

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS
ESPACIAIS

Bolsa de Iniciação Científica CNPq

Relatório Final

“IDENTIFICAÇÃO AUTÔNOMA DE ESTRELAS”

Gustavo Baldo Carvalho

**Aluno da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo (EESC-USP)**

Emanuella de Cássia Vicente

Aluna da Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP

**Orientador: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes, Pesquisador, DMC-
INPE**

São José dos Campos, 20/06/97

Agradecimentos

Agradeço a oportunidade de poder concluir o desenvolvimento deste trabalho, e as diversas pessoas que contribuíram para realização deste.

Primeiramente a Deus por esta e outras todas as oportunidades de minha vida, desafios, vitórias e derrotas que me levaram às melhores escolhas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelas oportunidades e apoio oferecidos, assim como ao Ministério da Ciência e Tecnologia.

Ao Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes pela orientação deste trabalho, onde pude desenvolver mais a capacidade de aprendizagem.

Ao CNPq e aos Departamentos responsáveis no INPE pela primeira oportunidade de participar no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

À todos meus familiares e amigos que colaboram neste processo de aprendizado, e pelo apoio e força que me deram para que eu chegasse até aqui.

Obrigada,

Emanuella de Cássia Vicente

São José dos Campos, 20/06/97.

Abstract

*The aim of this work is to present an study about **tree-axis attitude determination** of Earth artificial satellites from **star sensor** observations. Special emphasis was put in the **star identification** problem. It was solved by the Van Bezooijen Algorithm. Numerical simulation on a personal computer was carried out with **PC-Matlab**[®] based on a real star catalog. The results allow us to analyse the performance of the procedure for different star configuration, star identification without a priori attitude precision and star sensor precision.*

Resumo

IDENTIFICAÇÃO AUTÔNOMA DE ESTRELAS

O trabalho analisa determinações de atitude de um satélite artificial estabilizado triaxialmente, com identificação de estrelas por um sensor estelar rastreador CCD sem auxílio de um sensor de pré-estimativa, e complementa o projeto do sensor estelar do INPE.

O algoritmo de **Bezoigen** de comparação de pares de estrelas foi selecionado para a identificação das estrelas. Não há necessidade de uma atitude pré-estimada, podendo dessa forma operar em ambientes onde as únicas referências são as estrelas. A técnica da comparação de pares de estrelas compara distâncias angulares de pares estrelas vistas pelo sensor e pares de estrelas num catálogo, realizando um procedimento de atribuição de notas para as estrelas observadas com relação às catalogadas. Possibilidades: identificação correta, identificação errônea, identificação ambígua e não identificação. As estrelas escolhidas são as de notas mais altas para maximizar a probabilidade de identificação correta e minimizar a probabilidade de identificação errônea com base na distribuição de **Poisson** para as estrelas e de **Gauss** para o erro de observação.

A atitude é estimada por um método mínimos quadrados que utiliza dois ou mais versores medidos em dois referenciais diferentes. Os sistemas de coordenadas utilizados são o azimutal, vetorial-cartesiano e equatorial, sendo utilizados nos referenciais inercial e do satélite. A representação de atitude é feita através de ângulos de **Euler**. O transporte de atitude é feito por matrizes de rotação.

O catálogo de estrelas é dado no referencial inercial pelo catálogo Sky Catalogue 2000.0 da Sky Publishing Corporation. Utilizou-se todo o céu, representado pelo catálogo fonte com magnitude até 7, e um catálogo dedicado utilizado para a identificação com magnitude até 5.

Os resultados a partir de testes do *software* descrevem o comportamento do mesmo, com os quais tiramos as conclusões que servem de base para desenvolvimentos futuros.

Índice

	página
Título.....	I
Agradecimentos.....	II
Abstract.....	III
Resumo.....	IV
Índice.....	V
Lista de figuras.....	VI
Lista de tabelas.....	VII
Lista de abreviaturas.....	VII
Lista de símbolos.....	VIII
Capítulo I.....	1
1. Introdução.....	2
Capítulo II.....	5
2. Conceitos básicos.....	6
2.1 Sistemas de Referência.....	6
- Esfera celeste.....	6
- Descrição dos sistemas.....	7
- Descrição dos referenciais.....	9
- Transformações.....	9
- Sistemas de representação de atitude e referencial.....	11
2.2 Problema da determinação de atitude.....	13
2.3 Sensores típicos de atitude.....	13
2.4 Sensor estelar.....	15
2.4.1 Sensores estelares.....	15
2.4.2 Sensor estelar alvo deste trabalho.....	16
- Precisão do sensor.....	19
2.5 Mapa estelar.....	21
2.5.1 Geração do catálogo de estrelas	21
- Número de catalogação	23
- Asc. Reta (em ⁰) - A.R.....	23
- Declinação (em ⁰) - DEC.....	23
- Magnitude visual - V.....	24
- Diferença entre magnitude visual e <i>Blue</i> - BV.....	24
- Classe espectral - C.ES.....	24
- Aquisição de dados a partir do catálogo SKY 2000.0.....	24
Capítulo III.....	25
3. Fundamentos teóricos.....	26
3.1 O algoritmo.....	26
- Determinação de atitude triaxial exata.....	26
- Determinação de atitude triaxial otimizada.....	26
3.2 Métodos de identificação de estrelas.....	27
3.2.1. Algoritmos de identificação analisados.....	27
3.2.2. Algoritmos de identificação de <i>Bezooijen</i>	29
Capítulo IV.....	34
4. Descrição do procedimento	35
4.1 Rotinas.....	35
- Diagrama de acesso de rotinas principais.....	35
- Fluxograma do programa principal.....	36
- Rotinas auxiliares do sistema.....	37

4.2 Resultados e Conclusões.....	40
Capítulo Final.....	41
5. Comentários finais.....	42
- Atividades realizadas durante o decorrer do trabalho.....	42
- Opiniões gerais sobre a experiência.....	42
- Continuação do trabalho.....	43
6. Referências bibliográficas e <i>software</i>	44

Lista de figuras

Figura	Seção
1- Sonda Galileo em Júpiter - estabilizada triaxialmente - estrelas como referência.....(Cap.I.1.)	
2- Seqüência para o caso real de funcionamento do sistema de determinação de atitude.....(Cap.I.1.)	
3- Seqüência para a simulação de funcionamento do sistema de determinação de atitude.....(Cap.I.1.)	
4- Esfera celeste inercial.....(Cap.II.2.1.)	
5- Esfera celeste do satélite.....(Cap.II.2.1.)	
6- Sistema equatorial de referência.....(Cap.II.2.1.)	
7- Sistema azimutal anti-horário.....(Cap.II.2.1.)	
8- Sistema vetorial-cartesiano na esfera celeste.....(Cap.II.2.1.)	
9- Sistema cartesiano plano.....(Cap.II.2.1.)	
10- Sistema vetorial-cartesiano e equatorial de referência.....(Cap.II.2.1.)	
11 - Sistema vetorial-cartesiano e cartesiano plano.....(Cap.II.2.1.)	
12- Rotações sucessivas em ângulos de Euler.....(Cap.II.2.1.)	
13 - Determinação de atitude de satélites triaxialmente estabilizados.....(Cap.II.2.3.)	
14 - Determinação de versores de apontamento de estrelas a partir do satélite.....(Cap.II.2.3.)	
15- Giroscópios: sensores inerciais.....(Cap.II.2.3.)	
16- Diagrama simplificado de um sensor estelar com disposição de fendas em "V".....(Cap.II.2.4.1.)	
17- Rastreador estelar de movimentos mecânicos.....(Cap.II.2.4.1.)	
18- Diagrama simplificado de um sensor fixo com varredura eletrônica.....(Cap.II.2.4.1.)	
19- Seqüência de detecção do sensor rastreador estelar CT - 401.....(Cap.II.2.4.2.)	
20- Esfera celeste e sistema de coordenadas locais na matriz eletrônica.....(Cap.II.2.4.2.)	
21 - Relação de coordenadas no sistema óptico e matriz eletrônica.....(Cap.II.2.4.2.)	
22 - Matriz CCD do sensor de varredura eletrônica.....(Cap.II.2.4.2.)	
23- Movimentos em torno dos eixos do sensor e do satélite - precisão do sensor.....(Cap.II.2.4.2.)	
24- Mapas plotados a partir dos catálogos gerados; fonte e dedicado respectivamente.....(Cap.II.2.5.)	

25- Funcionamento do sistema de manipulação de dados do catálogo.....	(Cap.II.2.5.1.)
26- Bases ortonormais construídas através dos versores medidos.....	(Cap.III.3.1.)
27- Representação gráfica da técnica da comparação direta.....	(Cap.III.3.2.1.)
28- Seleção das estrelas dedicadas a serem utilizadas na identificação.....	(Cap.III.3.2.2.)
29- Representação gráfica da atribuição de notas na verificação de pares na matriz de <i>Bezooijen</i>	(Cap.III.3.2.2.)
30- Representação gráfica da atribuição de notas na verificação de magnitudes na matriz de <i>Bezooijen</i>	(Cap.III.3.2.2.)
31- Representação gráfica do algoritmo de <i>Bezooijen</i>	(Cap.III.3.2.2.)
32- Sequência para a simulação de funcionamento do sistema de determinação de atitude.....	(Cap.IV.4.1.)

Lista de tabelas

Tabelas	Seção
Tab. 1.- Divisões da esfera celeste em arquivos <i>PC-Matlab</i>	(Cap.III.2.5.1.)

Lista de siglas e abreviaturas

Arccos - Função arco-cosseno
 Arcsen - Função arco-seno
 c - coseno
 CCD - Charge Couple Device
 CDA - Centro de Divulgação da Astronomia
 Cos - Função coseno
 EESC - Escola de Engenharia de São Carlos
 Fig. - Figura
 INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
 Mag. - Magnitude
 s - seno
 Sen - Função seno
 USP - Universidade de São Paulo

Lista de símbolos

- ângulos:

- az - azimute
- α - ascensão reta
- α_h - ascensão reta em horas no referencial inercial
- α_{hs} - ascensão reta em horas no referencial do satélite
- δ - declinação no referencial inercial
- δ_s - declinação no referencial do satélite
- h - altura do sistema azimutal
- φ, θ, ψ - rotações sucessivas de Euler nos eixos cartesianos triaxiais
- θ - ângulo qualquer; ângulo de coordenada esférica
- λ - ângulo de estrela referente ao eixo y do sensor
- ϕ - ângulo de estrela referente ao eixo x do sensor; ângulo de coordenada esférica

- eixos:

- $\hat{n}_i, \hat{n}_i', \hat{n}_i''$ - eixos de rotação de Euler
- x, y - eixos do sistema cartesiano plano;
- z - eixo do sistema cartesiano tridimensional
- x', y', z' - eixos do sistema cartesiano tridimensional depois da rotação φ
- x'', y'', z'' - eixos do sistema cartesiano tridimensional depois da rotação θ
- x''', y''', z''' - eixos do sistema cartesiano tridimensional depois da rotação ψ
- X, Y, Z - Eixos do sistema triaxial cartesiano inercial; eixos do sistema tridimensional cartesiano geral

- sistemas:

- ϵ, ϵ' - bases
- $\{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3\}$ - base ortonormal inercial
- $\{\hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{s}_3\}$ - base ortonormal no referencial do satélite
- xy - Sistema cartesiano plano
- ZY - plano no referencial inercial que contém os eixos Z e Y
- XYZ - Sistema triaxial cartesiano

- definições::

- Δ - variação
- f - distância focal da lente
- N, S - Norte, Sul
- γ - ponto de equinócio vernal
- Σ - somatória
- \int - símbolo de integração
- h - hora
- ρ - raio de coordenada esférica
- v - magnitude visual aparente
- B - magnitude azul

- matrizes::

- A - matriz de atitude
- A^T - matriz transposta de A
- A^{-1} - matriz inversa de A única
- A_{i-1} - matriz atitude de iteração anterior
- $A_{m \times n}$ - matriz de tamanho $m \times n$
- $[a_{ij}]_{m \times n}$ - elemento de matriz $m \times n$
- I - matriz identidade 3×3 ;
- R_1 - matriz de transformação de $x'y'z''$ para $x''y''z'''$
- 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_{313} - matriz de rotação de Euler em modo 313
- R_{321} - matriz de transformação de xyz para $x''y''z'''$ (em modo 321)
- tr - traço de matriz
- Λ - matriz diagonal

- vetores:

- \hat{e}_i' - versor do sistema ortonormal de base ϵ'
- $\hat{e}_i, \hat{e}_j, \hat{e}_k$ - versores do sistema ortonormal
- i, j, k - versores do sistema ortonormal
- \hat{o} - versor representativo da posição observada da estrela
- \hat{s} - versor representativo da posição catalogada da estrela
- \vec{V} - vetor de módulo V
- $\vec{V}_{n \times 1}$ - vetor ou matriz coluna
- V_x, V_y, V_z - Componentes de vetor no sistema triaxial cartesiano inercial

\hat{V}_s - versor de posicionamento da estrela no sistema do sensor

\hat{V}_i - versor de observação no referencial inercial

W_x, W_y, W_z - componentes de vetor no sistema triaxial cartesiano no referencial do satélite.

W_i - versor de observação no referencial do satélite

u, v - coordenadas cartesianas planas na matriz do sensor

x, y, z - componentes de vetor no sistema ortonormal

• funções:

J - função erro

• erros, coeficientes, tolerâncias e fatores:

ε - tolerância permitida

σ_k - desvio padrão de medida (erro do sensor)

Capítulo I

1. Introdução

O Trabalho prévio ao aqui apresentado tinha por objetivo o estudo da identificação de estrelas por um sensor estelar de Câmara CCD, apoiado por um sensor auxiliar de pré-estimativa, para o cálculo da atitude de um satélite triaxialmente estabilizado. Para isso foi utilizada a técnica da comparação direta e em auxílio desta, a técnica dos Múltiplos critérios, em otimização do raio de busca das estrelas.

Algumas das conclusões daquele trabalho mostraram a importância e influência das hipóteses adotadas e relativamente confirmadas quanto à distribuição das estrelas no céu, assim como a densidade de estrelas, porém, sem a utilização das magnitudes como parâmetro de identificação.

Dessa forma, o trabalho aqui desenvolvido tem por objetivos fazer um estudo mais aprofundado da identificação de estrelas para o cálculo de atitude de naves triaxialmente estabilizadas, sem no entanto a necessidade de uso de um sensor de pré-estimativa. Isso tem um motivo especial de ser devido à aplicação em naves que por alguma razão não têm como utilizar outros sistemas de referência senão as estrelas, o que ocorre com frequência com sondas interplanetárias.

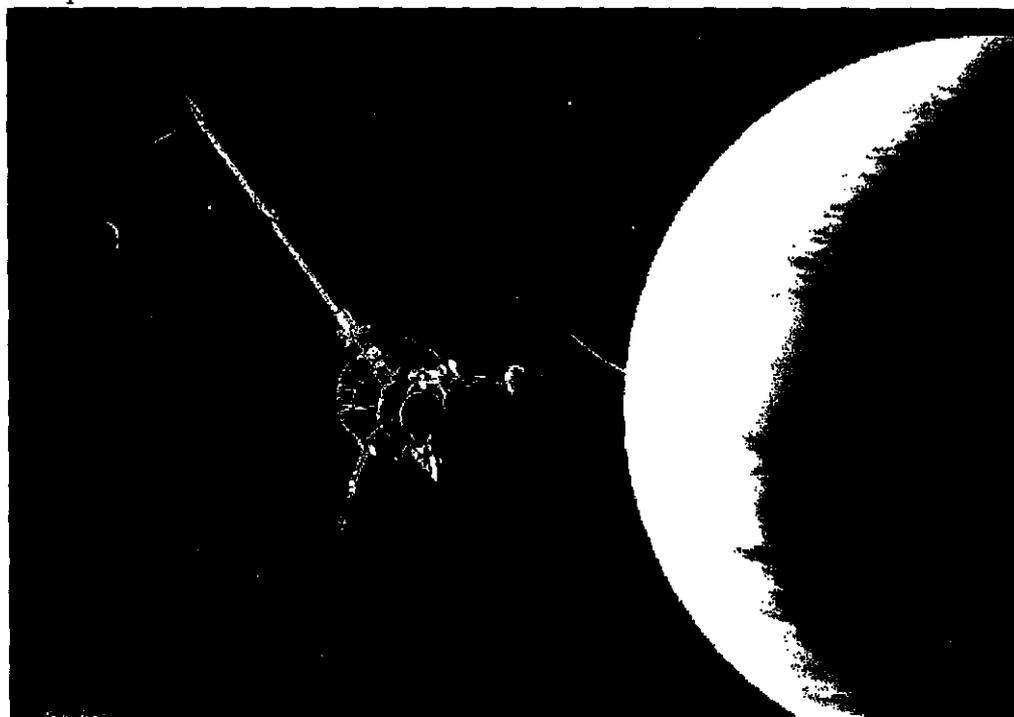


Fig. 1. - Sonda Galileo em Júpiter - estabilizada triaxialmente - estrelas como referência.

A necessidade de um estudo a este nível é devida à importância de uma correta atitude. O correto posicionamento de um satélite é de extrema importância, uma vez que vários fatores estão intrinsecamente ligados à sua atitude, como a iluminação de painéis solares para geração de energia, interpretação de dados e reconhecimento através do posicionamento, minimização de forças e torques atuantes (que tendem a tirar o satélite de sua posição correta), satisfação de todos os requisitos exigidos pela missão a ser desenvolvida e o controle do mesmo. Também apoia-se na construção do sensor estelar do INPE que tem vias de utilização em projetos em andamento como o do satélite franco-brasileiro e o projeto MASCO do balão atmosférico do INPE. Há uma grande contribuição no sentido de uma área não explorada no país, trabalhos em observatórios e ainda apoio a trabalhos de estudantes que desejam verificar o desempenho de técnicas estatísticas já

utilizadas em projetos como este. Porém, o trabalho será terminado por outro bolsista, uma vez que o autor encontra-se em situação de conclusão de graduação e início de pós-graduação na própria instituição. Dessa forma, o trabalho será orientado e apoiado pelo autor e orientador, direcionando-o no sentido de criar frutos para uma tese de mestrado.

Foi utilizada uma técnica um pouco mais complexa no que se refere ao algoritmo de identificação, estando ainda em fase de implementação em rotinas *PC-Matlab*. A técnica utilizada baseia-se no algoritmo de *Bezooijen* [b16.] onde utiliza-se um catálogo de 4100 estrelas e um FOV de $11,5^\circ \times 11,5^\circ$ e precisão de $8''$. No caso, utilizamos um catálogo dedicado de 518 estrelas de magnitude até 5, e um catálogo fonte de simulação de 15985 estrelas com magnitude até 7, ambos tirados do catálogo fonte *SKY Catalogue - 2000.0* [c1.] , com um FOV variável, mas normalmente testado com $15^\circ \times 15^\circ$. Com este algoritmo. monta-se uma comparação entre estrelas do FOV e do catálogo a partir de uma matriz na qual são atribuídos pesos para as estrelas. As estrelas com os maiores pesos são as primeiras a serem verificadas com relação à separação angular. A matriz tem tamanho de $o \times c$ onde $o = n^\circ$ de estrelas observadas e $c = n^\circ$ de estrelas catalogadas.

Num caso real (fig. 2), teríamos a informação chegando ao sensor e deste passando a todo o sistema onde seria calculada a atitude primária que numa iteração serviria de pré-estimativa, ou seja, o algoritmo começa de um modo sem pré-estimativa “perdido no espaço”

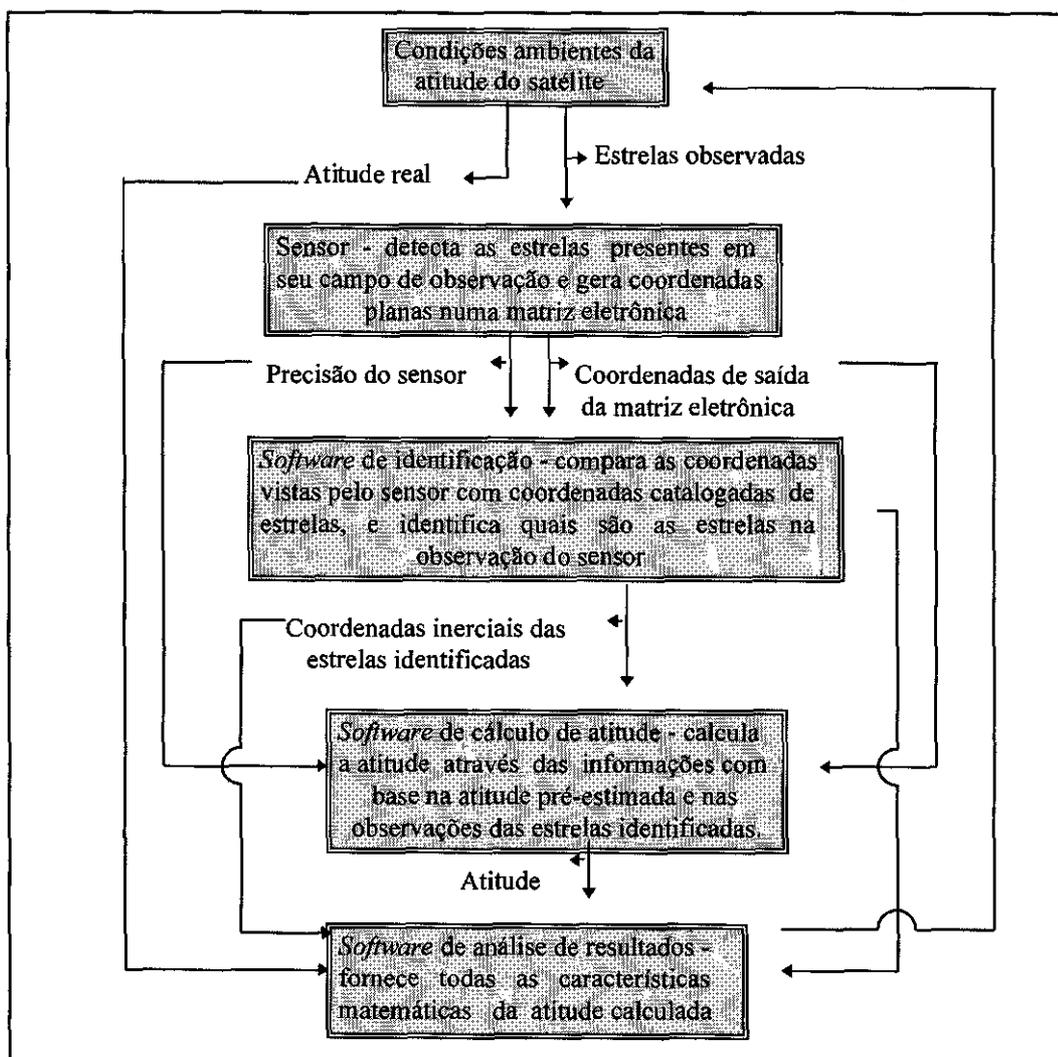


Fig. 2. - Caso real de funcionamento do sistema de determinação de atitude.

Para o desenvolvimento (fig 3), as informações das estrelas observadas e a atitude serão geradas por um simulador com participação de um usuário. A informação das estrelas será passada a um *software* que representa o sensor e que gera toda a informação sobre as estrelas vistas a partir da matriz eletrônica do sensor.

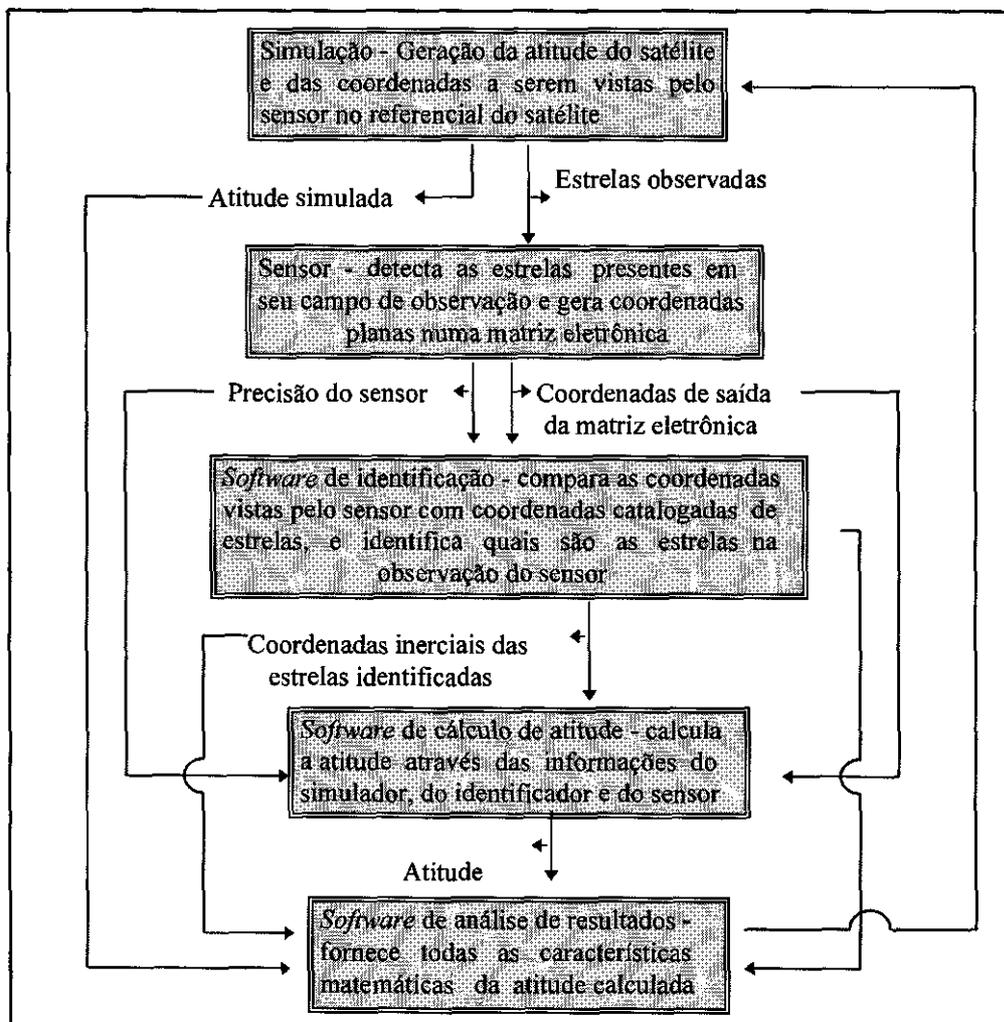


Fig. 3. - Simulação de funcionamento do sistema de determinação de atitude.

Então, as informações das estrelas vistas passam ao sistema de identificação. Na identificação são selecionadas as estrelas a serem utilizadas no cálculo da atitude através do algoritmo de *Bezooijen* [b16.]. Posteriormente as coordenadas das estrelas selecionadas são repassadas ao sistema de cálculo com as coordenadas vistas pela matriz do sensor. Nesta etapa, a atitude primária é calculada pelo *método de determinação de atitude triaxial otimizada* [b1.], sendo analisada e comparada com a simulada por um sistema de análise que fornece todas as características desejadas sobre a atitude calculada. A primária então reinicia o processo como pré-estimativa, fazendo com que o sistema trabalhe semelhante ao descrito na referência [b17.].

Os sistemas de coordenadas são representados pelo sistema azimutal, vetorial-cartesiano e equatorial de referência, sendo utilizados em dois referenciais básicos, o inercial (relacionado à esfera celeste centrada na Terra) e o do satélite (relacionado com uma esfera celeste centrada no próprio satélite). Como em termos astronômicos a distância que separa o satélite do planeta é ínfima, desconsiderou-se qualquer variação nas coordenadas das estrelas catalogadas com referência ao planeta, devido à mudança do referencial de observação, a menos das transformações angulares.

A representação de atitude é feita por ângulos de **Euler** e matrizes de rotação. Os ângulos de são utilizados em função da simplicidade de composição e reduzida dimensão de representação, reduzindo erros computacionais, apesar de possuir singularidades. Para o transporte de atitude é utilizada com maior eficiência a matriz de rotação. A seguir serão expostos os conceitos que permitem o desenvolvimento, os fundamentos que suportam o trabalho, e em seguida o desenvolvimento propriamente dito do trabalho.

Capítulo II

2. Conceitos básicos

Esta parte do desenvolvimento propõe-se a uma breve discussão a respeito de conceitos básicos, sem os quais seria impossível o perfeito andamento do trabalho. No entanto, como os conceitos já foram amplamente discutidos e apresentados no trabalho prévio [b17.], será aqui apenas dada uma abordagem superficial a título de recordação e motivação dos conceitos simplesmente de forma descritiva. Maiores detalhes e processos matemáticos são descritos na referência acima citada.

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

2.1. Sistemas de referência

- Esfera Celeste:

Para o desenvolvimento de toda a base do posicionamento e referência do sistema, relembremos o conceito de esfera celeste.

Imaginemos que o nosso planeta esteja estático e que todo o céu acima de nós resume-se a uma esfera rotativa centrada em nosso planeta. Através deste conceito, projetamos todas as características presentes na Terra para esta esfera, como o eixo de rotação e pólos, sendo estes denominados eixo e pólos celestes (Ver fig. 4).

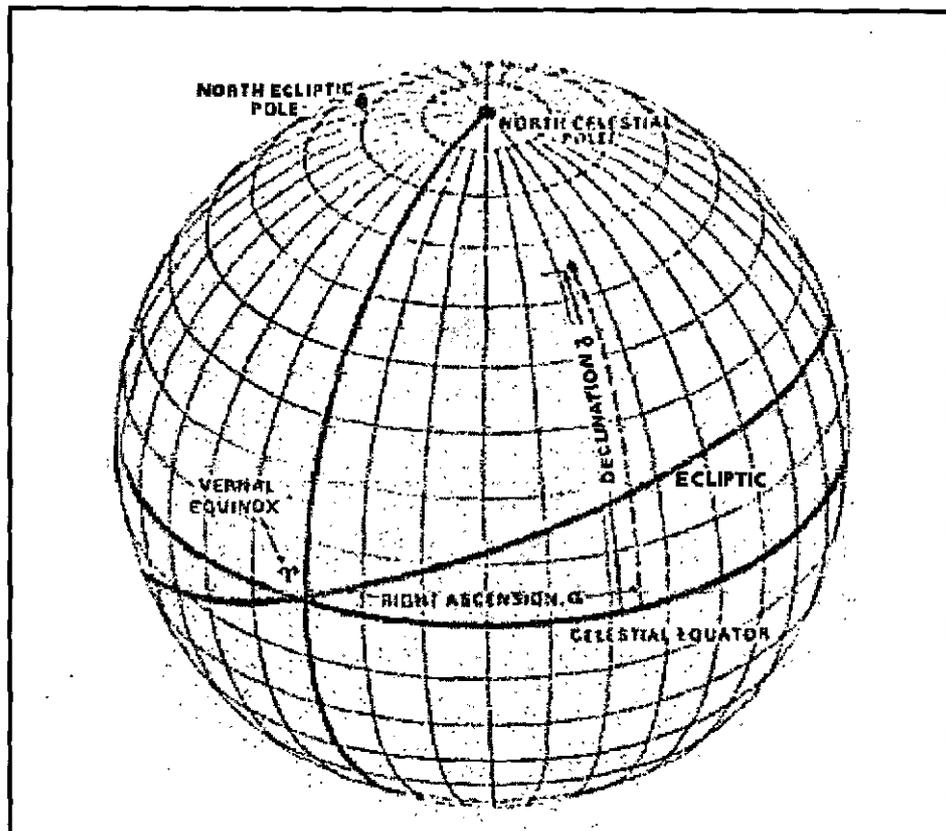


Fig. 4. - Esfera celeste inercial.

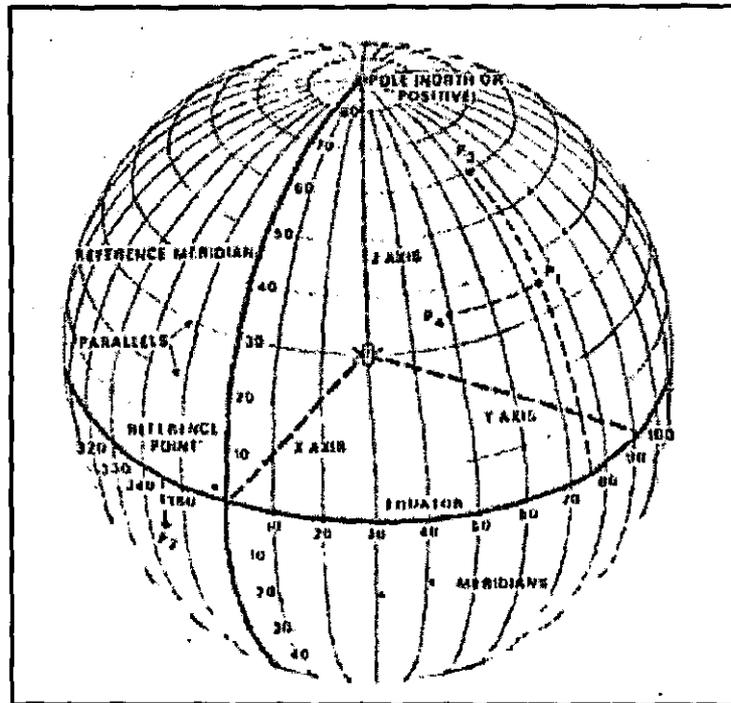


Fig. 5. - Esfera celeste do satélite.

Desprezamos neste trabalho, os movimentos próprios de todos os astros, imaginando que estejam estáticos eternamente. Além disso retiramos da esfera todos os planetas, cometas, asteróides, o Sol e a Lua, agindo como se somente houvessem estrelas.

A coordenada de ascensão reta é medida em horas de 0 a 24 hs a partir do meridiano de referência no sentido de rotação da Terra, e a coordenada de declinação é medida em graus de 0 a $+90^{\circ}$ para Norte a partir do paralelo de referência, ou equador.

• Descrição dos sistemas:

O sistema de coordenadas que utiliza a esfera celeste com coordenadas em ascensão reta e declinação é o chamado sistema equatorial de referência (Ver fig. 6).

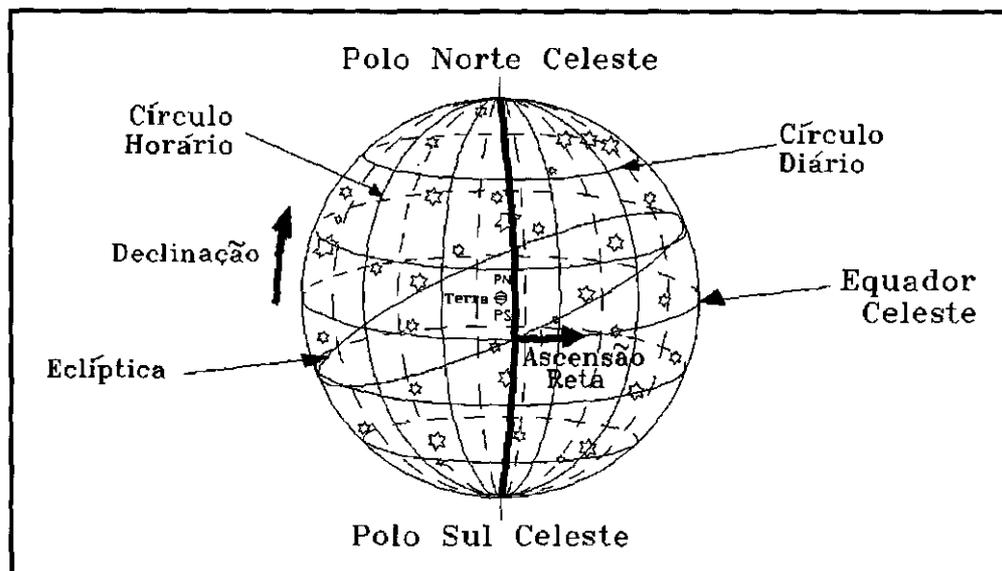


Fig. 6. - Sistema Equatorial de referência.

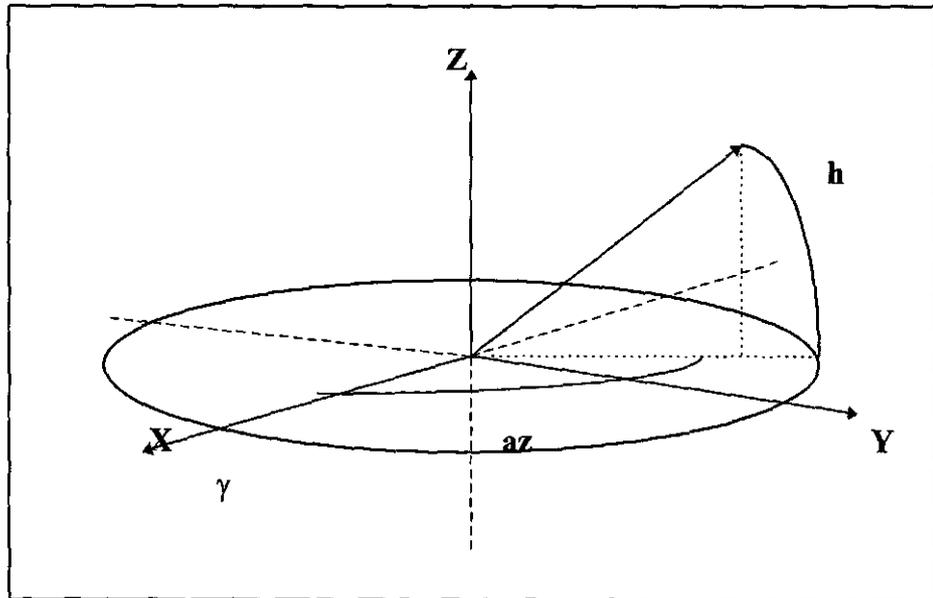


Fig. 7. - Sistema Azimutal anti-horário.

Além dele, ainda temos o sistema azimutal (Ver fig. 7). A altura é idêntica à declinação, e o azimute é idêntico à ascensão reta medido de 0 a 360°, porém que no sentido contrário. No entanto, por comodidade de cálculo, definimos para o trabalho um sistema onde o azimute acompanhe o mesmo sentido da ascensão reta ao que chamaremos sistema azimutal anti-horário.

Apesar da praticidade em visualização, os dois sistemas angulares já descritos possuem alguns inconvenientes no que se refere aos cálculos com a utilização dos valores angulares e funções trigonométricas. Assim, utilizamos um terceiro sistema, o vetorial-cartesiano (Ver fig. 8).

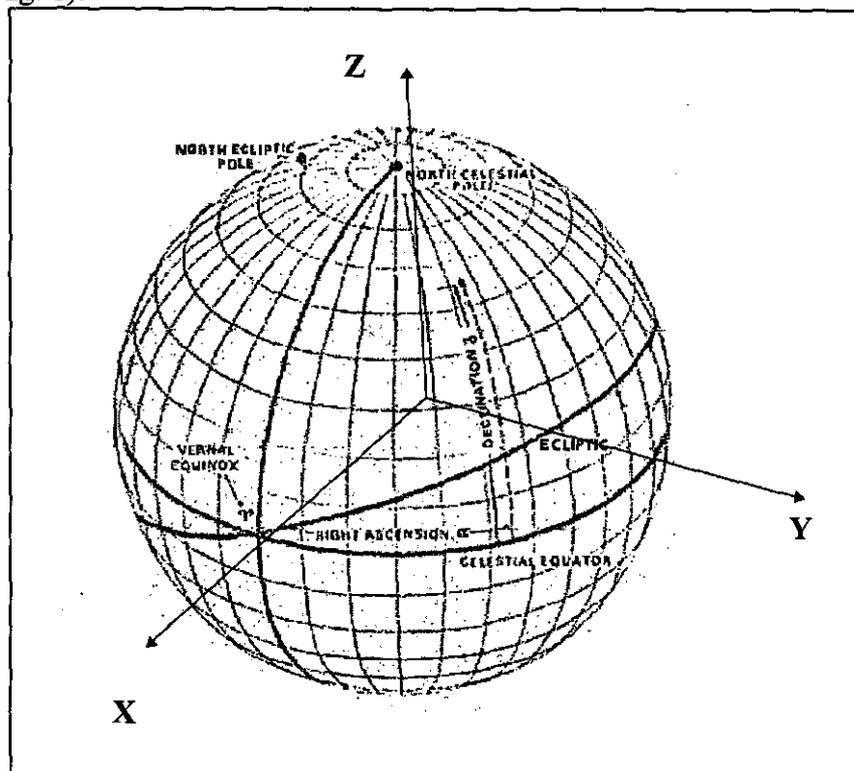


Fig. 8. - Sistema Vetorial-Cartesiano na esfera celeste.

Este é definido por um sistema triaxial XYZ cartesiano com a origem no centro da esfera onde o eixo Z aponta para o pólo norte, e o eixo X aponta para o ponto γ . Ao adotarmos para os vetores o módulo unitário, ou seja, uma esfera de raio unitário, trabalhamos com versores sem absolutamente nenhum prejuízo para o desenvolvimento.

Além de todos os sistemas de coordenadas utilizados para posicionamento, ainda há um quarto sistema somente utilizado no sensor e que representa a matriz eletrônica do sensor que é plana e será chamado sistema cartesiano plano. Esse sistema é definido por um par de eixos xy cartesianos e constituindo um plano perpendicular ao eixo X do sistema vetorial-cartesiano no referencial do satélite, sendo que y possui a mesma direção do eixo Z do sistema vetorial-cartesiano e x tem sentido oposto a Y também do sistema vetorial-cartesiano (Ver fig. 9).

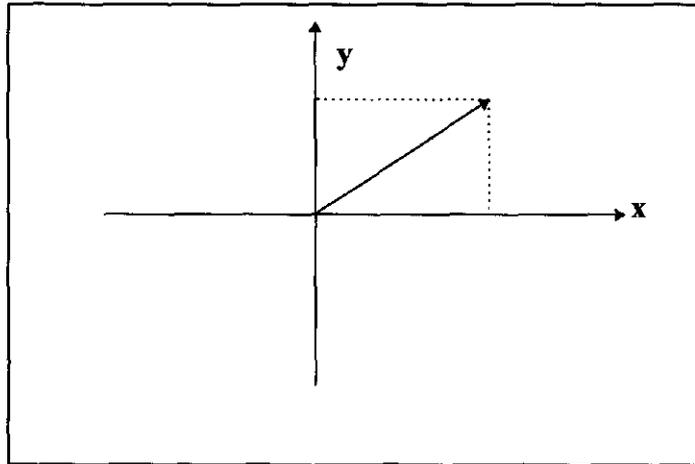


Fig. 9. - Sistema Cartesiano plano.

- Descrição dos referenciais:

Definiremos agora os referenciais aplicados.

O primeiro é o chamado referencial inercial, como explicado na referência, está ligado às características físicas da órbita terrestre. É nesse referencial que encontram-se catalogadas todas as coordenadas de estrelas utilizadas.

O segundo é o do satélite, definido com base em eixos cartesianos XYZ definidos no satélite, com os quais é construída a esfera celeste para o referencial do satélite. São definidos pontos e características análogas na esfera celeste do satélite com relação à inercial.

Para definirmos os referenciais e suas relações trabalharemos com dois tipos de codificação de posicionamento, os chamados ângulos de **Euler** que definem rotações em torno de cada um dos eixos do sistema e a matriz de rotação que transforma as coordenadas de um vetor de um referencial para outro.

- Transformações:

Depois de definidos todos os sistemas e referenciais utilizados, passamos agora à apresentação ilustrativa das transformações de coordenadas utilizadas entre os sistemas e referenciais.

a) Transformação do sistema equatorial de referência para o vetorial-cartesiano no mesmo referencial (Ver fig. 10):

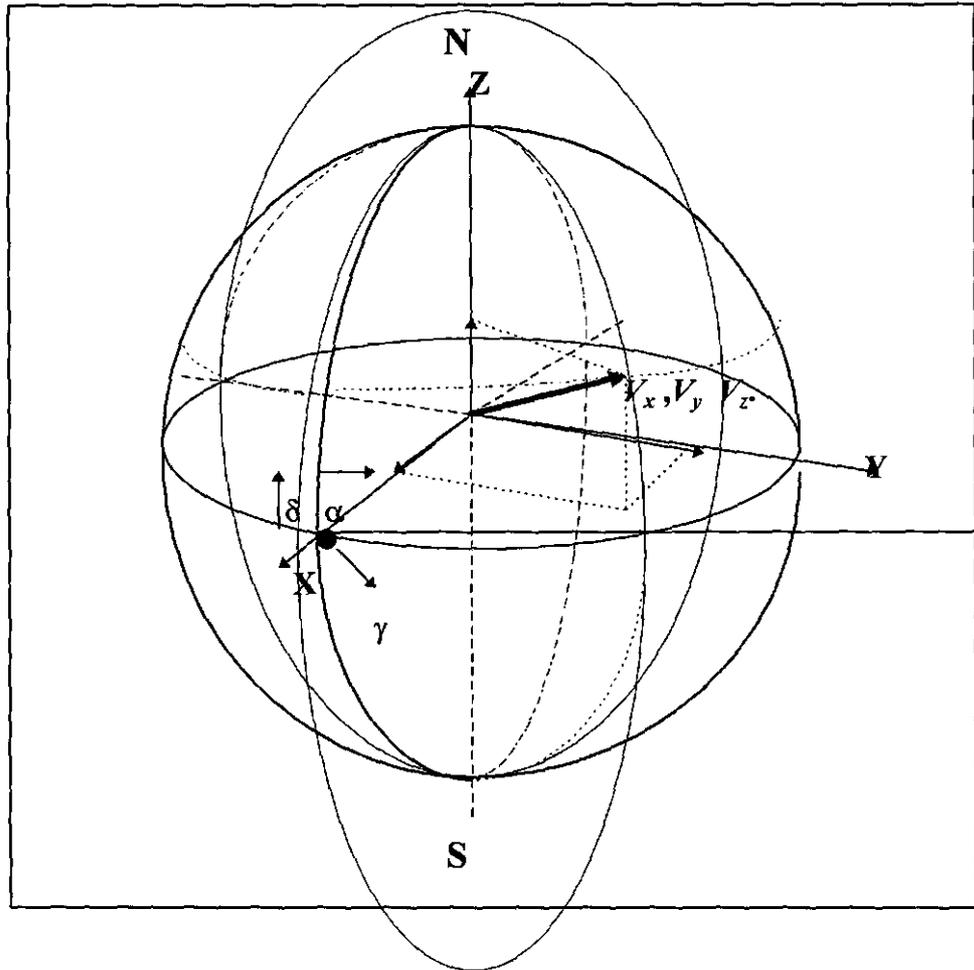


Fig. 10. - Sistema Vetorial-Cartesiano e Equatorial de referência.

$$\alpha_g = \alpha_h \cdot 15.$$

$$V_x = \text{sen } \delta \cdot \cos \alpha_g, \quad V_y = \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \alpha_g, \quad V_z = \text{sen } \delta$$

$$\delta = \arcsen(V_z), \quad \alpha_g = \arccos(V_x/V_z), \quad \alpha_h = \alpha_g/15.$$

b) Transformação do sistema equatorial de referência para o azimutal anti-horário no mesmo referencial:

$$h = \delta.$$

$$az = \alpha_h \cdot 15.$$

$$\delta = h, \quad \alpha_h = az/15.$$

As demais transformações entre o sistema azimutal anti-horário, equatorial de referência e vetorial-cartesiano utilizam-se das apresentadas acima.

c) Transformação do sistema vetorial-cartesiano para o sistema cartesiano plano (Ver fig. 11).

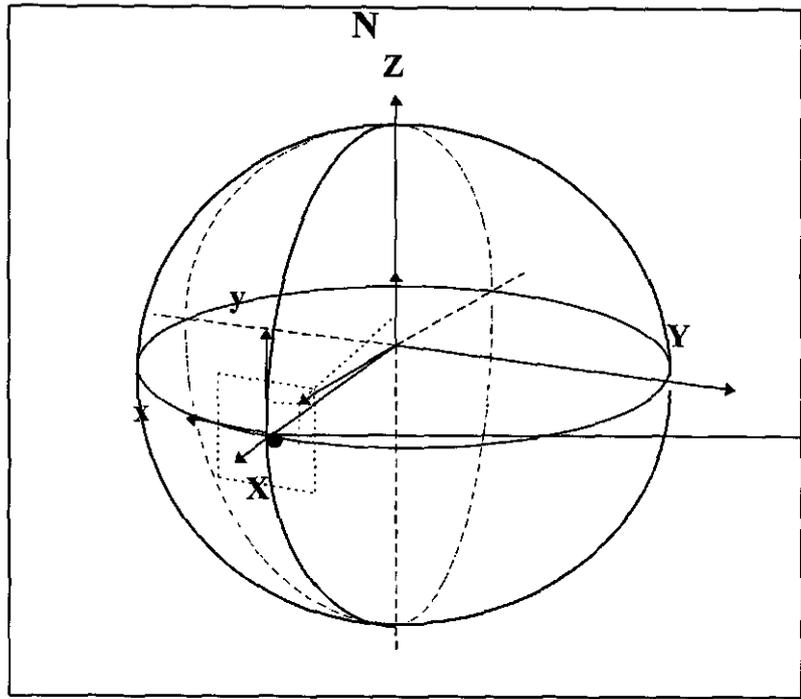


Fig. 11. - Sistema Vetorial-Cartesiano e Cartesiano plano.

$$\begin{aligned}
 y &= \text{sen } \delta, y = V_z. \\
 x &= -\text{cos } \delta \cdot \text{sen } \alpha_g = -V_y. \\
 V_y &= -x, V_z = y, V_x = 1.
 \end{aligned}$$

Logo após a esta transformação, o vetor deve ser normalizado para que tenhamos módulo unitário. Usamos sempre o sistema Cartesiano plano referenciado no ponto γ , ou seja, o campo de visada do sensor sempre estará apontando para o ponto γ da esfera celeste com referencial do satélite.

- Sistemas de representação de atitude e referencial:

a) Ângulos de **Euler** (Ver fig. 12):

Neste trabalho usaremos os ângulos de **Euler** em rotação 3-2-1, isto é, rotações sucessivas em torno do eixo Z(3), em seguida Y(2) e por último X(1), todas no sentido positivo do vetor rotação.

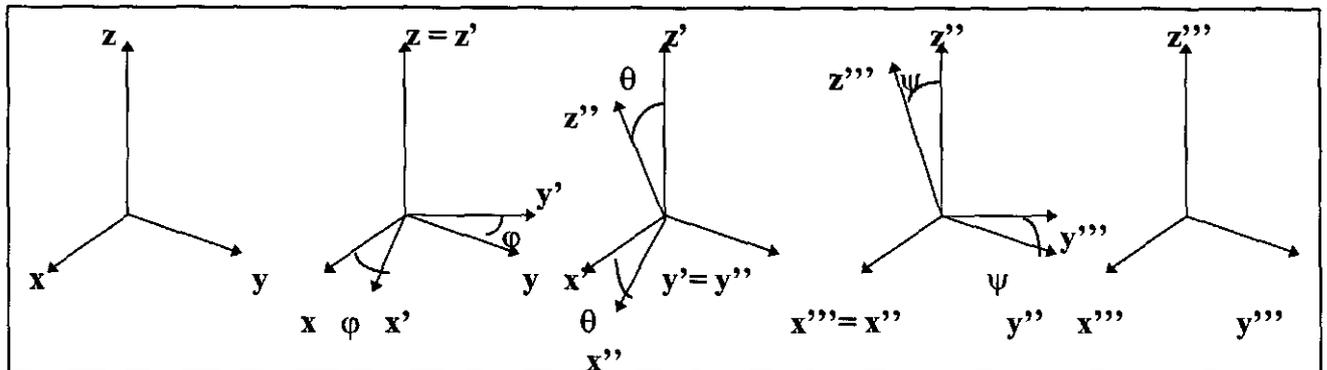


Fig. 12. - Rotações sucessivas em ângulos de *Euler*.

b) Matriz de rotação:

Seguindo a seqüência de eixos e fazendo as transformações, podemos chegar à matriz de rotação 3-2-1 que leva xyz para x''' , y''' e z''' .

1. Primeira transformação - rotação φ : Matriz R_3
2. Segunda transformação - rotação θ : Matriz R_2
3. Terceira transformação - rotação ψ : Matriz R_1

Enfim:

A matriz de rotação de xyz para $x'''y'''z'''$ pode ser obtida da multiplicação matricial:

$$R_{321} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 .$$

A título de simplicidade de notação, utilizaremos $\cos \alpha = c\alpha$ e $\sin \alpha = s\alpha$.

$$\therefore R_{321} = \begin{pmatrix} c\varphi \cdot c\theta & c\theta \cdot s\varphi & -s\theta \\ c\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi - s\varphi \cdot c\psi & s\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi + c\varphi \cdot c\psi & c\theta \cdot s\psi \\ c\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi + s\varphi \cdot s\psi & s\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi - c\varphi \cdot s\psi & c\theta \cdot c\psi \end{pmatrix}$$

c) Transformação da matriz de rotação para ângulos de Euler:

Podemos chegar aos ângulos de **Euler** equivalentes utilizando alguns dos termos da matriz de rotação.

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsen (- R_{321}(1,3)) , \\ \psi &= \arcsen (R_{321}(2,3) / \cos \theta) , \\ \varphi &= \arcsen (R_{321}(1,2) / \cos \theta) . \end{aligned}$$

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

$$\therefore \text{eulers} = (\varphi \ \theta \ \psi) .$$

Ainda há uma última transformação importante no processo:

d) Transformação de ângulos de Euler para o sistema equatorial de referência no referencial inercial:

$$\begin{aligned} \alpha_h &= \varphi / 15. \\ \delta &= - \theta. \end{aligned}$$

O último giro em nada afeta a coordenada de apontamento, sendo assim denominado como fase ψ . Neste trabalho utilizaremos apenas o sentido de giro positivo para φ , transformando da seguinte forma quando dos cálculos resultar negativo.

As transformações de coordenadas do referencial inercial para o satélite e vice-versa dão-se numa seqüência de transformações utilizando-se os métodos de transformações descritos.

2.2. Problema da determinação de atitude

Para a determinação de atitude, fixamos um sistema de eixos numa posição conhecida e orientamos dois ou mais versores do sistema para algumas referências, como por exemplo, o Sol, a Terra e as estrelas. Determinamos a atitude calculando o desvio do sistema com relação àquelas referências.

O processo da determinação de atitude de um satélite é muito dependente do tipo de estabilização do mesmo, por exemplo triaxial ou por rotação.

Para satélites estabilizados em três eixos utiliza-se um método que será estudado em detalhes neste trabalho, e aplicado para determinar a de atitude através de observações feitas por sensores de estrelas CCD.

2.3. Sensores típicos de atitude

Com base nas necessidades exigidas por cada sensor de cada tipo é que se desenvolve todo o método de funcionamento do mesmo.

Para um satélite estabilizado triaxialmente não podemos utilizar sensores com varredura já que não há a rotação necessária. Podemos utilizar sensores solares que determinem o vetor posição do Sol com relação ao satélite e magnetômetros que determinem o vetor campo magnético da Terra com relação a um campo gerado na satélite. Com estes dois vetores (Ver fig. 13) é possível a determinação da atitude do satélite, no entanto, se estiverem muito próximos, há uma indeterminação, não sendo possível o cálculo.

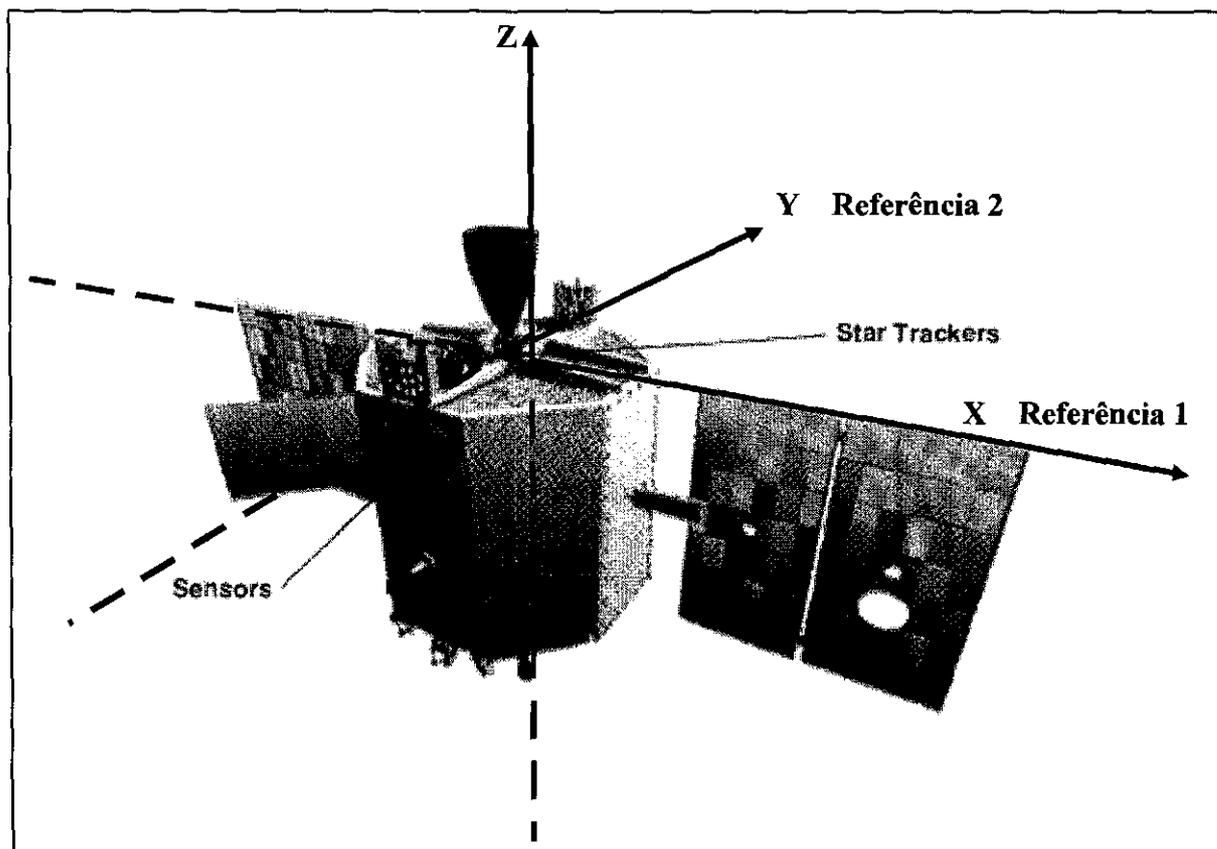


Fig. 13. - Determinação de atitude de satélites triaxialmente estabilizados.

A classe de sensores estelares divide-se entre três principais tipos: o de varredura (scanner) que utiliza a rotação do satélite (obviamente utilizados em satélites com

estabilização rotativa); de movimentos mecânicos que possui movimento próprio para promover a varredura (utilizado em satélites triaxialmente estabilizados); e o de cabeça fixa, com matriz CCD que possui varredura eletrônica de um campo de visada fixo.

No caso do sensor de estrelas, a cada estrela identificada associa-se um versor que liga o satélite à estrela (Ver fig. 14), sendo possível a determinação de diversos versores, o que intensifica a precisão do mesmo. No entanto, no caso da CCD, alguns erros também são introduzidos devido à constituição plana da matriz eletrônica que tenta representar uma porção esférica do céu, além de erros de origem foto-eletrônica.

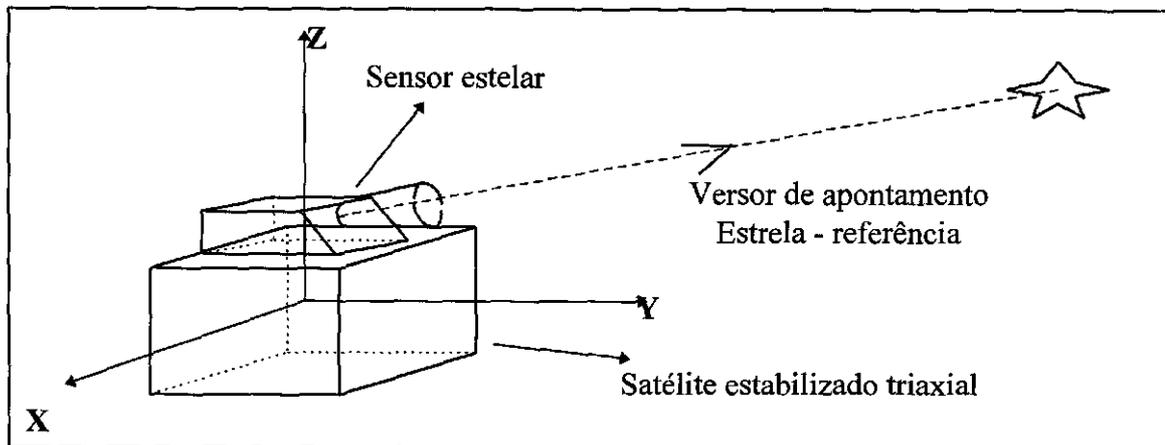


Fig. 14. - Determinação de versores de apontamento de estrelas a partir do satélite.

Até aqui foram mencionados os tipos que constituem os sensores principais de determinação de atitude. Ainda existem os sensores inerciais que auxiliam a determinação de atitude. Estes encontram-se representados pelos giroscópios, além de outros que estimam versores sendo baseados na diferença angular a partir de uma referência (Ver fig. 15).

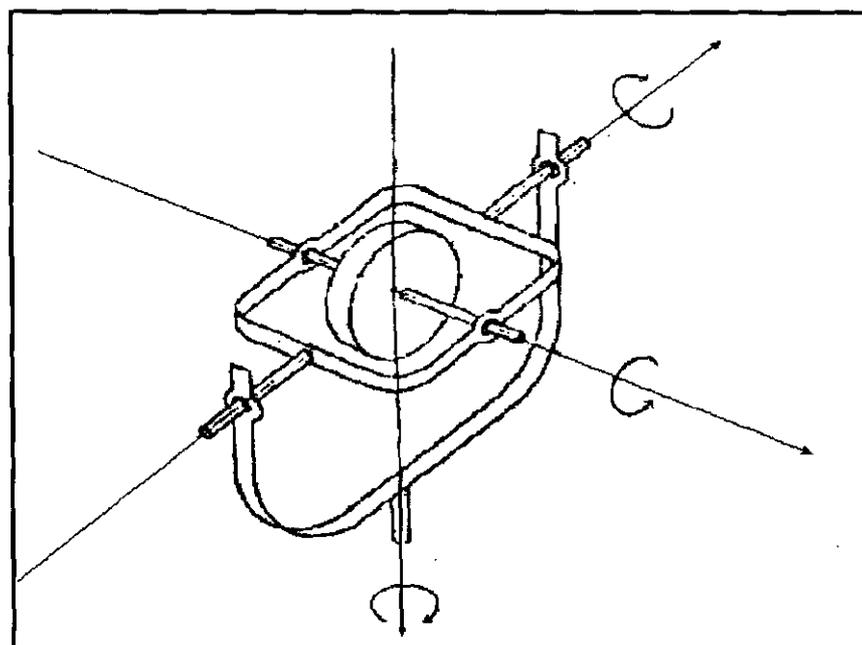


Fig. 15. - Giroscópios: sensores inerciais.

2.4. Sensor estelar

Nessa seção, faremos uma análise um pouco mais ampla dos sensores estelares e detalharemos o sensor alvo deste trabalho.

2.4.1. Sensores estelares

Os sensores estelares são capazes de medir a posição de estrelas com relação aos eixos do satélite e determinar a atitude com base em dados de posições das estrelas em catálogos estelares. São mais caros, pesados e requerem grande esforço computacional, pois os dados precisam ser analisados e calculados antes de calcular a manobra de atitude. Porém, apesar destas desvantagens, têm sido largamente utilizados em várias missões devido às suas resoluções da ordem de segundos de arco, propiciando grande precisão no posicionamento.

Como já mencionado, podemos dividi-los em três classes distintas: o sensor com varredura (scanner) utilizado em satélites rotativos, o de movimentos mecânicos para varredura e o de cabeça fixa com matriz CCD.

Todos eles são constituídos de partes em comum que são: o protetor solar gerador de sombra que minimiza efeitos indesejáveis da luminosidade solar; sistema óptico; equipamento de definição de imagem de escolha de campo de visada; detetor de imagem e eletrônica de processamento. Além destes, o sensor de movimentos mecânicos ainda possuem partes mecânicas e sistemas de auto posicionamento.

O maior problema com sensores estelares é a perda de luminosidade estelar, o que torna interessante o anteparo solar. Também são desenvolvidos sistemas de proteção à parte óptica que evitam a luminosidade procedente do Sol, da difusão em partículas de poeira, exatidão de gases e refletida pelo próprio satélite. Mesmo assim ainda são inoperantes com 30° a 60° de distância angular do Sol.

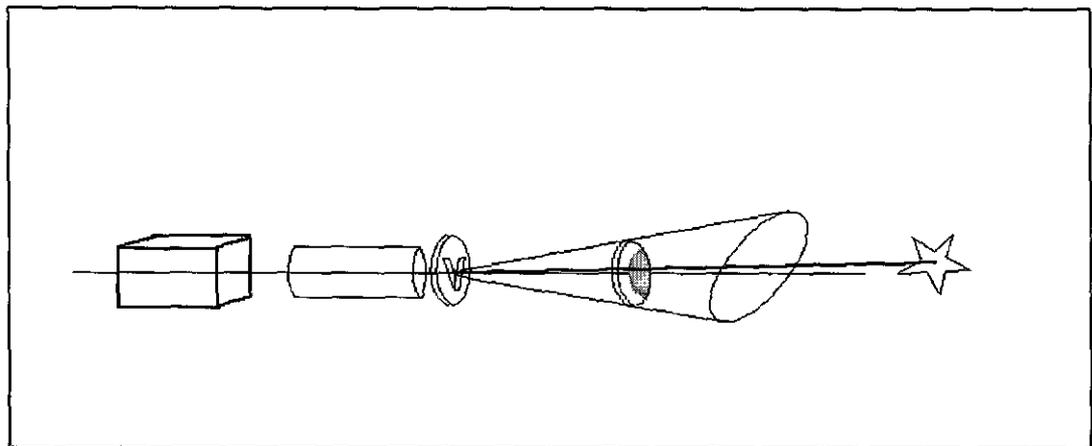


Fig. 16. - Diagrama simplificado de um sensor estelar com disposição de fendas em “V”.

Os sensores de varredura são os mais simples pois não possuem partes móveis. São constituídos de equipamentos de definição de imagem com fendas em disposição “V” (Ver fig. 16).

Para o caso dos satélites que operam com várias atitudes, o sensor com movimento mecânico é mais interessante, pois possui um campo de visão menor, mas pode varrer grandes áreas do céu (Ver fig. 17).

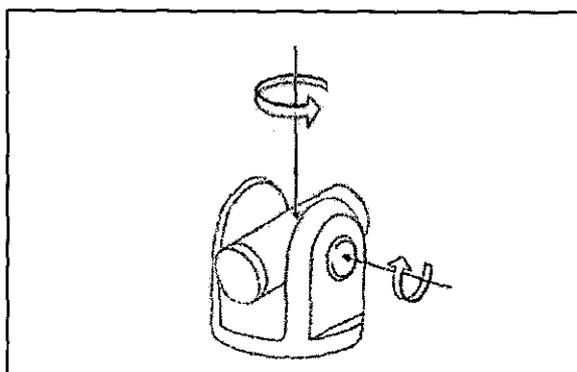


Fig. 17. - Rastreador estelar de movimentos mecânicos.

No caso dos sensores fixos que utilizam a eletrônica para promover a varredura, o uso de matrizes CCD's tem sido muito difundido. Elas são constituídas de uma matriz eletrônica foto-sensível que tem saída para um microprocessador que faz a identificação da posição da estrela através da posição de impressão na matriz (Ver fig. 18). Este é o tipo de sensor utilizado pelo trabalho aqui desenvolvido.

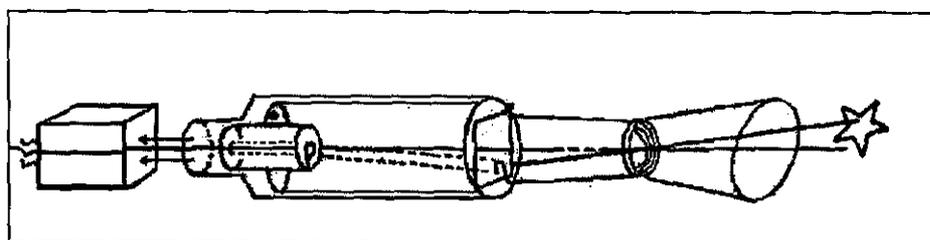


Fig. 18. - Diagrama simplificado de um sensor fixo com varredura eletrônica.

Neste caso o equipamento de definição de imagem consiste da matriz eletrônica que transforma o sinal óptico em elétrico através de foto-multiplicadores, passando à eletrônica onde é filtrado e processado.

O sensor fixo recebe a luz da estrela que passa através da óptica do equipamento e se projeta na matriz eletrônica disposta no plano focal. A escolha do campo de visada e da sensibilidade de magnitude depende dos requisitos de acuracidade. Um rastreador é sempre mais eficiente num campo de visada menor. No entanto, para pequenos campos é necessário que se aumente a sensibilidade 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 e distorções. Porém o aumento de sensibilidade dá acesso a milhares de estrelas mais fracas, dificultando a identificação.

2.4.2. Sensor estelar alvo deste trabalho

No caso deste trabalho, foi escolhido como modelo de teste o sensor Ball CT-633 Rastreador Estelar de Cabeça Fixa.

Suas características constituem num campo de visada (janela do sensor por onde são observadas as estrelas) de $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ com precisão de mais ou menos $20'$ de depois da calibração. É capaz de observar em curtos períodos de tempo, sendo por isso chamado de câmara. Possui quatro tipos de *threshold* selecionados conforme o brilho.

Pode ser utilizado tanto em aquisição, como em determinação de atitude. Rastreia no máximo 5 estrelas simultaneamente até magnitude 4,5 e tem uma velocidade de rastreamento de $0,3^{\circ}/s$ e precisão de 0,25 de magnitude ([b12.]) Funciona com o campo de visada instantâneo

(suposta janela menor que se locomove pelo campo de visada) de $9' \times 9'$ de arco varrendo o campo de visada continuamente até que alguma estrela sensibilize o equipamento.

Quando isso ocorre, inicia-se o rastreador que determina a posição da estrela no campo. O procedimento de rastreamento inicia-se com o movimento do campo de visada instantâneo dentro do campo de visada, quando então são detectadas algumas estrelas através dos pulsos elétricos por elas gerados numa matriz eletrônica foto-sensível, enviando-se informações ao *software* do sensor para que gere as informações de coordenadas em sua matriz. Quando a imagem cruza o pequeno campo de rastreamento, são gerados dois pulsos, um na entrada e outro na saída. Pela diferença de tempos entre eles é calculado o centro da imagem. Porém, o tempo não deve ser muito curto para não gerar erros. Conforme o campo move-se devido ao movimento de atitude, o rastreador segue e mantém a estrela centrada no campo de visada instantâneo. O rastreamento continua até que a estrela saia do campo de visada ou haja comando de parar rastreamento (Ver fig. 19). Para o caso deste trabalho, não foram considerados os movimentos de atitude, sendo então o rastreamento num campo de visada estático.

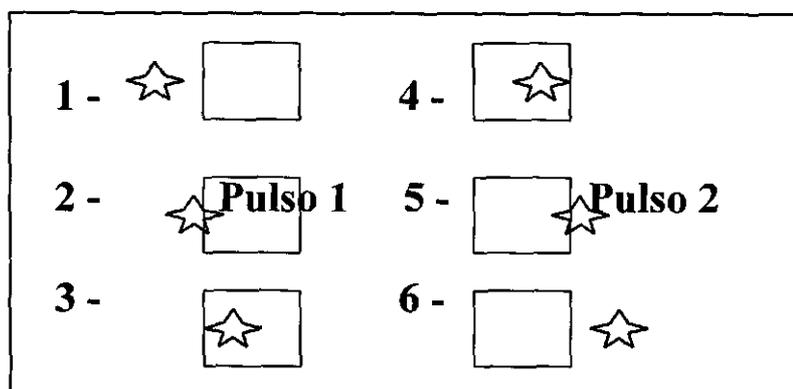


Fig. 19. - Seqüência de detecção do sensor rastreador estelar Ball CT - 633.

Há um sistema de proteção que fecha a abertura quando algo muito luminoso atravessa o campo (isso ocorre quando o Sol localiza-se a 42° de distância angular do eixo do campo).

A procura pode ser realizada em vários estilos de operação. Se o rastreador tem que reinicializar a procura freqüentemente, é chamado de mapeador.

As principais fontes de erro no sensor listam-se abaixo:

- Flutuação de elétrons proporcional ao sinal;
- Ruído térmico e flutuações físicas nas células quanto ao tamanho e sensibilidade no espaço e no tempo.

O procedimento de determinação da posição da estrela com relação à matriz eletrônica segue os princípios abaixo:

- Cálculo da posição da estrela num campo 3×3 células da matriz, onde a estrela é desfocada para que a informação seja distribuída e assim seja calculado o centróide da imagem (matriz = 512×512 pixels);
- Calibração com corrente de escuro (sinal presente mesmo em ausência de estrelas) a ser subtraído do sinal resultante;
- Resfriamento do sensor para a redução dos efeitos térmicos de distorção.

O modelamento matemático do sensor segue a medida de coordenadas proporcionalmente ao plano focal. A localização da direção é dada por ângulos referentes aos eixos do sensor, formados pela união das coordenadas do plano focal e o centro óptico da lente. O plano xy do campo de visada é paralelo ao plano ZY do referencial inercial, sendo λ medido no sentido positivo de y (ou Z do referencial inercial) e ϕ no sentido positivo de x (ou negativo de Y do referencial inercial) (Ver fig. 20 e 21).

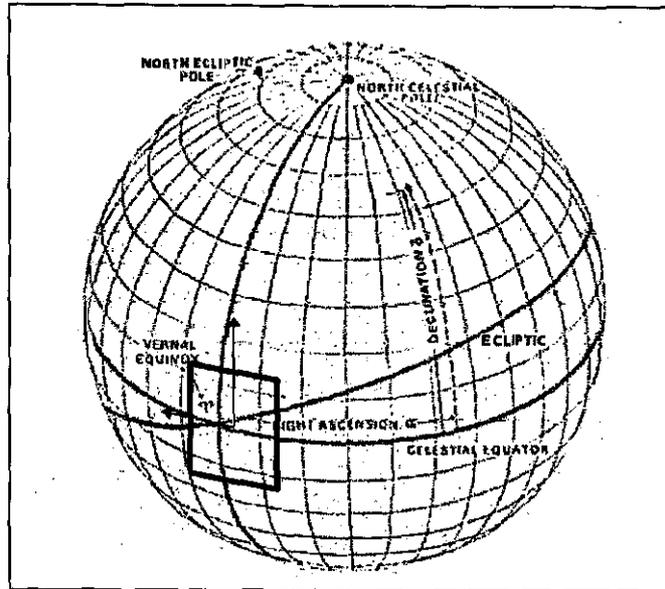


Fig. 20. - Esfera celeste e sistema de coordenadas locais na matriz eletrônica.

Porém, nas coordenadas da matriz eletrônica, os sinais invertem-se devido à influência da lente. Do vetor de apontamento da estrela no referencial do sensor, podemos obter as coordenadas planas na matriz CCD do sensor:

$$\hat{V}_s = \begin{pmatrix} \cos \phi \cdot \cos \lambda \\ \sin \phi \cdot \cos \lambda \\ - \sin \lambda \end{pmatrix}$$

Onde ϕ e λ são dados através das coordenadas da matriz e da distância focal da lente f através de:

$$\operatorname{tg} \phi = u/f \quad , \quad \operatorname{tg} \lambda = (v/f) \cdot \cos \phi$$

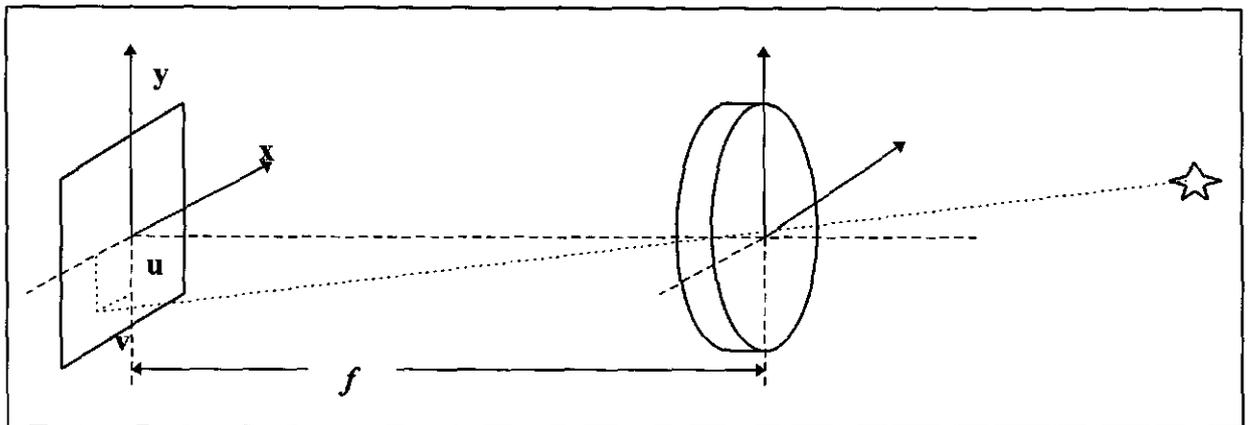


Fig. 21. - Relação de coordenadas no sistema óptico e matriz eletrônica.

No entanto, estas relações não são precisas devido às várias distorções de natureza óptica, eletro-eletrônica e térmica, surgindo então relações empíricas para o cálculo de ϕ e λ a partir de u e v [b5.]. Porém neste trabalho não foram levadas em consideração tais relações, sendo a imprecisão representada em apenas um número que reflete seus efeitos no posicionamento vetorial no método de determinação de atitude triaxial otimizada [b1.].

Dessa forma, para acharmos o versor da estrela no referencial inercial temos:

$$\hat{V} = A \cdot M \cdot \hat{V}_s$$

Onde \hat{V}_s é dado no referencial do sensor, M é a matriz de rotação para o referencial do satélite e A é a matriz atitude.

Neste trabalho consideramos o sistema de eixos do sensor coincidente com o do satélite e dessa forma M é idêntica à identidade e pode ser omitida, obtendo-se apenas:

$$\hat{V} = A \cdot \hat{V}_s$$

Um outro fator importante é a diferença de resposta em termos de magnitude. A magnitude percebida pelo instrumento é diferente e por isso é chamada de instrumental. Ela precisa ser calculada a partir das magnitudes ópticas das estrelas de forma a gerar um arquivo de estrelas não muito extenso, mas que inclua todas as que podem ser bem distinguidas. Até o momento, só foram citadas as magnitudes ópticas conforme apareceram no catálogo, não sendo até aqui considerados na identificação das estrelas.

Precisão do sensor:

Quando falamos em termos de precisão do sensor podemos distinguir dois tópicos diferentes, a precisão da matriz eletrônica em determinação do centro da estrela e a precisão quanto à sensibilidade de notar desvios quando há movimento por parte do satélite.

A precisão da matriz eletrônica está diretamente ligada a sua forma construtiva que define qual será a sensibilidade e tamanho de cada divisão sua que chamamos de pixel. Quanto menor os pixels da matriz, ou seja, quanto mais pixels por área, melhor para a definição de posicionamento de pontos de imagem, enquanto que sua sensibilidade dita a qualidade da imagem.

Os pixels são elementos foto-sensíveis que constituem toda a matriz e têm a eles associados uma posição em termos de coordenadas com relação a alguma referência na matriz (Ver fig. 22). É através destas coordenadas que são determinadas as coordenadas de uma estrela que impressione a matriz eletrônica. No entanto não é tão simples assim determinar as coordenadas da estrela impressionada com relação à matriz. A imagem recebida impressiona vários pixels ao mesmo tempo na região de impressão e em diferentes intensidades, causando um “borrão”. O cálculo do centro correto não é puro e simplesmente feito com o cálculo do centro geométrico da região, há que se levar em conta as intensidades de impressão, ficando desta forma determinado o centro por métodos estatísticos que determinam o “centróide” da região. É importante nesse momento levar em consideração o fato de que a sensibilidade de cada pixel não é idêntica à dos outros, sendo dessa forma necessária uma normalização da matriz com relação à sensibilidade. Tais métodos fogem ao escopo deste trabalho, sendo por isso não pesquisados.

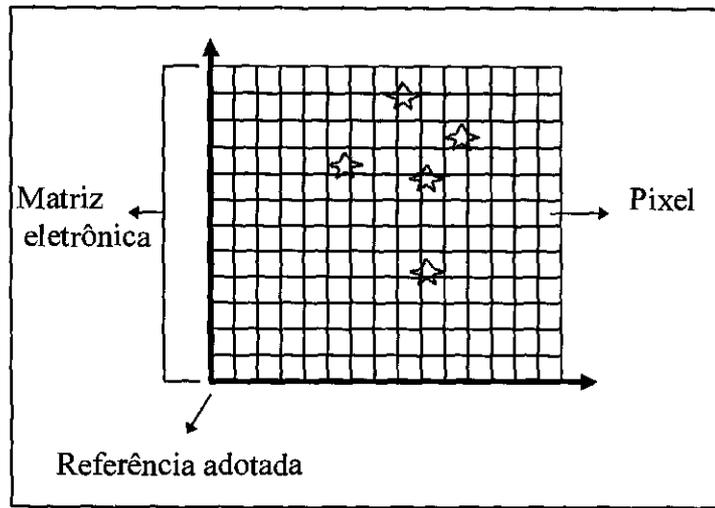


Fig. 22. - Matriz CCD do sensor de varredura eletrônica

Já a precisão quanto à sensibilidade de notar desvios quando há movimento por parte do satélite depende diretamente da atitude do satélite, pois é influenciada pelos movimentos do mesmo com relação aos seus eixos de referência.

Os movimentos podem ser decompostos em dois movimentos principais, rotação em torno do eixo do sensor e rotação perpendicular ao eixo do sensor (Ver fig. 23).

Percebe-se que a precisão de percepção de alteração de posição da imagem é melhor na direção perpendicular ao eixo do sensor, uma vez que o raio que vai do centro da referência de atitude do satélite ao sensor é maior que o raio que, no plano da matriz, vai do eixo 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 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.

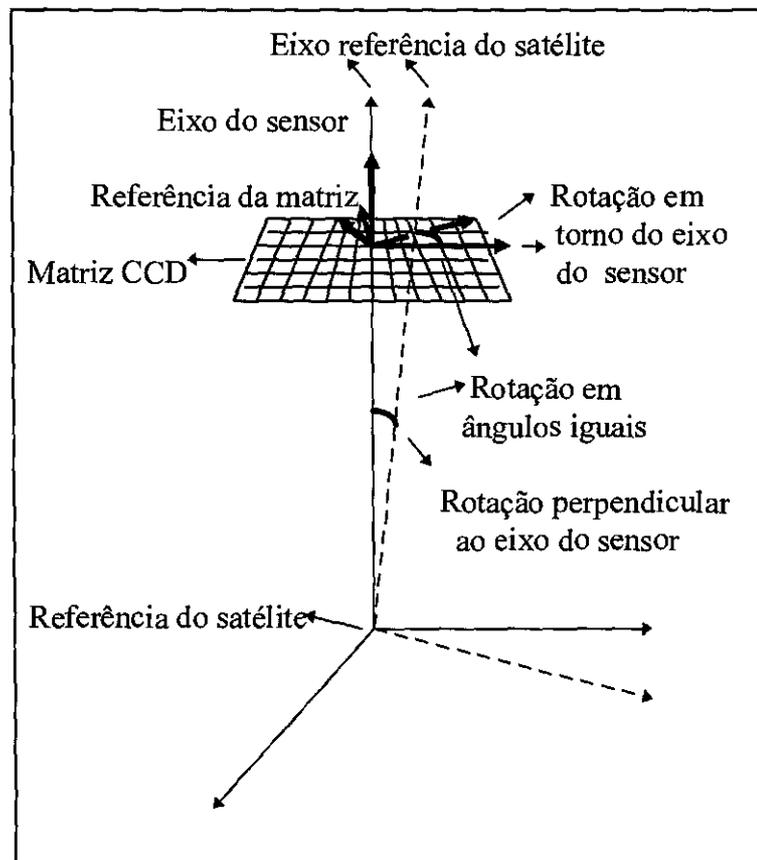


Fig. 23. - Movimentos em torno dos eixos do sensor e do satélite - Precisão do sensor

2.5. Mapa estelar

Ao tratarmos com as coordenadas de estrelas de um catálogo ou mapa de estrelas, devemos ter em mente que esse mapeamento é feito em uma esfera imaginária, e dessa forma, uma das melhores maneiras de representar tais coordenadas é a que envolve ângulos, sendo comumente utilizado o sistema equatorial de referências para a representação das coordenadas.

Po isso, quando representado em um plano, o mapa não corresponde realmente ao que deveria representar, havendo distorções inseridas pela planificação. No entanto, esse problema não acarreta dano algum ao desenvolvimento matemático, visto que todo este é feito vetorialmente, e ainda, a representação planificada será apenas aplicada a título de ilustração para o usuário do *software*.

Neste trabalho, todo o mapeamento da esfera celeste foi seguido a partir do catálogo gerado a partir do *Sky Catalogue 2000.0 [c1.]* com data base para 1950, da **SKY Publishing Corporation**, que utiliza estrelas de até 8ª magnitude. Por motivos que referem-se à natureza de testes do *software* desenvolvido, foram gerados dois catálogos, um para ser a fonte e outro para ser o dedicado do satélite (Ver fig. 24), os quais serão explicados em seguida.

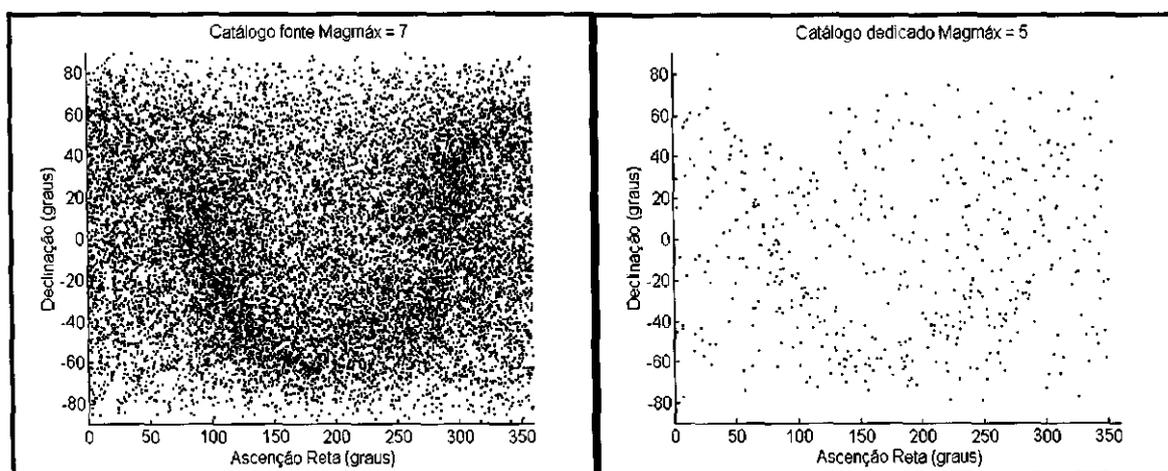


Fig. 24. - Mapas plotados a partir dos catálogos gerados; fonte e dedicado respectivamente.

2.5.1. Geração do catálogo de estrelas

O processo de utilização de informações de dados de estrelas para a confecção do catálogo fonte e catálogo dedicado deste trabalho partiu do desenvolvimento de um *software* de leitura em linguagem **Qbasic** de padrão **DOS** que pudesse ler e manipular os dados contidos num catálogo fonte de 50.071 estrelas com magnitude limite de brilho visual 8.0, obtido no **Observatório de São Carlos(CDA)**. As especificações do catálogo são as seguintes:

Sky Catalogue 2000.0, Volume 1, Second Edition
Floppy disk version (c) 1991 Sky Publishing Corporation
P. O. Box 9111, Belmont, MA 02178 [c1.]

Com o catálogo acima citado, o *software* **Qbasic** desenvolvido, foi capaz de gerar arquivos com extensão para *PC-Matlab*, de forma que pudessem ser executados no mesmo

ambiente de execução do trabalho aqui apresentado, dessa forma possibilitando toda a manipulação dos dados neste referido ambiente.

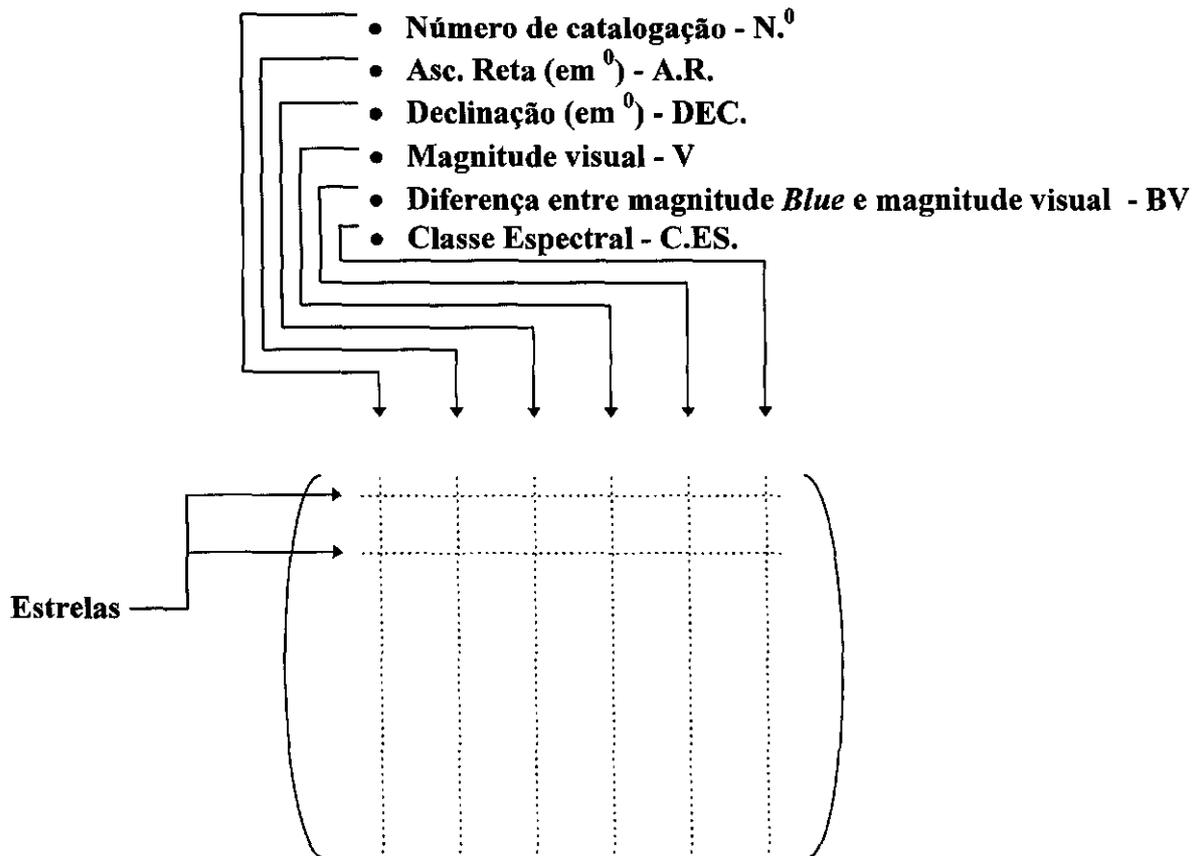
O *software* gera arquivos com nomes determinados segundo informações prévias fornecidas pelo usuário quanto à magnitude limite do catálogo desejado. Conforme a magnitude desejada o intervalo de 1 hora de ascensão reta na esfera celeste pode ser dividido em 1, 2, 3 ou 6 partes, resultando dessa forma em 24, 48, 72 ou 144 arquivos contendo as estrelas dentro de seus respectivos limites (isso foi necessário devido à impossibilidade de memória para se gravar um único arquivo com toda informação em módulo **QBasic**). Abaixo lista-se uma tabela com as relações de magnitude e números de arquivos gerados, assim como os limites estipulados:

Magnitude	Número de arquivos gerados	N.º de divisões do intervalo de 1 hora de asc. reta	Limites dentro de um intervalo de 1 hora de ascensão reta
≤ 5.0	24	1	01:00:00 ; 01:59:59
> 5.0 ≤ 6.0	48	2	01:00:00 ; 01:30:00 01:30:01 ; 01:59:59
> 6.0 e ≤ 7.0	72	3	01:00:00 ; 01:20:00 01:20:01 ; 01:40:00 01:40:01 ; 01:59:59
> 7.0	144	6	01:00:00 ; 01:10:00 01:10:01 ; 01:20:00 01:20:01 ; 01:30:00 01:30:01 ; 01:40:00 01:40:01 ; 01:50:00 01:50:01 ; 01:59:59

Tab. 1. - Divisões da esfera celeste em arquivos *PC-Matlab*.

Todos os arquivos gerados são acessados por um programa principal que junta numa só matriz *PC-Matlab* todos os dados contidos nos n arquivos referentes às estrelas a serem utilizadas.

Para o caso deste trabalho, foi estipulado que a magnitude do catálogo principal deveria ser 7.0 e do catálogo dedicado 4.0, resultando assim em dois catálogos contendo respectivamente 15.985 e 518 estrelas. As informações contidas nestes catálogos são dadas por colunas, sendo cada estrela representada numa linha em específico. As características são as seguintes:



Cada característica de catalogação teve certas adoções de sistemas de representação matricial. Em seguida, são explicadas as formas de representação de cada característica listada na matriz descrita acima.

•Número de catalogação:

O número de catalogação das estrelas, segue o número de catalogação do próprio catálogo *SKY 2000.0*, sendo escolhido o número de catalogação no catálogo **SAO**. No entanto, algumas estrelas não tem número de catalogação em alguns catálogos. Portanto foi estipulado que o número da estrela seria em ordem de prioridade, o número **SAO** seguido do decimal "0,1", ou o número **HD** seguido do decimal "0,2", ou o número **HR** seguido do decimal "0,3", ou ainda um número criado para representá-la caso não possua nenhum dos três acima. O número criado constitui-se do número da linha de posição da estrela na matriz no arquivo que representa o gomo ao qual pertence a estrela (divisão em partes do intervalo de 1 hora na geração dos arquivos *PC-Matlab*), mais o número em horas de sua ascensão reta, mais o número em minutos de hora de sua coordenada de asc. reta, mais o número em segundos de hora de sua coordenada de asc. reta mais o decimal "0,4". ("num" & "as" & "min" & "seg" & "0,4").

Os decimais representam respectivamente o número **SAO**, **HD**, **HR**, e o número criado.

•Asc. Reta (em ^o) - A.R.:

A coordenada de ascensão reta é representada por apenas um número dado em graus.

- Declinação (em ⁰) - DEC.:

A coordenada de declinação é representada por apenas um número dado em graus.

- Magnitude visual - V:

A magnitude visual das estrelas é a fornecida pelo catálogo. No entanto, há algumas estrelas que não possuem dados. Dessa forma, foi atribuído um valor de magnitude no valor da magnitude limite escolhida afim de que a mesma não ficasse sem magnitude e tb não tivesse uma magnitude forte, atrapalhando dessa forma a identificação por tratar-se de um dado duvidoso.

- Diferença entre magnitude visual e magnitude *Blue* - BV:

A diferença da magnitude *Blue* para a visual das estrelas é a fornecida pelo catálogo. No entanto, há algumas estrelas que não possuem dados. Em tais casos, foi atribuído um valor nulo para essa característica.

- Classe Espectral - C.ES.:

A classe espectral das estrelas assume alguns caracteres seguidos de um dígito de 0 a 9 como se segue: O, B, A, F, G, K, M. Para cada classe, seguindo essa seqüência, foram substituídas as letras por números de 0 a 6, resultando assim em classes representadas de 00 à 69. No entanto algumas estrelas possuem classificações diferenciadas com relação ao segundo dígito, não sendo este apenas um número. Portanto todas as classes que não apresentaram o formato de classe com uma letra e um dígito, foram representadas da mesma forma com relação às letras, mas no entanto, adicionando-se o decimal "0,1". Outras classes, que não estas, foram representadas pelo número 70.

- Aquisição de dados a partir do catálogo SKY 2000.0:

A aquisição de dados para a confecção dos catálogos utilizou-se de um *software* modificado a partir do original de leitura do catálogo em linguagem **Qbasic**. Dessa forma, além de ler os dados, o programa trata os dados e os direciona para arquivos de interesse em utilização *PC- Matlab*, tendo a geração de diversos arquivos de dados e um principal de manipulação e transformação dos mesmos, como já explicado. A figura abaixo dá uma melhor idéia do funcionamento da rotina (listada no apêndice A):

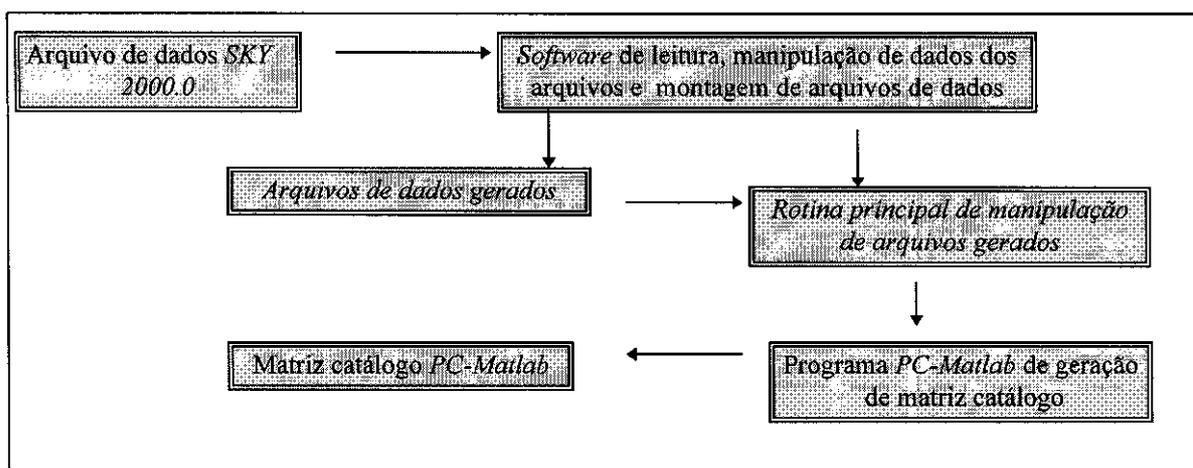


Fig. 25. - Funcionamento do sistema de manipulação de dados de catálogo.

Capítulo III

3. Fundamentos teóricos

Uma vez descritos e explicados os métodos e fundamentos básicos deste trabalho, passamos a descrever a forma como foram utilizados para que se obtivesse o resultado desejado. Uma vez que alguns tópicos já foram tratados na referência [b17.], será dado aqui apenas um tratamento superficial. Maiores detalhes sobre a teoria figuram no apêndice da referência citada.

3.1. O algoritmo de cálculo de atitude

- Determinação de atitude triaxial exata. [b1.]:

Este método aqui apresentado, apesar de desconsiderar erros e ser exato, é importante pois é utilizado num contexto mais amplo da determinação. Utiliza-se basicamente da medida de dois versores \hat{V}_1 e \hat{V}_2 no referencial inercial como duas referências para a determinação triaxial.

No referencial do satélite, \hat{W}_1 e \hat{W}_2 são os mesmos versores (Ver fig. 26).

Se os dados forem perfeitos, isto é, sem erros, teremos:

$$\hat{W}_1 \cdot \hat{W}_2 = \hat{V}_1 \cdot \hat{V}_2$$

Dessa forma a determinação da atitude é exata e chamada determinística. Porém, se levarmos em conta os erros a solução não será única e deveremos aproximá-la.

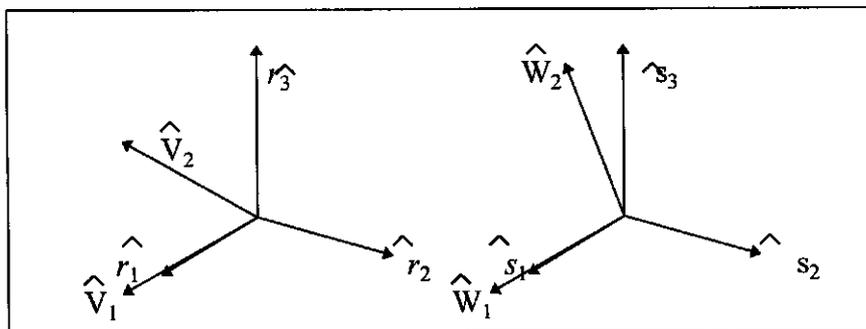


Fig. 26. - Bases ortonormais construídas através dos versores medidos.

- Determinação de atitude triaxial otimizada. [b1.]:

Para o caso de considerarmos os erros nas medidas, podemos achar a matriz de rotação A que minimize o erro através da função erro:

$$J(A) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{K=1}^N \frac{1}{\sigma_K^2} \cdot |\hat{W}_K - A \cdot \hat{V}_K|^2 \quad \text{para } N \text{ versores.}$$

Onde os σ_K são os desvios padrões das medidas.

O algoritmo inicia-se com um chute inicial que é dado pelo algoritmo determinístico, aproximando-se A por iterações sucessivas.

3.2. Métodos de identificação de estrelas

A identificação refere-se à associação de estrelas observadas pelos sensores, com estrelas catalogadas. Como as estrelas observadas tem coordenadas referenciadas ao sistema inercial, suas posições podem ser computadas, fornecendo a atitude do satélite.

O processo inicia-se com a transformação de coordenadas para o sistema inercial. Se a estimativa inicial de atitude é pobre, a posição transformada das coordenadas observadas pode estar distante angularmente da posição real, o que dificulta ou impossibilita a identificação.

A técnica utilizada neste trabalho é fornecida pelo algoritmo de *Bezooijen* [b16.].

Este algoritmo foi escolhido devido à sua versatilidade em termos de rapidez de processamento e não muita requisição de memória de armazenamento. No entanto, ainda está longe de ser definitivamente o algoritmo ótimo para as aplicações em projetos brasileiros, sendo necessário um estudo mais aprofundado de técnicas e talvez até o desenvolvimento de uma nova idéia baseada na experiência prévia adquirida com estes estudos.

Antes de passarmos à descrição propriamente dita do algoritmo utilizado, mostraremos agora uma breve discussão dos métodos estudados, dentre os quais foi escolhido o algoritmo em questão.

3.2.1. Algoritmos de identificação analisados

Anteriormente, como descrito na referência [b17.], foi utilizada a técnica de comparação direta [b5.] que utiliza-se de círculos centrados nas estrelas observadas e transportados para coordenadas inerciais, através da pré-estimativa de atitude de um sensor auxiliar, a fim de se verificar a presença de estrelas catalogadas dentro de seu perímetro, ocorrendo dessa forma a identificação. É dada a sua representação esquemática abaixo:

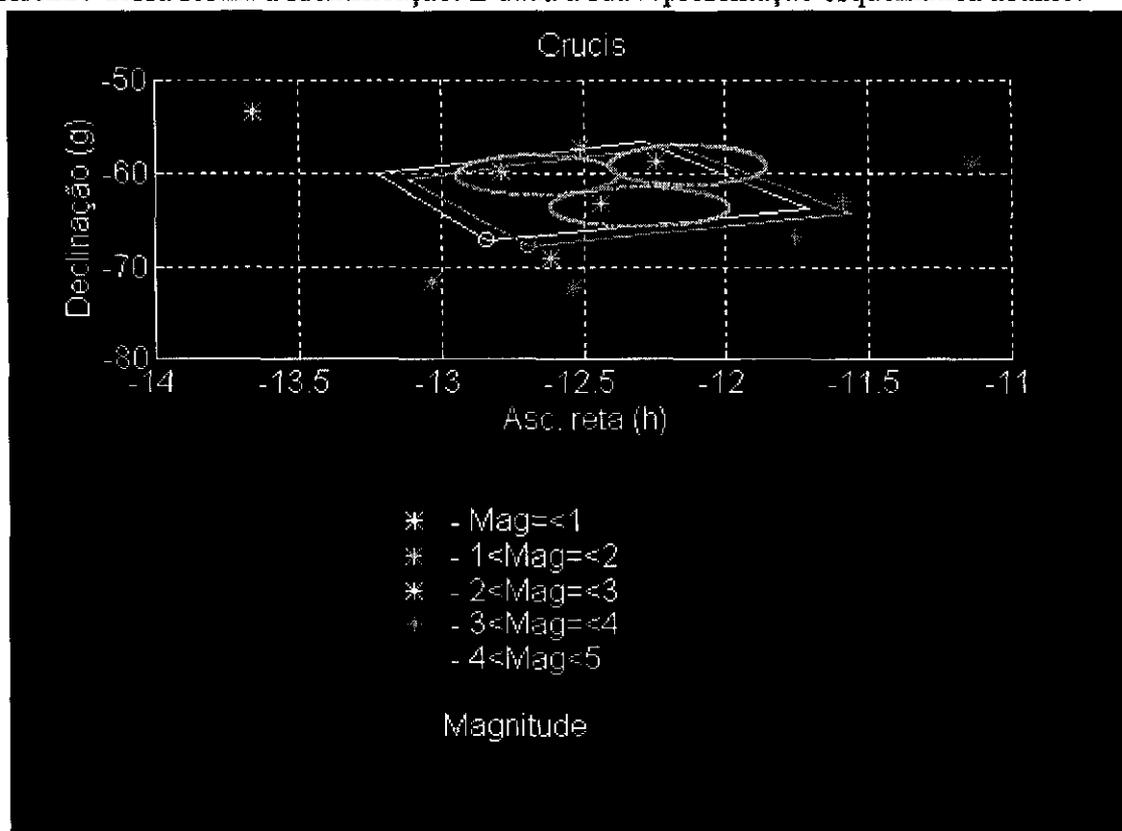


Fig. 27. - Representação gráfica da técnica de comparação direta.

Já os algoritmos analisados, todos referem-se a identificações sem utilização de estimativa a priori, ou seja, as únicas referências disponíveis são as estrelas. No caso da técnica anterior, a precisão da identificação recaía em muito na precisão de pré-estimação, não sobrando dessa forma muitas alternativas de melhoria e refinamento na identificação do sensor estelar, o que já não ocorre com a nova técnica que pode ser totalmente manipulada em cima do próprio sensor e do algoritmo de identificação. No entanto, continuam ainda em vigor as hipóteses de distribuição estatística de erro do sensor (**Gauss**) e de distribuição de estrelas no céu (**Poisson**).

Abaixo segue a análise de cada algoritmo estudado:

- *Autonomous Star identification and spacecraft attitude determination with CCD Star Tracker* (1991) - T. E. Strikwerda, H. L. Fisher, C.C. Kilgus and L. J. Frank:

Neste Artigo, o método utilizado aplica uma divisão ao céu, sendo este dividido em 225 células.

Calculam-se as separações angulares entre todas as estrelas observadas no FOV e comparam-se com separações angulares de estrelas no catálogo que tenham uma distância angular entre si menor que a separação angular do FOV. Se não houver nenhuma estimativa a priori, então o método varre o céu todo, caso contrário utiliza-se a estimativa no processo de busca.

Identificando-se um par, verifica-se a veracidade com um ajuste de uma terceira estrela. Se não houver confirmação, prossegue-se com a busca de um novo par.

O catálogo utilizado de 90 kb de memória possui 9000 estrelas com $\text{Mag} \leq 7$ e que tem entre si uma separação angular superior a $500''$. O FOV tem um tamanho de $7,2^\circ \times 9^\circ$ e a matriz é de 256×403 pixels, o que resulta numa precisão de $6''$.

- *Design Study: Parallel Architectures for Autonomous Star Pattern Identification and Tracking* (1993) - K. E. Willians, T. E. Strickwerda, H. L. Fisher, K. Strohbehn and T. G. Edwards:

Este método utiliza uma métrica de padrão discretizado (ou padrão binário) onde toma-se uma estrela como guia e outras secundárias para a construção do padrão em termos de distâncias angulares discretizadas. Utiliza-se a Magnitude apenas para resolver ambigüidades.

Utiliza-se 2 FOVs, um externo de $20^\circ \times 20^\circ$ e outro interno de $10^\circ \times 10^\circ$. A matriz eletrônica possui um tamanho de 128×128 pixels em termos gerais, podendo-se variar as especificações conforme os requisitos da missão.

- *All Stellar Attitude Estimation Using A Ball CT - 633 Star Tracker* (1995) - Thomas Bank:

Este método cataloga todas as separações angulares observadas e compara-as com separações catalogadas dentro de uma faixa de incerteza por ordem crescente.

O FOV de $20^\circ \times 20^\circ$ é capaz de detectar até 5 estrelas simultâneas na sua matriz de 512×512 pixels. São utilizadas estrelas com $\text{Mag} \leq 4,5$.

- *Onboard Star Identification Without A Priori Attitude Information* (1995) - E. A. Ketchum, R. H. Tolson:

O algoritmo utiliza-se de um icosaedro (poliedro de 20 faces triangulares equiláteras) onde as faces tem suas arestas divididas em triângulos, para repartir a esfera em pequenas regiões denominadas subcatálogos. Cada subcatálogo assume para si o Valor da Mag da estrela mais brilhante em seu domínio, denominada estrela primária. Ainda definem-se estrelas secundárias.

Calcula-se a separação angular das observadas, todas com relação à estrela mais brilhante. Tomam-se todos os subcatálogos que tenham magnitude semelhante àquela e a partir daí, com o catálogo dedicado, monta-se um subcatálogo instantâneo com o qual calcula-se as separações angulares das estrelas e compara-as com as observadas, conforme ordem de probabilidades. Ainda podem ser usadas as secundárias, caso não haja identificação com as primárias.

O método ocupa pouca memória e tempo. Utiliza um catálogo de 9000 estrelas com $\text{Mag} \leq 6,5$.

- *Autonomous Star Referenced Attitude Determination* (1989) - R. W. H. Bezooijen:

Utiliza-se neste método um catálogo de 4100 estrelas e um FOV de $11,5^\circ \times 11,5^\circ$ e precisão de $8''$.

Monta-se uma comparação entre estrelas do FOV e do catálogo a partir de uma matriz na qual são atribuídos pesos para as estrelas. As estrelas com os maiores pesos são as primeiras a serem verificadas com relação à separação angular. A matriz tem tamanho de $o \times c$ onde $o = n^\circ$ de estrelas observadas e $c = n^\circ$ de estrelas catalogadas.

- *Star Field Identification for Autonomous Attitude Determination* (1995) - M. S. Scholl:

Este método utiliza-se de formação de triângulos a partir de estrelas observadas, que são listados com as Mag e distâncias angulares em ordem crescente.

A partir da maior Mag do triângulo, montam-se triângulos do catálogo com base nas estrelas de Mag semelhantes, fazendo-se uma lista de triângulos que depois são verificados um a um.

Depois da análise de cada um, vamos agora detalhar o algoritmo em questão.

3.2.2. Algoritmo de identificação de *Bezoijen*

O Algoritmo de *Bezoijen* [b16.] trata a identificação das estrelas com uma adoção de notas às que mais se encaixam numa verificação de distâncias angulares de pares de estrelas e magnitudes.

Para isso, monta-se uma matriz de notas que relaciona cada estrela observada com cada estrela catalogada no catálogo dedicado do satélite. As linhas da matriz representam cada uma das estrelas observadas e as colunas, cada uma das estrelas do catálogo dedicado.

A escolha das estrelas catalogadas a serem utilizadas na matriz é feita com base num catálogo armazenado de pares das estrelas do catálogo dedicado.

Com base nas estrelas observadas, monta-se um catálogo instantâneo de pares observados. Com cada um desses pares, verifica-se no catálogo de pares dedicado quais os pares que satisfazem o requisito aplicado de possuir uma distância angular dentro de uma faixa estipulada por uma precisão ϵ com a distância observada:

$$do - \epsilon \leq dc \leq do + \epsilon$$

onde dc é a distância catalogada, do é a observada e ϵ é a precisão de posicionamento (utilizou-se $30''$).

Depois de selecionados todos os pares dedicados com relação aos pares observados, verifica-se quais as estrelas dedicadas que fazem parte daqueles pares dedicados e monta-se assim um catálogo instantâneo dedicado de estrelas e um de pares para aquela observação. Dessa forma, agora temos a relação das estrelas dedicadas que será representada pelas colunas da matriz.

Fig. 29. - Representação gráfica da atribuição de notas na verificação de pares na matriz de Bezooijen.

Em seguida, toma-se a matriz para iniciar-se um processo de verificação de magnitudes. Para cada estrela observada, verifica-se todas as estrelas dedicadas que estejam dentro de uma faixa especificada pela precisão de magnitude ϵ_{mag} e a magnitude da estrela observada:

$$mago - \epsilon_{mag} \leq magc \leq mago + \epsilon_{mag}$$

onde $magc$ é a magnitude catalogada, $mago$ é a observada e ϵ_{mag} é a precisão de posicionamento (utilizou-se 0,25 de magnitude visual).

Depois de estipuladas as estrelas dedicadas a serem verificadas, começa-se um processo de comparação de magnitudes com relação à observada. Somente aquelas que se encontram dentro da faixa estipulada são verificadas. A nota é dada relativamente a todas as verificações para aquela estrela observada. Cada estrela dedicada recebe sua nota sendo o inverso do módulo da diferença entre a sua magnitude e a da estrela observada. Caso esta seja nula (estrelas com magnitudes idênticas: ótimo) a nota é igual à maior nota já obtida mais 0,1:

$$\begin{aligned} notamag_{par} &= 1 / |mago - magc|, \text{ se } mago \neq magc \\ notamag_{par} &= \max(notamag_{par}) + 0,1, \text{ se } mago = magc \end{aligned}$$

Com as notas calculadas, atribui-se as mesmas a cada elemento da matriz referente às estrelas dedicadas em questão (1 elemento: 1 linha e 1 coluna) somando-se à nota já obtida por aquele elemento na verificação de pares:

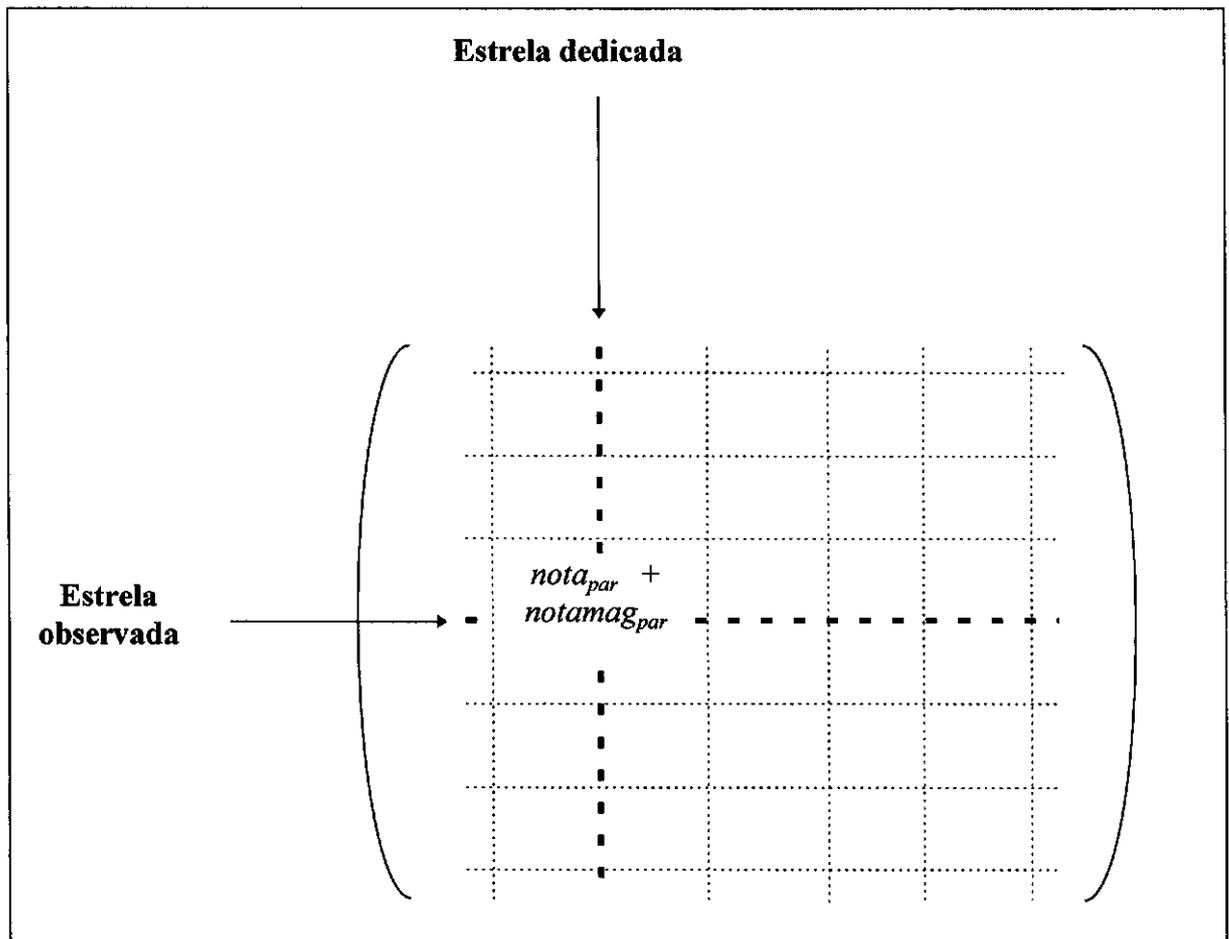


Fig. 30. - Representação gráfica da atribuição de notas na verificação de magnitudes na matriz de Bezooijen.

Dessa forma, com a matriz montada e todas as notas atribuídas, podemos passar à verificação de atitude e identificação propriamente ditas.

A figura a seguir mostra o fluxograma do algoritmo de identificação:

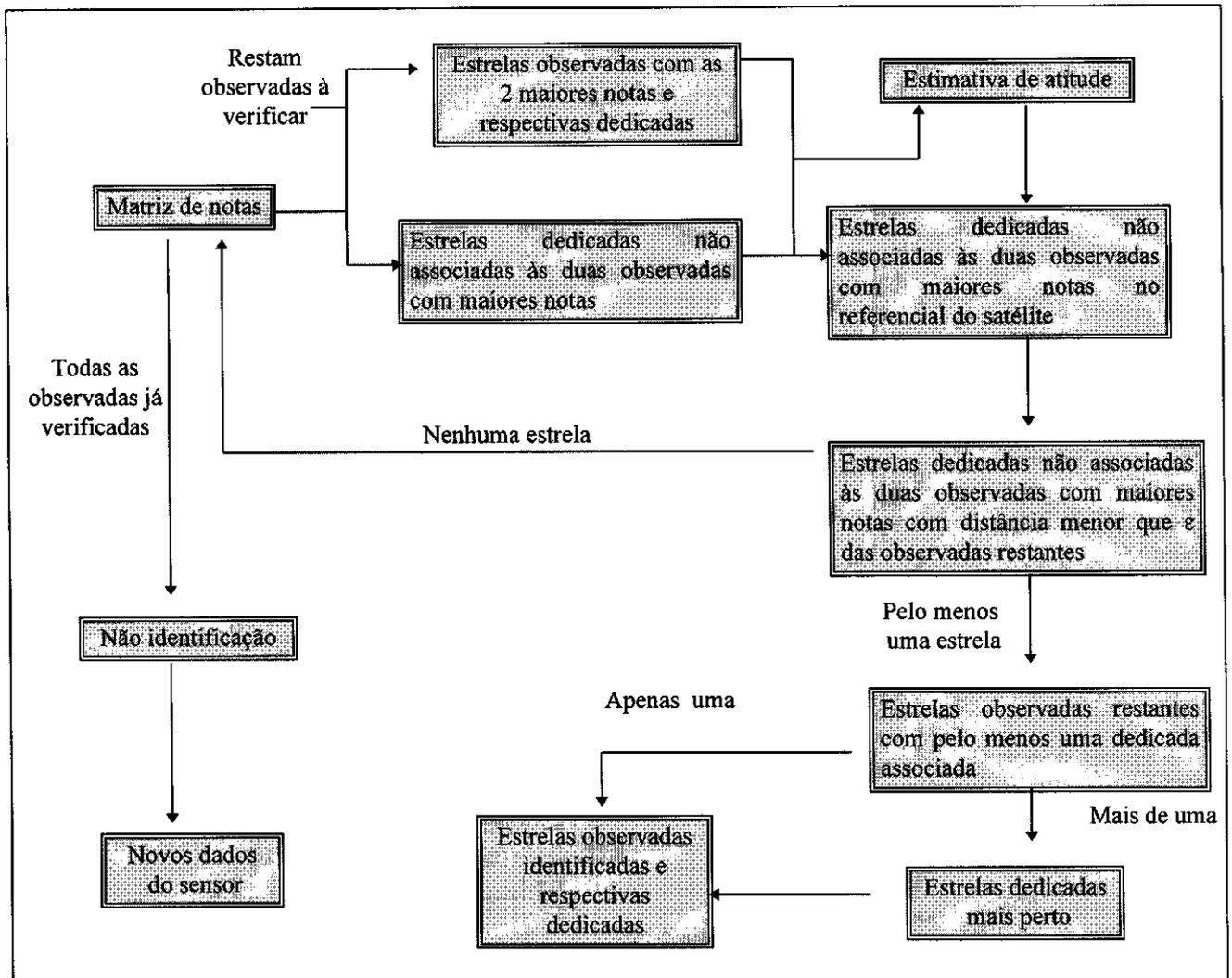


Fig. 31. - Representação gráfica do algoritmo de *Bezoijen*.

Através da matriz de *Bezoijen*, tomamos as duas estrelas com as maiores notas, porém referenciadas a estrelas dedicadas diferentes, e as utilizamos como referências para calcular uma primeira estimativa da atitude. Com esta, todas as estrelas dedicadas, que não as associadas com as duas observadas de maiores notas associadas, são transferidas para o referencial do satélite e através de produto escalar verificamos quais estão a uma distância menor que a precisão ϵ das estrelas observadas. Se nenhuma estrela se encontrar nessa situação é sinal de que a atitude está errada e então passamos à utilização das duas estrelas observadas com maiores notas seguintes em escala decrescente de notas.

Assim, repetindo-se o procedimento iterativamente, procedemos até que todas as estrelas observadas já tenham sido utilizadas. Verificamos todas as estrelas observadas que tenham associadas estrelas dedicadas que se encontrem na situação descrita, podendo-se ter identificação única ou ambígua. Nesse caso, para resolver a questão de ambigüidade, verificamos a quais estrelas dedicadas cada observada se associa e a atribuímos àquela que está a menor distância e damos-na por identificada. As estrelas observadas que não tiverem sido reconhecidas a nenhuma dedicada são dadas por não identificadas.

Pode ocorrer que depois de todas as iterações nenhuma estrela tenha sido identificada. Dessa forma o sistema é reinicializado e capta outra observação do sensor para os cálculos de identificação de estrelas até que se tenha uma identificação e dessa forma possa-se calcular a atitude.

No caso de identificações não há como se saber se são corretas ou errôneas, sendo dessa forma simplesmente consideradas identificadas. No entanto, quando ocorrem errôneas, a acuracidade do cálculo fica extremamente prejudicada. Dessa forma, depois de completo o procedimento de identificação, todas as estrelas identificadas serão utilizadas pelo algoritmo de cálculo de atitude descrito.

Capítulo IV

4. Descrição do procedimento

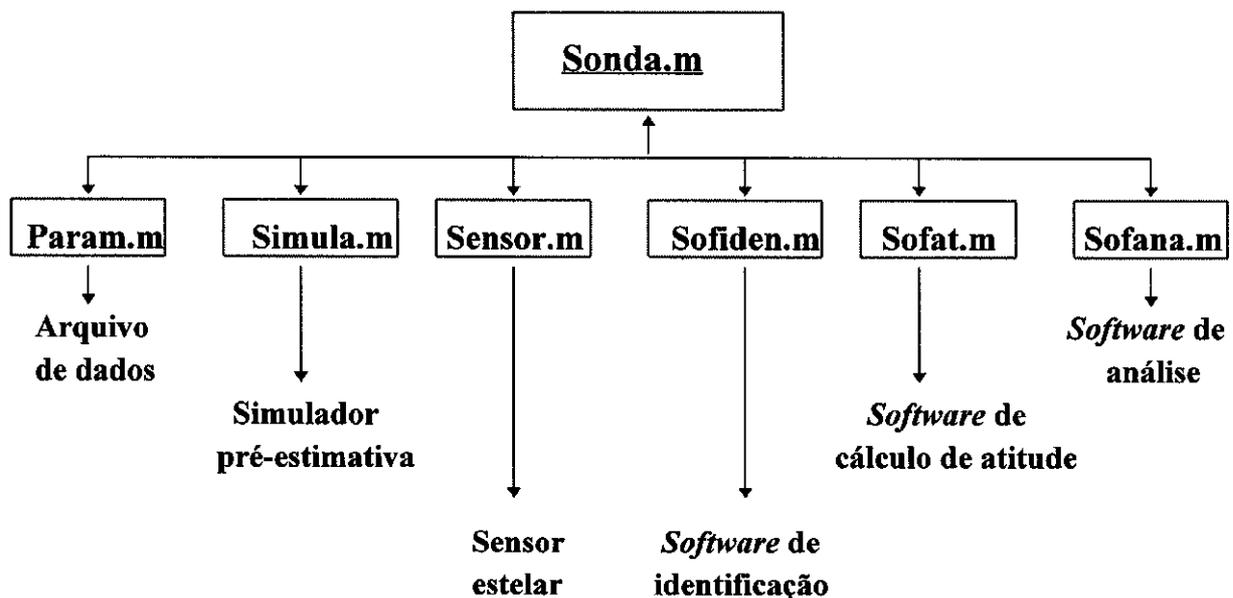
4.1. Rotinas

O *software* para o estudo neste trabalho, foi desenvolvido no ambiente *PC-Matlab* através do método de programação em módulos, ou seja, um programa principal, representando todo o sistema estudado, que acessa uma série de outros programas auxiliares que executam funções específicas de cálculo e análise representando subsistemas.

A vantagem do método modular de programação encontra-se na facilidade de introdução de alterações nas funções a serem executadas, correções ou modificação na estrutura de funcionamento do sistema, sem que necessitemos modificar todo o programa principal, além de permitir uma direta análise dos resultados e da coerência dos cálculos executados por cada módulo.

Nesta seção discutiremos as idéias básicas das rotinas principais construídas com a citação de suas funções básicas e explicação mais detalhada, apresentando alguns fluxogramas de funcionamento e transferências de dados, sendo que sua listagem final será apresentada no relatório final deste trabalho, uma vez que ainda se encontram em desenvolvimento.

- Diagrama de acesso de rotinas principais:



- Fluxograma Programa principal:

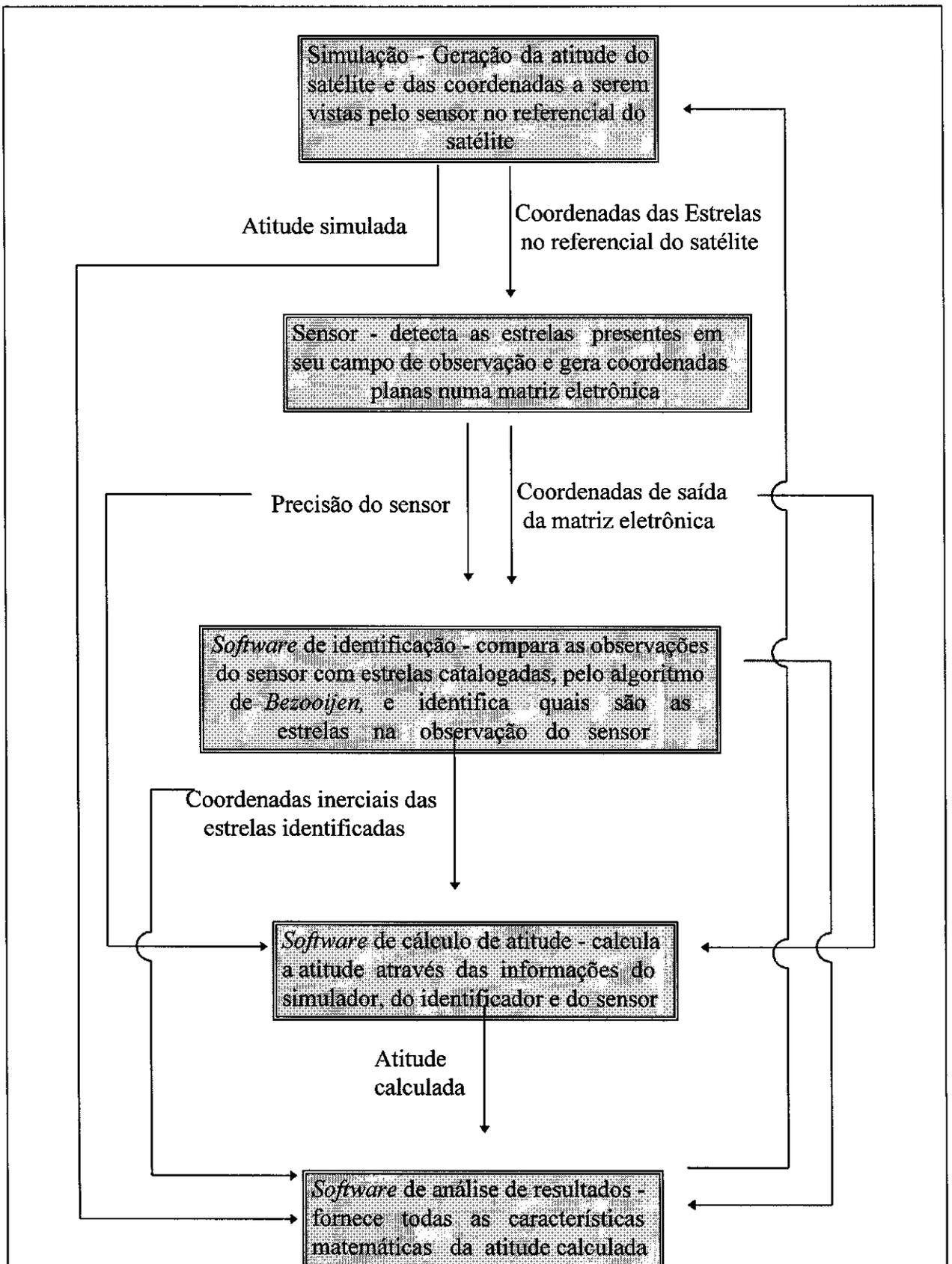


Fig. 32. - Simulação de funcionamento do sistema de determinação de atitude.

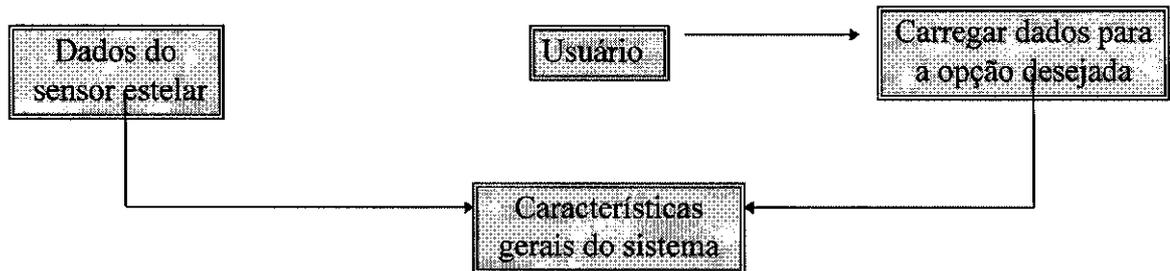
O fluxograma acima (Ver fig. 32) representa todo o desenvolvimento. As informações das estrelas a serem observadas e a atitude simulada são geradas por um simulador. A informação das estrelas é passada a um *software* que representa o sensor estelar e que gera toda a informação sobre as estrelas vistas a partir de sua matriz eletrônica.

Sem necessidade de pré estimativa de atitude, as informações das estrelas vistas passam ao sistema de identificação que por si só inicia-se num modo “perdido no espaço” (*Lost in space*). Na identificação são selecionadas as estrelas a serem realmente utilizadas no cálculo da atitude.

Posteriormente as coordenadas das estrelas selecionadas são repassadas ao sistema de cálculo junto com as coordenadas vistas pela matriz do sensor. Nesta etapa, a atitude primária é calculada, sendo posteriormente analisada e comparada com a pré estimada por um sistema de análise que então fornece todas as características desejadas sobre a atitude calculada. Com esta atitude primária, o sistema é reiniciado já num modo de pré-estimação, trabalhando de forma semelhante ao descrito na referência [b17.].

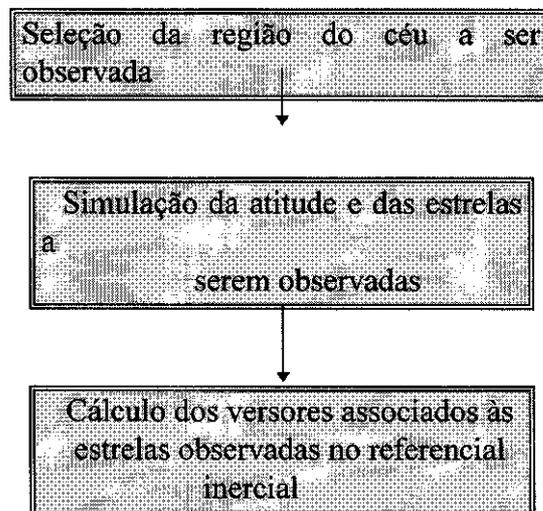
- Rotinas auxiliares do sistema:

Param.m



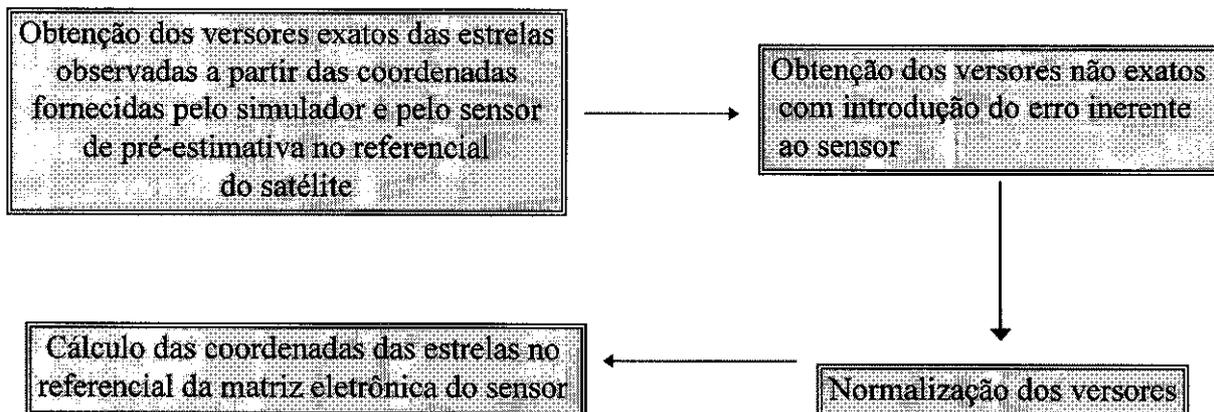
A rotina Param.m propõe-se a carregar todos os dados contidos nos catálogos assim como definir as características operacionais do sensor estelar.

Simula.m



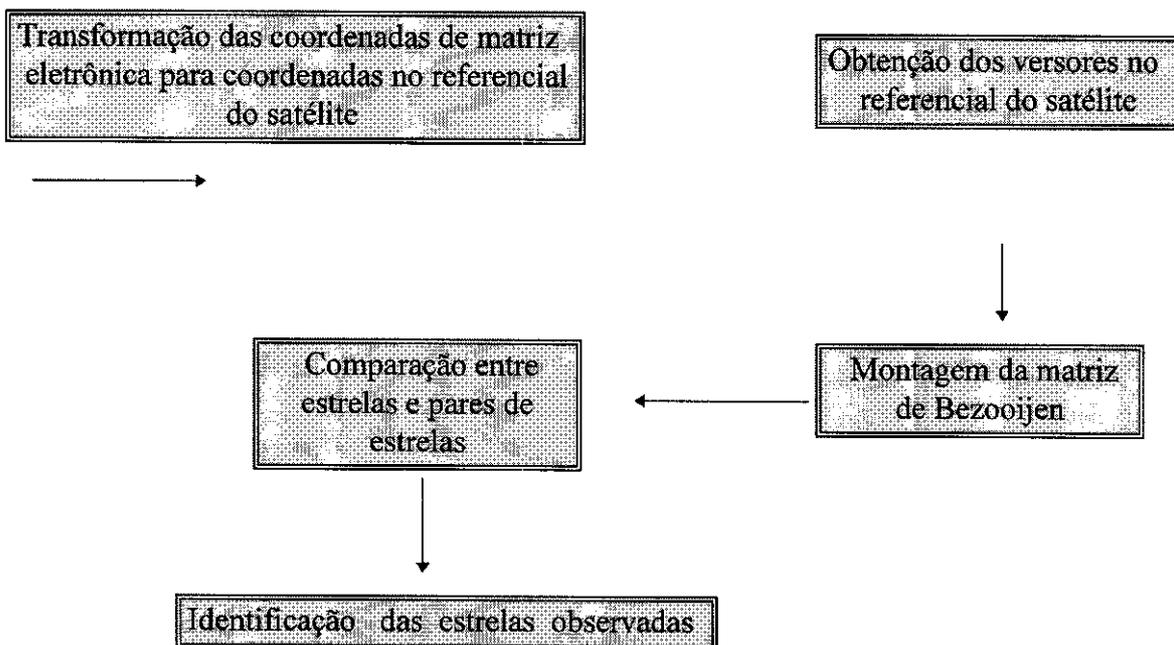
A rotina Simula.m propõe-se, com interação de um usuário, a um simulador que gera todas as informações necessárias ao cálculo da determinação de atitude como se as mesmas fossem provenientes do meio-ambiente onde se encontraria o satélite. Dessa forma a rotina simula o céu e o posicionamento do satélite com relação ao mesmo utilizando-se da base de dados contida no catálogo fonte.

Sensor.m



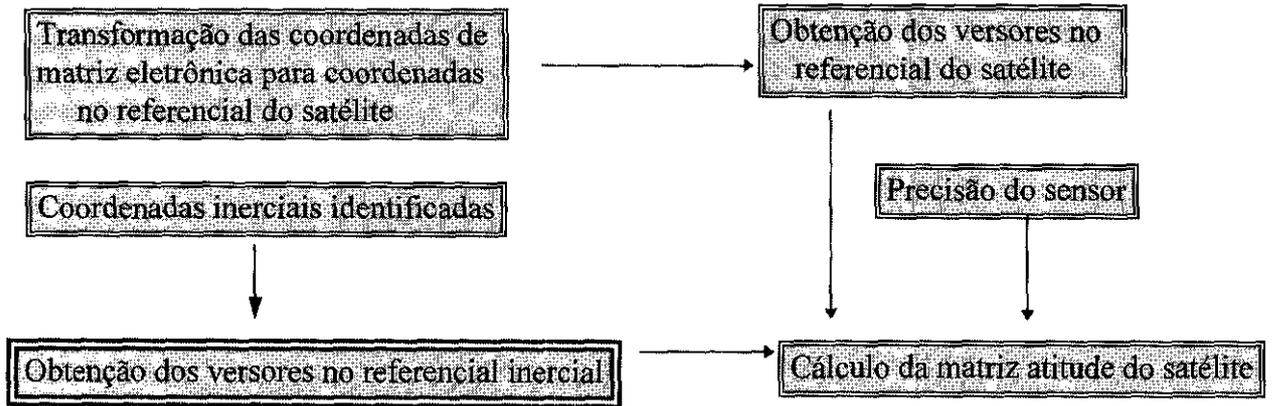
A rotina **Sensor.m** executa o papel de um sensor com uma matriz eletrônica CCD que é sensibilizada às estrelas observadas em seu campo de visada, e fornece coordenadas num referencial plano.

Sofiden.m



A rotina **Sofiden.m** realiza as identificações das estrelas observadas pelo sensor comparando-as através do algoritmo de *Bezooijen* com as coordenadas catalogadas, tendo apenas uma única identificação para cada observação. Se a observação não possuir identificação, nenhuma coordenada associada será repassada. No entanto ainda existe a possibilidade de uma identificação errônea para as identificações únicas.

Sofat.m



A rotina Sofat.m calcula a matriz de rotação ou atitude do satélite no referencial inercial com base nos dados fornecidos pelo sensor e pelo identificador de estrelas.

Sofana.m

O fluxograma apresenta-se em seguida:



A rotina Sofana.m calcula itens de análise de toda a situação do cálculo de atitude executado com relação à atitude real simulada pelo simulador e à atitude calculada através de observações do sensor estelar, tais como erros nos ângulos de **Euler**, versores e coordenadas inerciais de apontamento do sensor, eixo e ângulo de rotação de uma atitude para a outra e erros associados à atitude nas direções paralela e perpendicular ao sensor

4.2. Resultados

Os resultados esperados para os futuros testes com relação a vários tópicos de interesse descreveram o comportamento do *software*. Através destes resultados poderemos analisar e estudar as características de desempenho e funcionamento do sistema montado., das quais podemos tirar proveitosas conclusões que nos possibilitam um melhor desenvolvimento de métodos mais avançados.

Os tópicos de interesse residem em:

- Se o número de estrelas identificadas aproxima-se ao número de estrelas vistas, o que seria um bom resultado de desempenho.
- Se a precisão dada pelo modo de inicialização (*Lost in Space*) é suficiente e satisfatório para a aquisição de atitude da nave.
- Se as identificações errôneas e não identificações, e ainda a tendência de identificações ambíguas tenham baixa porcentagem e a identificação correta é otimizada.
- Se a influência da distribuição e disposição (“entropia”) das estrelas no campo influencia muito no resultado de acuracidade para que se possa otimizar o sistema para que trabalhe de acordo com as situações reais. Se, mesmo que a densidade no campo seja satisfatória, o fato de estarem aglomeradas não piore o desempenho, ou se uma disposição mais esparsa é o ideal. Se o céu segue a hipótese inicial adotada de que seja seguida a distribuição de **Poisson**, ou se foge à regra notavelmente. Se realmente o desempenho é satisfatório quando se segue a hipótese adotada.
- Se a precisão com relação ao apontamento da atitude é melhor desenvolvida na direção perpendicular ao eixo de apontamento do sensor ou paralela. Se a previsão teórica inicial com relação a este tipo de precisão do sensor é real.

Todos estes resultados foram verificados e estudados para o caso do método aplicado na referência [b17.].

Capítulo Final

5. Comentários e Conclusões

5.1. Primeiro autor

Depois de descritos os conceitos e procedimentos que suportam o trabalho, passamos a descrever agora as atividades realizadas no decorrer do trabalho com opiniões a respeito de todo o contexto.

Atividades realizadas durante o decorrer do trabalho:

Desde o início deste trabalho em agosto de 1996, foram realizadas algumas atividades em função do desenvolvimento do mesmo, ou sua complementação. A título de conhecimento ou informação simplesmente, essas atividade resumem-se em:

a) Pesquisas bibliográficas:

Essas pesquisas referem-se em boa parte ao desenvolvimento do trabalho na obtenção de informações, mas também a uma ambientação aos recursos bibliográficos disponíveis no INPE e aquisição de conhecimentos em áreas alheias ao desenvolvimento propriamente dito.

b) Programação QBASIC:

Foi desenvolvida uma tarefa em programação QBASIC afim de manipular dados do catálogo fonte utilizado e geração de arquivos de dados úteis às aplicações do trabalho. No caso, foi desenvolvida uma rotina para a geração de outras rotinas que resultassem saída para *PC-Matlab*.

c) Programação PC-MATLAB:

Essa atividade foi um dos suportes básicos do trabalho, pois o *software PC-MATLAB* possibilita a implementação de todo o algoritmo.

d) Auxílio a estudantes:

Foi feito um trabalho sobre teses e relatórios na Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), sendo dada uma contribuição em sentido de melhor esclarecimento da importância, métodos utilizados e necessidades de conhecimento prévio.

e) Eventos:

Palestra no Observatório de Ribeirão Preto (Instituto Astronômico Liceu Albert Sabin) em causa da inauguração do mesmo, com uma ênfase na importância da pesquisa da área espacial no Brasil e seus benefícios para a comunidade.

Participação na 48.º Reunião anual da SBPC em São Paulo e 8.º Colóquio de Dinâmica Orbital em Santos com uma apresentação sobre o trabalho anteriormente desenvolvido, além de assistir a muitas apresentações sobre os outros trabalhos de iniciação que se desenvolvem no Brasil por outros estudantes de várias áreas e partes do país.

- Opiniões gerais sobre a experiência:

No decorrer do desenvolvimento das atividades foi possível um amplo aproveitamento de todo o processo, apesar da distância entre o INPE e a instituição de origem EESC-USP-São Carlos.

Com o desenvolvimento deste trabalho de iniciação científica ficaram mais claros quais são os meios e processos utilizados numa pesquisa espacial, assim como todo o seu desenvolvimento, desmitificando um pré-conceito formado de que a pesquisa espacial é quase, ou senão impossível no nosso país.

Em opinião particular, o desenvolvimento deveria dar-se um pouco mais próxima da realidade da convivência com todo o equipamento de suporte e de forma mais amplificada, como conhecimento propriamente dito de um satélite desenvolvido no INPE , ou protótipo para uma pré-ambientação ao trabalho com o mesmo.

Em primeira visão, todo o desenvolvimento saiu-se perfeitamente bem, com mostras de uma ampla melhoria, além de sugerir idéias de um mestrado já em vias de se iniciar em 1997 na área espacial pelo INPE, visando basicamente um aperfeiçoamento do trabalho desenvolvido.

- Continuação do trabalho:

- a) Estudo de técnicas avançadas de identificação de estrelas:

Paralelamente à otimização do *software* serão estudadas e analisadas técnicas mais avançadas na identificação de estrelas afim de aumentar o desempenho no ponto particular da identificação, tornando o cálculo da atitude mais preciso. No entanto, por motivos de término de graduação e início de mestrado, o trabalho será terminado por um outro bolsista que será auxiliado na continuação, visando uma integração com o tema da tese de mestrado.

Tais técnicas serão eventualmente pesquisadas através de uma ampla pesquisa bibliográfica, principalmente em artigos publicados recentemente, afim de permitir que tenhamos as mais avançadas em mãos, tendo em vista uma continuidade do trabalho num numa pós-graduação no INPE.

A pesquisa se estenderá através dos métodos de identificação sem necessidade de pré-estimativa de atitude como foi o caso deste trabalho. Isto possibilita a utilização do sistema em condições mais especiais onde o satélite, ou nave, não tenha condições de utilizar outra referência senão as estrelas, além de contribuir para uma área nova em desenvolvimento no país.

5.2. Segundo Autor

Os programas descritos neste relatório foram implementados, de modo a obter a matriz de notas que permite identificar as estrelas corretas. Os resultados obtidos mostram a potencialidade do método, que será útil em futuras aplicações de determinação de atitude no INPE.

Um levantamento numérico mais detalhado precisará ser realizado com as ferramentas aqui apresentadas para caracterizar o desempenho do procedimento em termos de precisão e porcentagem de acerto.

6. Referências bibliográficas e software

As referências para o desenvolvimento deste trabalho são baseadas em livros, artigos publicados, apostilas, catálogos e atlas de mapas estelares, onde toda a informação a respeito dos conceitos básicos, fundamentos teóricos e técnicas de aplicação foram obtidas.

Já os *softwares* utilizados baseiam-se em alguns títulos já consagrados pelo seu ótimo desempenho na realização de tarefas específicas para a editoração ou cálculo.

a) Apostilas:

- 1. *Matlab with simulink ver. 4.0 - help* impresso;
- 2. *Astronomia*. CDA-CDCC-IFQSC-USP, São Carlos, SP.

b) Artigos e Livros:

:

- 1. **Shuster, Malcolm D.** *Introduction to spacecraft attitude determination*. The Johns Hopkins University, 1989;
- 2. **Allen.** *Astrophysics Quantities*, 523.023 A153a - 1973;
- 3. **Strikwerda, T. E.; Fisher, H. L.; Kilgus, C. C. and Frank, L. J.** *Autonomous star identification and spacecraft attitude determination with CCD star trackers*. Proceedings of 1st ESA International Conference. ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 4-7 June, 1991, pp. 195-200;
- 4. **Willians, K. E.; Strikwerda, T. E.; Fisher, H. L.; Strohbehn, K. and Edwards, T. G.** *Design study: Parallel architectures for autonomous star pattern identification and tracking*. (AAS 93-012) *Spacecraft Mechanics* 1993, Vol. 82, Part I, *Advances in the Astronautical Sciences*, R. G. Melton; L. J. Wood; R. C. Thompson and S. J. Kerridge (eds.). Proceedings of AAS/AIAA Space Mechanics Meeting, Pasadena, CA, Feb. 22-24, 1993. (Univelt San Diego, CA, 1993)pp.43-58;
- 5. **Wertz, J. R.(ed.)**. *Spacecraft attitude determination and control*. D. Heidel, London, 1978. (Astrophysics and Space Sciences Library);
- 6. **Hughes, P. C.** *Spacecraft attitude dynamics*. John-Wiley & Sons, New York, 1986;
- 7. **Kane, T. R.; Linkins, P. W. and Levinson, D. A. (ed.)**. *Spacecraft dynamics*. Mc Graw-Hill, New York, 1983;
- 8. **Rinrott, F. P. J.** *Introductory attitude dynamics*. Spring Verlag, New York, 1989. (Mechanical Engineering Series);
- 9. **Freeman, H.** *Introduction to statistical inference*. Addison-Wesley Publishing Company, London, 1963. (Addison-Wesley Series in Statistics);
- 10. **Brownlee, K. A.** *Statistical theory and methodology in science and engineering*. John-Wiley & Sons, New York, 1967.
- 11. **Levine, Wilian S.** *The Control Handbook*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1996.
- 12. **Bank, Thomas.** *All stellar Attitude Estimation Using a Ball CT-633 Star Tracker*. (AAS 95-004) *Guidance and Control* 1995, Vol 88, *Advances in the Astronautical Sciences*, R.D.Culp and J.D.Medbery (eds). Proceedings of AAS/AIAA Anual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Keystone, CO, Feb. 1-5, 1995. (Univelt, San Diego, CA, 1995) pp. 59-66.
- 13. **Kosik, J. C.** *Star pattern identification aboard on inertially stabilized spacecraft*. *Journal of Guidance, Control and Dynamics* 14(2):230-235, Mar.- Apr., 1991;

•

•14. **Scholl, M. S.** *Star-field Identification for Autonomous Attitude Determination.* Journal of Guidance, Control and Dynamics 18(1): 61-65, January-February,1995;

•15. **Ketchum, E. A.; Tolson, R. H.** *Onboard Star Identification without A Priori Attitude Information.* Journal of Guidance, Control and Dynamics 18(2): 242-246, March-April,1995;

•16. **Van Bezooijen, R. W. H.** *Autonomous Star Referenced Attitude Determination.* (AAS 89-003) Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 68, 1989, pp. 31-52.

•17. **Carvalho, Gustavo B.** *Identificação de estrelas observadas por sensores estelares.* Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais , Brasil, 1996;

c) Catálogos:

•1. **Corporation, Sky Publishing.** *SKY Catalogue 2000.0*, Vol. 1, 2.nd edition, Sky Publishing Corporation , Belmont-MA, USA, 1991;

d) Softwares:

•1. *PC-MATLAB WITH SIMULINK 4.0;*

•2. *Word for Windows 6.0;*

•3. *Qbasic DOS 6.22;*

•5. *Paint Shop Pro 3.0;*

•6. *Coreldraw 3.0;*

•7. *Corelxara 1.1.*