



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14198-RPQ/260

**SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DO COMPORTAMENTO
DINÂMICO DA PLATAFORMA SUBORBITAL 1 DURANTE
PERÍODO DE ESTABILIZAÇÃO**

Paulo Giácomo Milani
Suely Silva

Publicação Interna – sua reprodução ao público externo está sujeita à autorização da
chefia

INPE
São José dos Campos
2006

RESUMO

O programa de lançamentos de plataformas Suborbitais, além de constituir suporte para teste de dispositivos a serem utilizados nos satélites em desenvolvimento dentro do Programa Espacial Brasileiro, tem como objetivo oferecer à comunidade científica a disponibilidade de ambiente de microgravidade para a realização de pesquisas de interesse para a indústria nacional. Com a finalidade de visualizar e analisar o comportamento da plataforma após sua separação do foguete lançador foi desenvolvido um software que realiza a simulação em tempo real dos movimentos da plataforma e comanda um simulador de três eixos para seguir as velocidades obtidas na simulação. O software, em linguagem C, foi desenvolvido para execução em sistema operacional Linux e acessa o simulador através das rotinas de interface desenvolvidas para controle do mesmo. A integração das equações dinâmicas da PSO é realizada através de um algoritmo Runge Kutta de 4ª ordem. Os resultados da Simulação são avaliados a partir dos gráficos das velocidades e torques de controle aplicados nos três eixos.

ABSTRACT

The suborbital platforms launch program, besides providing stand to experiment devices that will be used in satellites being developed within the Brazilian Spacial Program, has the objective to offer to scientific community an available microgravity enviroment to be used in experiments of interest to National Industry. Aiming to visualize and analyze the platform's behavior after its separation from the launch vehicle, a software was designed to simulate in real time the platform's motions and commands a three axis simulator to follow the velocities attained from the simulation. The software, written in C language, was developed to be executed in Linux Systems and gets access to the simulator using a package of routines designed to control it. The integration of the suborbital platform's dynamic equations is accomplished applying a 4th order Runge Kutta algorithm. Simulation results are evaluated through the analysis of graphics that show the velocities and control torques applied in the three axis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	14
3. DINÂMICA DA PLATAFORMA E ESTRATÉGIA DE CONTROLE UTILIZADA	17
3.1. EQUAÇÕES DINÂMICAS	17
3.2. ESTRATÉGIA DE CONTROLE	17
4. IMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO	19
5. RESULTADOS OBTIDOS	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Disposição das baias de equipamentos na PSO1.....	12
2.1 - Simulador de Três eixos.....	14
2.2 - Mesa de Rotação Controlada e seu rack de controle elétrico e eletrônico.....	15
2.3 - Mesa de Mancal a Ar de um eixo.....	15
2.4 - Mesa de Mancal a Ar de 3 graus de liberdade com amortecedor de nutação.....	16
3.1 – Posicionamento dos propulsores.....	18
4.1 – Diagrama de simulação com o Simulador não inserido na malha de controle.....	19
4.2 – Diagrama de simulação que inclui o Simulador na malha.....	20
4.3 – Diagrama de simulação que inclui, além do Simulador, o <i>hardware</i> correspondente aos sensores e atuadores na malha de ontrole.....	20
4.4 – Hierarquia do software de controle do Simulador.....	21
5.1 – Gráfico das velocidades angulares.....	23
5.2 - Gráfico dos Torques aplicados.....	24

1. INTRODUÇÃO

Diante da constatação da importância de se ter disponível um ambiente de microgravidade para a realização de inúmeras pesquisas de interesse científico e tecnológico para o país, verificou-se oportuno no âmbito do Programa Espacial Brasileiro o desenvolvimento de uma plataforma suborbital. Esta plataforma consiste em um compartimento acoplado a um foguete de sondagem que é lançado em vôo suborbital, onde são colocados os experimentos. Nestas condições a plataforma propicia a utilização de ambiente de microgravidade de melhor qualidade e por períodos de tempo mais longos que os obtidos em laboratórios na Terra ou em queda livre de aviões em vôo parabólico. O ambiente é muito semelhante ao existente em uma estação espacial e embora o processo seja de menor duração possui a vantagem de ter um custo muito menor. O projeto da plataforma se beneficia da já bem estabelecida experiência brasileira no lançamento de foguetes de sondagem, com inúmeros lançamentos bem sucedidos incluindo missões levando carga útil de experimentos internacionais.

Um outro aspecto de grande importância no projeto do lançamento desta plataforma é a possibilidade de realizações de estudos e testes de qualificação de equipamentos desenvolvidos por grupos do INPE. Alguns fabricados inteiramente no INPE e outros em conjunto com a indústria nacional. Estes equipamentos poderão ser utilizados nos satélites que serão futuramente lançados de acordo com o cronograma do Programa Espacial Brasileiro. Por exemplo, entre os equipamentos embarcados no primeiro protótipo lançado estiveram girômetros e acelerômetros, projetados e construídos no Departamento de Mecânica e Controle (DMC) do INPE, propulsores a hidrazina, que atuam na estabilização da plataforma, projetados pela DMC e fabricados por indústria brasileira e o equipamento de recuperação da plataforma, cujo desenvolvimento contou com a participação do IAE e da DMC do INPE. Detalhes sobre estes sistemas podem ser obtidos em Milani et alli, 2005.

De acordo com o projeto da plataforma suborbital, para a obtenção do ambiente de microgravidade a plataforma deve ser acoplada a um foguete e lançada em uma trajetória parabólica, atingindo uma altura em torno de 260 km. Após a separação entre a plataforma e o último estágio do foguete inicia-se uma manobra para redução de suas velocidades angulares que devem ficar abaixo de 0.2 graus por segundo. Do instante em que a plataforma se estabiliza até a reentrada na atmosfera tem-se o período de microgravidade, durante o qual é possível a realização dos experimentos. Após a reentrada a plataforma tem sua descida amortecida por um pára-quedas. Ela então deve cair no mar e permanecer flutuando com o auxílio de bóias até a recuperação por uma equipe de resgate.

Em Dezembro de 2000 foi realizado o lançamento do primeiro protótipo da Plataforma Suborbital brasileira desenvolvida na DMC do INPE. Este primeiro protótipo recebeu a denominação de PSO1 e foi lançado a partir do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno, em Natal, por um foguete Sonda III, do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). A figura 1.1 mostra uma fotografia da plataforma, indicando a disposição das baías onde estão alojados os equipamentos. A partir da base tem-se a primeira baía onde estão alojados os dispositivos de recuperação da plataforma:

o pára-quedas e o sistema de flutuação. Na segunda baia tem-se o equipamento de telemetria que fornece as informações sobre a missão. Na terceira e na quarta baia estão os sensores e atuadores embarcados para permitir o controle para a estabilização da plataforma, além de um receptor GPS e uma caixa de baterias.



Figura 1.1 – Disposição das baias de equipamentos na PSO1.
Fonte: INPE (1999).

Com a finalidade de realizar uma análise do desempenho do algoritmo de controle utilizado na estabilização da plataforma foi desenvolvido um software que faz a

implementação deste algoritmo e simula o controle da plataforma a partir de uma condição inicial posterior à separação entre a plataforma e o último estágio do foguete. Este software, utilizando as equações descritivas da dinâmica do sistema calcula, a intervalos de tempo determinados, as velocidades angulares da plataforma e os torques, de acordo com a lei de controle, a serem aplicados em cada eixo pelos propulsores. O programa registra em arquivo os valores calculados e comanda em tempo real um simulador em três eixos para seguir as velocidades desenvolvidas pela plataforma. Deste modo o simulador apresenta uma emulação do comportamento dinâmico da plataforma e possíveis anomalias do sistema de controle podem ser visualizadas e corrigidas.

Pretende-se com este trabalho realizar a documentação da simulação dinâmica da plataforma suborbital, descrevendo o software desenvolvido e os equipamentos utilizados, além dos resultados alcançados. De acordo com esta orientação o presente documento foi dividido em 5 seções que realizam a cobertura dos assuntos mencionados. Assim a seção 1 procura fornecer ao leitor uma idéia geral sobre a missão da plataforma suborbital, buscando não só mostrar aspectos do projeto como também apresentar a motivação para o desenvolvimento do mesmo. A seção 2 faz uma apresentação do ambiente de simulação mostrando alguns equipamentos disponíveis para realização de testes. A seção 3 apresenta as equações dinâmicas da plataforma e mostra o algoritmo de controle empregado para sua estabilização, apontando as razões que levaram à sua adoção. Na seção 4 é feita uma discussão do software desenvolvido mostrando como foi realizada sua implementação, É descrito o esquema de interação entre as diferentes partes do processo e são apresentadas as tarefas realizadas passo a passo pelo programa. Finalmente a seção 5 mostra os gráficos das velocidades e torques calculados durante a simulação, faz uma breve discussão sobre os resultados obtidos e comenta as possibilidades de continuação do trabalho realizado.

2. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para a realização das simulações e testes necessários durante o desenvolvimento de vários projetos executados pela DMC do INPE, a Divisão conta com um Laboratório de Simulações (LabSim) que possui entre vários outros equipamentos um Simulador em Três Eixos, modelo 53M2B-30H da Contraves (figura 2.1) e outros três simuladores dinâmicos desenvolvidos e construídos na DMC, sendo uma mesa de Rotação Controlada em um eixo (figura 2.2), uma mesa de Mancal a Ar de um eixo (figura 2.3) e uma mesa de Mancal a Ar de três eixos (figura 2.4).



Figura 2.1 – Simulador de Três eixos.
Fonte: INPE - DMC (1999).

Os equipamentos do laboratório que estão envolvidos na simulação descrita neste trabalho são um computador padrão IBM PC onde se executa o software de simulação e o Simulador de Três Eixos que recebe comandos de velocidade de forma a imitar os movimentos da plataforma. A comunicação em modo remoto com o Simulador através de um computador pode ser realizada via Interface GPIB, RS-232-C ou através de Interface CPU. Uma vez que utilizando a Interface CPU pode-se conseguir uma taxa de transmissão de dados maior que nas demais opções, esta é a interface freqüentemente utilizada nas simulações em tempo real. O computador onde é executado o software de simulação é equipado com uma placa de interface que permite a troca de sinais entre o computador e o Simulador. Esta placa de interface foi desenvolvida e fabricada no Laboratório da DMC para ser conectada em um PC através de barramento ISA. Existem atualmente planos para a substituição desta placa por outra que utilize barramento PCI ou mesmo a conexão desta placa ao PC utilizando um adaptador para USB com a finalidade de permitir a utilização de computadores mais modernos para comunicação com o Simulador. Em Rosa et ali, 1997, encontra-se a descrição do funcionamento da placa de interface.

Outras simulações do sistema de controle da plataforma, já propostas, pretendem utilizar as mesas de mancal a ar, disponíveis no laboratório, além de inserir na malha os *hardwares* correspondentes aos sensores e atuadores.

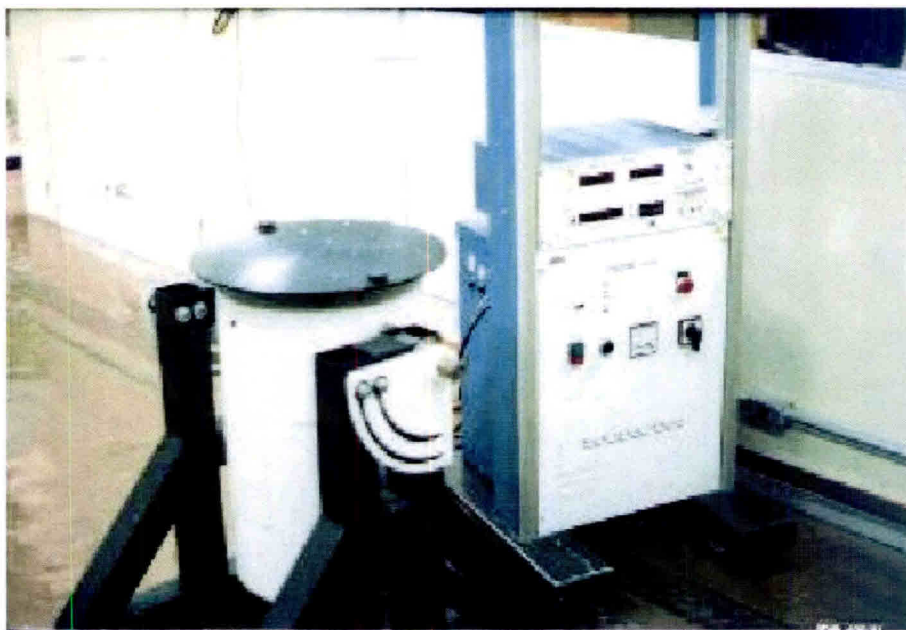


Figura 2.2 - Mesa de Rotação Controlada e seu rack de controle elétrico e eletrônico.
Fonte: INPE - DMC (1999).



Figura 2.3 – Mesa de Mancal a Ar de um eixo.
Fonte: INPE - DMC (1999).

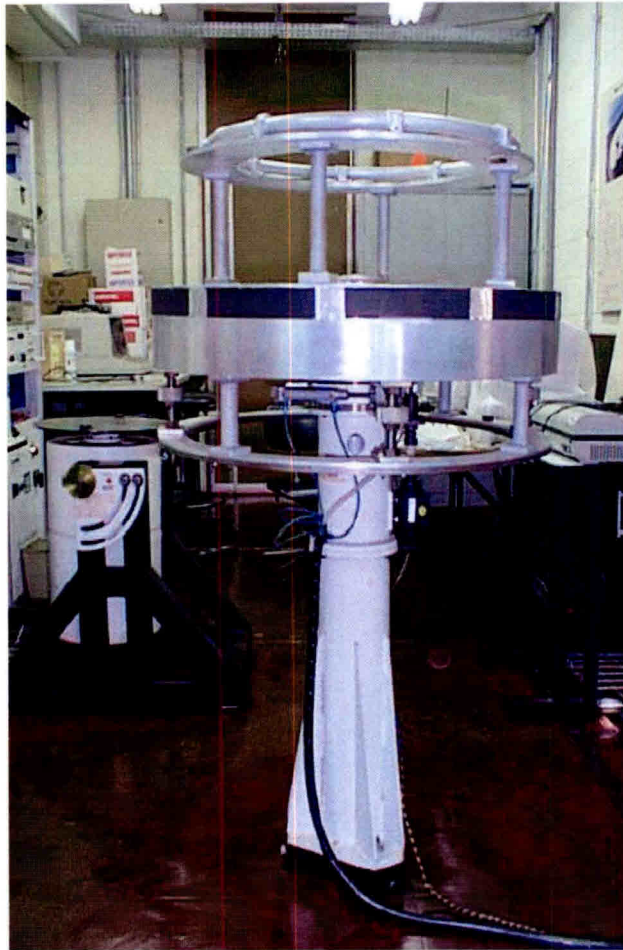


Figura 2.4 – Mesa de Mancal a Ar de 3 graus de liberdade com um amortecedor de nutação.
Fonte: INPE - DMC (1999).

3. DINÂMICA DA PLATAFORMA E ESTRATÉGIA DE CONTROLE UTILIZADA

3.1. EQUAÇÕES DINÂMICAS

As equações dinâmicas que representam o movimento da plataforma, obtidas a partir das equações de Euler para dinâmica de um corpo rígido em relação a um referencial fixo ao próprio corpo, estão listadas abaixo:

$$\dot{w}_1 = (T_1 - (I_z - I_y) \times w_2 \times w_3) / I_x$$

$$\dot{w}_2 = (T_2 - (I_x - I_z) \times w_1 \times w_3) / I_x$$

$$\dot{w}_3 = (T_3 - (I_y - I_x) \times w_1 \times w_2) / I_x$$

Sendo, $I_x = 48$, $I_y = 48$, $I_z = 1.7$, os momentos principais de inércia em torno dos respectivos eixos X, Y e Z para o caso da PSO1; w_1 , w_2 e w_3 as velocidades angulares em torno dos eixos X, Y e Z respectivamente; T_1 , T_2 e T_3 os torques aplicados também em torno eixos X, Y e Z respectivamente.

3.2. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Após a separação da PSO do último estágio do foguete, suas velocidades angulares são muito altas, da ordem de 180 rpm (mais de 1000^o/s). Estas velocidades devem ser reduzidas para valores de no máximo 0.2^o/s. Para este fim foi implementada uma lei de controle utilizando-se um sistema baseado em um computador de bordo, 2 giroscópios tipo DTG e um conjunto de 4 propulsores a jato de hidrazina. Os propulsores foram posicionados em um plano XY que se situa a uma distância a do centro de massa **CM** da plataforma, como mostrado na figura 3.1. Eles estão inclinados de um ângulo α em relação ao eixo Y da figura e r é a distância dos propulsores até o eixo Z. Esta configuração possibilita a atuação nos três eixos utilizando apenas os quatro propulsores instalados. Da figura pode-se observar que para realizar uma rotação em torno do eixo X basta acionar os propulsores A e B ou C e D. Em torno do eixo Y, os propulsores C e B ou A e D. Já em torno do eixo Z, basta acionar os propulsores A e C ou B e D.

Os sensores também são posicionados de forma a permitir a medida das velocidades angulares da plataforma em torno de seus três eixos principais de inércia. Os giroscópios no entanto possuem capacidade de medida até o limite de 20^o/s e no início da estabilização da plataforma, como mencionado anteriormente, as velocidades angulares são muito superiores a este valor. Por essa razão optou-se por uma lei de controle que em vez de utilizar as intensidades das velocidades angulares utiliza apenas os sinais destas. A ação de controle, representada pelos torques T_1 , T_2 e T_3 é formalizada em Silva e Milani, 2004 e mostrada na tabela 3.1 retirada do mesmo documento.

As intensidades dos torques que aparecem na tabela são calculadas em função da força F desenvolvida pelos propulsores e do ângulo α , utilizando as seguintes relações:

$$T_1 = 2.a.F.\text{sen}\alpha$$

$$T_2 = 2.a.F.\text{cos}\alpha$$

$$T_3 = 2.r.F.\text{sen}\alpha$$

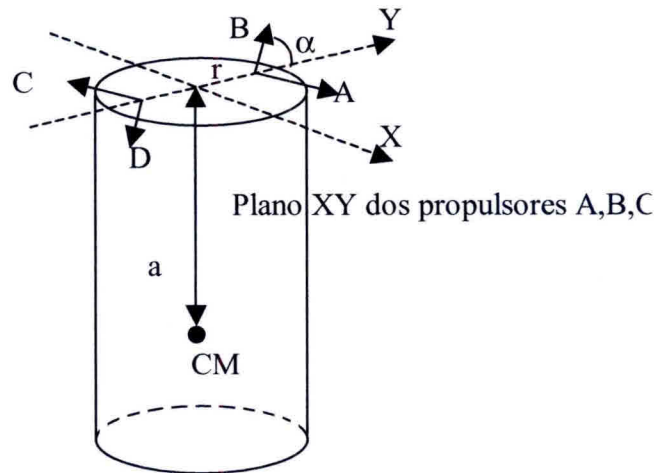


Figura 3.1 – Posicionamento dos propulsores.

Tabela 3.1 – Síntese do Sistema de Atuação.

Velocidades Angulares	Torques	Propulsores ativados
$w_1 > 0$	$-T_1$	A,D
$w_1 < 0$	$+T_1$	C,D
$w_2 > 0$	$-T_2$	A,B
$w_2 < 0$	$+T_2$	C,D
$w_3 > 0$	$-T_3$	B,D
$w_3 < 0$	$+T_3$	A,C

4. IMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Geralmente, o modelo da dinâmica considerado leva em conta apenas uma parte das variáveis envolvidas em uma simulação. A natureza dificilmente é linear, simples, sem atrasos, com precisão limitada e com resposta em frequência limitada. O que acontece no caso real geralmente é bem diferente do que se simula em computador. A inclusão de hardware na malha de controle procura fazer com que as limitações dos modelos considerados sejam repostas pelos correspondentes hardwares e que todas as implicações desses últimos sejam incluídas no sistema sendo simulado. Assim, no caso da inclusão de sensores inerciais passa-se a considerar os efeitos de *bias* e de fatores de escala diferentes, de atrasos na medida, de efeitos de quantização do conversor A/D utilizado, entre outros fatores.

O objetivo da presente proposta é o de simular em tempo real a dinâmica correspondente às equações dinâmicas apresentadas na seção anterior.

Uma simulação pode ter graus de realismo diferentes, correspondentes a quão bem ela representa o sistema físico sendo simulado. Esses graus vão desde uma simulação em tempo não real apenas em software até a uma simulação dinâmica, em tempo real, com *hardware* na malha de controle (*hardware in the loop*). Maiores detalhes desses tipos de simulações podem ser vistos em Milani, 1993. Apesar da relativa simplicidade da dinâmica do veículo na apresentação deste trabalho, a simulação será dinâmica, em tempo real, e com o *hardware* (no caso, o Simulador em 3 eixos) sendo usado apenas para apresentar o resultado da simulação fisicamente. Isto pode ser visto de uma forma melhor na Fig. 4.1 a seguir.

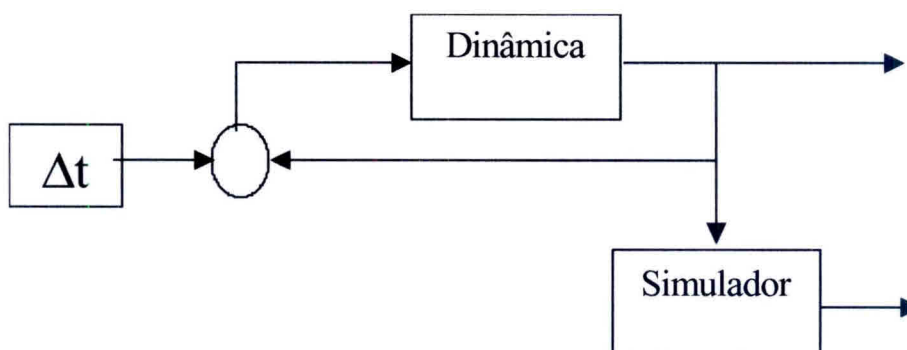


Figura 4.1 – Diagrama de simulação com o Simulador não inserido na malha de controle.

Como pode ser visto, o simulador segue a saída da dinâmica do veículo de uma forma física mas não faz parte da malha de controle. Em outra forma de simulação, o simulador pode ser incluído na malha de controle, o que exige que por um lado se comande o simulador com a saída da dinâmica, e por outro se leia do próprio simulador as velocidades angulares (no presente caso) para se poder fechar a malha de controle.

Essa segunda possibilidade, a da Figura 4.2, não foi implementada no presente momento por limitações do próprio Simulador, uma vez que leituras de velocidade angular do mesmo, nos 3 eixos, são difíceis de implementar com o *hardware* atualmente disponível no INPE (dispõe-se de apenas um módulo de medida de velocidades angulares, o qual precisa ser multiplexado entre os 3 eixos e isso traz atrasos significativos às medidas realizadas).

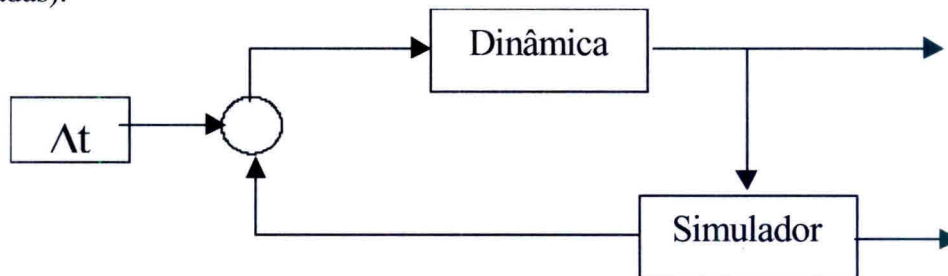


Figura 4.2 – Diagrama de simulação que inclui o Simulador na malha de controle.

Uma outra forma de realizar a mesma simulação é apresentada na Figura 4.3. Neste caso as velocidades angulares impostas pela dinâmica ao Simulador, são medidas através de sensores (inerciais, do tipo giroscópico) e, depois de filtradas, são realimentadas para a malha de controle.

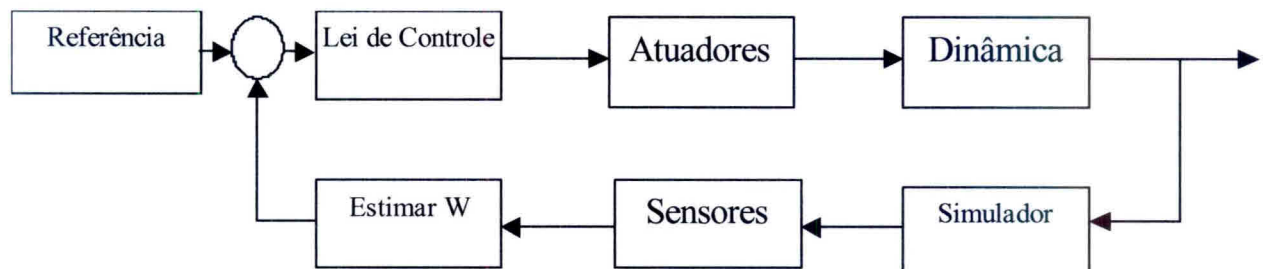


Figura 4.3 – Diagrama de simulação que inclui, além do Simulador, o *hardware* correspondente aos sensores e atuadores na malha de controle.

Esses sucessivos incrementos ao *hardware* de simulação permitem a incorporação de *hardware* de voo, por exemplo, os mesmos sensores que serão usados na plataforma PSO em sua missão real. Cada incremento de equipamentos reais à malha de controle adiciona um novo grau de realismo à simulação, aproximando-a cada vez mais da situação a ocorrer de fato com o veículo sendo testado.

Dessa forma fica claro que o exemplo apresentado neste trabalho corresponde a uma primeira etapa numa longa cadeia de possíveis alternativas de simulação do sistema de controle da PSO. Já serve, no mínimo, para se verificar a viabilidade do sistema proposto, que ele não diverge (leva a um ponto estável) e para se visualizar fisicamente

o resultado obtido ao se empregar essa estratégia de controle, entre outros. Fica muito clara a influência do acoplamento dinâmico entre os eixos devido à rotação da plataforma e a necessidade de se reduzir bastante a rotação em torno do eixo longitudinal (Z, no caso) para só então reduzir as outras rotações.

De acordo com a estrutura representada na figura 4.1 o software de simulação documentado neste trabalho implementa em tempo real a lei de controle descrita na seção 3 utilizando as equações dinâmicas da plataforma apresentadas também na seção 3 e realizando a integração das mesmas através de um algoritmo Runge Kutta de quarta ordem. O Simulador em três eixos recebe a cada intervalo de tempo de integração comandos de velocidade sobre cada um de seus eixos promovendo no Simulador uma imitação do comportamento da plataforma de acordo com condições iniciais especificadas.

O programa de simulação aqui descrito foi inicialmente desenvolvido e testado no ambiente de programação do MATLAB sob sistema operacional DOS (Milani, 2006). Embora este ambiente não ofereça condições ideais para simulações em tempo real, os resultados obtidos mostraram a viabilidade numérica do procedimento. Posteriormente o mesmo software foi escrito em linguagem C e modificado para ser executado em sistema operacional Linux resultando na versão do software de simulação descrito neste trabalho.

A comunicação entre o programa de simulação e o Simulador é feita através de *software driver* que realiza a interface entre o computador que executa o programa e o Simulador. Este *software driver* encontra-se descrito em detalhes em Milani e Silva, 2006. Examinando a figura 4.4, que mostra a hierarquia do *software* de controle do Simulador e foi extraída do documento citado, tem-se uma idéia de como o usuário obtém acesso às funções do Simulador. Os blocos rotulados como Rotinas Complementares, Rotinas em C e Rotinas read e write do Simulador constituem o *software driver* que realiza a interface.

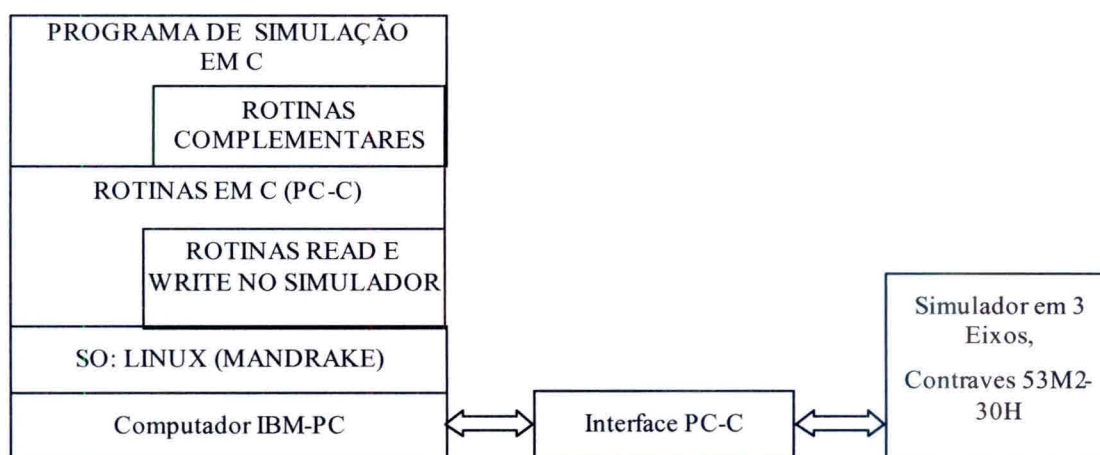


Figura 4.4 – Hierarquia do *software* de controle do Simulador.

O programa de simulação foi escrito em linguagem padrão ANSI C e foi compilado com o **gcc** versão 3.4.1. Basicamente ele executa as seguintes ações:

1. Definição de variáveis utilizadas no programa e parâmetros das equações dinâmicas e equações de cálculo dos torques;
2. Apresentação de menu para entrada opcional de novos valores para os parâmetros citados no primeiro item;
3. Declaração dos valores iniciais das velocidades angulares e cálculo dos torques iniciais;
4. Envio de comando de velocidade ao Simulador forçando cada eixo para as velocidades angulares iniciais;
5. Chamada da rotina para cálculo das derivadas das velocidades;
6. Início da contagem do tempo de simulação;
7. Início da malha de controle;
8. Implementação da lei de controle com cálculo dos torques a serem aplicados;
9. Integração da dinâmica através da chamada da rotina rk4_m que implementa um algoritmo Runge Kuta de ordem 4;
10. Novo cálculo das derivadas;
11. Malha que implementa tempo de espera pelo instante de envio de comandos ao simulador;
12. Envio de comando de velocidade para o simulador;
13. Retorno ao início da malha de controle;
14. Saída da malha de controle ao final do tempo determinado de simulação;
15. Armazenamento do vetor de velocidades calculados durante a simulação em arquivo no disco rígido do computador;
16. Comando para parar os eixos do simulador;
17. Fim do programa.

Após a execução das simulações os dados registrados em arquivo no disco rígido do computador são utilizados para a apresentação gráfica dos resultados.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizadas algumas simulações e os respectivos resultados numéricos serão apresentados a seguir. No eixo da variável dependente apresenta-se a velocidade angular da plataforma PSO, em rad/s, e no eixo das abcissas apresenta-se o tempo, em segundos. As condições iniciais das simulações foram escolhidas de acordo com as características da missão e das disponibilidades de desempenho do simulador. Os torques de controle foram implementados considerando diferentes pesos para cada eixo, simulando a possibilidade do emprego de propulsores com capacidade de torques diferentes.

Uma limitação de velocidade máxima de rotação do simulador impôs uma velocidade inicial máxima para a simulação. A PSO, no início da manobra de estabilização, tem uma rotação em torno de 180 rpm ou seja, $180 \cdot 2 \cdot \pi / 60 = 18,85$ rad/s. O limite superior de velocidade do simulador (eixo interno) está em torno de $450^\circ/\text{s}$, i.e., $450 \cdot \pi / 180 = 7,8$ rad/s, ou seja, da ordem de menos da metade da velocidade desejada. Como a parte inicial da simulação tem comportamento bastante conhecido e a dinâmica do veículo não se altera significativamente até que se atinja as rotações mais baixas, a realização da simulação a partir de valores mais baixos de rotações iniciais não implica em nenhuma degradação na qualidade da simulação ou do sistema simulado.

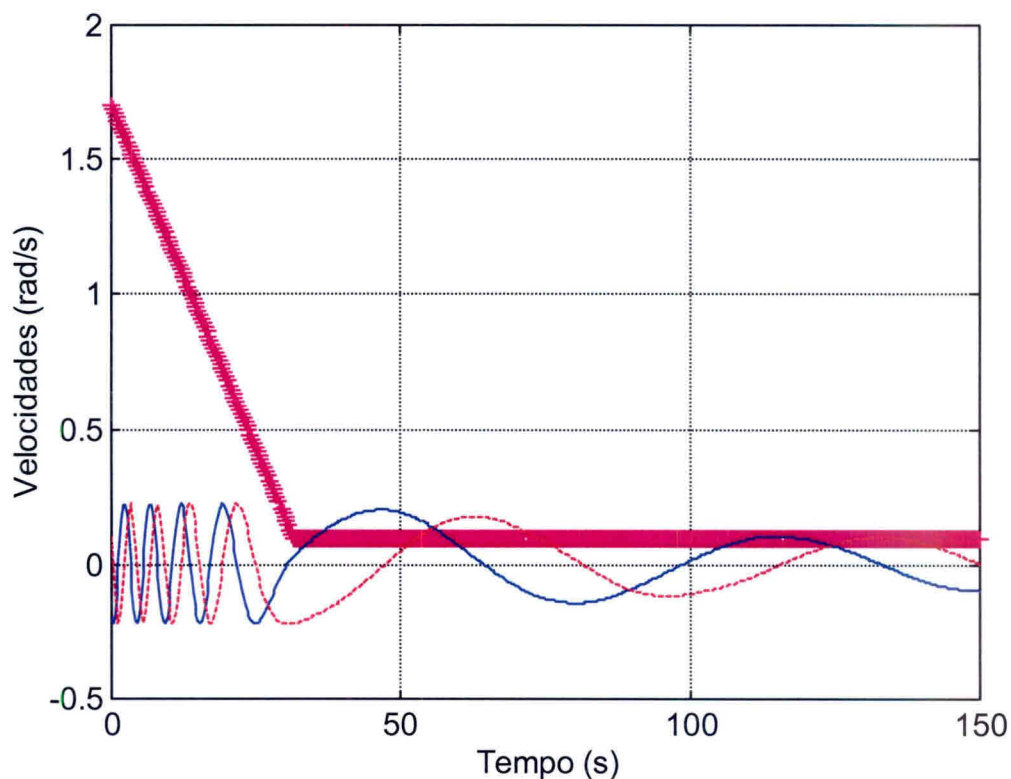


Figura 5.1 – Gráfico das velocidades angulares.

A figura 5.1 apresenta os resultados de uma simulação em que se consideram

condições iniciais relativamente lentas.

As velocidades angulares nos 3 eixos do corpo são apresentadas, variando ao longo do tempo da simulação. Nota-se a alteração das velocidades nas direções X e Y (linhas tracejada e contínua) ao mesmo tempo em que se aplica torque apenas no eixo Z (traço +), até os 35s.

A partir de então aplica-se torque no eixo X (tracejado) e, depois, no eixo Y (linha contínua). Depois tem-se novos acionamentos dos controles nos eixos X, Y, X e Y, conforme figura 5.2, abaixo. A amplitude dos torques em cada um dos eixos é diferente, assim como apresentados nessa figura, pois os ângulos dos propulsores não eram simétricos em relação aos eixos principais de inércia do veículo.

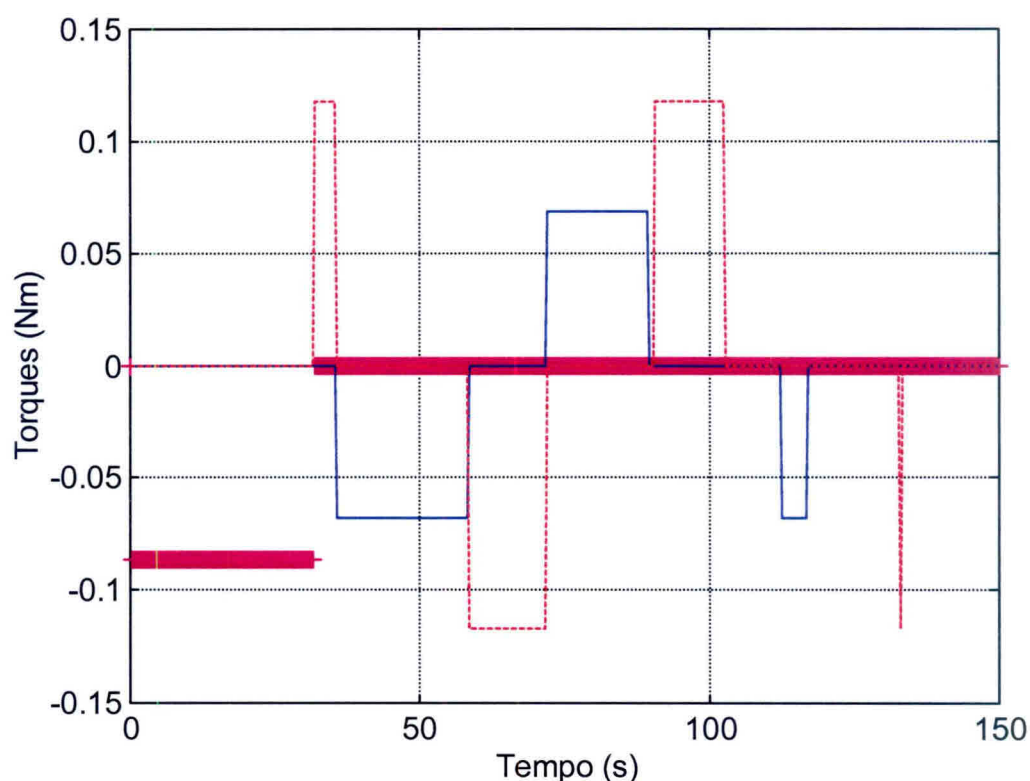


Figura 5.2 - Gráfico dos Torques aplicados.

Como o controle tem um limite físico mínimo de atuação e não decresce linearmente para zero, a estabilização da plataforma caminha para um ciclo limite. Não se apresenta uma análise desse aspecto no presente trabalho mas considera-se apenas que no ciclo limite, quando este é atingido, que a plataforma esteja na condição desejada de estabilidade.

Os resultados das simulações mostram que é possível controlar a PSO com um intervalo de discretização da ordem de meio segundo com uma lei de controle simples, com um ou com dois níveis de atuação, levando a PSO à condição de estabilidade. Foram obtidos resultados em que as velocidades angulares nos 3 eixos ficaram abaixo

de 0.1 rad/s, nos 3 eixos.

Num caso de uma nova PSO, a melhora de desempenho no início da manobra poderia ser obtida com o uso de um dispositivo de iô-iô, embora esse não fosse o objetivo desta plataforma e desta simulação.

O grau de realismo da simulação poderia ser incrementado muitas vezes com a utilização da Mesa de Mancal a Ar em 3 eixos, um sistema de estabilização baseado em sensores inerciais em 3 eixos, computador de bordo e um conjunto de propulsores a jatos de gás frio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MILANI, P. G.; MARTINS NETO, A. F.; LOPES, R. V. da F.; SOUZA, P. N. de; PALEROSI, ^a C.; DURÃO, O.; CARRARA, V.; RICCI, M. C.; FONSECA, I. M. da; KUGA, H. K.. **Uma apresentação dos sistemas, equipamentos, recursos e estudos em guiagem e controle desenvolvidos na divisão de mecânica espacial e controle - DMC do inpe (versão 1)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. 101 p. (INPE-10119-RPQ/246).

SAKURAGUI, R. R. M.; ROSA, W. R. F.; MILANI, P. G.. **Descricao do software da interface PC-C (PC - Simulador contraves)**. Sao Jose dos Campos: INPE, 1997. 31 p. (INPE-6380-MAN/014).

ROSA, W. R. F.; SAKURAGUI, R. R. M.; MILANI, P. G.. **Descrição do hardware da interface PC - simulador contraves**. São José dos Campos: INPE, 1997. 23 p. (INPE-6379-MAN/013).

SILVA, W. C. C. da ; MILANI, P. G.. Stabilization of a space vehicle using the sign of angular velocity sensors and gas jets as thrusters. In: KUGA, Hélio Koiti (Ed.). **Advances in space dynamics 4: celestial mechanics and astronautics**. São José dos Campos: INPE, 2004. p. 171-178. ISBN 85-17-00012-9. Publicado como: INPE-11296-PRE/6733.

SILVA, S.; MILANI, P. G.. **Descrição do software da interface PC-C para Linux**. São José Campos: INPE, 2006. 32 p..

MILANI, P. G.. A new architetur for the simulation and testing of satellite attitude and orbit control systems: hardware and sotware description. In: WORLD CONGRESS OF IFAC, 12., 1993, Sidney. Proceedings ...Sidney, 1993, Vol V, p. 161-164.

MILANI, P. G.. **Simulação em tempo real de uma plataforma estabilizada em 3 eixos**. São José dos Campos: INPE, 2006. 11 p..