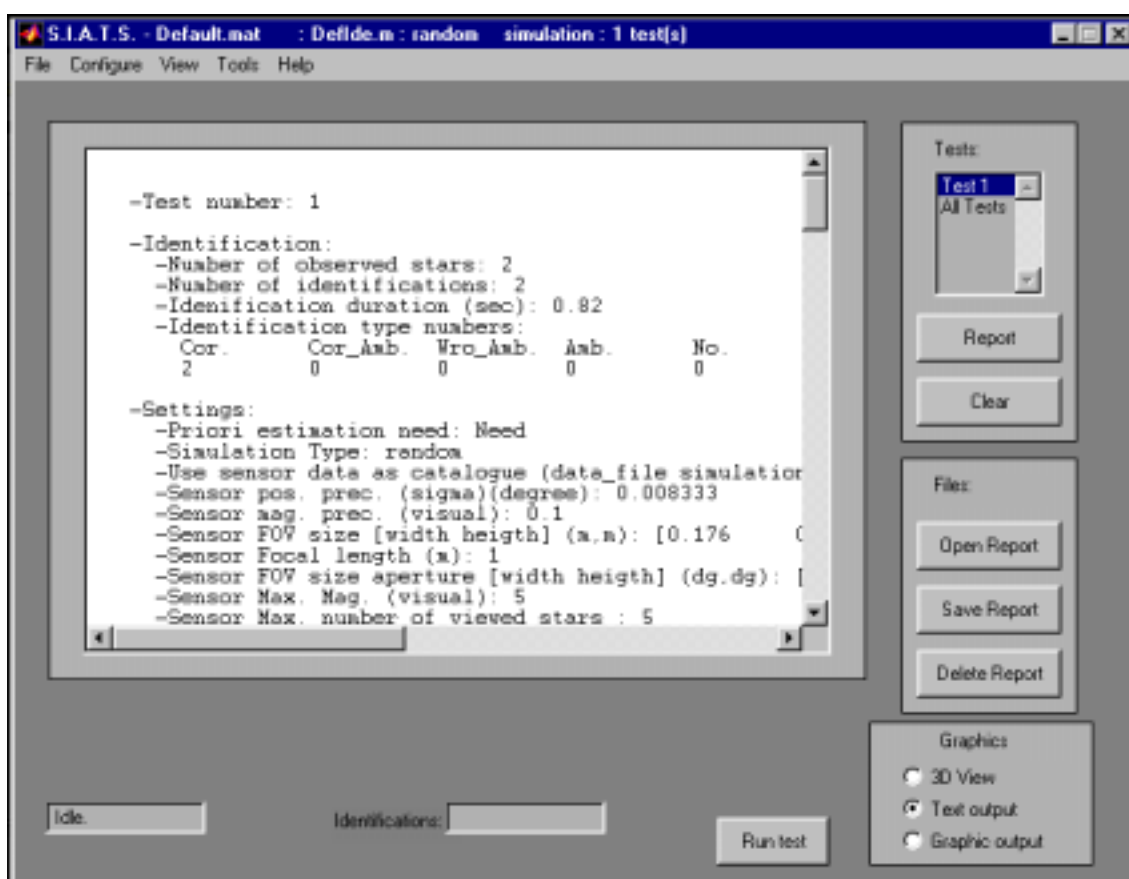


Fig. C.4 - Visualização textual dos resultados de teste.

É possível também visualizar qualquer informação escrita por rotinas específicas fornecidas pelo usuário (Ver Seção C.1.5. - DATA).

Além disso há a possibilidade de se gravar, apagar e abrir arquivos texto gerados pela ferramenta em formato *ASCII* através de comandos disponíveis no painel.

- Painel Gráfico:

No painel gráfico exibe-se em formato de gráficos bidimensionais as condições do teste. Neste painel pode-se visualizar o seguinte (Ver Fig. C.5):

- Gráficos unitários para cada teste,
- Gráficos gerais englobando todos os testes.

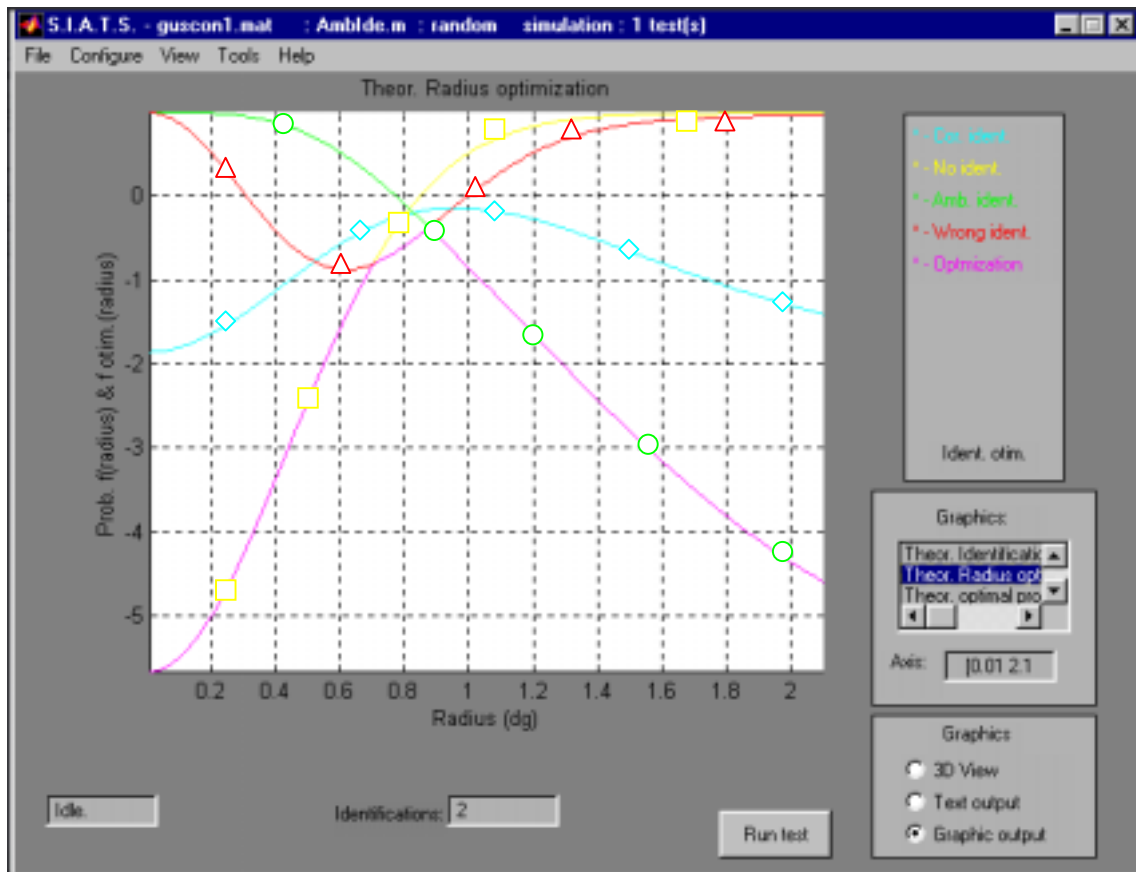


Fig. C.5 - Visualização gráfica dos resultados de teste.

É possível também visualizar qualquer gráfico gerado por rotinas específicas fornecidas pelo usuário (Ver Seção C.1.5. - DATA).

Além disso há a possibilidade de se ampliar a resolução dos eixos através de comando disponível no painel.

Agregadas também ao *Control Panel* estão as janelas que permitem:

- Configurar o ambiente de testes:

Para a configuração de cada modelo, assim como arquivos de dados utilizados na simulação utiliza-se os itens do menu “*Configure*” presente na barra de menus (Ver Fig. C.6).

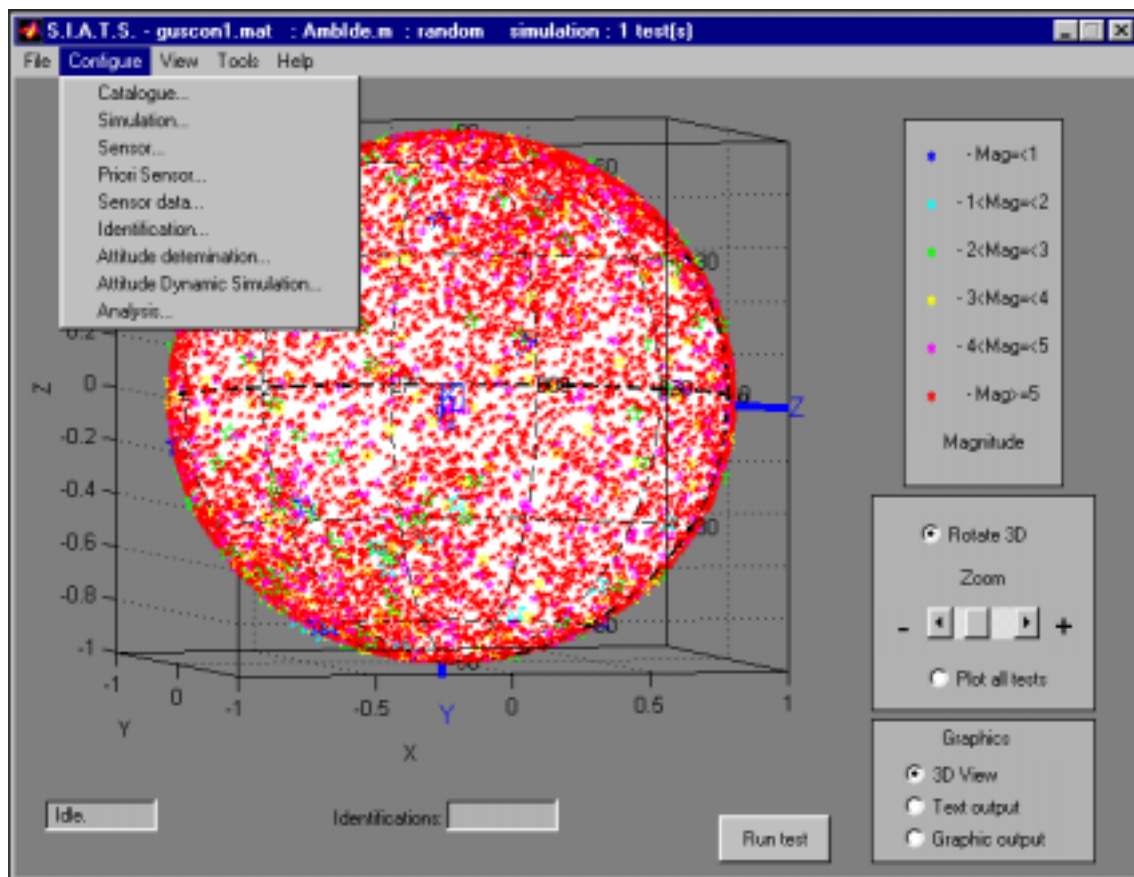


Fig. C.6 - Menus de configuração do ambiente de simulação e teste.



Com esses itens é possível configurar:

➤ *Catálogos:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.7):

- inserir arquivos de catálogo,
- remover arquivos de catálogo
- configurar (botão *Change Features*) (Ver Fig. C.8):
  - ⇒ a magnitude máxima do catálogo de trabalho,
  - ⇒ a probabilidade de existência de uma estrela no catálogo de trabalho

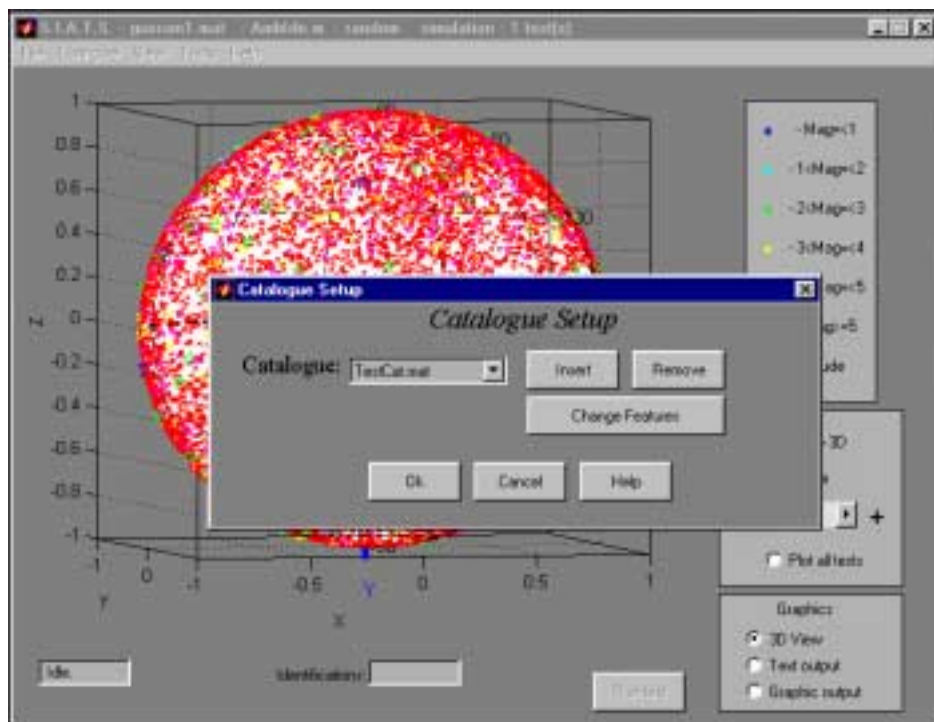


Fig. C.7 - Configuração do catálogo.

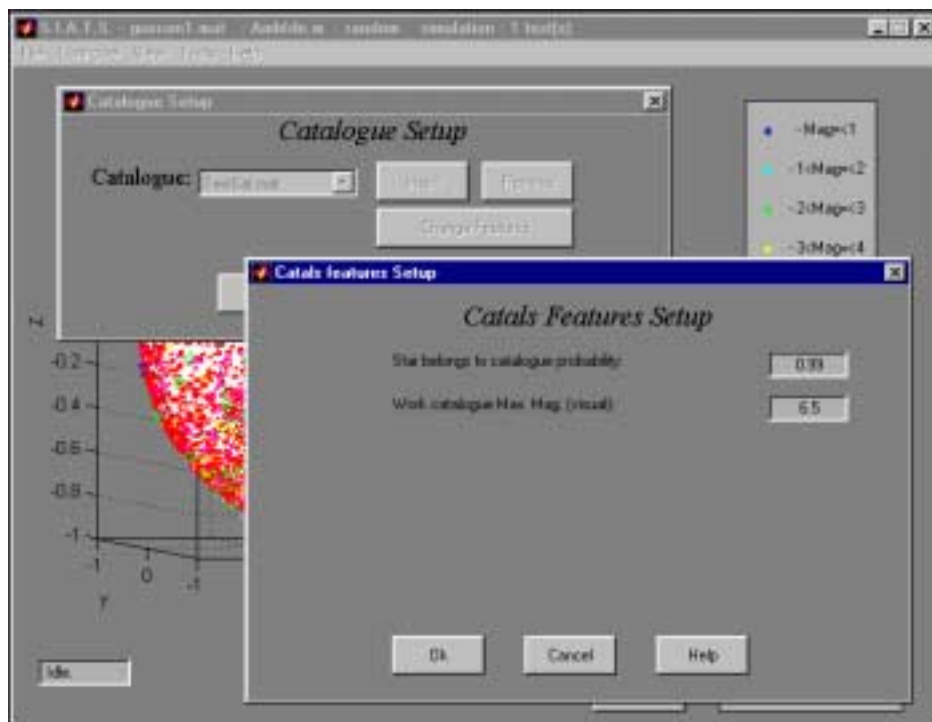


Fig. C.8 - Configuração de características de catálogo.

➤ *Tipo de simulação:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.9) configurar a simulação para os seguintes tipos:

- simulação por arquivo de dados de sensor
- simulação aleatória
- entrada manual
- simulação dinâmica

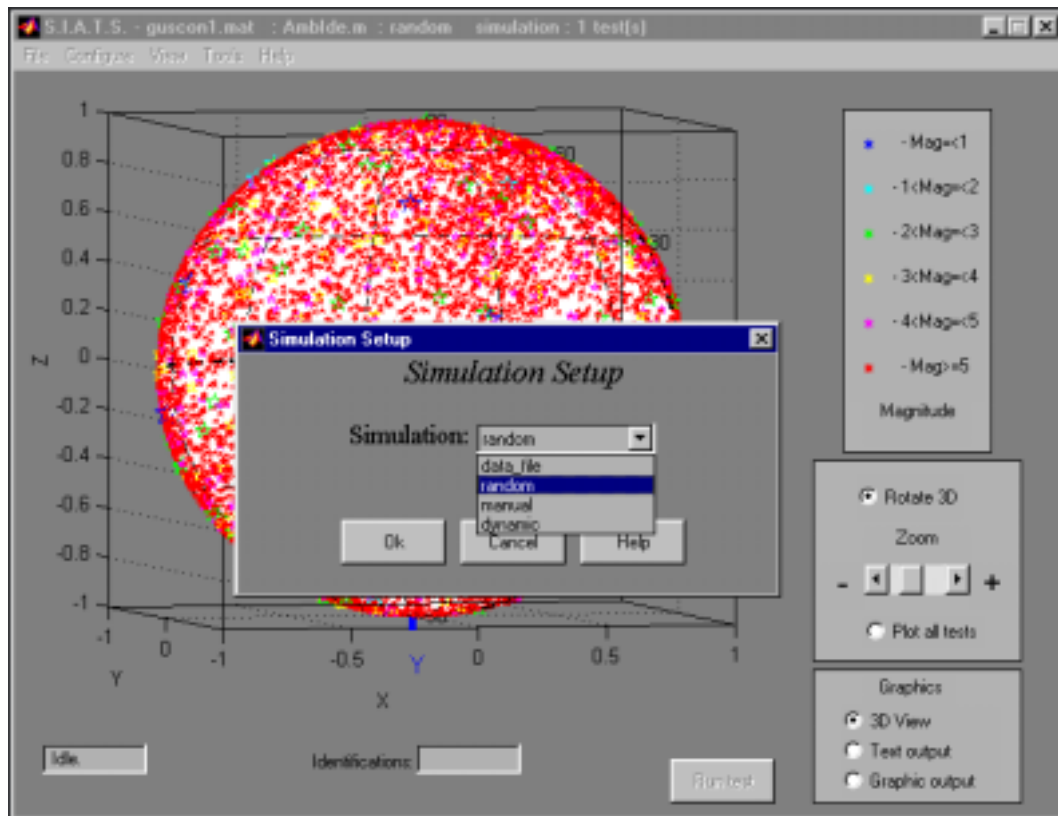


Fig. C.9 - Configuração do tipo de simulação.

➤ *Sensor de estrelas:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.10):

- inserir modelos de sensor de estrelas,
- remover modelos de sensor de estrelas,
- configurar (botão *Change Features*) (Ver Fig. C.11):
  - ⇒ precisão de observação de magnitude,
  - ⇒ máxima magnitude de observação,
  - ⇒ precisão de observação de posição,
  - ⇒ tamanho do FOV do sensor,
  - ⇒ distância focal da lente do sensor,
  - ⇒ abertura angular do FOV do sensor,
  - ⇒ ângulos de **Euler** da atitude do sistema do sensor com relação ao referencial da espaçonave,
  - ⇒ número máximo de estrelas rastreadas,
  - ⇒ ângulos de ascensão reta, declinação e rolagem do apontamento do sensor.

Além disso, quando em modo de simulação por arquivo de dados de sensor de estrelas é possível configurar, no arquivo de dados, as mesmas características descritas acima para o modelo de sensor (Ver Fig. C.12).

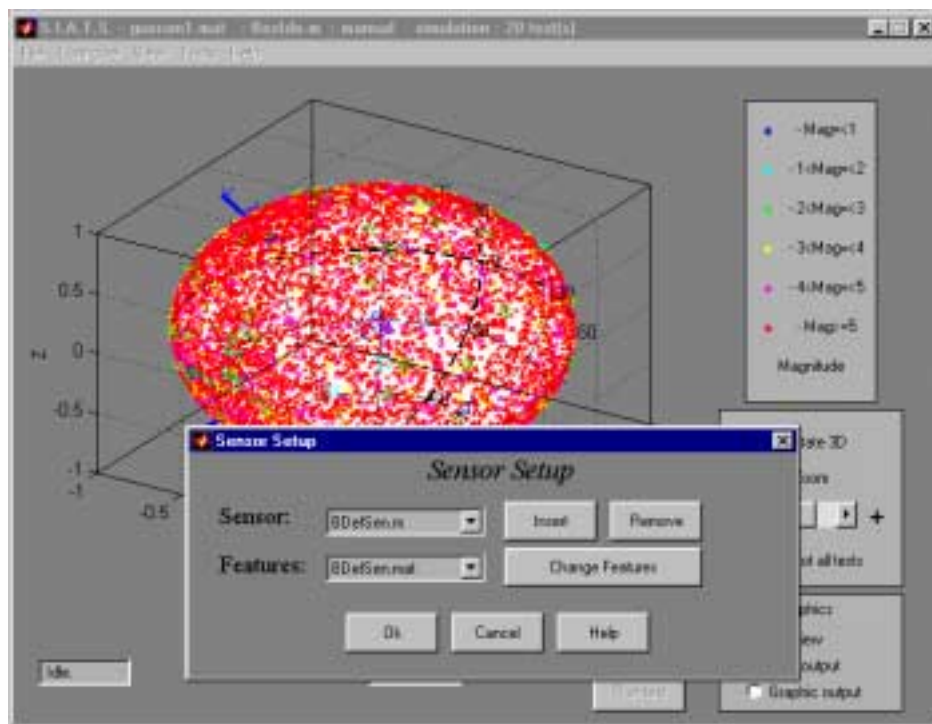


Fig. C.10 - Configuração do sensor de estrelas.

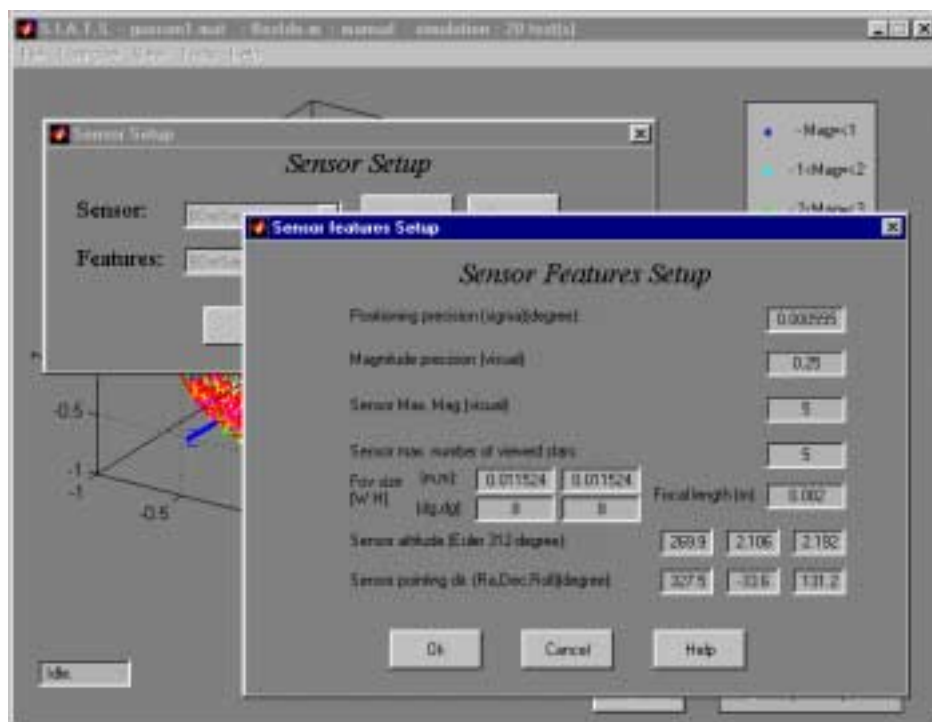


Fig. C.11 - Configuração de características do sensor de estrelas.

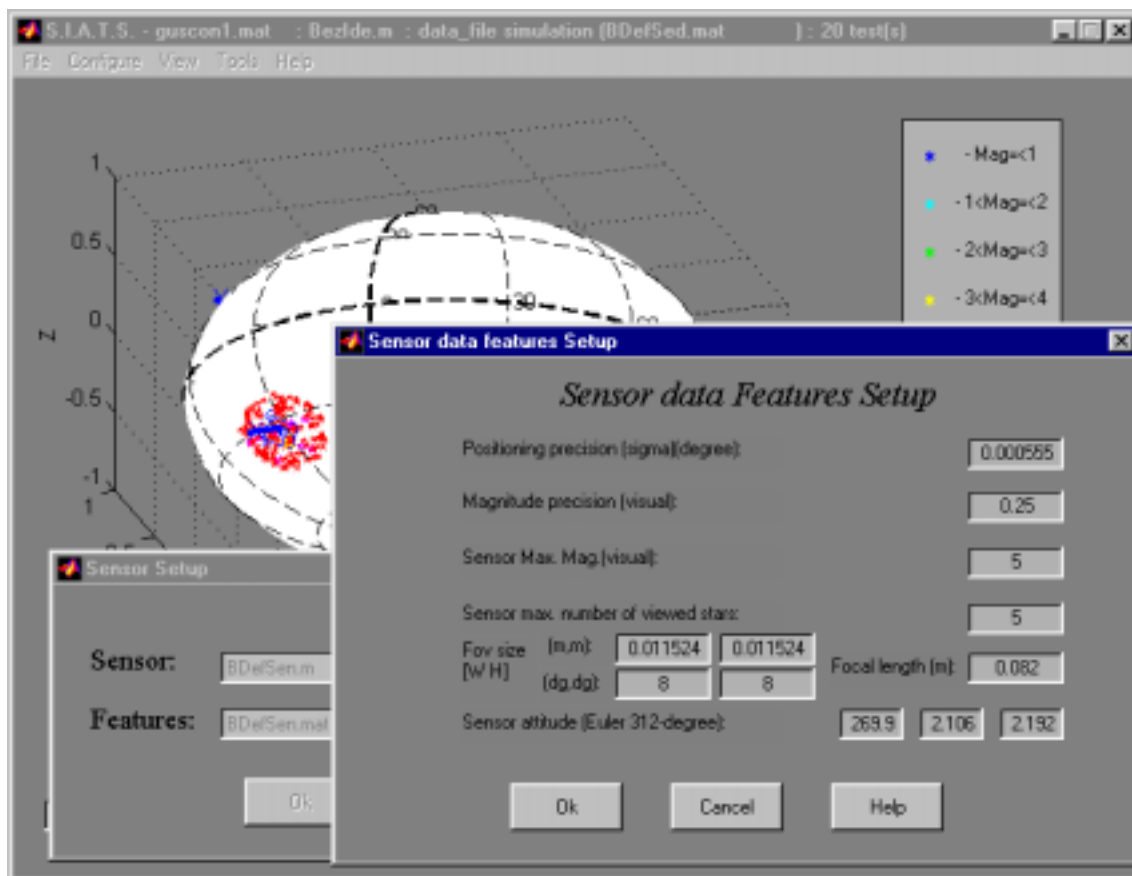


Fig. C.12 - Configuração de características do arquivo de dados de sensor de estrelas.

➤ *Sensor de Pré-estimativa:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.13):

- inserir modelos de sensor de pré-estimativa,
- remover modelos de sensor de pré-estimativa,
- configurar (botão *Change Features*) (Ver Fig. C.14):
  - ⇒ precisão de posição

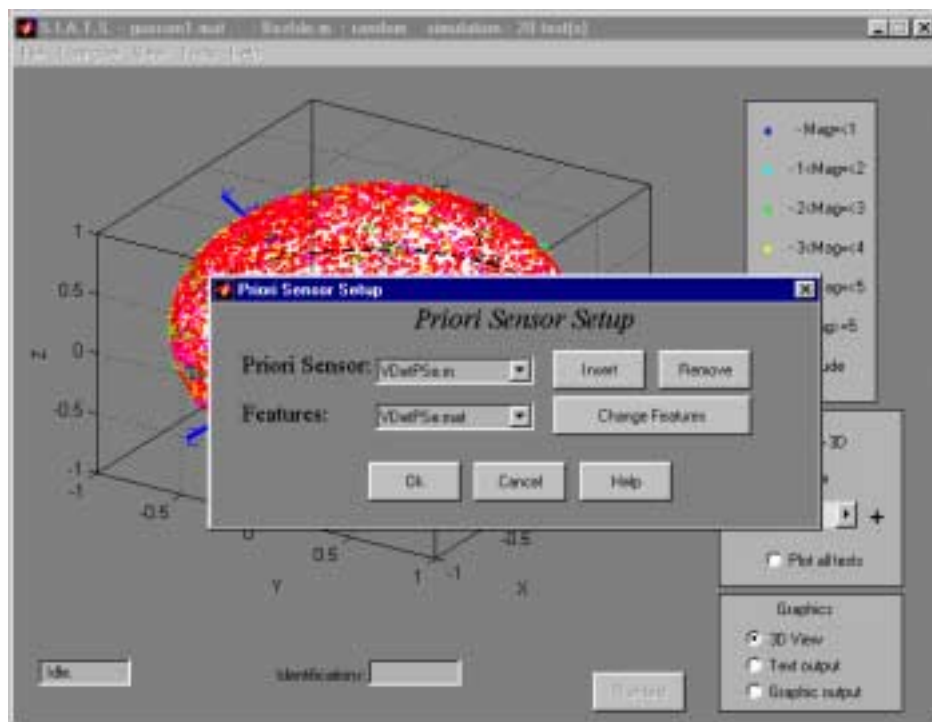


Fig. C.13 - Configuração do sensor de pré-estimativa.

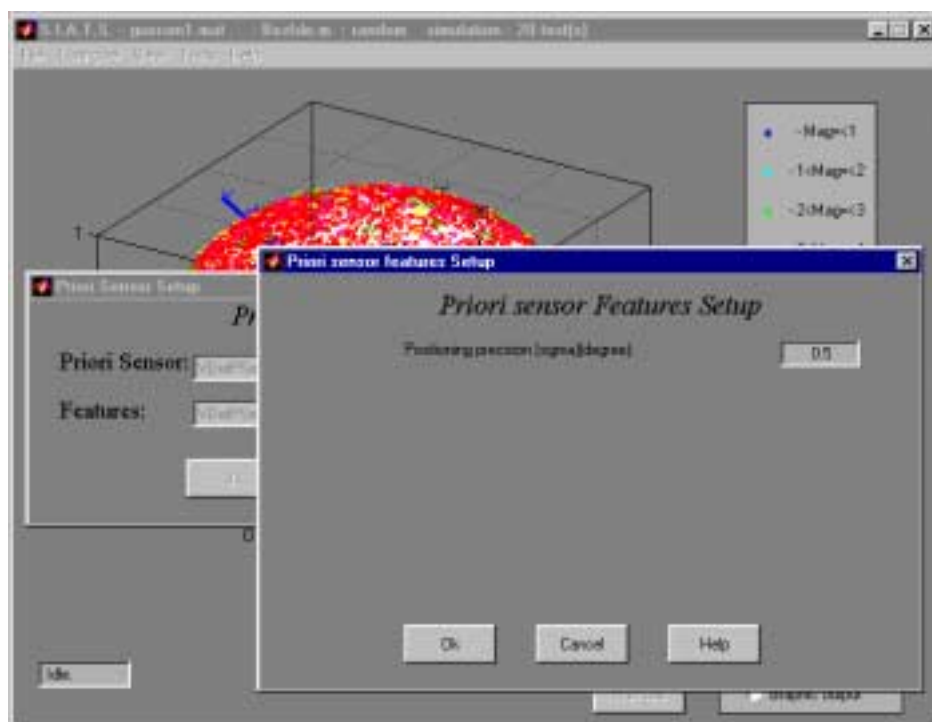


Fig. C.14 - Configuração de características do sensor de pré-estimativa.

➤ *Arquivo de dados de sensor de estrelas:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.15):

- inserir arquivo de dados de sensor de estrelas,
- remover arquivo de dados de sensor de estrelas,
- criar novo arquivo de dados de sensor de estrelas,
- apagar arquivo de dados de sensor de estrelas,
- habilitar a utilização de dados do arquivo como catálogo de trabalho,
- configurar magnitude máxima do catálogo de trabalho (quando em modo de simulação por arquivo de dados de sensor e com utilização de dados do arquivo como catálogo de trabalho habilitada).

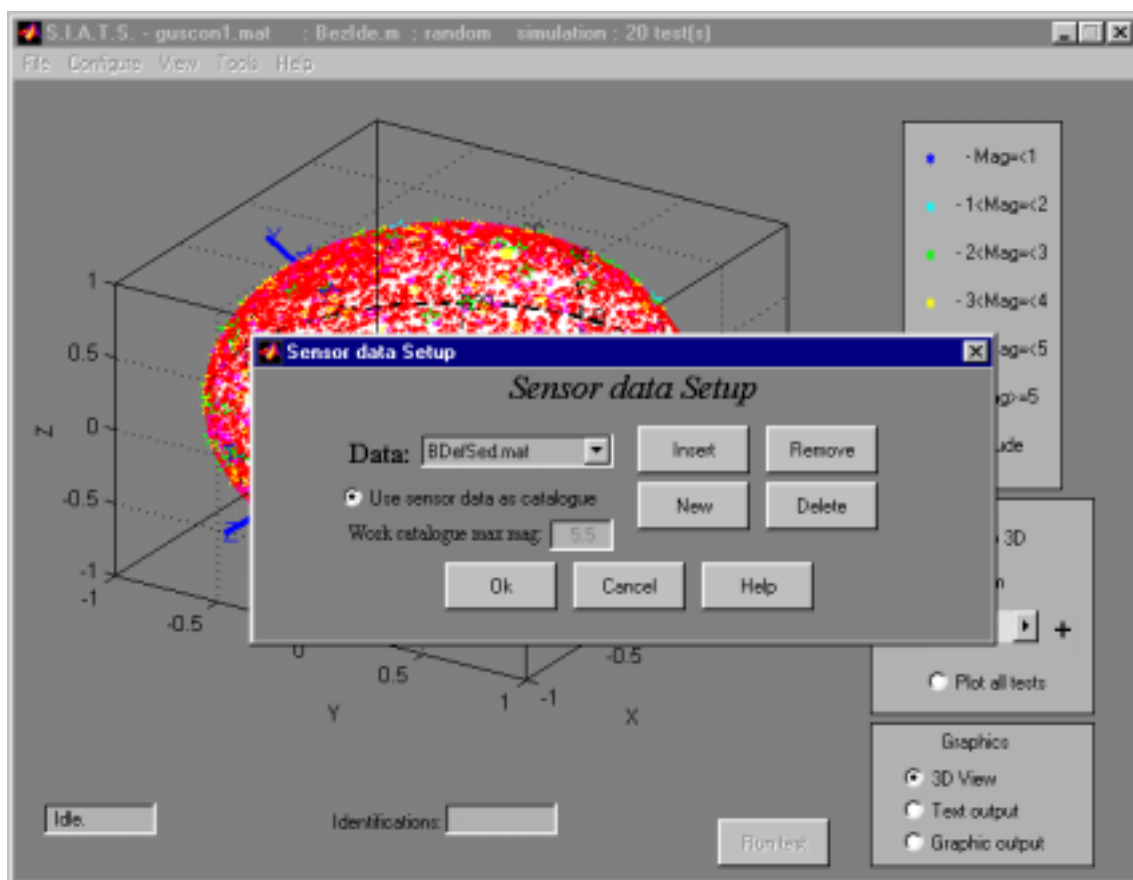


Fig. C.15 - Configuração do arquivo de dados de sensor de estrelas.

➤ *Algoritmo de identificação:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.16):

- inserir algoritmos de identificação de estrelas,
- remover algoritmos de identificação de estrelas,
- habilitar a classificação de identificações por índices de catalogação ou por coordenadas das estrelas identificadas do catálogo de trabalho,
- visualizar algoritmos auxiliares de teste configurados para o algoritmo de identificação em vigor,
- configurar (botão *Change Features*) (Ver Fig. C.17):
  - ⇒ necessidade do uso de pré-estimativa da atitude,
  - ⇒ faixas de valores Bom-Ruim para otimização de fatores de identificação de estrelas (tais como o raio no método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza)

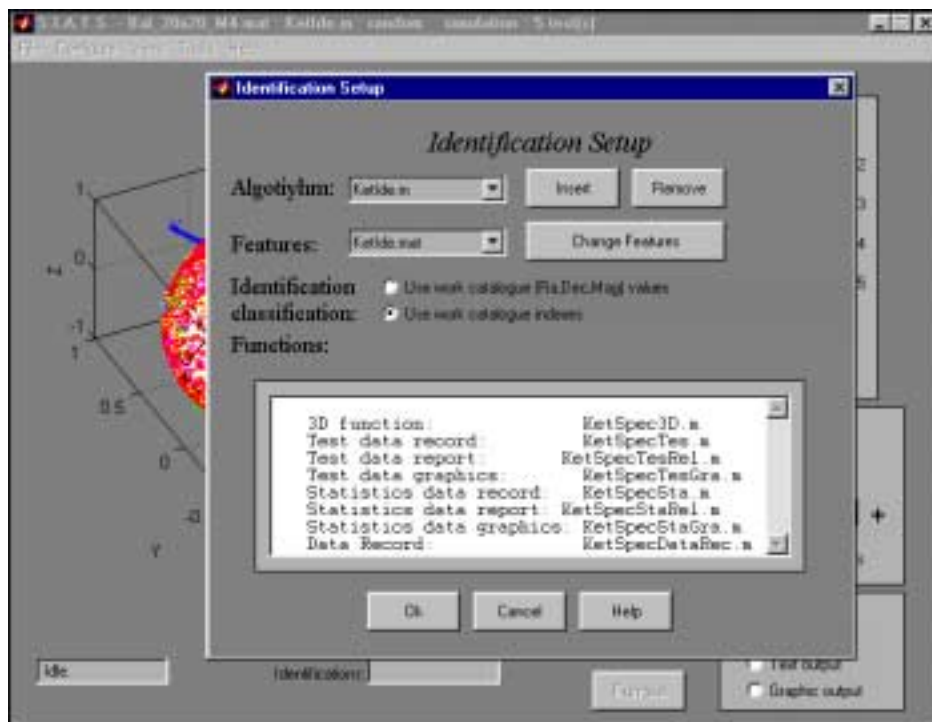


Fig. C.16 - Configuração do algoritmo de identificação de estrelas.



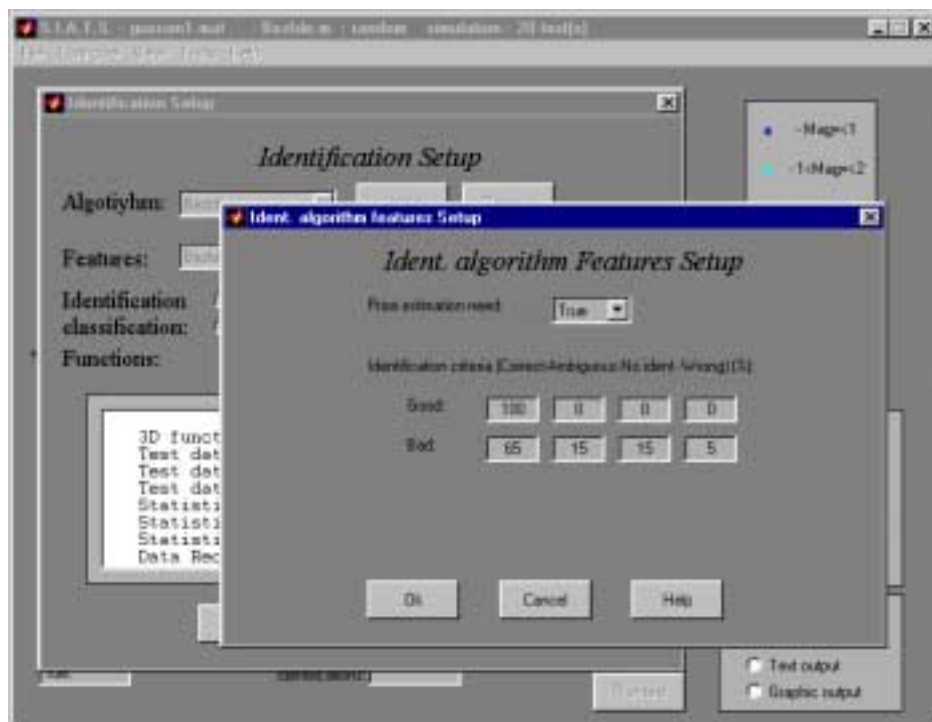


Fig. C.17 - Configuração de características do algoritmo de identificação de estrelas.

➤ *Determinação de atitude:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.18):

- inserir modelos de determinação de atitude,
- remover modelos de determinação de atitude

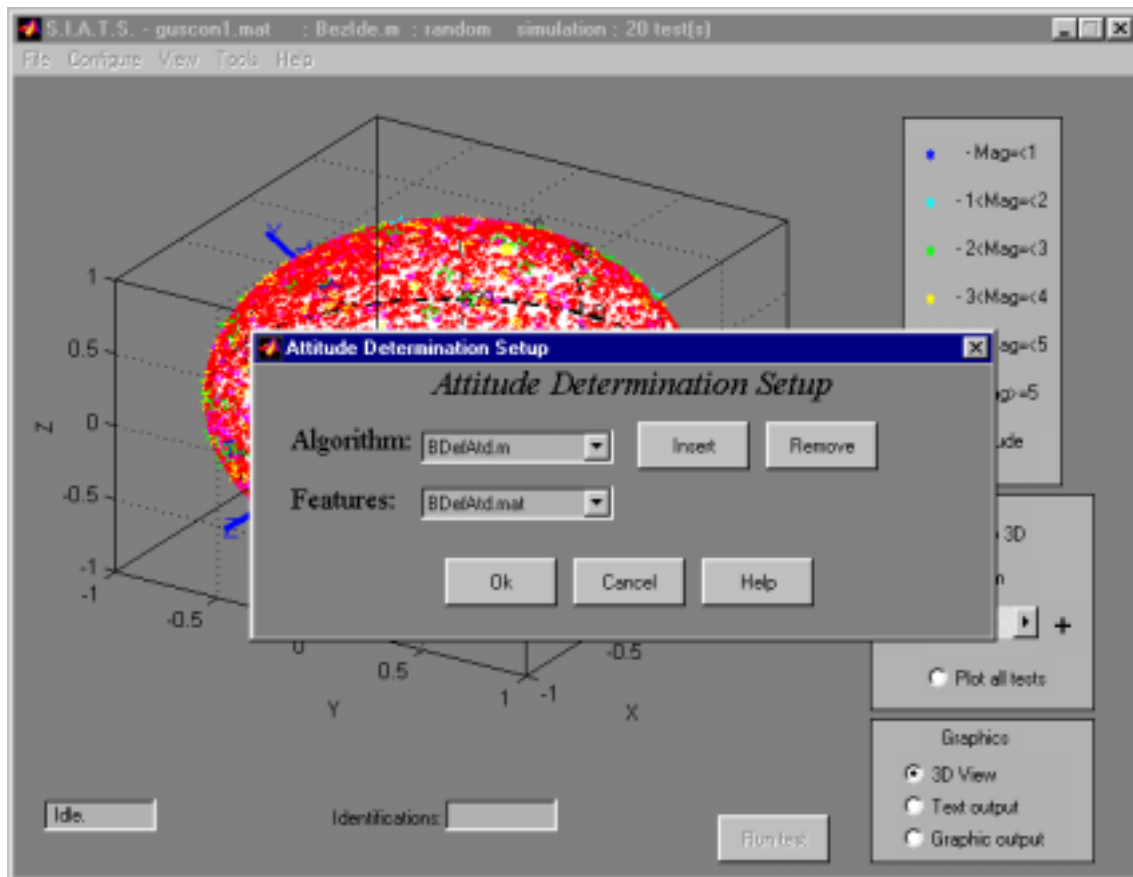


Fig. C.18 - Configuração da determinação de atitude.

➤ *Simulação dinâmica de atitude:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.19):

- inserir modelos de simulação dinâmica de atitude,
- remover modelos de simulação dinâmica de atitude

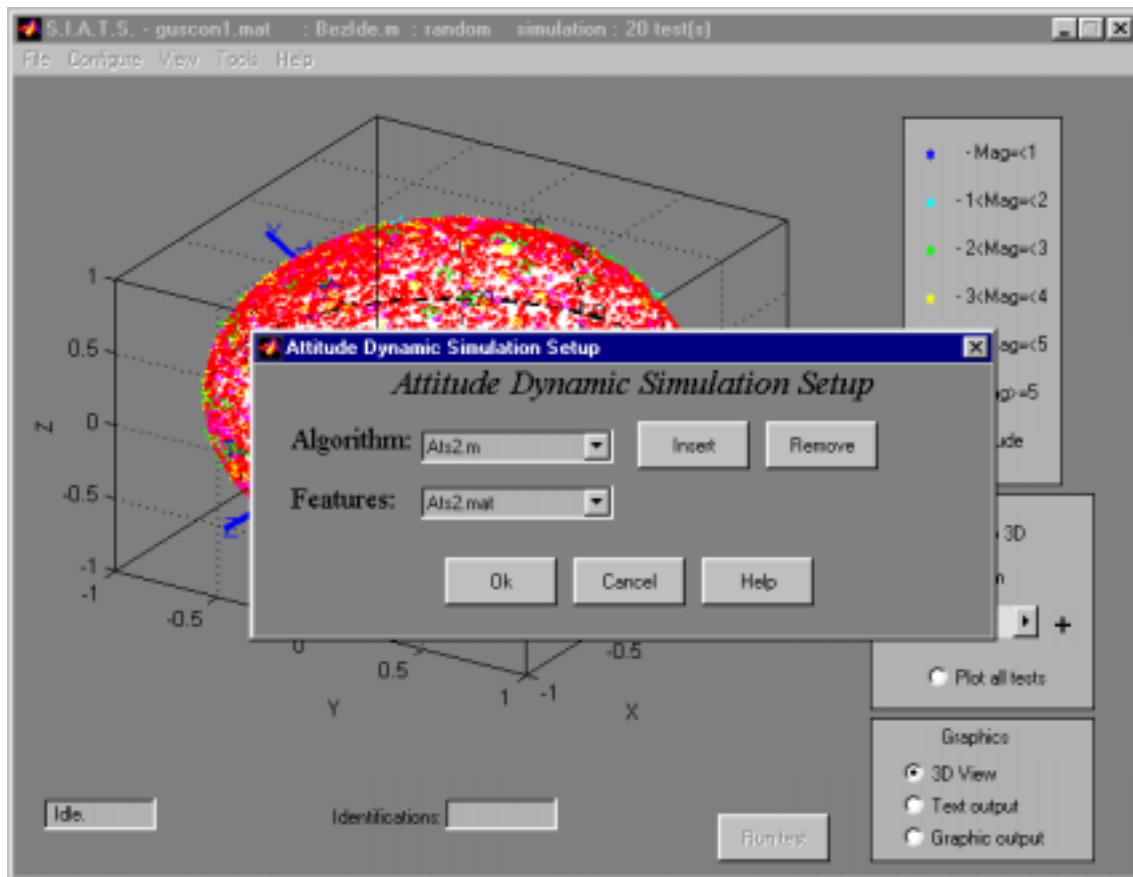


Fig. C.19 - Configuração da simulação dinâmica de atitude.

➤ *Arquivo de dados de resultado de teste:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.20):

- inserir arquivo de dados de teste,
- remover arquivo de dados de teste,
- criar novo arquivo de dados de teste,
- apagar arquivo de dados de teste,
- configurar (botão *Change Features*) (Ver Fig. C.21):  
⇒ descrição do arquivo de dados de teste

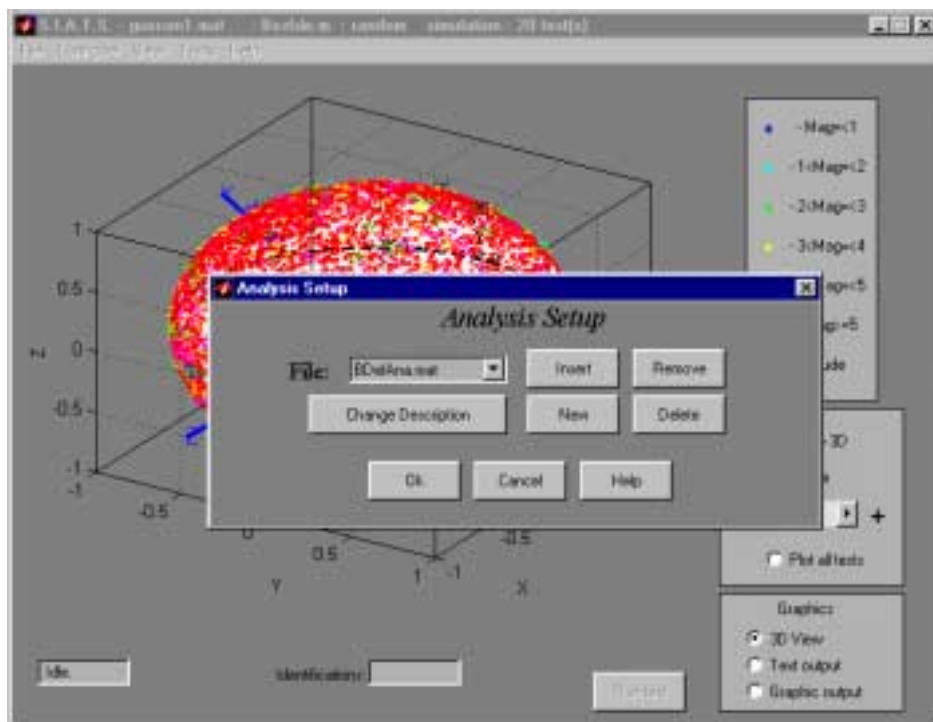


Fig. C.20 - Configuração do arquivo de dados de teste.

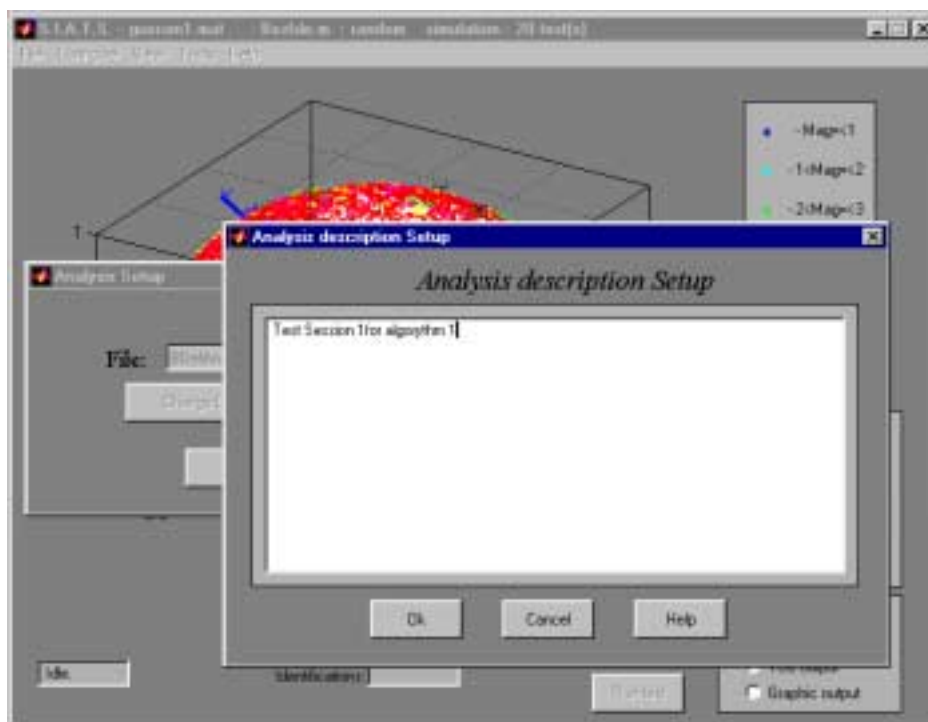


Fig. C.21 - Configuração de características do arquivo de dados de teste.

- Fornecer ajuda em caráter geral ou específico:

Para a visualização de cada tópico de ajuda utiliza-se os itens do menu “*Help*” presente na barra de menus (Ver Fig. C.22).

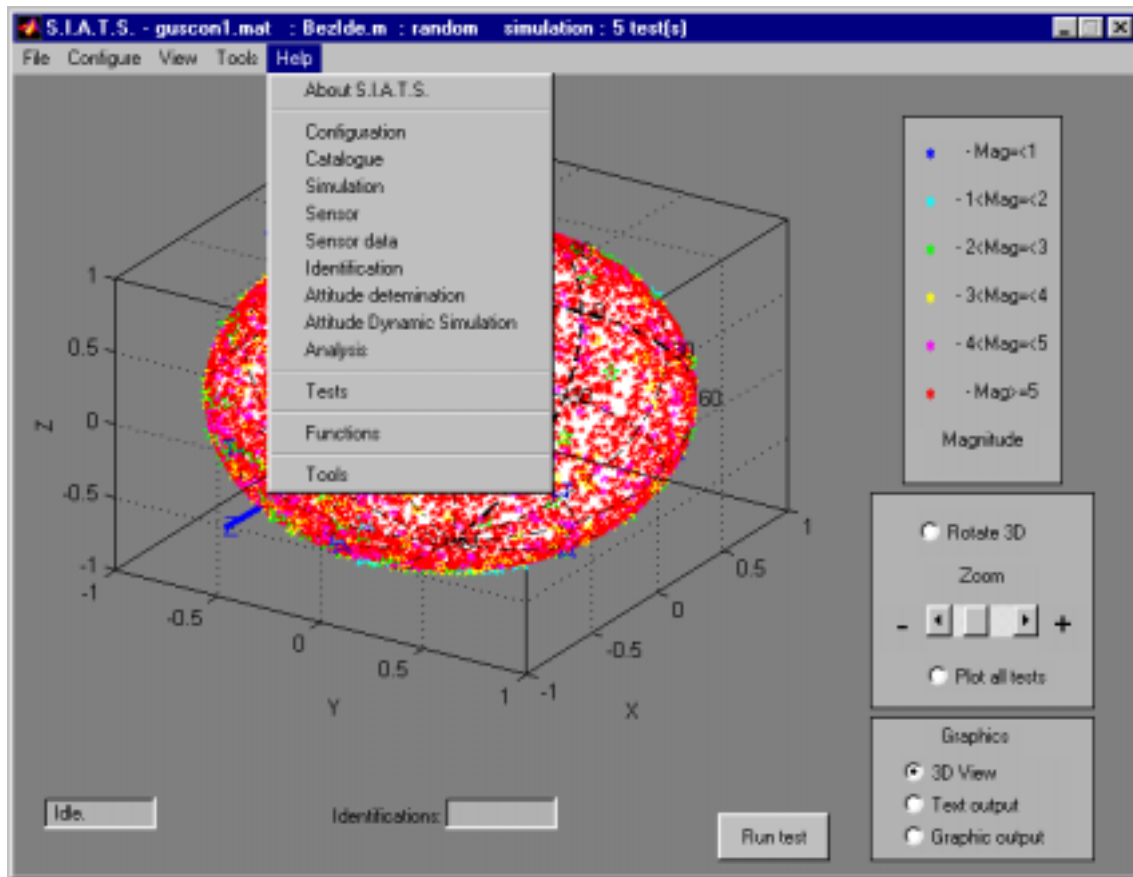


Fig. C.22 - Menus de ajuda do ambiente de simulação e teste.

Com esses itens é possível obter ajuda sobre:

- *A ferramenta de modo geral (Ver Fig. C.23)*



Fig. C.23 - Informações gerais sobre a ferramenta.

- *A configuração de modelos e arquivos na ferramenta (Ver Fig. C.24)*



Fig. C.24 - Informações sobre configuração de arquivos e modelos.

- A execução dos testes de modo geral (Ver Fig. C.25)



Fig. C.25 - Informações sobre execução dos testes.

- Cada função pertencente à biblioteca de funções (Ver Fig. C.26)

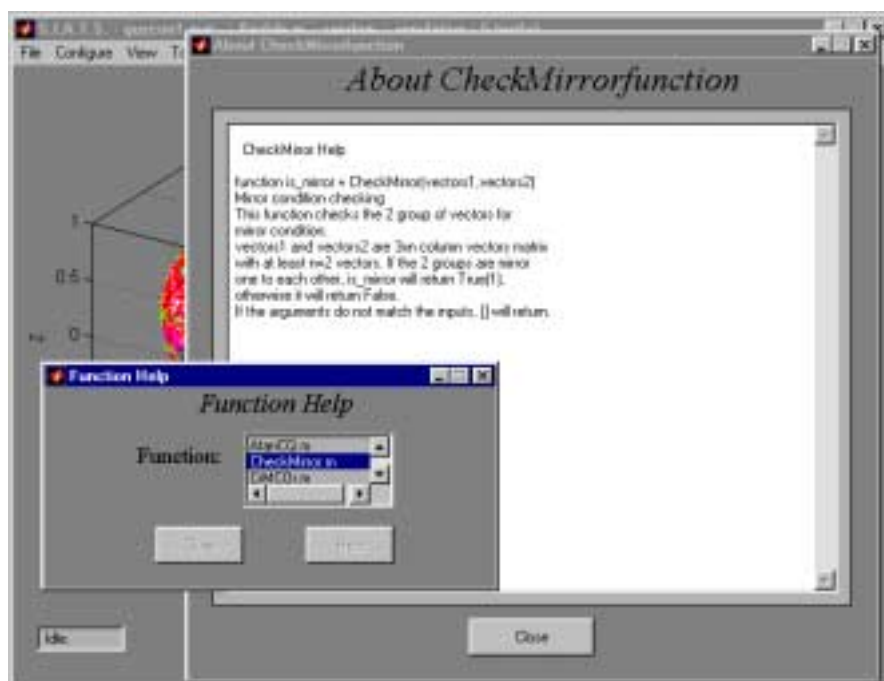


Fig. C.26 - Informações sobre funções da biblioteca de funções.

➤ Cada ferramenta auxiliar (Ver Fig. C.27)

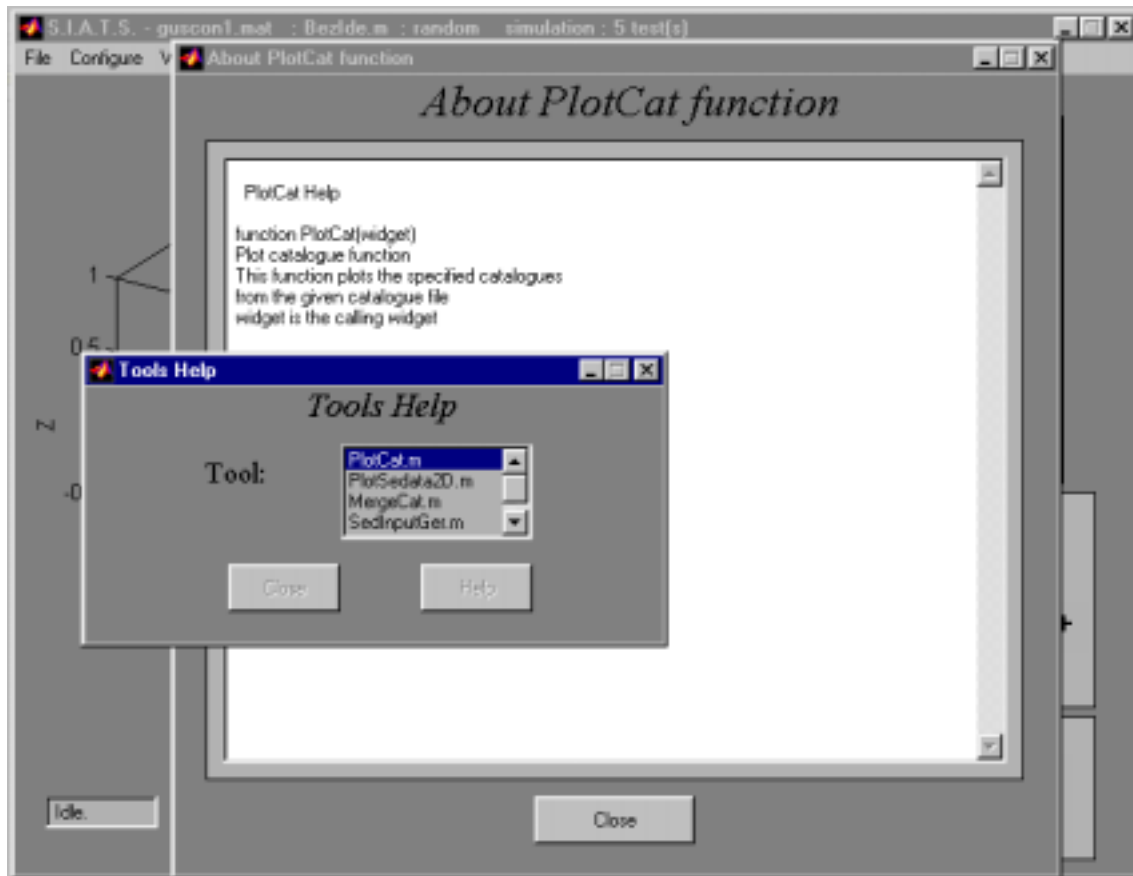


Fig. C.27 - Informações sobre as ferramentas auxiliares.

- Executar ações:

Para a execução de cada ação auxiliar utiliza-se os itens do menu “*File*” (relativo à manipulação de arquivos), “*View*” (relativo à visualização de informações) e “*Tools*” (relativo à manipulação de informações com ferramentas auxiliares) presente na barra de menus (Ver Fig. C.28 a C.30).



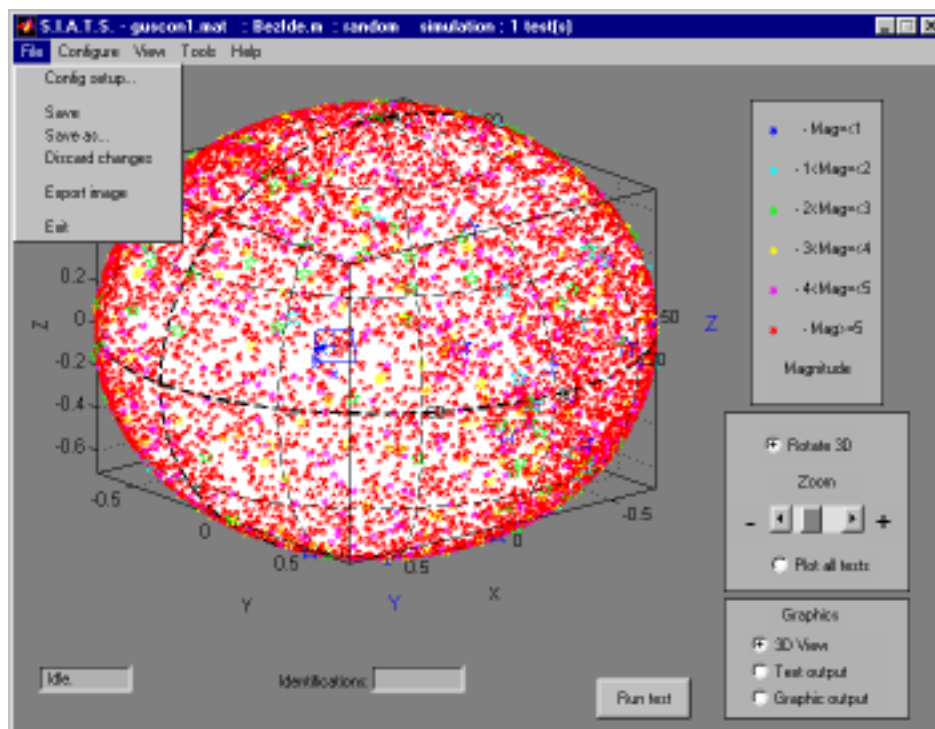


Fig. C.28 - Menus de ações de manipulação de arquivos do ambiente de simulação e teste.

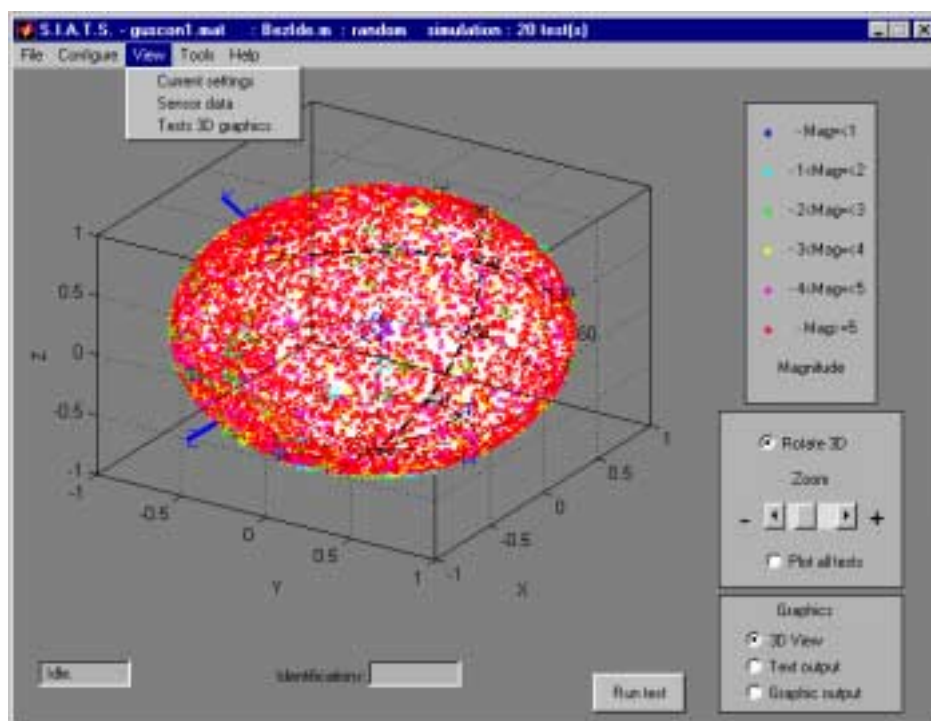


Fig. C.29 - Menus de ações de visualização de informações do ambiente de simulação e teste.

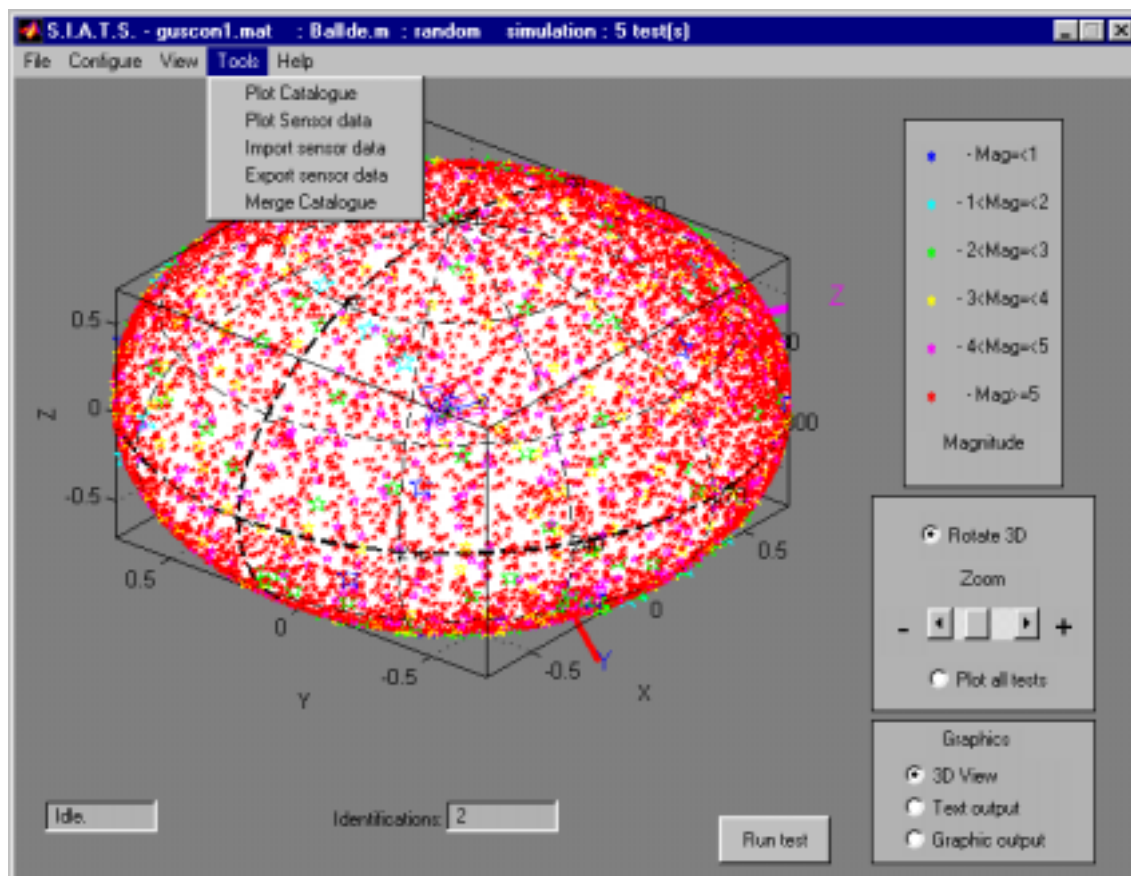


Fig. C.30 - Menus de ações de manipulação de informações do ambiente de simulação e teste.

Com os itens de manipulação de arquivos é possível:

- *Configurar o arquivo que concentra todas as informações de configurações da ferramenta:*

Com esse item é possível (Ver Fig. C.31):

- inserir arquivo de dados de configuração,
- remover arquivo de dados de configuração,
- criar novo arquivo de dados de configuração,
- apagar arquivo de dados de configuração,
- Configurar número de testes a serem executados,
- configurar (botão *Change Features*) (Ver Fig. C.32):
  - ⇒ descrição do arquivo de dados de configuração
- *Salvar todas as informações de configurações da ferramenta,*
- *Salvar o arquivo que concentra todas as informações de configurações da ferramenta com outros nomes,*
- *Desconsiderar qualquer alteração e possibilitar o término da sessão de trabalho,*
- *Exportar a imagem dos gráficos ou visualização 3D dos painéis descritos anteriormente para formato 'tif',*
- *Terminar a sessão de trabalho*

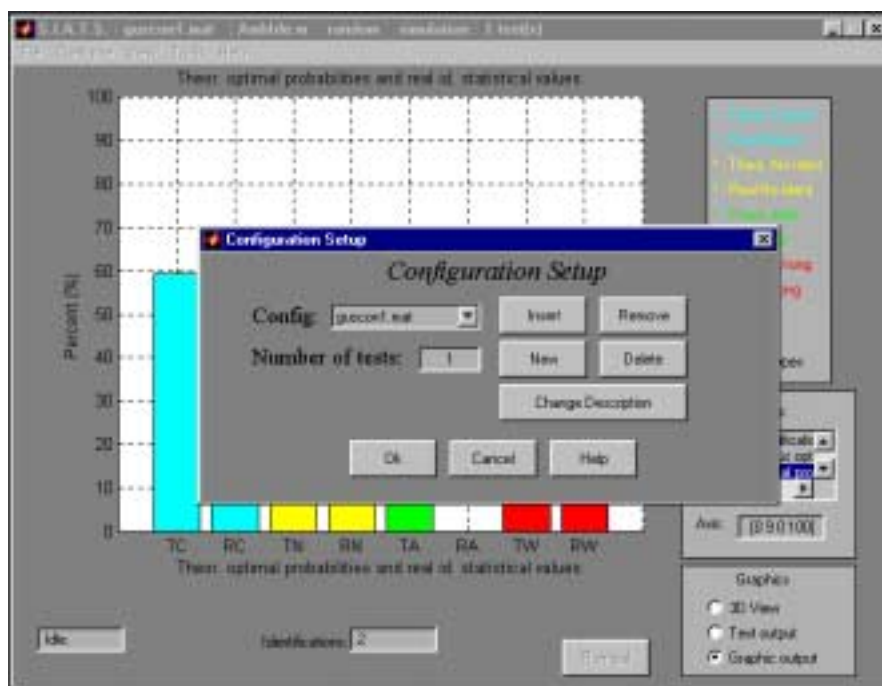


Fig. C.31 - Configuração do arquivo que concentra todas as informações de configuração.

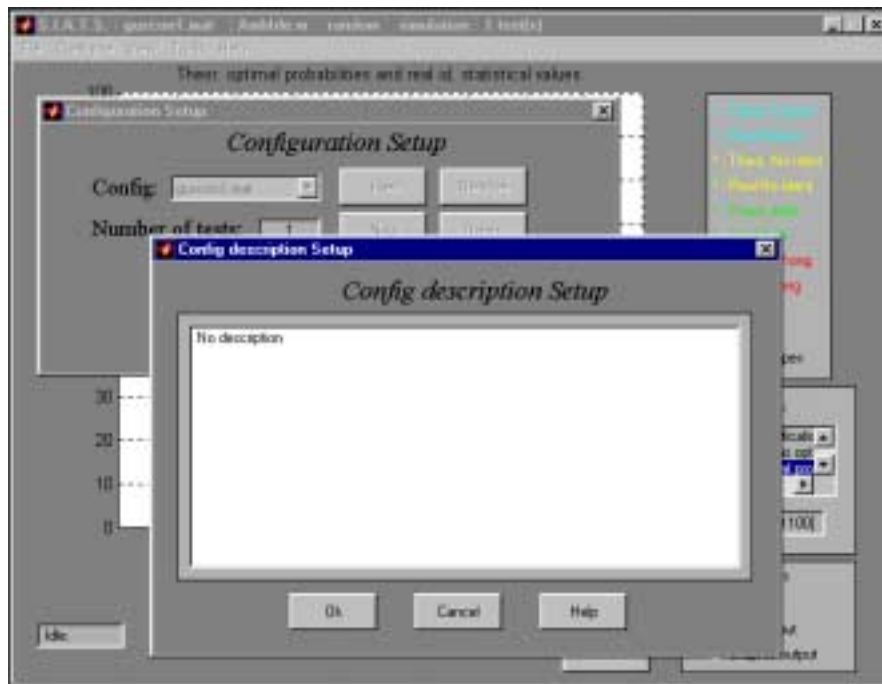


Fig. C.32 - Configuração de características do arquivo de dados de configuração.

Com os itens de visualização de informações é possível:

- Visualizar as configurações atuais (Ver Fig. C.33)



Fig. C.33 - Visualização de configurações atuais.

- Visualizar textualmente os dados presentes em arquivos de dados de sensor escolhidos (Ver Fig. C.34)

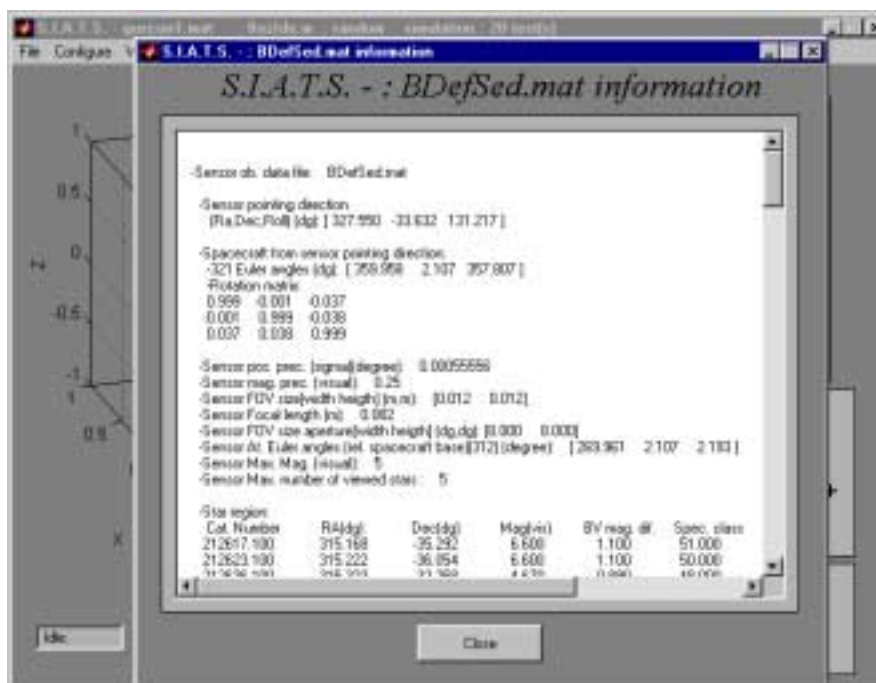


Fig. C.34 - Visualização textual dos dados presentes em um arquivo de dados de sensor.

- Visualizar os resultados 3D dos testes realizados (Ver Fig. C.35)

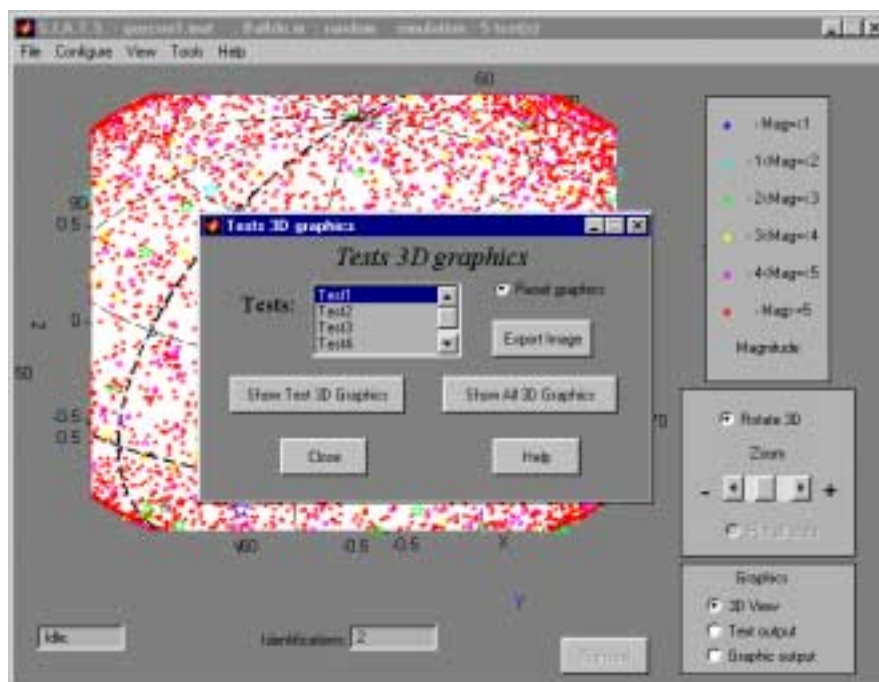


Fig. C.35 - Visualização dos resultados 3D dos testes.



Com esse item é possível:

- Visualizar os resultados 3D para cada um dos testes executados,
- Visualizar os resultados 3D para todo o conjunto de testes executados,
- Ajustar a ferramenta para limpar ou não a tela 3D antes de mostrar os resultados 3D (desta forma possibilitando a sobreposição visual dos resultados de vários testes diferentes),
- Exportar a imagem da visualização 3D para formato 'tif'

Com os itens de manipulação de informações é possível:

- *Visualizar informações presentes em catálogos escolhidos (Ver Fig. C.36)*

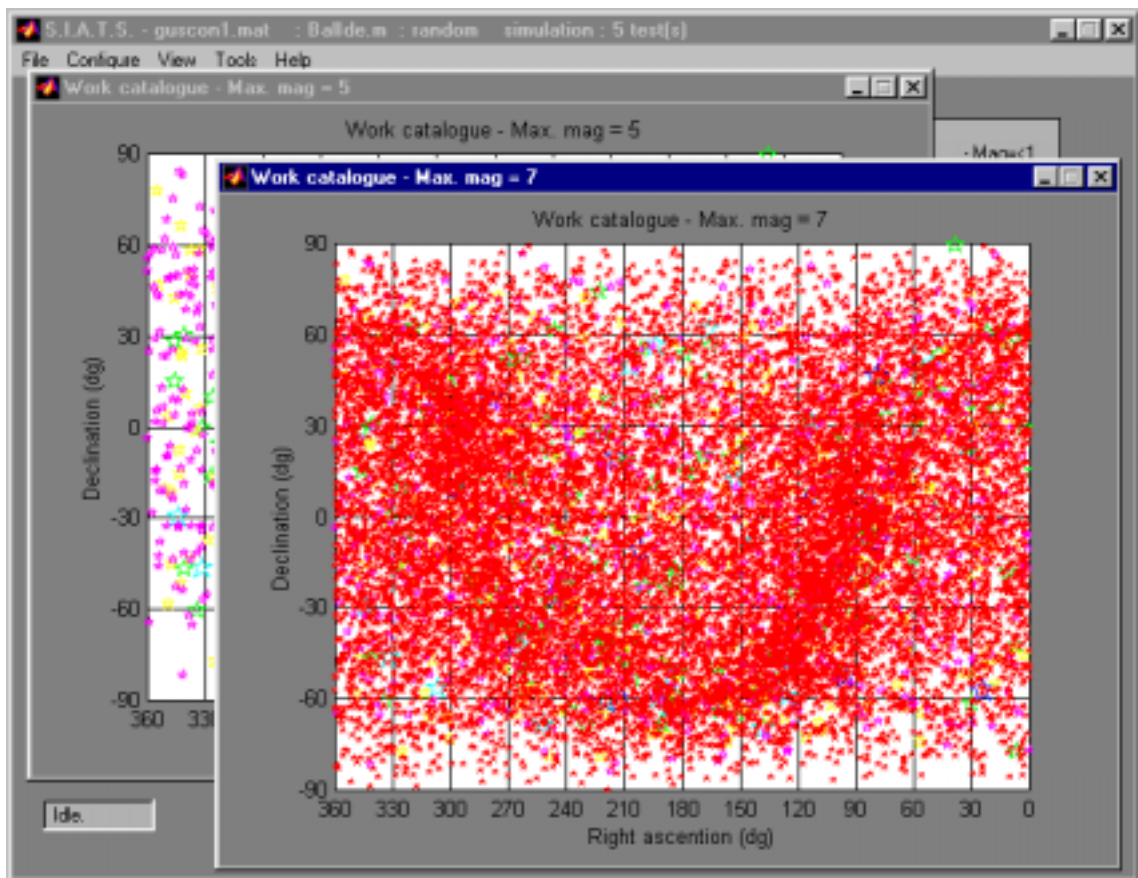


Fig. C.36 - Visualização de informações presentes em catálogos escolhidos.

- Visualizar informações presentes em arquivos de dados de sensor escolhidos (Ver Fig. C.37)

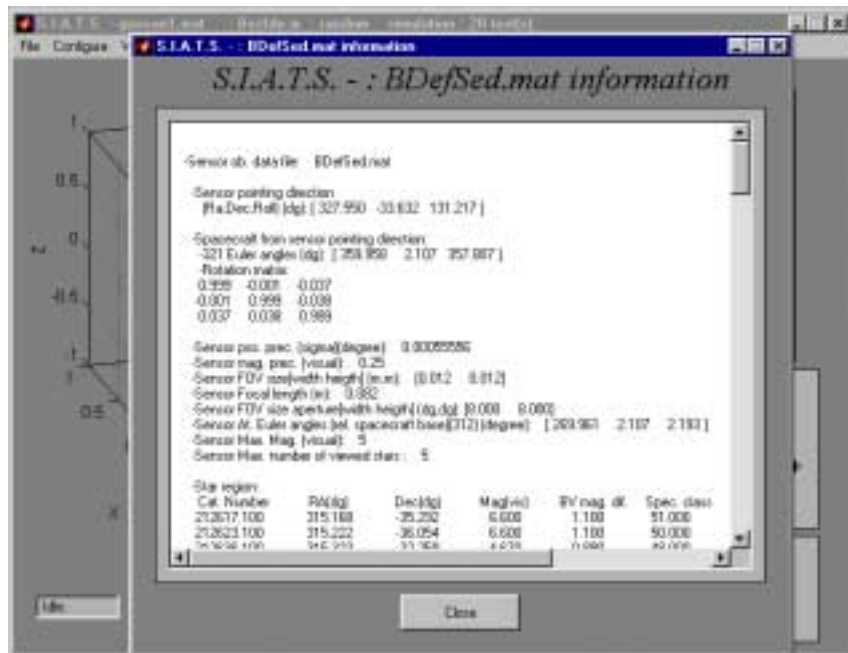


Fig. C.37 - Visualização de informações presentes em arquivos de dados de sensor escolhidos.

- Importar informações de arquivos de dados de sensor em um outro formato determinado para o formato entendido pela ferramenta (Ver Fig. C.38)

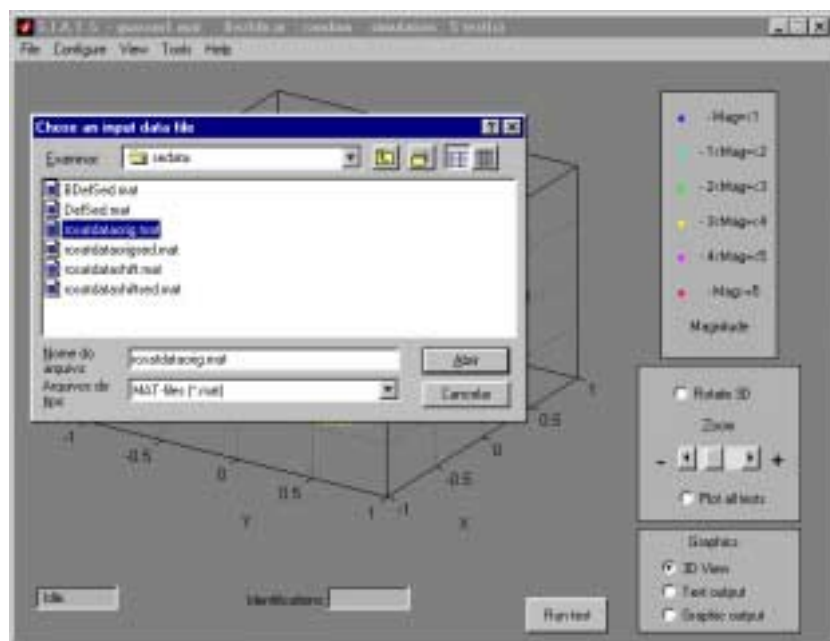


Fig. C.38 - Importação de arquivos de dados de sensor.

- Exportar informações de arquivos de dados de sensor em formato entendido pela ferramenta para um outro formato determinado (Ver Fig. C.39)

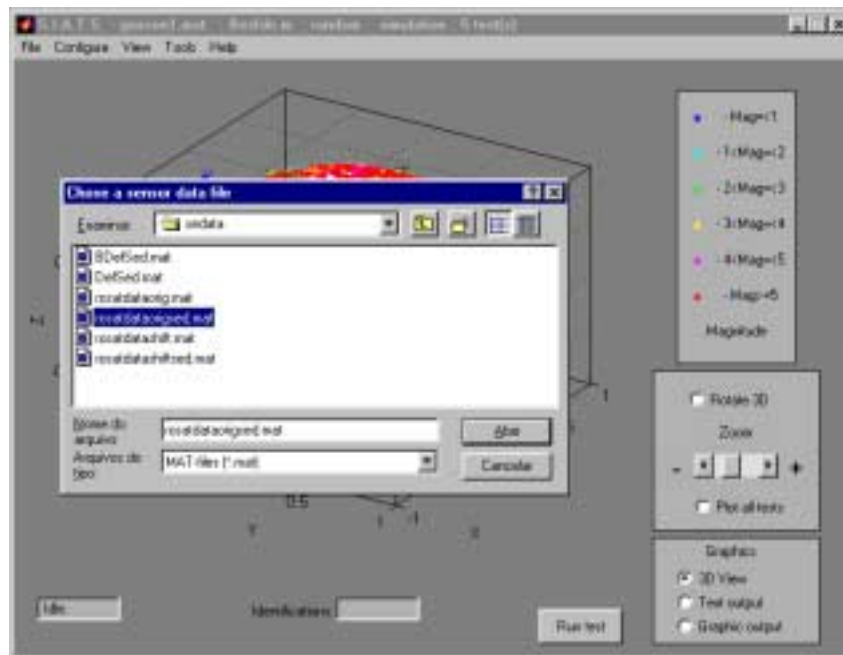


Fig. C.39 - Exportação de arquivos de dados de sensor.

- Inserir novas estrelas em um catálogo escolhido a partir de outros catálogos ou arquivos de dados de sensor (Ver Fig. C.40)

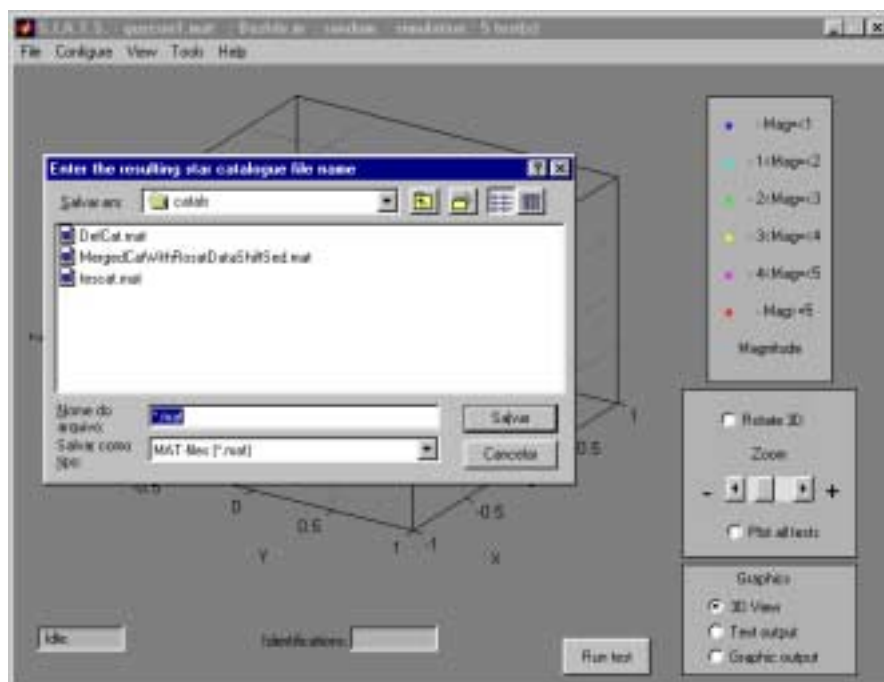


Fig. C.40 - Inserção de novas estrelas em um catálogo escolhido.



### C.1.2. SIMULATION

Este CSC representa a sequência de simulação, armazenamento de dados e geração de visualização dos testes executados. É nele que ocorre a simulação tanto do sistema de determinação de atitude da espaçonave como do ambiente no qual insere-se o próprio sistema.

A simulação utilizada é a descrita na Seção 4.3. (SIMNULAÇÃO) do Capítulo 4. (CONCEITOS BÁSICOS). Para cada teste em particular executa-se uma simulação completa com o armazenamento completo de todas as condições e resultados referentes ao teste, assim como os resultados referentes a todo o conjunto de testes (Ver Seção C.1.5. - DATA). Para a execução de cada teste pode-se visualizar os resultados 3D conforme ajustado pelo botão presente no Painel 3D.

Na execução dos testes, se a visualização 3D estiver habilitada, pode-se (Ver Fig. C.41):

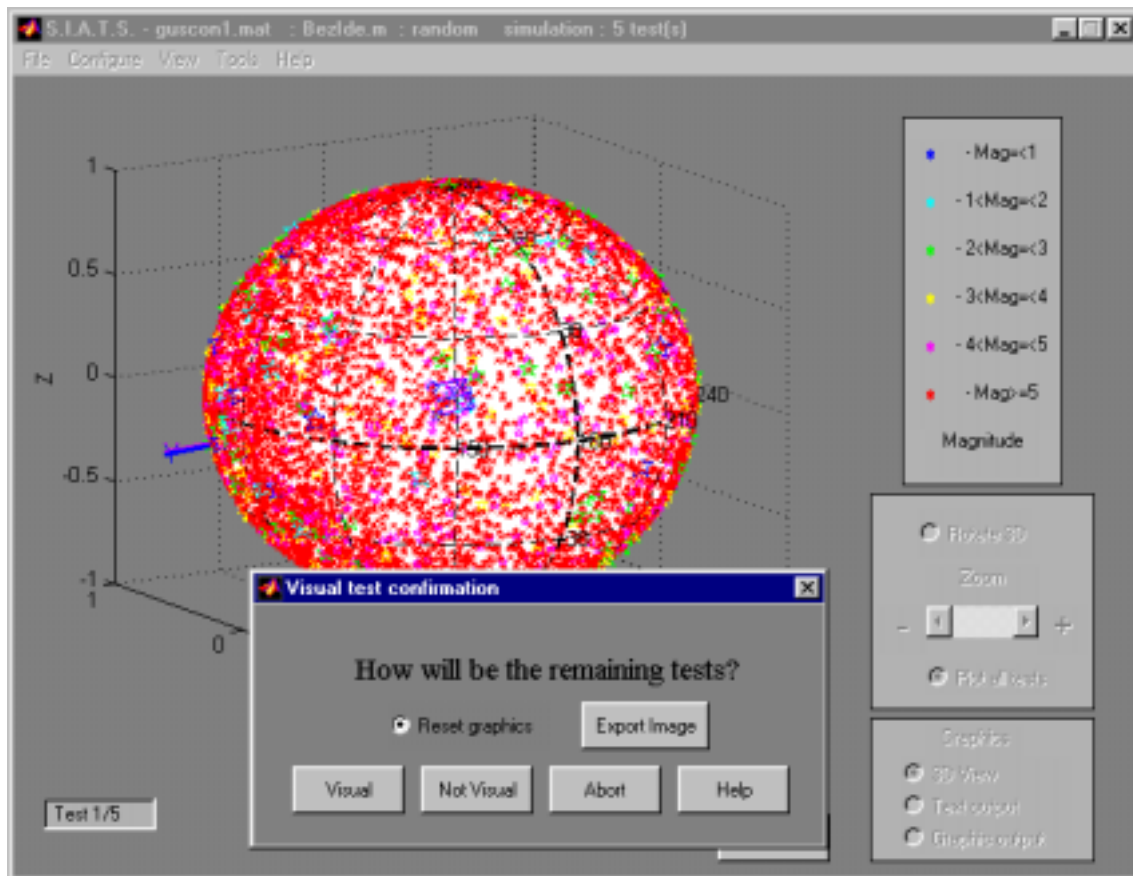


Fig. C.41 - Visualização 3D dos testes.

- *Habilitar a visualização para o próximo teste,*
- *Desabilitar a visualização para os testes restantes,*
- *Abortar a simulação para todos os testes,*

- Ajustar a ferramenta para limpar ou não a tela 3D antes de mostrar os resultados 3D do próximo teste (desta forma possibilitando a sobreposição visual dos resultados de vários testes),
- Exportar a imagem da visualização 3D para formato 'tif'

Como descrito na Seção C.1.1. (CONTROL PANEL) existem 4 tipos de simulação:

- *simulação por arquivo de dados de sensor* - Neste caso não há a simulação do sensor. Os dados provenientes de arquivos já são assumidos como a saída do sensor a ser identificada.
- *simulação aleatória* - Neste caso, cada teste possui uma atitude da espaçonave por simulação aleatória
- *entrada manual* - Neste caso, cada teste possui uma atitude da espaçonave através de entrada provida pelo usuário (Ver Fig. C.42)
- *simulação dinâmica* - Neste caso, cada teste possui uma atitude da espaçonave por simulação dinâmica onde cada atitude se baseia na atitude anterior por uma dinâmica definida pelo modelo de simulação dinâmica da atitude. A atitude inicial e o número de passos (número de testes) em cada simulação é provida pelo usuário. (Ver Fig.s C.42 e C.43)

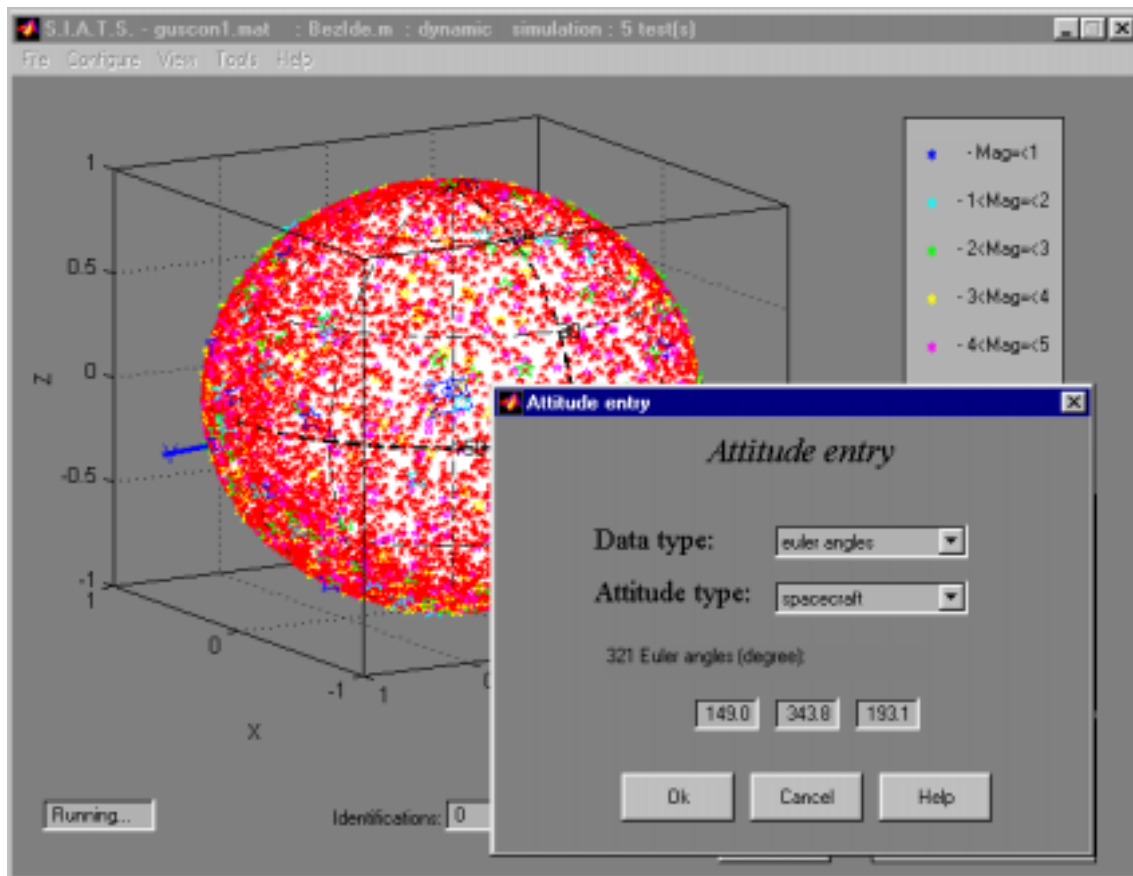


Fig. C.42 - Configuração da entrada manual e condições iniciais de atitude para a simulação dinâmica.

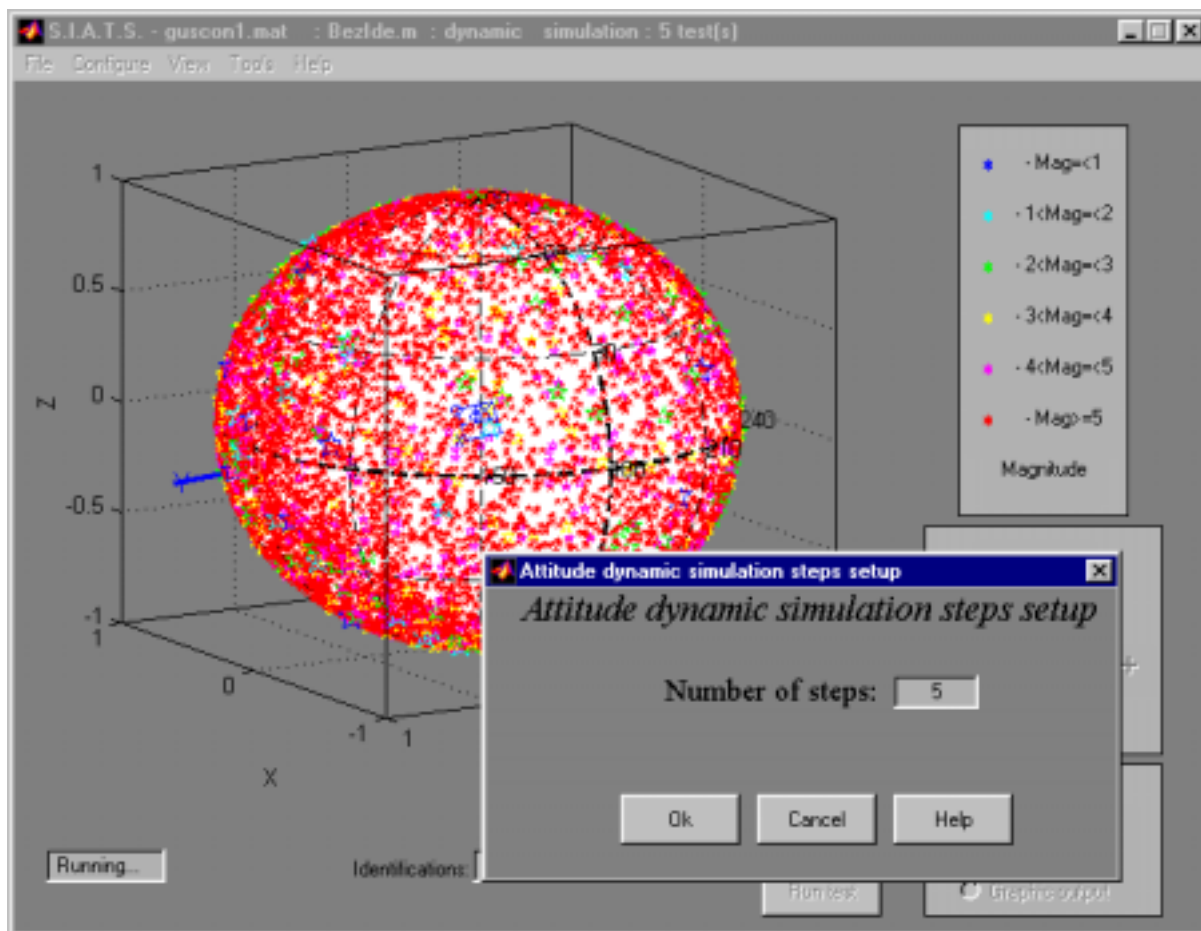


Fig. C.43 - Configuração do número de passos para a simulação dinâmica.

### C.1.3. FUNCTION LIBRARY

Este CSC representa o conjunto de funções auxiliares utilizado pela simulação e ferramentas auxiliares. Pode também ser utilizado na codificação dos diferentes modelos utilizados na ferramenta, assim como dos próprios algoritmos a serem testados (se assim o usuário desejar).

Essas funções implementam principalmente rotinas de cálculo, transformações de coordenadas e facilitadores para a construção de visualizações 3D específicas que o usuário deseje prover para completar os resultados do algoritmo que se deseja testar.

### C.1.4. TOOLS

Este CSC representa o conjunto de ferramentas auxiliares utilizado para executar ações que complementem o entendimento e geração de informações necessárias à avaliação dos algoritmos de identificação.

Como descrito na Seção C.1.1. (CONTROL PANEL), estas ferramentas podem ser utilizadas através dos itens de manipulação de informações, onde é possível:

- *Visualizar informações presentes em catálogos escolhidos*
- *Visualizar informações presentes em arquivos de dados de sensor escolhidos*
- *Importar informações de arquivos de dados de sensor em um outro formato determinado para o formato entendido pela ferramenta*
- *Exportar informações de arquivos de dados de sensor em formato entendido pela ferramenta para um outro formato determinado*
- *Inserir novas estrelas em um catálogo escolhido a partir de outros catálogos ou arquivos de dados de sensor*

### **C.1.5. DATA**

Este CSC representa o conjunto de dados utilizado na definição e execução dos testes. Este conjunto pode ser descrito da seguinte forma:

- Arquivos de dados

Estes arquivos dividem-se em 3 categorias:

- *Arquivos de dados de configuração de ambiente:*

Estes arquivos armazenam dados de configuração de ambiente. Com estes dados, é possível restabelecer as configurações previamente armazenadas em uma sessão de testes.

Estes arquivos são os seguintes:

- *‘Config.mat’* - Este arquivo contém a informação referente aos arquivos de configurações disponíveis, além de informações de carácter operacional. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Diretório raiz de instalação da ferramenta
  - ⇒ Lista dos arquivos de configurações de sessões de teste
  - ⇒ Arquivo de configurações de sessões de teste configurado para uso
  - ⇒ Lista de funções auxiliares pertencentes ao *CSC Function Library*
  - ⇒ Lista de arquivos de ajuda das funções auxiliares pertencentes ao *CSC Function Library*
  - ⇒ Lista de ferramentas auxiliares pertencentes ao *CSC Tools*
  - ⇒ Lista de arquivos de ajuda das ferramentas auxiliares pertencentes ao *CSC Tools*
- *‘Image.mat’* - Este arquivo contém a informação referente à imagem de apresentação introdutória da ferramenta.
- *‘Default.mat’* - Este arquivo contém as configurações de modelos e arquivos de dados de configuração de modelos, assim como configurações de teste para uma sessão de testes. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que representem diferentes configurações para sessões de teste. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Número de testes a serem executados
  - ⇒ Descrição da sessão configurada

- ⇒ Lista de tipos de Simulação
- ⇒ Tipo de simulação configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de catálogo
- ⇒ Arquivo de catálogo configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de algoritmo de identificação de estrelas
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de configuração de algoritmo de identificação de estrelas
- ⇒ Lista de estruturas contendo os arquivos específicos de algoritmo de identificação de estrelas contendo:
  - Algoritmo específico de geração de visualização 3D
  - Algoritmo específico de gravação de dados de teste
  - Algoritmo específico de geração de relatório de teste
  - Algoritmo específico de geração de gráfico de teste
  - Algoritmo específico de gravação de dados para todos os teste
  - Algoritmo específico de geração de relatório para todos os teste
  - Algoritmo específico de geração de gráfico para todos os teste
  - Algoritmo específico de gravação de dados para execução do algoritmo de identificação de estrelas
- ⇒ Arquivo de algoritmo de identificação de estrelas configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de modelo de determinação de atitude
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de configuração de modelo de determinação de atitude
- ⇒ Arquivo de modelo de determinação de atitude configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de modelo de geração dinâmica de atitude
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de configuração de modelo de geração dinâmica de atitude
- ⇒ Arquivo de modelo de geração dinâmica de atitude configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de modelo de sensor de estrelas
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de configuração de modelo de sensor de estrelas
- ⇒ Arquivo de modelo de sensor de estrelas configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de modelo de sensor de pré-estimativa
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de configuração de modelo de sensor de pré-estimativa
- ⇒ Arquivo de modelo de sensor de pré-estimativa configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de resultados de modelo de sensor de estrelas
- ⇒ Arquivo de dados de resultado do modelo de sensor de estrelas configurado
- ⇒ Lista dos arquivos de dados de resultado de teste
- ⇒ Arquivo de dados de resultado de teste configurado

➤ *Arquivos de dados de resultados*

Estes arquivos armazenam dados com resultados obtidos da execução dos testes.

Estes arquivos são os seguintes:

- ‘*DefAna.mat*’ - Este arquivo contém a informação referente à execução de uma sessão de testes. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que representem diferentes condições de teste. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Descrição dos resultados
  - ⇒ Conjunto de estruturas, uma para cada teste realizado, contendo informações coletadas da execução do teste.
  - ⇒ Estrutura contendo informações coletadas com base nos resultados de todos os testes
  - ⇒ Conjunto de estruturas contendo informações gráficas referentes a cada teste e a todos os testes
  - ⇒ Conjunto de estruturas contendo informações visuais 3D referentes a cada teste
- ‘*DefSed.mat*’ - Este arquivo contém a informação referente aos dados do sensor de estrelas. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes resultados de teste. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Ângulos de ascensão, declinação e rolagem de apontamento do sensor (graus)
  - ⇒ Matriz de rotação do apontamento do sensor para o referencial da espaçonave
  - ⇒ Ângulos de **Euler** (312) do referencial do sensor com relação ao referencial da espaçonave (graus)
  - ⇒ Precisão de posicionamento de observação de estrelas do sensor (graus)
  - ⇒ Precisão de magnitude de observação de estrelas do sensor (visual)
  - ⇒ Tamanho físico do *FOV* (*Field of View*) do sensor (m)
  - ⇒ Abertura angular do *FOV* (*Field of View*) do sensor (graus)
  - ⇒ Distância focal da lente do sensor (m)
  - ⇒ Máxima magnitude observável pelo sensor (visual)
  - ⇒ Máximo número de estrelas rastreadas pelo sensor
  - ⇒ Máxima magnitude do catálogo de trabalho (visual)
  - ⇒ Matriz de informações de estrelas na região de observação
  - ⇒ Matriz de informações de estrelas observadas identificadas
  - ⇒ Índices das estrelas na Matriz de informações de estrelas na região de observação que foram observadas
  - ⇒ Dados de saída de observação do sensor
- ‘*\*.txt*’ - Estes arquivos contém a informação referente aos dados de resultados de teste exportados para formato *ASCII*. Podem existir diversos arquivos com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes resultados de teste.
- ‘*\*.tif*’ - Estes arquivos contém a informação referente à qualquer visualização de resultados de teste, seja 3D ou gráfica exportada para formato ‘*tif*’. Podem existir diversos arquivos com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes imagens geradas pela ferramenta.

➤ *Arquivos de dados de configuração de modelos:*

Estes arquivos armazenam dados que representam as características configuradas para os modelos de sistemas que constituem o sistema de determinação de atitude e os próprios algoritmos de identificação de estrelas sob teste.

Estes arquivos são os seguintes:

- *'DefCat.mat'* - Este arquivo contém as informações e configurações de catálogos de estrelas que representam do modelo do céu para observação do sensor de estrelas. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes informações e configurações de catálogos. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Matriz de dados de catálogo fonte para a simulação do céu
  - ⇒ Matriz de dados de catálogo de trabalho para a simulação do catálogo que vai a bordo da espaçonave
  - ⇒ Magnitude máxima do catálogo de trabalho (visual)
  - ⇒ Probabilidade de que uma estrela do catálogo fonte (céu) esteja no catálogo de trabalho
- *'DefIde.mat'* - Este arquivo contém a informação de configuração do modelo da técnica de identificação de estrelas sob teste. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes configurações do algoritmo de identificação de estrelas. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Necessidade de pré-estimativa de atitude
  - ⇒ Matriz de critérios de otimização a serem adotados para cada tipo de identificação (Correta, Ambígua, Não identificação e errônea)
- *'DefAtd.mat'* - Este arquivo contém a informação de configuração do modelo de determinação de atitude. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes configurações de modelo de determinação de atitude. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Matriz de atitude determinada no último teste
- *'DefAts.mat'* - Este arquivo contém a informação de configuração do modelo de geração dinâmica de atitude. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes configurações de modelo de geração dinâmica de atitude. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Matriz de atitude simulada no último teste
- *'DefSen.mat'* - Este arquivo contém a informação de configuração do modelo do sensor de estrelas. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes configurações de modelo de sensor de estrelas. Nele constam os seguintes dados:
  - ⇒ Ângulos de **Euler** (312) do referencial do sensor com relação ao referencial da espaçonave (graus)
  - ⇒ Precisão de posicionamento de observação de estrelas do sensor (graus)

- ⇒ Precisão de magnitude de observação de estrelas do sensor (visual)
  - ⇒ Tamanho físico do *FOV (Field of View)* do sensor (m)
  - ⇒ Abertura angular do *FOV (Field of View)* do sensor (graus)
  - ⇒ Distância focal da lente do sensor (m)
  - ⇒ Máxima magnitude observável pelo sensor (visual)
  - ⇒ Máximo número de estrelas rastreável pelo sensor
  - '*DefPSe.mat*' - Este arquivo contém a informação de configuração do modelo do sensor de pré-estimativa. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que armazenem diferentes configurações de modelo de sensor de pré-estimativa. Nele constam os seguintes dados:
    - ⇒ Precisão de determinação de atitude do sensor (graus)
- Arquivos de código

Estes arquivos representam o modelamento de sistemas que constituem o sistema de determinação de atitude e os próprios algoritmos de identificação de estrelas sob teste.

Estes arquivos são os seguintes:

- '*DefIde.m*' - Este arquivo contém o código que implementa o modelo do algoritmo de identificação de estrelas sob teste (Neste caso método de justaposição direta com otimização de domínio de incerteza sem resolução de ambigüidade). Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que implementem diferentes técnicas de identificação de estrelas. A interface e o modelo são os descritos na Seção 3.5. (IDENTIFICAÇÃO) do Capítulo 3. (TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE ESTRELAS). Associados a este arquivo, encontram-se os arquivos específicos do algoritmo:
  - ⇒ '*DefSpec3D.m*' - Este arquivo representa a geração de visualização 3D específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecTes.m*' - Este arquivo representa a gravação de dados de teste específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecTesRel.m*' - Este arquivo representa a geração de relatório de teste específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecTesGra.m*' - Este arquivo representa a geração de gráfico de teste específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecSta.m*' - Este arquivo representa a gravação de dados para todos os teste específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecStaRel.m*' - Este arquivo representa a geração de relatório para todos os teste específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecStaGra.m*' - Este arquivo representa a geração de gráfico para todos os teste específica para o algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'
  - ⇒ '*DefSpecDataRec.m*' - Este arquivo representa a gravação de dados para execução do algoritmo representado pelo arquivo '*DefIde.m*'



- ‘*DefAtd.m*’ - Este arquivo contém o código que implementa o modelo de determinação de atitude. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que implementem diferentes modelos de determinação de atitude. A interface e o modelo são os descritos na Seção 2.4. (DETERMINAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).
- ‘*DefAts.m*’ - Este arquivo contém o código que implementa o modelo de geração dinâmica de atitude. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que implementem diferentes modelos de geração dinâmica de atitude. A interface e o modelo são os descritos na Seção 2.7 (SIMULAÇÃO DE ATITUDE) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).
- ‘*DefSen.mat*’ - Este arquivo contém o código que implementa o modelo do sensor de estrelas. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que implementem diferentes modelos de sensor de estrelas. A interface e o modelo são os descritos na Seção 2.5. (SENSOR ESTELAR) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).
- ‘*DefPSe.mat*’ - Este arquivo contém o código que implementa o modelo do sensor de pré-estimativa. Podem existir diversos arquivos semelhantes a este com nomes providos pelo usuário e que implementem diferentes modelos de sensor de pré-estimativa. A interface e o modelo são os descritos na Seção 2.8. (SENSOR DE PRÉ-ESTIMATIVA) do Capítulo 2. (CONCEITOS BÁSICOS).

A alocação dos vários arquivos na estrutura de diretórios da ferramenta ocorre da seguinte forma:

- SiatsPath\config - Diretório de configuração
- SiatsPath\config\data - Diretório de dados da configuração de sessão de testes
- SiatsPath\data - Diretório de dados
- SiatsPath\data\anares - Diretório de dados obtidos em análise de algoritmos.
- SiatsPath\data\anares\relat - Diretório de relatórios texto gerados e figuras ‘*tif*’ exportadas.
- SiatsPath\data\catals - Diretório de catálogos
- SiatsPath\data\sedata - Diretório de dados obtidos por sensores de estrelas
- SiatsPath\func - Diretório de rotinas
- SiatsPath\func\attdet - Diretório de modelos de determinação de atitude
- SiatsPath\func\attdet\data - Diretório de dados dos modelos de determinação de atitude
- SiatsPath\func\attsim - Diretório de modelos de geração dinâmica de atitude
- SiatsPath\func\attsim\data - Diretório de dados dos modelos de geração dinâmica de atitude
- SiatsPath\func\idealg - Diretório de algoritmos de identificação de estrelas
- SiatsPath\func\idealg\data - Diretório de dados dos algoritmos de identificação de estrelas

- SiatsPath\func\idealg\func - Diretório de funções específicas dos algoritmos de identificação de estrelas
- SiatsPath\func\matfun - Diretório de funções auxiliares
- SiatsPath\func\sensor - Diretório de modelos de sensores de estrelas
- SiatsPath\func\sensor\data - Diretório de dados dos modelos de sensores de estrelas
- SiatsPath\func\prisen - Diretório de modelos de sensores de pré-estimativa
- SiatsPath\func\prisen\data - Diretório de dados dos modelos de sensores de pré-estimativa
- SiatsPath\help - Diretório de auxílio sobre o SIATS
- SiatsPath\help\config - Diretório de auxílio de configuração
- SiatsPath\help\matfun - Diretório de auxílio de funções auxiliares

## C.2. EXEMPLOS DE SAÍDA SIATS

A seguir são mostrados os tipos de saída que o software SIATS é capaz de fornecer. A título de exemplo escolheu-se a simulação n.º 2 do teste 3 como fonte de informação.

- Saída 3D

A seguir encontra-se a representação esquemática onde apresentam-se (Ver Fig. C.44 ):

- posição real do FOV do sensor estelar (em azul),
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV real (círculos azuis),
- posição pré-determinada do FOV do sensor estelar (em magenta),
- posições das estrelas observadas com relação ao FOV pré-estimado (círculos magenta)
- posição determinada do FOV do sensor estelar (em vermelho),
- indicador de estrelas identificadas (círculos vermelhos).
- indicador de pares de estrelas identificados (segmentos vermelhos)
- indicador de pares de estrelas observados identificados (segmentos magenta)

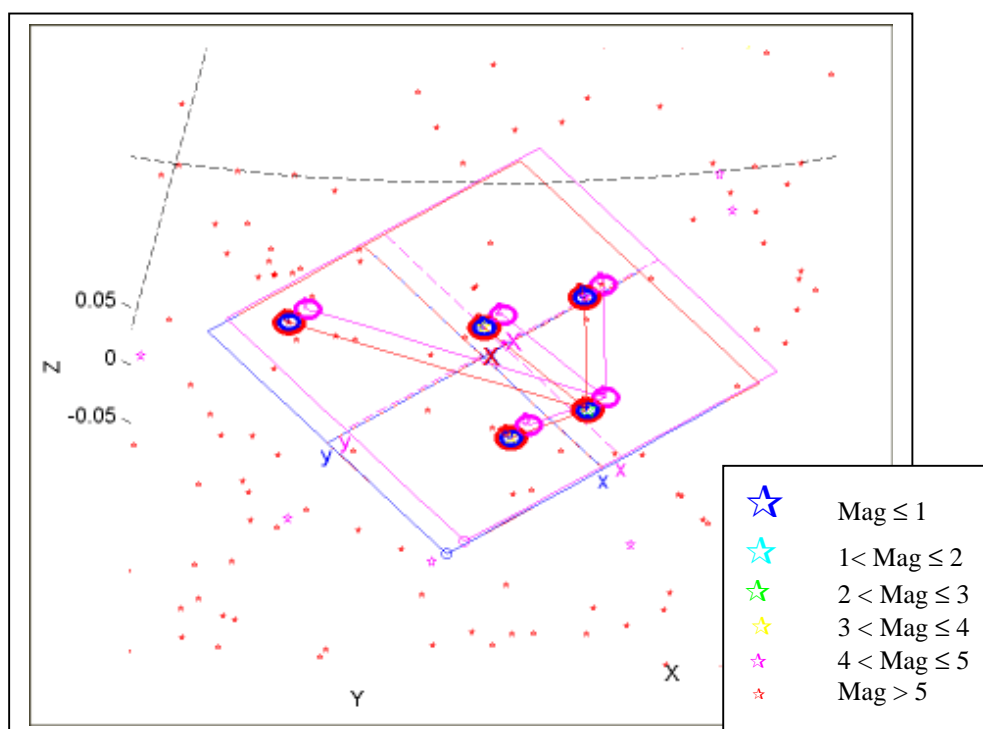


Fig. C.44 - Exemplo de saída 3D.

- Saída gráfica

A seguir encontra-se a saída do tipo gráfica (Ver Fig. C.45):

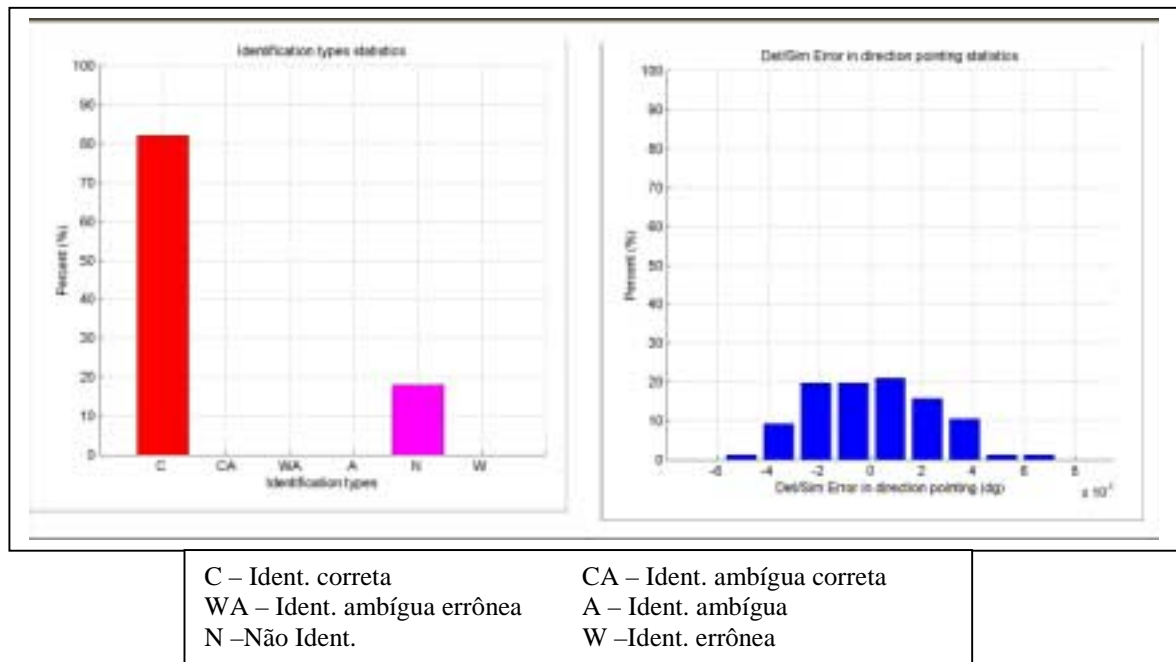


Fig. C.45 - Exemplos de saída gráfica.

- Saída textual

➤ Relatório para cada simulação :

Siats relatory:

-Test number: 2

-Identification:

-Number of observed stars: 5

-Number of identifications: 5

-Identification duration (sec): 1.43

-Identification type numbers:

| Cor. | Cor_Amb. | Wro_Amb. | Amb. | No. | Wro. |
|------|----------|----------|------|-----|------|
| 5    | 0        | 0        | 0    | 0   | 0    |

-Settings:

-Priori estimation need: Need

-Simulation Type: random

-Use sensor data as catalogue (data\_file simulation mode only): Do not use

-Sensor pos. prec. (sigma)(degree): 0.002222

-Sensor mag. prec. (visual): 0.25

-Sensor FOV size [width height] (m,m): [0.141 0.141]

-Sensor Focal length (m): 1

-Sensor FOV size aperture [width height](dg,dg):[8.000 8.000]

-Sensor Max. Mag. (visual): 5.5

-Sensor Max. number of viewed stars : 5

-Priori sensor pos. prec. (sigma)(degree): 1

-Stars feasibility to belong catalogue: 0.99

-Work catal. max. mag. (visual): 5.5

-Sim. catal. max. mag. (visual): 7.02

```

-Work catalogue number of stars: 2873
-Sim. catalogue number of stars: 15996
-Identification classification: Use work catalogue indexes
-Optimization criteria:
    Ident.      Amb.      NoIdent.      WrongIdent.
Good:    100.00    0.00      0.00      0.00
Bad:     65.00    15.00     15.00     5.00

-Algorithm specific information:
-Algorithm name: Baldini
-Number of checks for bright stars: 9
-Number of checks for neighbor stars: 1
-Searching Ang. sep. prec.(dg): 0.0094271
-Searching Mag prec.(vis.): 0.75
-Mirror check status: False
-Ident. obs. bright star mag.(vis.): 3.5395
-Ident. obs. bright star id: 4
-Ident. bright star id: 4
-Ident. obs. neighbors:
[ 1  2  3  5 ]
-Ident. neighbors:
[ 1  2  3  5 ]

-Positions:
-Sensor At. Euler angles (rel. spacecraft base)(312) (degree):
[ -90.000  0.000  0.000 ]
-Sensor pointing direction (based on real attitude)(Ra,Dec,Roll) (dg):
[ 42.641  55.059  307.509 ]
-Sensor pointing direction (based on priori attitude)(Ra,Dec,Roll) (dg):
[ 43.301  55.417  306.735 ]
-Sensor pointing direction (based on det. attitude)(Ra,Dec,Roll) (dg):
[ 42.640  55.057  307.509 ]
-Spacecraft from sensor pointing direction:
-321 Euler angles (dg):
[ 0.000  0.000  0.000 ]
-Rotation matrix:
1.000  0.000  0.000
0.000  1.000  0.000
0.000  0.000  1.000
-Spacecraft real attitude:
-Ra,Dec,Roll (dg):
[ 42.641  55.059  307.509 ]
-Rotation matrix:
0.421  0.388  0.820
0.066  0.888 -0.454
-0.905  0.245  0.349
-Spacecraft priori attitude estimation:
-Ra,Dec,Roll (dg):
[ 43.301  55.417  306.735 ]
-Rotation matrix:
0.413  0.389  0.823
0.070  0.888 -0.455
-0.908  0.246  0.339
-Spacecraft attitude determination:
-Ra,Dec,Roll (dg):
[ 42.640  55.057  307.509 ]
-Rotation matrix:
0.421  0.388  0.820
0.066  0.888 -0.454
-0.905  0.245  0.349

-Star lists:
-Observed star region:
Cat. Number  RA(dg)  Dec(dg)  Mag(vis)  Fi(dg)  Lambda(dg)  BV mag. dif.  Spec. class
23256.100    35.589  55.846  5.200    -3.192   2.533      0.340        22.000

```

|           |        |        |       |        |        |       |        |
|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 23655.100 | 42.674 | 55.896 | 3.790 | -0.653 | -0.524 | 1.690 | 53.000 |
| 23685.100 | 43.565 | 52.763 | 3.950 | 2.159  | 0.953  | 0.740 | 45.000 |
| 23789.100 | 46.199 | 53.506 | 2.900 | 2.477  | -0.765 | 0.730 | 45.000 |
| 23791.100 | 46.385 | 56.706 | 4.760 | -0.100 | -2.666 | 1.020 | 50.000 |

-Sensor observed stars:

| Cat. Number | Xl(m)  | Yl(m)  | ObsMag(vis) | Status | Identifications |
|-------------|--------|--------|-------------|--------|-----------------|
| 23256.100   | -0.056 | 0.044  | 5.242       | co     | 1               |
| 23655.100   | -0.011 | -0.009 | 3.780       | co     | 1               |
| 23685.100   | 0.038  | 0.017  | 4.009       | co     | 1               |
| 23789.100   | 0.043  | -0.013 | 3.539       | co     | 1               |
| 23791.100   | -0.002 | -0.047 | 4.877       | co     | 1               |

-Identified observed star data:

| Obs. index | Fi(dg) | Lambda(dg) | ObsMag(vis) |
|------------|--------|------------|-------------|
| 1          | -3.193 | 2.532      | 5.242       |
| 2          | -0.654 | -0.526     | 3.780       |
| 3          | 2.158  | 0.951      | 4.009       |
| 4          | 2.476  | -0.767     | 3.539       |
| 5          | -0.101 | -2.668     | 4.877       |

-Work catalogue identified stars :

| Cat. Number | RA(dg) | Dec(dg) | Mag(vis) | BV mag. dif. | Spec. class |
|-------------|--------|---------|----------|--------------|-------------|
| 23256.100   | 35.589 | 55.846  | 5.200    | 0.340        | 22.000      |
| 23655.100   | 42.674 | 55.896  | 3.790    | 1.690        | 53.000      |
| 23685.100   | 43.565 | 52.763  | 3.950    | 0.740        | 45.000      |
| 23789.100   | 46.199 | 53.506  | 2.900    | 0.730        | 45.000      |
| 23791.100   | 46.385 | 56.706  | 4.760    | 1.020        | 50.000      |

-Identified stars sensor frame vectors:

|        |       |        |
|--------|-------|--------|
| 0.056  | 0.997 | -0.044 |
| 0.011  | 1.000 | 0.009  |
| -0.038 | 0.999 | -0.017 |
| -0.043 | 0.999 | 0.013  |
| 0.002  | 0.999 | 0.047  |

-Identified stars inertial frame vectors:

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 0.457 | 0.327 | 0.828 |
| 0.412 | 0.380 | 0.828 |
| 0.438 | 0.417 | 0.796 |
| 0.412 | 0.429 | 0.804 |
| 0.379 | 0.397 | 0.836 |

-Star region limits:

|               |         |
|---------------|---------|
| min RA(dg):   | 22.5758 |
| max RA(dg):   | 63.7579 |
| min Dec(dg):  | 43.3644 |
| max Dec(dg):  | 66.3803 |
| min Mag(vis): | 1.79    |
| max Mag(vis): | 7       |

-Analysis variables:

-Sensor pointing vector related to the simulated attitude:

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| [ 0.421 | 0.388 | 0.820 ] |
|---------|-------|---------|

-Sensor pointing vector related to the priori attitude:

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| [ 0.413 | 0.389 | 0.823 ] |
|---------|-------|---------|

-Sensor pointing vector related to the det. attitude:

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| [ 0.421 | 0.388 | 0.820 ] |
|---------|-------|---------|

-Priori/Simulated 321 Euler angles error(dg):

|         |        |          |
|---------|--------|----------|
| [ 0.660 | -0.358 | -0.775 ] |
|---------|--------|----------|

-Det./Priori 321 Euler angles error(dg):

|          |       |         |
|----------|-------|---------|
| [ -0.661 | 0.360 | 0.774 ] |
|----------|-------|---------|

-Det./Simulated 321 Euler angles error(dg):

|          |       |          |
|----------|-------|----------|
| [ -0.001 | 0.002 | -0.001 ] |
|----------|-------|----------|

-Priori/Simulated Euler

|                                   |        |          |
|-----------------------------------|--------|----------|
| angle (dg): 0.569, axis: [ -0.409 | -0.907 | -0.103 ] |
|-----------------------------------|--------|----------|

-Det./Priori Euler

|                                  |       |         |
|----------------------------------|-------|---------|
| angle (dg): 0.570, axis: [ 0.405 | 0.908 | 0.105 ] |
|----------------------------------|-------|---------|

-Det./Simulated Euler

|                                   |       |         |
|-----------------------------------|-------|---------|
| angle (dg): 0.002, axis: [ -0.599 | 0.651 | 0.466 ] |
|-----------------------------------|-------|---------|

-Priori/Simulated attitude related error in sensor direction angle (dg): -  
0.346

```

-Det./Priori attitude related error in sensor direction angle (dg): 0.346
-Det./Simulated attitude related error in sensor direction angle (dg): 0.001
-Priori/Simulated attitude related error in sensor perpendicular direction
angle (dg): 0.452
-Det./Priori attitude related error in sensor perpendicular direction angle
(dg): 0.453
-Det./Simulated attitude related error in perpendicular sensor direction
angle (dg): 0.002

-Files:
-Ident. alg.: BalIde.m
-Ident. alg. data: BalIde.mat
-Ident. alg. specific functions:
  Specific 3D:    BalSpec3D.m
  Specific Test:  BalSpecTes.m
  Specific Test Relatory:    BalSpecTesRel.m
  Specific Test Graphics:    BalSpecTesGra.m
  Specific Statistics:    BalSpecSta.m
  Specific Statistics Relatory:    BalSpecStaRel.m
  Specific Statistics Graphics:    BalSpecStaGra.m
  Specific Data Record:    BalSpecDataRec.m
-Sensor alg.: FOVpeq.m
-Sensor features: FOVpeq.mat
-Sensor ob. data file: test03-sed.mat
-Priori Sensor alg.: PSe.m
-Priori Sensor features: PSe.mat
-At. det. alg.: DefAtd.m
-At. det. alg. data: DefAtd.mat
-At. dyn. sim. alg.: DefAtd.m
-At. dyn. sim. alg. data: DefAtd.mat
-Analysis data: test03-ana.mat
-Source catalogue: Catalogue_5p5.mat

```

### ➤ Relatório para todas as simulações:

Siats relatory:

-Number of tests: 100

-Identification types:

| Cor. | Cor_Amb. | Wro_Amb. | Amb. | No.  | Wro. |
|------|----------|----------|------|------|------|
| 0.82 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.18 | 0.00 |

-Statistics:

| Test | Num. obs. | stars | Correct Id. | Duration(sec) |
|------|-----------|-------|-------------|---------------|
| 1    |           | 5     | 4           | 0.980         |
| 2    |           | 5     | 5           | 1.430         |
| 3    |           | 4     | 3           | 1.040         |
| 4    |           | 2     | 2           | 0.880         |
| 5    |           | 3     | 0           | 1.370         |
| 6    |           | 5     | 5           | 1.050         |
| 7    |           | 5     | 5           | 1.090         |
| 8    |           | 2     | 2           | 1.100         |
| 9    |           | 5     | 4           | 1.050         |
| 10   |           | 2     | 2           | 1.040         |
| 11   |           | 5     | 4           | 1.050         |
| 12   |           | 5     | 5           | 0.990         |
| 13   |           | 2     | 2           | 1.090         |
| 14   |           | 1     | 0           | 0.160         |
| 15   |           | 5     | 5           | 0.990         |
| 16   |           | 0     | 0           | 0.990         |
| 17   |           | 2     | 2           | 1.040         |
| 18   |           | 5     | 5           | 0.990         |
| 19   |           | 5     | 5           | 1.260         |
| 20   |           | 3     | 0           | 1.480         |

|    |   |   |       |
|----|---|---|-------|
| 21 | 3 | 0 | 1.260 |
| 22 | 0 | 0 | 1.260 |
| 23 | 5 | 5 | 0.990 |
| 24 | 1 | 0 | 0.170 |
| 25 | 5 | 4 | 1.040 |
| 26 | 1 | 0 | 0.160 |
| 27 | 3 | 3 | 1.040 |
| 28 | 5 | 3 | 0.940 |
| 29 | 4 | 3 | 1.050 |
| 30 | 1 | 0 | 0.160 |
| 31 | 4 | 3 | 1.210 |
| 32 | 5 | 5 | 1.090 |
| 33 | 5 | 5 | 0.990 |
| 34 | 5 | 5 | 0.940 |
| 35 | 4 | 2 | 1.210 |
| 36 | 5 | 5 | 1.420 |
| 37 | 5 | 5 | 1.150 |
| 38 | 5 | 5 | 1.050 |
| 39 | 5 | 5 | 1.050 |
| 40 | 5 | 4 | 0.980 |
| 41 | 5 | 3 | 1.100 |
| 42 | 4 | 3 | 0.990 |
| 43 | 3 | 3 | 1.040 |
| 44 | 5 | 5 | 1.160 |
| 45 | 3 | 0 | 0.990 |
| 46 | 3 | 0 | 1.480 |
| 47 | 5 | 5 | 1.090 |
| 48 | 1 | 0 | 0.170 |
| 49 | 5 | 5 | 1.260 |
| 50 | 2 | 2 | 1.050 |
| 51 | 5 | 5 | 1.100 |
| 52 | 3 | 3 | 1.160 |
| 53 | 4 | 4 | 1.040 |
| 54 | 1 | 0 | 0.160 |
| 55 | 3 | 0 | 0.820 |
| 56 | 3 | 0 | 0.940 |
| 57 | 0 | 0 | 0.940 |
| 58 | 4 | 4 | 1.050 |
| 59 | 3 | 3 | 1.150 |
| 60 | 5 | 5 | 1.050 |
| 61 | 2 | 2 | 1.040 |
| 62 | 5 | 5 | 1.100 |
| 63 | 5 | 3 | 1.040 |
| 64 | 4 | 4 | 1.050 |
| 65 | 4 | 3 | 0.990 |
| 66 | 5 | 4 | 1.100 |
| 67 | 2 | 0 | 1.050 |
| 68 | 4 | 4 | 0.990 |
| 69 | 2 | 0 | 1.540 |
| 70 | 5 | 4 | 0.990 |
| 71 | 5 | 5 | 1.150 |
| 72 | 5 | 5 | 0.930 |
| 73 | 3 | 3 | 1.100 |
| 74 | 2 | 0 | 1.430 |
| 75 | 3 | 3 | 0.880 |
| 76 | 5 | 5 | 0.990 |
| 77 | 2 | 2 | 1.160 |
| 78 | 3 | 0 | 1.270 |
| 79 | 5 | 5 | 1.150 |
| 80 | 5 | 4 | 1.100 |
| 81 | 2 | 0 | 1.540 |
| 82 | 3 | 3 | 1.040 |
| 83 | 5 | 3 | 1.040 |
| 84 | 5 | 4 | 0.990 |
| 85 | 5 | 5 | 1.210 |
| 86 | 4 | 4 | 0.990 |



|     |   |   |       |
|-----|---|---|-------|
| 87  | 5 | 4 | 1.040 |
| 88  | 5 | 5 | 1.040 |
| 89  | 5 | 5 | 1.150 |
| 90  | 3 | 3 | 1.040 |
| 91  | 3 | 3 | 1.320 |
| 92  | 3 | 0 | 1.260 |
| 93  | 3 | 3 | 0.930 |
| 94  | 1 | 0 | 0.160 |
| 95  | 5 | 4 | 1.380 |
| 96  | 4 | 3 | 1.040 |
| 97  | 3 | 0 | 1.100 |
| 98  | 5 | 5 | 1.100 |
| 99  | 5 | 5 | 0.980 |
| 100 | 5 | 5 | 0.990 |

-Error Statistics (dg):

| Test | Priori/Simulated |            | Determined/Priori |            | Determined/Simulated |            |
|------|------------------|------------|-------------------|------------|----------------------|------------|
|      | Point. dir.      | Perp. dir. | Point. dir.       | Perp. dir. | Point. dir.          | Perp. dir. |
| 1    | 2.0968           | 1.0476     | -2.0778           | 1.0861     | 0.0002               | 0.0028     |
| 2    | -0.3464          | 0.4518     | 0.3463            | 0.4531     | 0.0009               | 0.0022     |
| 3    | -1.5950          | 1.9367     | 1.5238            | 1.9914     | -0.0042              | 0.0036     |
| 4    | 1.3672           | 0.7704     | -1.3678           | 0.7683     | 0.0007               | 0.0016     |
| 5    | 0.2184           | 0.4890     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 6    | -0.0388          | 1.5167     | 0.0127            | 1.5180     | -0.0031              | 0.0010     |
| 7    | 2.1902           | 2.4229     | -2.2810           | 2.3390     | -0.0029              | 0.0013     |
| 8    | -0.1585          | 0.7484     | 0.1527            | 0.7506     | -0.0006              | 0.0015     |
| 9    | 1.4928           | 1.7921     | -1.4374           | 1.8321     | 0.0040               | 0.0018     |
| 10   | -0.2288          | 1.8973     | 0.2632            | 1.8960     | -0.0011              | 0.0038     |
| 11   | 1.2270           | 1.6660     | -1.2127           | 1.6670     | 0.0043               | 0.0068     |
| 12   | -0.9916          | 0.8780     | 1.0058            | 0.8604     | -0.0023              | 0.0014     |
| 13   | 0.5036           | 1.5718     | -0.5406           | 1.5600     | 0.0034               | 0.0064     |
| 14   | -0.0406          | 1.5470     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 15   | -0.7679          | 1.2779     | 0.7590            | 1.2852     | 0.0000               | 0.0022     |
| 16   | 0.2151           | 0.5734     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 17   | 0.0665           | 0.9595     | -0.0717           | 0.9564     | 0.0003               | 0.0027     |
| 18   | 1.4924           | 1.7565     | -1.5595           | 1.6991     | -0.0014              | 0.0025     |
| 19   | -0.3202          | 0.7990     | 0.3097            | 0.8025     | -0.0014              | 0.0002     |
| 20   | -1.0047          | 0.6611     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 21   | -0.2890          | 1.6429     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 22   | 0.0019           | 1.1091     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 23   | -2.9943          | 1.0689     | 3.0161            | 1.0182     | 0.0030               | 0.0035     |
| 24   | 0.2365           | 1.2622     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 25   | -0.5263          | 1.7766     | 0.5330            | 1.7768     | -0.0019              | 0.0030     |
| 26   | -0.3058          | 1.5777     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 27   | -1.6813          | 0.5603     | 1.6860            | 0.5561     | 0.0022               | 0.0041     |
| 28   | -1.6888          | 0.9884     | 1.6760            | 1.0152     | 0.0051               | 0.0039     |
| 29   | -0.9323          | 0.1731     | 0.9364            | 0.1601     | 0.0020               | 0.0034     |
| 30   | 1.1011           | 1.3639     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 31   | 0.1799           | 2.0756     | -0.1093           | 2.0815     | 0.0031               | 0.0016     |
| 32   | 0.2604           | 0.3514     | -0.2590           | 0.3535     | 0.0008               | 0.0023     |
| 33   | 0.1737           | 1.7231     | -0.1489           | 1.7207     | -0.0012              | 0.0049     |
| 34   | -0.2799          | 1.8554     | 0.2600            | 1.8598     | -0.0001              | 0.0016     |
| 35   | 0.6379           | 1.3918     | -0.6056           | 1.4034     | -0.0002              | 0.0036     |
| 36   | 0.8243           | 1.2155     | -0.8201           | 1.2195     | -0.0028              | 0.0008     |
| 37   | 0.2012           | 1.4138     | -0.2153           | 1.4101     | -0.0026              | 0.0021     |
| 38   | -0.4708          | 1.2247     | 0.4831            | 1.2213     | -0.0014              | 0.0051     |
| 39   | 0.3325           | 1.1542     | -0.3326           | 1.1569     | 0.0013               | 0.0038     |
| 40   | 0.2689           | 1.5884     | -0.2324           | 1.5955     | -0.0015              | 0.0014     |
| 41   | -0.0429          | 1.6893     | 0.0752            | 1.6894     | 0.0008               | 0.0016     |
| 42   | 0.0079           | 0.5590     | -0.0052           | 0.5596     | 0.0027               | 0.0007     |
| 43   | 0.5608           | 1.1819     | -0.5431           | 1.1924     | -0.0032              | 0.0010     |
| 44   | -0.3969          | 0.2737     | 0.3947            | 0.2718     | -0.0036              | 0.0010     |
| 45   | -0.0992          | 0.8790     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 46   | -0.6546          | 0.8958     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |
| 47   | 0.6768           | 1.0095     | -0.6771           | 1.0059     | 0.0022               | 0.0027     |
| 48   | 0.7637           | 1.3442     | NaN               | NaN        | NaN                  | NaN        |

|     |         |        |         |        |         |        |
|-----|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 49  | -0.4494 | 0.4697 | 0.4493  | 0.4721 | 0.0001  | 0.0033 |
| 50  | 1.8979  | 1.2137 | -1.8898 | 1.2298 | -0.0022 | 0.0026 |
| 51  | -0.2193 | 1.7867 | 0.1980  | 1.7853 | 0.0038  | 0.0044 |
| 52  | 0.9215  | 1.9416 | -0.9837 | 1.9091 | 0.0016  | 0.0016 |
| 53  | -0.4856 | 0.5003 | 0.4827  | 0.5020 | -0.0021 | 0.0035 |
| 54  | 0.3127  | 1.1031 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 55  | -0.6237 | 0.7541 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 56  | -1.8796 | 2.1153 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 57  | -0.7882 | 1.2059 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 58  | 2.2760  | 0.9029 | -2.2838 | 0.8825 | 0.0005  | 0.0007 |
| 59  | 1.4307  | 0.4528 | -1.4350 | 0.4333 | 0.0013  | 0.0038 |
| 60  | -0.4260 | 1.3208 | 0.4088  | 1.3225 | 0.0015  | 0.0042 |
| 61  | 1.2099  | 0.9253 | -1.2276 | 0.8982 | 0.0011  | 0.0021 |
| 62  | -1.7171 | 1.5171 | 1.7291  | 1.5038 | -0.0016 | 0.0025 |
| 63  | 0.1204  | 0.4259 | -0.1173 | 0.4263 | -0.0001 | 0.0021 |
| 64  | -0.4805 | 1.0290 | 0.4904  | 1.0231 | -0.0022 | 0.0010 |
| 65  | 0.1471  | 2.9684 | -0.0849 | 2.9667 | 0.0008  | 0.0041 |
| 66  | 0.2318  | 2.3787 | -0.2958 | 2.3697 | -0.0021 | 0.0022 |
| 67  | 1.0143  | 1.6934 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 68  | 2.0638  | 0.9360 | -2.0614 | 0.9359 | 0.0012  | 0.0032 |
| 69  | 0.2917  | 0.9881 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 70  | -1.2030 | 1.1805 | 1.2302  | 1.1508 | -0.0004 | 0.0018 |
| 71  | 0.2953  | 2.4346 | -0.3471 | 2.4265 | -0.0024 | 0.0040 |
| 72  | -1.9129 | 1.5131 | 1.8807  | 1.5576 | 0.0000  | 0.0047 |
| 73  | -1.3873 | 0.6033 | 1.3788  | 0.6170 | -0.0042 | 0.0044 |
| 74  | 0.0799  | 0.8494 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 75  | -0.2574 | 2.0943 | 0.2561  | 2.0937 | 0.0013  | 0.0024 |
| 76  | 0.5470  | 0.7554 | -0.5583 | 0.7528 | -0.0029 | 0.0042 |
| 77  | 0.0502  | 0.6614 | -0.0423 | 0.6618 | 0.0017  | 0.0027 |
| 78  | 0.0580  | 0.9507 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 79  | 1.1941  | 1.4874 | -1.1948 | 1.4889 | 0.0023  | 0.0087 |
| 80  | -0.0723 | 1.4208 | 0.0805  | 1.4210 | -0.0051 | 0.0025 |
| 81  | -0.8557 | 0.3909 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 82  | -0.9448 | 0.9703 | 0.9266  | 0.9834 | -0.0016 | 0.0040 |
| 83  | -0.6054 | 1.5788 | 0.5943  | 1.5829 | -0.0003 | 0.0008 |
| 84  | -0.1534 | 0.2084 | 0.1569  | 0.2073 | 0.0031  | 0.0014 |
| 85  | -0.3576 | 0.9365 | 0.3652  | 0.9368 | 0.0027  | 0.0026 |
| 86  | -0.4298 | 2.3681 | 0.4340  | 2.3648 | -0.0037 | 0.0022 |
| 87  | 1.0411  | 0.7492 | -1.0562 | 0.7294 | -0.0011 | 0.0013 |
| 88  | -0.6807 | 1.6153 | 0.6564  | 1.6291 | 0.0023  | 0.0028 |
| 89  | 0.6621  | 3.3353 | -0.7656 | 3.3136 | 0.0041  | 0.0025 |
| 90  | -0.1001 | 1.5426 | 0.0724  | 1.5438 | 0.0066  | 0.0010 |
| 91  | 0.9654  | 0.9548 | -0.9776 | 0.9447 | -0.0021 | 0.0025 |
| 92  | 0.4747  | 2.1862 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 93  | 1.6069  | 1.2380 | -1.6352 | 1.1987 | 0.0016  | 0.0010 |
| 94  | -0.4018 | 0.7113 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 95  | 0.9731  | 1.7232 | -0.9568 | 1.7323 | -0.0010 | 0.0033 |
| 96  | 0.0338  | 0.9572 | -0.0158 | 0.9565 | 0.0027  | 0.0011 |
| 97  | -1.3665 | 1.2274 | NaN     | NaN    | NaN     | NaN    |
| 98  | 0.4425  | 2.6365 | -0.4695 | 2.6344 | 0.0026  | 0.0037 |
| 99  | -1.1350 | 0.4475 | 1.1248  | 0.4727 | -0.0005 | 0.0018 |
| 100 | 1.9550  | 1.2248 | -1.9443 | 1.2431 | -0.0017 | 0.0032 |

-Mean/Std. deviation:

-Identification types:

|      |          |          |      |      |      |
|------|----------|----------|------|------|------|
| Cor. | Cor_Amb. | Wro_Amb. | Amb. | No.  | Wro. |
| 2.97 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.65 | 0.00 |
| 1.92 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 1.01 | 0.00 |

-Statistics:

|                 |             |               |
|-----------------|-------------|---------------|
| Num. obs. stars | Correct Id. | Duration(sec) |
| 4               | 3           | 1.034         |
| 1               | 2           | 0.280         |

-Error Statistics (dg):

|                  |            |                   |            |                      |            |
|------------------|------------|-------------------|------------|----------------------|------------|
| Priori/Simulated |            | Determined/Priori |            | Determined/Simulated |            |
| Point. dir.      | Perp. dir. | Point. dir.       | Perp. dir. | Point. dir.          | Perp. dir. |
| 0.0461           | 1.2569     | -0.1117           | 1.2900     | 0.0001               | 0.0027     |

|        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.9842 | 0.6178 | 1.0542 | 0.6533 | 0.0024 | 0.0015 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|

-Simulation Type: random

-Algorithm specific information:

- Algorithm name: Baldini
- Number of checks (Bright stars, Neig. stars:
 

|          |      |      |
|----------|------|------|
| Mean:    | 2.43 | 0.84 |
| Std dev: | 2.50 | 0.36 |
- Mirror condition statistics %:
 

|        |     |
|--------|-----|
| True:  | 0   |
| False: | 100 |
- Identification types occurrences:
 

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Correct identification (%)   | : 82.0442 |
| No identification (%)        | : 17.9558 |
| Ambiguous identification (%) | : 0       |
| Wrong identification (%)     | : 0       |



## GLOSSÁRIO

**Algoritmo** – procedimento computacional realizado no cumprimento de uma tarefa específica.

**Campo de visada** (FOV – *Field of view*) – área angular do céu observável pelo sensor de estrelas.

**Catálogo de estrelas** – conjunto de informações (posição, magnitude) referentes às estrelas, armazenadas em formato padronizado.

**Catálogo fonte** – catálogo de estrelas contendo informações de todas as estrelas abaixo de uma certa magnitude, geralmente elevada, que define um mapeamento do céu.

**Catálogo de trabalho** – catálogo de estrelas utilizado pelo sistema de identificação de estrelas, geralmente com baixa magnitude.

**Condição espelho** – associação invertida entre estrelas observadas e catalogadas, ocorrendo que um dos conjuntos forma um padrão que é o espelho do outro.

**Determinação de atitude** – estabelecimento da atitude de uma espaçonave com relação a um referencial adotado.

**Domínio** – região circular centrada numa estrela observada, definida por um raio preestabelecido, na qual procura-se pelas estrelas catalogadas que possam corresponder à estrela observada.

**Esfera celeste** – conceito didático para a representação do céu.

**Identificação de estrelas** – associação realizada entre estrelas observadas por um sensor estelar e estrelas presentes num catálogo de estrelas.

**Magnitude estelar** – definição numérica para o brilho de uma estrela.

**MASCO** – projeto de balão estratosférico do INPE.

**Método de identificação de estrelas** – Idéia teórica de um procedimento de identificar estrelas.

**Catálogo de pares** – conjunto de todos os pares de estrelas de um catálogo de trabalho cuja separação angular é menor que a diagonal ou diâmetro do FOV.

**Pré-estimativa de atitude** – estimativa de atitude fornecida previamente de maneira grosseira por um sistema não muito preciso.

**ROSAT** – satélite alemão para observações com telescópio de raios x.

**Sensor de pré-estimativa** – equipamento qualquer capaz de fornecer uma estimativa grosseira da atitude.

**Sensor estelar** – equipamento óptico que é capaz de observar estrelas e produzir saídas de posição e brilho.

**Subcatálogo** – conjunto de informações de uma região definida do céu que tem por objetivo partilhar as informações contidas em um catálogo de trabalho de forma a otimizar o processo de procura de uma estrela.

**Técnica de identificação de estrelas** – Descrição teórica de uma maneira específica de implementar um método de identificação de estrelas.