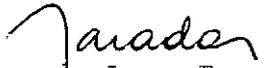
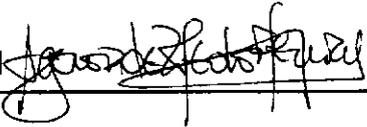


1. Publicação nº <i>INPE-3174-RPE/459</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1984</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC/DGC</i>	Programa <i>CONTAT</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CONTROLE DE ATITUDE E DE ÓRBITA CONTROLE TÉRMICO SIMULAÇÃO DIGITAL LABORATÓRIO - IMPLANTAÇÃO, ORGANIZAÇÃO, EQUIPAMENTOS</i>			
7. C.D.U.: <i>629.7.062.2:629.7.076.6</i>			
8. Título <i>INPE-3174-RPE/459</i>		10. Páginas: <i>87</i>	
OBJETIVOS, ATIVIDADES E NECESSIDADES DOS LABORATÓRIOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL, DE SIMULAÇÃO FÍSICA DE SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE E DE ÓRBITA E DE CONTROLE TÉRMICO DO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA ESPACIAL E CONTROLE		11. Última página: <i>80</i>	
		12. Revisada por  <i>Atair Rios Neto</i>	
9. Autoria <i>Agenor de Toledo Fleury Valcir Orlando Olavo Bueno de Oliveira Filho</i>		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada Diretor Geral</i>	
Assinatura responsável 			
14. Resumo/Notas <i>O presente relatório tem por finalidades apresentar os objetivos, descrever as atividades e estabelecer as necessidades ligadas ao Laboratório de Simulação Digital, ao Laboratório de Simulação Física dos Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita e ao Laboratório de Controle Térmico ora em implantação no Departamento de Mecânica Espacial e Controle do INPE. Cada um desses laboratórios apresenta características próprias de funcionamento, destacando-se o Laboratório de Simulação Digital como núcleo básico de origem e apoio às atividades das outras áreas. O relatório analisa sucessivamente as características, os testes de desenvolvimento e/ou qualificação que devem ser realizados e as configurações de ensaio hoje consagradas nos principais centros de engenharia aeroespacial, relativas a cada um dos laboratórios. Levando em conta os requisitos dos projetos dos satélites da MECB, o atual estágio de desenvolvimento do Departamento e as considerações anteriores, são estabelecidas as configurações, em termos de equipamentos, e definidos os objetivos experimentais, a curto e médio prazos, para que os laboratórios possam atender, da melhor maneira, as áreas de desenvolvimento hoje sob responsabilidade do Departamento de Mecânica Espacial e Controle.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

The main purpose of this report is to present objectives, activities and needs associated to the Digital Simulation, the Attitude and Orbit Control Systems and the Thermal Control Laboratories now in implementation phase in INPE - Department of Space Mechanics and Control. Despite the distinct characteristics involved with each of these laboratories, it is pointed out that the Digital Simulation Laboratory plays a fundamental role as the initial step for the activities in the other areas and also as the basic support even when the laboratories are fully operational. This report analyses sequentially characteristics, development and/or qualification tests to be performed and available equipment configurations for each of the laboratories. Using this analysis and bearing in mind the constraints imposed by MECB satellite projects and the real development stage of the Department, objectives for short and medium terms are defined. Basic configurations are proposed for all laboratories, relative to the equipments they will need in order to satisfy the requirements associated to the projects under the Space Mechanics and Control Department responsibility.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Objetivos	1
1.2 - Organização do laboratório do DMC	2
1.2.1 - Laboratório de Simulação Digital (LSD)	2
1.2.2 - Laboratório de Simulação Física de Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita (LSCAO)	3
1.2.3 - Laboratório de Controle Térmico (LCT)	6
1.2.4 - Laboratório de Estruturas Espaciais	7
1.3 - Tipos de teste de aplicação no laboratório do DMC	9
1.3.1 - Simulação física do sistema de controle de atitude e de órbita	10
1.3.2 - Simulação digital	17
1.3.3 - Laboratório de Controle Térmico	19
<u>CAPÍTULO 2 - LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO DIGITAL</u>	23
2.1 - Necessidades de simulação digital	23
2.2 - Requisitos básicos do sistema de computação	25
2.3 - Análise das opções disponíveis	28
2.3.1 - Uso de um computador analógico	29
2.3.2 - Uso de computador digital dedicado	34
2.3.3 - Uso de um processador vetorial	38
2.3.4 - Computador hospedeiro	42
2.3.5 - Sistema de desenvolvimento de microprocessadores	42
2.4 - Configuração proposta	44
<u>CAPÍTULO 3 - LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO FÍSICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE E DE ÓRBITA</u>	47
3.1 - Projeto e testes de um sistema de controle de órbita e de atitude	47
3.2 - Análise de alternativas	50
3.2.1 - Testes estáticos em malha fechada	52
3.2.2 - Testes com mesas servocontroladas	53

	<u>Pág.</u>
3.2.3 - Testes usando mancal esférico a ar	57
3.3 - Configuração proposta	59
<u>CAPÍTULO 4 - LABORATÓRIO DE CONTROLE TÉRMICO</u>	69
4.1 - Necessidades do Laboratório de Controle Térmico	69
4.2 - Análise dos equipamentos necessários	70
4.2.1 - Câmaras vácuo-térmicas	70
4.2.2 - Absortímetro ou refletômetro	71
4.2.3 - Emissímetro	74
4.2.4 - Calorímetro	74
4.2.5 - Medidor de camadas	74
4.2.6 - Laboratório de pintura	74
4.3 - Projetos a serem desenvolvidos	74
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u>	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Estrutura de um computador híbrido para simulações de sistemas dinâmicos	30
2.2 - Diagrama de blocos do AD-10	35
2.3 - Diagrama de um processador vetorial FPS	39
3.1 - Diagrama de blocos das tarefas relativas a projeto, desenvolvimento e teste de um SCAO	48
3.2 - Teste estático em malha fechada	53
3.3 - Teste dinâmico em malha fechada em mesa com 3 eixos	55
3.4 - Teste dinâmico em malha fechada com mancal esférico a ar ..	58
3.5 - Teste estático em malha fechada	62
3.6 - Teste estático modular com a eletrônica dos componentes na malha	63
3.7 - Teste dinâmico em malha fechada	64
4.1 - Câmara térmica de 250 ℓ	72
4.2 - Esquema do sistema de vácuo da Câmara Térmica de 250 ℓ	73

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - OBJETIVOS

Este relatório tem por finalidade estabelecer as necessidades em termos de equipamentos e descrever as atividades associadas ao Laboratório de Simulação Física de Sistemas de Controle de Órbita e de Atitude (LSCAO), ao Laboratório de Simulação Digital (LSD) e ao Laboratório de Controle Térmico (LCT) ora em implantação no Departamento de Mecânica Espacial e Controle (DMC) do INPE.

A criação do DMC dentro do INPE, em 1982, englobou três divisões - Guiagem e Controle, Dinâmica Orbital e Estrutura e Controle Térmico - cada qual com diferentes necessidades em termos de projetos experimentais. Tal fato impôs a necessidade da criação do Laboratório do DMC para coordenar as atividades experimentais dentro do âmbito das suas atribuições.

O Laboratório do DMC se propõe ao desenvolvimento e, quando pertinente, qualificação de subsistemas para uso na Missão Espacial Completa Brasileira e outras missões que por ventura o INPE seja encarregado da condução, bem como se propõe à importantíssima função de qualificação de recursos humanos na área experimental.

De maneira a poder atender satisfatoriamente às necessidades das três Divisões, o Laboratório do DMC deve contar com recursos razoáveis em termos de equipamentos, instalações e pessoal técnico. A filosofia que norteia sua implantação é a de gradual compra ou projeto e utilização de equipamentos, associada à progressiva capacitação do pessoal técnico envolvido, de modo a se poder satisfazer os requisitos do DMC e da MECB e, ainda, eventualmente, de outros Departamentos do INPE ou de projetos externos à instituição. Essa posição, estabelecida quando das discussões relativas a implantação do primeiro grupo de trabalho

(Martins Neto et alii, 1982), o de Simulação Física de Controle de Atitude e de Órbita, é seguida quando da definição de qualquer novo grupo dentro do Laboratório. Assim, O Laboratório do DMC conta atualmente com três grupos em plena atividade na área experimental enquanto o quarto grupo, mais especificamente o de Estruturas, encontra-se em estágio de implantação.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DO DMC

As atividades do Laboratório do DMC estão divididas em quatro áreas, todas voltadas ao objetivo prioritário de atendimento à Missão Espacial Completa Brasileira, a saber:

1.2.1 - LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO DIGITAL (LSD)

A tarefa fundamental do grupo envolvido com o Laboratório de Simulação Digital é prover os meios computacionais necessários, a nível de "software" e "hardware", para as atividades do Laboratório do DMC. Essas atividades, em certos aspectos, se confundem com as próprias necessidades do Departamento no sentido de que a separação entre as partes experimental e teórica é muito tênue.

O Laboratório de Simulação Digital deverá, quando plenamente operacional, suprir as diversas tendências existentes nas várias atividades do Departamento e que podem ser caracterizadas por:

- Alta velocidade de processamento necessária para simulação em tempo real, desde a puramente digital até a física, onde acoplado aos diversos equipamentos de teste de sistemas de controle de atitude, o sistema computacional comanda todos os movimentos.
- Grande capacidade de armazenamento necessária para simulações no desenvolvimento do projeto térmico e do projeto estrutural.
- Necessidade de aquisição de dados para interpretação dos diversos experimentos.

Por razões impostas pela simulação em tempo real, o Laboratório de Simulação Digital deve ser colocado o mais próximo possível do Laboratório de Simulação Física de Controle de Atitude e de Órbita, já que, para atender a norma IEEE-488, o sistema de computação deverá estar suficientemente próximo dos equipamentos com os quais tem interfaceamento, minimizando os problemas de ruídos nas linhas e permitindo altas taxas de entrada e saída de dados.

O Laboratório de Simulação Digital deverá suportar, também, toda a atividade de desenvolvimento do "software" de Guiagem e Controle não ligadas diretamente aos ensaios experimentais. Por razões que se tornarão claras mais adiante, o "software" a ser desenvolvido deve ter boas características de modularidade e portabilidade.

1.2.2 - LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO FÍSICA DE SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE E DE ÓRBITA (LSCAO)

Tem como atribuição o desenvolvimento, a construção e a qualificação de sistemas de controle de atitude e de órbita que deverão ser utilizados nos satélites a serem lançados durante a Missão Espacial Completa bem como de quaisquer outros veículos que venham a ser realizados pelo INPE.

Devido à necessidade de qualificação do subsistema de controle, visto que tradicionalmente esse subsistema só é integrado ao satélite quando dos testes ambientais no modelo de qualificação, o Laboratório de Controle de Atitude e de Órbita exige uma série de equipamentos dedicados, extremamente precisos e, em função disso, muito caros. Menos por necessidade desses equipamentos de teste e mais pelos componentes do sistema de controle de atitude, os trabalhos de desenvolvimento e qualificação devem ser conduzidos em ambientes especiais quanto à isolamento de efeitos externos (iluminação, vibrações, campos magnéticos, etc) e quanto à limpeza do ar.

Normalmente o desenvolvimento e a qualificação de um sub

sistema de controle de atitude e de órbita envolve vários passos, sendo que, no âmbito do Laboratório de Simulação Física propriamente dito, existem diferentes maneiras de se conduzir os testes. Quatro tipos de testes estão hoje em dia consagrados como maneiras de qualificar SCAO para satélites:

- a) Simulação em computador digital.
- b) Testes estáticos em malha fechada (static closed loop tests).
- c) Testes dinâmicos em malha fechada (dynamic closed loop tests).
- d) Testes dinâmicos em simuladores com mancal esférico a ar.

Os tipos de teste estão listados na ordem decrescente de envolvimento com um sistema de computação, isto é, os testes podem evoluir desde puro "software" de simulação (a) até a presença física total do sistema de controle (d) em que o computador é usado apenas como elemento de ligação entre o sistema em ensaio e o Laboratório. Admitindo que o sistema de controle de atitude possa ser separado em sensores, lógica de controle e "software" de voo, a Tabela 1.1 resume a presença de cada parte nos diversos tipos de teste.

TABELA 1.1

PARTICIPAÇÃO DAS SUBDIVISÕES DE UM SCAO
NOS DIVERSOS TIPOS DE TESTE

PARTE DO SCAO TIPO DE TESTE	SENSORES	LÓGICA DE CONTROLE	ATUADORES	"SOFTWARE" DE VÔO
SIMULAÇÃO DIGITAL	NÃO	NÃO	NÃO	SIM

(continua)

Tabela 1.1 - conclusão

PARTE DO SCAO	SENSORES	LÓGICA DE CONTROLE	ATUADORES	"SOFTWARE" DE VÔO
TIPO DE TESTE				
TESTES ESTÁTICOS	POSSÍVEL APENAS PARTE ELETRÔNICA	SIM	POSSÍVEL APENAS PARTE ELETRÔNICA	SIM
TESTES DINÂMICOS	SIM	SIM	POSSÍVEL APENAS PARTE ELETRÔNICA	SIM
MANCAL ESFÉRICO	SIM	SIM	SIM	SIM

Atualmente os três primeiros tipos de teste são utilizados mais frequentemente na qualificação dos sistemas de controle de atitude, ficando os testes com simuladores de mancal esférico a ar, em virtude da complexidade da sua implantação, reservados à qualificação de componentes (sensores ou atuadores). Em função disso, o Laboratório de Simulação Física de Controle de Atitude e de Órbita, quando operacional, será capaz de, apoiado em um bom sistema de computação digital, realizar os três primeiros tipos de teste (a, b, c). O Laboratório de Simulação Física deverá contar com um simulador servo assistido com 3 graus de liberdade, simulador solar e simulador da Terra para satélites a baixa altitude, conjunto necessário para realização dos mais complexos testes de manobra ou de apontamento dos satélites especificados para a MECB. Além desses recursos, o Laboratório deve contar com outros pequenos dispositivos (bloco sísmico para sistemas inerciais, bancadas de alinhamento, por exemplo) e equipamentos para poder realizar testes estáticos. O Grupo de Controle de Órbita e de Atitude, por outro lado, tem desenvolvido projetos para atender as necessidades restantes sem ter de recorrer a compras no exterior, ao mesmo tempo em que desenvolve capacitação para realização dos testes mais elaborados.

O Laboratório de Simulação Física de Sistemas de Controle de Atitude e Órbita tem trabalhado em colaboração com a Divisão de Sis

temas Sensores/DTE, órgão responsável pela confecção de sensores a serem utilizados na MECB, e com o Departamento de Suprimento de Energia, que vem desenvolvendo motores de jatos de gás (frio e quente) para controle de atitude. A integração de esforços dentro do objetivo comum do projeto é considerada de vital importância para consolidação do trabalho no Laboratório do DMC.

1.2.3 - LABORATÓRIO DE CONTROLE TÉRMICO (LCT)

O grupo envolvido com o Laboratório de Controle Térmico do DMC tem por incumbência o desenvolvimento experimental dos projetos que visam garantir o correto funcionamento do satélite, sob o ponto de vista térmico, na sua interação com o ambiente espacial. É importante observar que testes de qualificação do subsistema citado devem ser realizados após a integração física do satélite em equipamentos especialmente projetados para essa finalidade, ficando, então, a cargo do DMC o projeto, o desenvolvimento e a comprovação experimental das soluções propostas. Os ensaios de qualificação serão desenvolvidos no Laboratório de Testes Ambientais do INPE.

Dentro do esquema do Laboratório do DMC, o Grupo de Controle Térmico está empenhado em trabalhos de desenvolvimento que permitam a capacitação técnica necessária para acompanhamento dos projetos e testes térmicos. Com relação às necessidades da Missão Espacial Completa Brasileira, os satélites de Coleta de Dados não terão, a princípio, nenhum dispositivo para controle térmico ativo, enquanto os satélites de Sensoreamento Remoto provavelmente deverão estar equipados com tais dispositivos. Dessa forma, configura-se a necessidade de se contar com uma área de desenvolvimento térmico em que, para os satélites de Coleta de Dados, seja possível a realização de ensaios para determinação de coeficientes térmicos e de ensaios com maquetes e em que, para os satélites de Sensoreamento Remoto, se inclua também o desenvolvimento de "hardware" (aquecedores, persianas, "heat-pipes", etc). Em ambos os casos a qualificação do "software" de projeto deve ser também uma preocupação permanente.

Além dos desenvolvimentos específicos ligados diretamente à área, deve ser ressaltado que a solução a ser utilizada depende fundamentalmente das condições de funcionamento dos outros subsistemas, o que implica na possibilidade de alteração parcial ou total do projeto térmico durante as diversas fases de desenvolvimento de um satélite.

Levando em conta todos esses pontos o Laboratório de Controle Térmico deve estar pronto a atender as necessidades relativas a:

- a) Testes de Simulação Espacial, onde se entende que os componentes ou subsistemas são expostos a ambientes que reproduzem aproximadamente as condições que o satélite irá enfrentar quando em operação. A realização de tais testes pressupõe obtenção de ambientes de alto vácuo (da ordem de 10^{-5} Torr) e simulação das condições de corpo negro a baixas temperaturas (aproximadamente 77°K), o que pode ser conseguido através do uso em câmaras vácuo-térmicas.
- b) Medição e Montagem de Experimentos, compreendendo a medição de propriedades termoóticas de materiais e revestimentos, como absorvidades, refletividades, emissividades, espessuras de camadas e outras.
- c) Obtenção das Propriedades Termoóticas definidas em projeto, compreendendo, nesse caso, o desenvolvimento de tecnologias apropriadas de aplicação de revestimentos que permitam compatibilizar as propriedades termoóticas obtidas experimentalmente com aquelas necessárias para perfeito funcionamento dos diversos componentes do satélite.

1.2.4 - LABORATÓRIO DE ESTRUTURAS ESPACIAIS

O Laboratório de Estruturas Espaciais tem por objetivos a construção e o desenvolvimento experimental, nos seus diversos níveis, das estruturas que serão utilizadas nos satélites da Missão Espacial Completa Brasileira.

Para efeito de estudo e desenvolvimento das estruturas que serão utilizadas tanto no satélite de Coleta de Dados como no satélite de Sensoriamento Remoto, os diversos componentes estruturais estão classificados em três níveis de acordo com a solicitação de esforços em cada parte. Esses níveis são:

- Estrutura Primária: Cilindros, Painéis Horizontais;
- Estrutura Secundária: Painéis Laterais, Painel Geocêntrico e Painel Antigeocêntrico;
- Estrutura Terciária: Ligações e Reforços.

Testes estruturais em satélites são divididos em duas categorias:

- Ensaio dinâmico;
- Ensaio estático.

Ensaio dinâmico exige o uso de geradores eletromagnéticos de vibração e todo o equipamento e instrumentação associados. Para o grupo de Estruturas, a exceção de eventuais ensaios de componentes, o interesse está centrado nos testes que serão realizados com maquetes estruturais ou protótipos, a nível de satélite integrado, utilizando as instalações do prédio de Integração e Testes destinadas a tal finalidade.

Com relação aos ensaios estáticos, testes com maquetes estruturais devem ser conduzidos em laboratórios fora do INPE, uma vez que o parque industrial de São José dos Campos conta com instalações de excelente padrão para isso. Exemplos são a EMBRAER e o CTA. No entanto, o Laboratório de Estruturas deverá contar com equipamentos para ensaios estáticos a nível das estruturas secundária e terciária que são de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto. Dessa maneira, o

grupo de Estruturas vem se capacitando para definição e implantação de recursos na área de ensaios estáticos estruturais, onde serão utilizados dispositivos do tipo máquina de tração. Este tipo de equipamento necessita a construção de uma pequena laje de reação para suporte do dispositivo em teste, sendo que, pelo fato de apenas pequenas peças serem ensaiadas, a laje pode ser construída horizontal ou verticalmente. Serão necessários também instrumentos de medição como, por exemplo, strain-gages, pontes, células de carga, LVDT's, registradores, para realização dos testes estáticos previstos.

O grupo de Estruturas não antevê necessidade de ensaios de fotoelasticidade dentro do Laboratório do DMC, uma vez que esse tipo de teste, se necessário, pode ser também encomendado a outras instituições em São José dos Campos.

Em função de ser a estrutura um subsistema cujo desenvolvimento está vinculado a outros subsistemas do satélite, a necessidade de ensaios de acompanhamento não pode ser relegada a segundo plano sob pena de se comprometer cronogramas. Dessa forma, nas necessidades do Laboratório do DMC, estão previstos um mínimo de equipamentos e instalações na área de Estruturas para um bom desenvolvimento dos trabalhos.

1.3 - TIPOS DE TESTE DE APLICAÇÃO NO LABORATÓRIO DO DMC

Em virtude da variedade de trabalhos a serem realizados, ou seja, desenvolvimento dos subsistemas de controle térmico e estruturas e desenvolvimento e qualificação do subsistema de controle de órbita e de atitude, numerosos testes envolvendo diversas metodologias deverão ser aplicados em laboratório.

Os testes descritos de forma condensada na sequência são os principais ensaios a serem realizados sob responsabilidade do DMC de modo a permitir uma evolução harmoniosa entre o projeto e a prática. Não se pode pretender colocar uma lista conclusiva visto que, logicamente, testes de desenvolvimento são, sob vários aspectos, ditados pelas necessidades ao longo do projeto.

Dessa maneira, os ensaios descritos estão diretamente relacionados com as soluções propostas para os tipos de satélite a serem construídos durante a MECB, ou seja, os satélites de Coleta de Dados (S1/S2) e os satélites de Sensoriamento Remoto (S3/S4).

1.3.1 - SIMULAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA DE CONTROLE DE ATITUDE E DE ÓRBITA

Sob o ponto de vista de Controle de Atitude e de Órbita, as soluções propostas para os satélites de Coleta de Dados e de Sensoriamento Remoto são bastante distintas. As atividades de projeto e desenvolvimento desse subsistema se encontram dentro do projeto CONTAT, sob a coordenação do DMC.

Os satélites de Coleta de Dados não disporão de qualquer equipamento para controle da órbita, enquanto o controle de atitude será feito através de um sistema de controle passivo. No caso, o Sistema de Controle de Atitude deverá desempenhar as seguintes funções:

- Desencadeamento, através da Minuteria, dos eventos relativos ao controle de atitude que devem ocorrer na fase inicial de pós-injeção em órbita do satélite;
- Acionamento dos meios para a liberação do ioiô;
- Diminuição, através do ioiô, da energia cinética de rotação em torno do eixo longitudinal do satélite;
- Amortecimento, através de Barras Ferromagnéticas, de movimentos residuais;
- Medição, através de sensores solares e magnéticos, da atitude do satélite;
- Esticamento do Mastro Estabilizador;
- Estabilização, através do Mastro Estabilizador, da atitude em torno da vertical local.

Fica, então, caracterizada a estabilização através de gradiente de gravidade, usando um mastro estabilizador, e da interação com o campo magnético da Terra, com o emprego de barras ferromagnéticas. O dispositivo ioiô é acionado apenas para diminuição da velocidade de rotação do satélite, que é injetado em órbita a cerca de 180 rpm e tem a rotação reduzida a cerca de 5 rpm, sempre em torno do eixo longitudinal, pelo emprego do ioiô. As barras ferromagnéticas se encarregam de reduzir essa rotação de 5 rpm a uma rotação residual em torno de zero quando então o mastro estabilizador é acionado para garantir estabilização em torno da vertical local. A determinação da atitude é feita com o emprego de sensores solares e sensores magnéticos.

Dentro do âmbito do projeto CONTAT, tem-se, então, atividades ligadas aos seguintes subsistemas:

- Minuteria;
- Dispositivo Ioiô;
- Barras Ferromagnéticas;
- Sensores Solares;
- Sensores Magnéticos;
- Mastro Estabilizador.

Dentre esses subsistemas, sensores magnéticos e o mastro estabilizador serão encomendados a fabricantes estrangeiros, e deverão ser entregues já qualificados para vôo, dispensando dessa forma testes de desenvolvimento. Testes de aceitação deverão ser realizados nas instalações dos fornecedores, contando com acompanhamento de pessoal do INPE. Ainda com relação a esses componentes, ensaios rigorosos de funcionamento serão executados quando da integração do satélite, nos testes ambientais e nos testes pré-lançamento. Não há justificativa para testes de desenvolvimento com o mastro estabilizador por ser um sistema que

terá utilização exclusiva nos satélites de Coleta de Dados e que exigiria investimentos altíssimos para construção de uma bancada de testes. Quanto aos sensores magnéticos, há necessidade de incluí-los em pelo menos um experimento, mesmo que sejam comprados com qualificação espacial, como se verá a seguir.

Os outros subsistemas estão sendo desenvolvidos dentro do DMC com exceção dos sensores solares cujo projeto está vinculado ao Departamento de Aplicações Tecnológicas (DTE). No entanto, os testes de qualificação do conjunto dos 7 sensores solares e sua integração são também de responsabilidade do DMC.

Assim sendo, deve-se prever a necessidade de realização dos seguintes testes:

a) Ensaio do Conjunto de Sensores Solares

Finalidade: - Confirmação do desempenho dos sensores;
- Teste dos circuitos eletrônicos associados.

Montagem : - Teste estático do conjunto;
- Eventual montagem em plataforma com 1 ou 2 graus de liberdade e uso de um simulador solar externo.

b) Determinação da Interferência entre Sensores Magnéticos e Barras Ferromagnéticas

Finalidade: - Quantificar as medidas dos sensores magnéticos na presença do campo gerado pelas barras.

Montagem : - Ainda em estudo a instalação de equipamentos no Laboratório do DMC ou a encomenda dos testes a laboratórios estrangeiros;
- Configuração provável: montagem do conjunto de barras e sensores numa bobina de Helmholtz que produz campo magnético conhecido.

c) Caracterização das Barras Ferromagnéticas

Finalidade: - Determinação dos momentos gerados pelas barras

quando imersos num campo magnético de intensidade conhecida.

Montagem : - Teste estático;
- Teste dinâmico com conjunto de barras preso a uma plataforma móvel.

d) Desenvolvimento do Sistema de Minuteria (Sequenciador de Eventos)

Finalidade: - Qualificação da Minuteria;
- Simulação de falhas.

Montagem : - Teste dos circuitos eletrônicos sem a presença dos dispositivos pirotécnicos;
- Inclusão da telemetria redundante para simulação de falhas.

e) Ensaios com o Dispositivo Ioiô

Finalidade: - Qualificação dos componentes do sistema ioiô;
- Qualificação do sistema como um todo.

Montagem : - Testes estruturais estáticos e dinâmicos dos componentes abaixo:
. Cabos de aço;
. Ponteiras;
. Suportes de fixação;
. Guias;
. Ganchos e contraganchos;
. Dispositivo de acionamento que substitua os pirotécnicos.
- Testes estruturais do conjunto que inclua a necessidade do cone de acoplamento no teste;
- Simulação física do conjunto em escala;
- Teste do conjunto ligado a cone de acoplamento, terceiro estágio e satélite (maquetes estruturais) quando da integração do satélite (condução do teste sob responsabilidade do DIT).

Como observação, cabe ressaltar que os testes estruturais dinâmicos a nível de componentes ou subsistemas serão realizados em equipamentos apropriados no Laboratório de Integração e Testes, cabendo ao pessoal do DMC a definição e o acompanhamento dos testes.

Os satélites de Sensoriamento Remoto deverão incorporar praticamente o estado da arte em termos de soluções para Controle de Órbita e de Atitude. As exigências de apontamento necessárias para operação da câmara, isto é (Dossiê Técnico do Satélite, Documento nº 5):

- Erros de apontamento em rolamento, guiagem e arfagem inferiores a 0.5° ;
- Erros em velocidades de rolamento, arfagem e guinada inferiores a $6,5 \times 10^{-3}$ $^{\circ}/s$, $6,5 \times 10^{-3}$ $^{\circ}/s$ e 10^{-2} $^{\circ}/s$, respectivamente,

são bastante rigorosas em termos de projeto.

Para poder atender a esses requisitos o sistema deverá ser composto por um bloco girométrico, sensores de horizonte terrestre e sensores solares, rodas de reação, bobinas magnéticas para dessaturação das rodas e conjunto de jatos de gás quente a monopropelente, numa configuração de controle ativo em 3 eixos. O controle da órbita deverá ser feito também por jatos de gás quente a monopropelente, e todo o sistema de controle de atitude e de órbita deverá ser comandado a partir de uma unidade central de processamento utilizando microprocessadores.

A sofisticação necessária do sistema de controle de órbita e de atitude para satisfazer os requisitos da missão implica num planejamento muito mais criterioso dos testes de desenvolvimento e qualificação do que no caso dos satélites de Coleta de Dados. Embora nem todos os pontos que devam ser abordados estejam plenamente identificados, principalmente no que se refere ao intervalo entre a injeção em órbita e a colocação na órbita final, as manobras de correção e apontamento são, de uma certa forma, padronizadas e devem ser ao menos parcialmente reproduzidas em Laboratório, com o Subsistema de Controle de Atitude inte

grado fisicamente no mais alto nível possível. Tais manobras são, de modo geral:

- Aquisição Grosseira do Sol;
- Aquisição Fina do Sol;
- Aquisição de Terra;
- Aquisição Grosseira de Guinada;
- Aquisição Fina de Guinada;
- Modos Normais de Operação;
- Modos de Reaquisição;
- Modos de Falha do Subistema.

A simulação dessas manobras em laboratório com o sistema integrado visa a qualificação do conjunto e deve ser precedida de um grande número de testes a nível de componentes e partes do sistema. Dessa maneira, pode-se antever a necessidade de realização de ensaios que levem à qualificação de componentes ou "pacotes" desses componentes, sejam eles comprados a fornecedores estrangeiros ou desenvolvidos dentro da instituição. Uma análise preliminar dos diversos aspectos envolvidos no projeto do SCAO leva à seguinte proposta de testes:

- a) Desenvolvimento e Caracterização de um Bloco Girométrico.
Finalidade: Integração e levantamento de todas as características de funcionamento de um bloco girométrico construído a partir de componentes estrangeiros.
- b) Desenvolvimento e Caracterização da Eletrônica de Controle de Atitude e de Órbita Usando Microprocessador.

Finalidade: Construção, desenvolvimento e qualificação do sistema acima.

- c) Integração do Conjunto de Sensores Solares e Sensores de Horizonte Terrestre.

Finalidade: Integração e levantamento das características de funcionamento do conjunto acima a partir de componentes qualificados.

- d) Integração do Conjunto de Rodas de Reação e Bobinas Magnéticas.

Finalidade: A mesma descrita no item anterior.

- e) Simulação Parcial do Conjunto de Jatos de Gás Quente.

Finalidade: Integração, a menos de motores (câmaras de combustão e bocais), e levantamento de características de funcionamento do sistema.

Além dos trabalhos envolvendo o SCAO totalmente integrado ou de partes do sistema, como descrito acima, deve-se levar em conta que outros trabalhos de desenvolvimento tem de ser conduzidos, ou a nível de componentes ou a nível de capacitação do Laboratório, para permitir a realização dos testes mais sofisticados. Esta tem sido a linha de conduta no Laboratório de Simulação Física, com o desenvolvimento de projetos relativamente simples, em termos de componentes e equipamentos, visando sempre atender às exigências mais restritivas apenas após um período de maturação, onde as atividades para as quais os grupos envolvidos já possuem a experiência necessária possam ser completadas a contento.

Os meios físicos requeridos para os testes descritos nesse item são objeto de discussão nos Capítulos 2 e 3 deste relatório. Em particular o Capítulo 3 ressalta o papel primordial de um bom sistema de conjunto de computação digital nos testes de desenvolvimento de um sistema de Controle de Atitude e de Órbita.

1.3.2 - SIMULAÇÃO DIGITAL

Como já colocado, as atividades de projeto, desenvolvimento e qualificação de sistemas de Controle de Atitude e de Órbita de satélites exigem a presença de um Laboratório de Simulação Digital, pois todos os equipamentos não incluídos na malha de um determinado teste devem ser substituídos pelo computador. Além disso, o LSD deverá se prestar às atividades preliminares de projeto tanto do SCAO como do Sistema de Controle Térmico e do Sistema de Estrutura e às atividades de desenvolvimento e testes dos dois últimos.

Os trabalhos de simulação nas áreas dos três subsistemas dos satélites da MECB sob responsabilidade do DMC foram iniciadas há já longo tempo utilizando o computador central do INPE. No entanto, em vista tanto das necessidades específicas de cada projeto como da saturação quase total do sistema central do INPE, a criação do Laboratório de Simulação Digital passa a ser de importância fundamental.

Pelo planejamento atual, a implantação do LSD terá a curto prazo as seguintes atribuições de apoio aos testes no Laboratório do DMC, no que se refere aos satélites Coleta de Dados:

- a) Desenvolvimento de Modelos Matemáticos para:
 - Dispositivo Ioiô;
 - Sensores e Barras Magnéticas;
 - Mastro Estabilizador incluindo Efeitos Térmicos;
 - Minuteria.
- b) Simulação da Determinação de Atitude usando Sensores Solares e Magnéticos.
- c) Desenvolvimento dos Modelos Matemáticos de Controle Térmico incluindo os diversos tipos de revestimento.
- d) Identificação da Necessidade de uso de Dispositivos de Controle Térmico Ativo.

- e) Desenvolvimento de Modelos Matemáticos Estruturais a Níveis de Estrutura Primária, Secundária ou Terciária.
- f) Análise dos Resultados dos Testes envolvendo "hardware".

No entanto, o papel primordial representado pelo sistema de computação sobressai quando de uma análise mesmo que incompleta das tarefas reservadas para os projetos associados aos Satélites de Sensoriamento Remoto. A sequência apresentada mostra os grandes blocos que deverão ser esmiuçados ao longo do desenvolvimento dos projetos dos subsistemas dos quais o DMC está encarregado:

- a) Estudo de Configurações dos Sistemas de Controle de Atitude, Controle Térmico e Estrutural;
- b) Desenvolvimento do "Software" de Teste para o Sistema de Controle de Órbita e de Atitude;
- c) Desenvolvimento e Qualificação do "Software" de Voo;
- d) Substituição, através de modelos matemáticos confiáveis, dos equipamentos não envolvidos nas malhas de testes de simulação física;
- e) Controle, em tempo real, dos diversos dispositivos dedicados de testes dos SCAO, como simuladores celestes, mesas servoassistidas e outros;
- f) Geração e organização, em tempo real, de todo sistema de entrada e saída dos testes de SCAO;
- g) Testes estáticos e dinâmicos em malha fechada do Sistema de Controle de Órbita e Atitude;
- h) Interpretação e Análise dos Resultados obtidos nos testes.

O detalhamento de cada um desses blocos certamente consumirá longo tempo das equipes envolvidas pois a quantidade de trabalho embutida em cada bloco é muito grande. Apesar de não se entrar em detalhes, as tarefas estão colocadas numa sequência ideal relativa ao início de seus desenvolvimentos.

1.3.3 - LABORATÓRIO DE CONTROLE TÉRMICO

No que se refere ao Subsistema de Controle Térmico também as soluções propostas para os satélites de Coleta de Dados e Satélites de Sensoreamento Remoto são bastante distintas. Embora apenas em fases mais adiantadas do projeto se possa definitivamente confirmar as orientações dadas ao projeto, os satélites de Coleta de Dados não deverão contar com dispositivos de controle térmico ativo. Por outro lado, os requisitos da missão de Sensoreamento Remoto são muito mais estreitos e permitem antecipar a necessidade de controle ativo para os satélites S3 e S4.

Dessa forma, a especificação do Controle Térmico referente aos satélites de Coleta de Dados prevê que para desempenhar sua função de manter os diversos subsistemas do satélite dentro das faixas de temperatura especificadas de funcionamento, as tecnologias associadas aos seguintes componentes devem ser desenvolvidos:

- Revestimentos Térmicos;
- Graxas Térmicas;
- Isolantes Térmicos;
- Sensores de Temperatura;
- Aquecedores Térmicos (se necessários).

Com a preocupação de cobrir todos os possíveis pontos no que se refere ao projeto de Controle Térmico, os testes de desenvolvimen

to do subsistema estão planejados ou já iniciados na seguinte forma:

1. Desenvolvimento de Trabalhos na Área de Medição de Temperaturas
Finalidade: - Fornecer conhecimentos indispensáveis na área de medição de temperatura para utilização nos sensores do satélite e nos outros experimentos.
Montagem : - Medição nos diversos experimentos a serem desenvolvidos pelo grupo.

2. Desenvolvimento de "Hardware" na Área de Simulação Térmica
Finalidade: - Prover os meios necessários de simulação para as maquetes térmicas.
Montagem : - Simulação em câmara térmica com a instrumentação necessária.

3. Determinação e Obtenção de Propriedades Termoópticas para os Revestimentos Térmicos do Satélite
Finalidade: - Caracterização das Propriedades Termoópticas dos diversos revestimentos térmicos empregados no controle térmico a nível de componentes ou do satélite integrado.
Montagem : - Simulação em câmara térmica com a instrumentação necessária;
- Utilização do Laboratório de Pintura, emissímetro, absorvímetro e medidor de espessuras de camadas.

4. Determinação de Resistência Térmica de Contato e de Painéis Sanduiche (Honeycomb)
Finalidade: - Caracterização do acoplamento térmico entre as diversas superfícies em contato e das propriedades térmicas de painéis sanduiche.
Montagem : - Simulação em câmara térmica com a instrumentação necessária.

5. Projeto e Testes de Maquetes Térmicas

Finalidade: - Verificação do projeto térmico e da confiabilidade do "software" de projeto desenvolvido.

Montagem : - Simulação em câmara térmica com a instrumentação necessária.

Os testes de desenvolvimento relativos aos satélites de Sensoriamento Remoto são podem ser planejados quando se conhecer com maior grau de detalhamento as configurações dos outros subsistemas. De qualquer forma, desde já podem ser antecipadas as necessidades de adaptação das tecnologias de controle passivo, adquiridas no projeto dos satélites de Coleta de Dados, para atendimento parcial das exigências dos satélites S3 e S4, bem como a necessidade de grande desenvolvimento de "hardware" para controle ativo.

CAPÍTULO 2

LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO DIGITAL

2.1 - NECESSIDADES DE SIMULAÇÃO DIGITAL

Para que o projeto e implementação dos sistemas de controle de atitude e órbita de satélites artificiais possam ser levados a efeito é de necessidade fundamental que se disponha de um laboratório de simulação digital para desenvolvimento e testes convenientemente equipado e com recursos computacionais capacitados para a simulação em tempo real. Isso significa que os recursos computacionais devem permitir a simulação de um sistema dinâmico complexo, vinculado a requisitos de precisão compatíveis com os vínculos impostos ao sistema real nas várias fases da missão e, apesar disso, possuir características de velocidade de processamento tais que permita reproduzir a dinâmica do sistema nas mesmas taxas de variação de sua operação física real. Essa característica de operação em tempo real da simulação é necessária a fim de que a mesma possa ser efetuada de maneira híbrida no sentido de que possam ser incluídos, na simulação, equipamentos físicos reais operando conjuntamente com o restante do sistema simulado no computador. Isso permite que esses equipamentos possam ser convenientemente desenvolvidos, testados e calibrados em ambiente que reproduz o sistema físico real do qual fazem parte, com o que podem ser colocados em níveis aceitáveis de qualificação e confiabilidade.

Esse tipo de simulação é imprescindível em praticamente todas as fases do projeto e implementação dos subsistemas envolvidos em uma missão espacial. É ferramenta fundamental para:

- desenvolvimento, testes e calibração dos equipamentos;
- desenvolvimento e validação de "software" de aplicação;

- ajustes de parâmetros por tentativa e erro;
- análises de desempenho;
- correções de erros de projeto;
- facilitar o projeto de um sistema tolerante a falhas, isto é, projeto do sistema de tal modo que possíveis falhas em componentes críticos não comprometem o funcionamento global do sistema, aumentando a confiabilidade do mesmo como um todo;
- possibilitar testes intensivos de componentes críticos, em ambientes que simulam as severas condições existentes no espaço, nas quais deverão operar, no sentido de se verificar se esses componentes possuem capacitação para funcionar com desempenho satisfatório, durante toda a vida útil estimada do satélite;
- ajudar no treinamento de operadores para o centro de controle de missões no que se refere ao controle da atitude;
- realizar análises pós-missão.

Em uma missão espacial o aspecto de confiabilidade do sistema de controle é particularmente crítico, pois parte desse sistema, correspondente ao segmento espacial, deverá operar convenientemente durante longo tempo, em um local remoto cujo acesso para manutenção é impossível e num ambiente severo sujeito a grandes variações de temperatura em curtos espaços de tempo. Da operação conveniente do sistema de controle depende o cumprimento dos objetivos finais da missão. O "software", os equipamentos e o sistema como um todo devem ser testados exaustivamente antes do lançamento do satélite. Devido ao alto grau de qualificação requerida, equipamentos para aplicação em missões espaciais são geralmente complexos e de custo elevado. Através do laboratório de simulação digital poder-se-á escolher com critério os equipamentos necessários à implementação do sistema de controle de missões, testar convenientemente

esses equipamentos, evitando erros de escolha, e, em consequência pre
juízos e gastos desnecessários também serão evitados. Um fator ainda
mais importante é que, com o Laboratório de Simulação Digital, será pos
sível o desenvolvimento de equipamentos dentro do INPE, gerando tecno
logia própria e reduzindo a dependência externa.

2.2 - REQUISITOS BÁSICOS DO SISTEMA DE COMPUTAÇÃO

Existe uma série de requisitos específicos para desenvolvi
mentos e testes que devem ser satisfeitos pelo sistema computacional
destinado ao Laboratório de Simulação Digital. No item anterior, alguns
desses requisitos foram citados rapidamente. Essas e outras exigências
serão aqui discutidas com maiores detalhes, visando definir opções de
equipamentos existentes, com capacidade para atendê-los.

Um primeiro requisito refere-se à velocidade de processamen
to. Recursos computacionais para aplicações nessa área devem ser ca
pazes de processar em velocidade suficiente para acompanhar a dinâmica
do sistema simulado em tempo real. Devem permitir a utilização de model
os matemáticos complexos e sofisticados e, ainda assim, manter o pro
cessamento dentro dos necessários requisitos de precisão sem, entretanto,
perder a característica de funcionamento em tempo real. É fundamenta
l que, além dos requisitos de processamento em tempo real, preencham
requisitos de precisão tais que possibilitem a manutenção de um alto
grau de fidelidade do sistema simulado, com a operação do sistema físi
co real. Com isso se consegue criar condições realistas para o desenvol
vimento, testes e calibração de equipamentos, bem como para a vali
dação de "software" de aplicação a ser utilizado na missão espacial.

Deve ser salientado que a precisão de processamento deve
ser mantido a níveis satisfatórios para todas as frequências componentes
da dinâmica do sistema simulado, a fim que se tenha a citada fideli
dade na simulação. Por exemplo, a solução de um sistema de equações di
ferenciais, numericamente, em um computador digital, é obtida de uma for
ma discreta, passo a passo, para vários instantes consecutivos. Em um

dados intervalo de tempo o número de passos necessários para manter a pre ci s ã o dentro de um certo limite de tolerância depende das frequências en vol vi d a s na dinâmica do sistema. Aplicações na área espacial podem pos s uir faixa de frequências cujo valor máximo chega a 1000 Hz (Wolin, 1976). Para que se consiga manter o erro em, por exemplo, 0,1% são necessários pelo menos 20 passos de integração por ciclo de componente de frequência mais alta da dinâmica do sistema. Assim, para que se obtenha 1 segundo de integração dentro desse limite de precisão, são necessários 20000 pas s os de integração. Para que se possa avaliar, para um determinado siste ma dinâmico, a velocidade de computação necessária para a realização des ses 20000 passos de integração em tempo real, utiliza-se, normalmente, a operação ADD como sendo uma operação unitária e as outras operações, como LOAD, STORE, DIVISÃO, MULTIPLICAÇÃO, são normalizadas com respeito a essa operação. Por exemplo, as operações LOAD e STORE são equivalentes à operação ADD e portanto correspondem a uma operação normalizada. A ope ra ç ã o multiplicação equivale a 3 operações ADD's em termos de tempo de processamento, o mesmo ocorrendo com a divisão.

Simulações de mísseis, por exemplo, requerem aproximadamente 30.000 operações normalizadas por passo de integração (Wolin, 1976). Supondo que a componente máxima da dinâmica seja 1000 Hz então, como já foi dito, são necessários 20.000 passos de integração para um segundo de simulação. Com isso, para que se consiga simulação em tempo real com precisão mantida em 0,1 %, devem ser efetuadas em um segundo 30000 (ope ra ç õ e s) x 20000 (passos de integração) ou seja: 600 Moperações/segundo. É óbvio que o número de operações requeridas por passo de integração de p en d e da dimensão e complexibilidade das equações diferenciais do siste ma dinâmico. O programa efetuado para o projeto do Space Shuttle, por exemplo, envolve 60 variáveis dinâmicas com uma frequência máxima de 250 Hz (Catálogo EAI, 1980). No exemplo de testes de qualificação do SCAO do satélite INSAT 1 (Benet, Gamble, 1983), a dinâmica considerada pos s ua frequência máxima de 25 Hz. Considerando-se 20 passos de integração por ciclo para a precisão de 0.1% e supondo 30.000 operações normaliza das por ciclo de integração, verifica-se a necessidade de velocidade de

processamento de 15 Mops normalizadas como um número mínimo razoável para um sistema de computação dedicado a satélites.

Apenas alguns computadores multipropósitos de grande porte existentes atualmente possuem características de velocidade de processamento suficientes para satisfazer tais requisitos, porém operando em sua velocidade máxima limite. Dentre esses computadores, os que possuem maior velocidade são o IBM 370/195 e o CDC 7600 que conseguem processar na taxa de 15 M operações/segundo, ficando na fronteira das necessidades reais de velocidade de processamento para as aplicações nas simulações de interesse (Wolin, 1976; Ilić, 1979).

Um segundo requisito seria a facilidade de comunicação com o mundo real analógico, permitindo em conjunto com a satisfação do requisito de velocidade de processamento, a inclusão de equipamentos físicos na malha de simulação ("hardware in the loop"). Isso significa que os recursos computacionais necessários em um laboratório de simulação devem possuir um número considerável de entradas e saídas analógicas. Com isso se consegue um ambiente favorável ao desenvolvimento e testes de equipamentos.

O terceiro requisito importante diz respeito às facilidades para interação do homem com o processamento ("man in the loop"). Sistemas computacionais para aplicação em laboratórios de simulação digital devem possuir dispositivos de entrada e saída e correspondente "software" com recursos que facilitem a análise do processo pelo operador. É, por exemplo, fundamental que se disponha de saídas gráficas em que o comportamento da dinâmica do sistema possa ser continuamente analisado, facilitando estudos de estabilidade, desenvolvimento de compensadores, análises rápidas de erros, e outros. A existência de terminais de vídeo alfa-numéricos é também importante para que o operador possa intervir facilmente no processo, de acordo com a necessidade oriunda de análises por ele efetuadas.

O quarto fator importante é a facilidade de geração de funções multivariáveis. Em aplicações na área aero-espacial a geração dessas funções é geralmente responsável pela maior carga de processamento e é, portanto, fundamental que os recursos computacionais a serem empregados em simulação híbrida de sistemas espaciais sejam providos de facilidades no que diz respeito à geração das mesmas. Como exemplo dessa necessidade, pode-se citar o cálculo de coeficientes aerodinâmicos que, usualmente envolvem a avaliação de dezenas de funções multivariáveis.

O quinto requisito diz respeito ao alcance de utilidade do sistema. Embora os recursos computacionais devam ser prioritariamente voltados às tarefas relativas a simulações do SCAO é de se desejar que possuam características tais que permitam sua utilização como sistema de multi-usuários para desenvolvimento de "software" de aplicação, durante períodos ociosos do sistema global ou parte dele. Nesse aspecto, o sistema computacional deve atender também às necessidades de desenvolvimento das áreas de Controle Térmico e de Estruturas, onde, contrariamente aos requisitos da simulação de sistemas de controle de órbita e atitude, caracterizadas por várias equações diferenciais ordinárias, estão envolvidas duas ou mais variáveis dimensionais além do tempo. Os padrões, em desenvolvimento de "software" ou em testes, hoje ainda são os métodos de diferenças finitas para o Controle Térmico e os métodos de Elementos Finitos no caso de Estruturas. De modo geral, a dinâmica desses processos é bem mais lenta que no caso de controle mas o número de variáveis envolvidas é, por outro lado, muito maior. Surgem, então, parâmetros conflitantes, quando da análise do alcance de utilidade do sistema, que devem ser criteriosamente avaliados para a correta definição de uma configuração do sistema de computação do Laboratório de Simulação Digital.

2.3 - ANÁLISE DAS OPÇÕES DISPONÍVEIS

Serão apresentadas opções de sistemas computacionais existentes no mercado, que mais satisfatoriamente preenchem os requisi

tos exigidos para utilização no Laboratório de Simulação Digital do DMC. Uma descrição resumida mostrando as principais características de cada uma dessas opções será dada na sequência. Deve ser aqui ressaltado que a ordem pela qual as mesmas serão apresentadas não visa sugerir qualquer grau de preferência de uma em relação a outra e que todas as opções apresentadas são correntemente usadas para as citadas aplicações em importantes laboratórios do mundo.

A primeira opção apresentada envolve o emprego do computador analógico EAI-2000, fabricado pela Electronic Associates Incorporated. A opção seguinte envolve a utilização de um computador digital cujo projeto foi voltado a aplicações em simulações de sistemas dinâmicos. Esse computador possui arquitetura que emprega um conjunto de processadores dedicados com funcionamento tipo "pipe-line". É fabricado pela Applied Dynamics International sob a sigla AD-10. A terceira opção apresentada trata de um sistema computacional baseado na utilização de um "array-processor", particularmente da linha da Floating Point Systems Incorporation, também de utilização comprovada na aplicação de interesse.

2.3.1 - USO DE UM COMPUTADOR ANALÓGICO

Esse sistema consiste basicamente da combinação de um processador digital com um ou mais módulos analógicos EAI-2000. A combinação é feita através de um sistema adequado de interfaces de comunicação entre os processadores analógicos e digital. A Figura 2.1. apresenta um esquema básico da estrutura desse sistema.

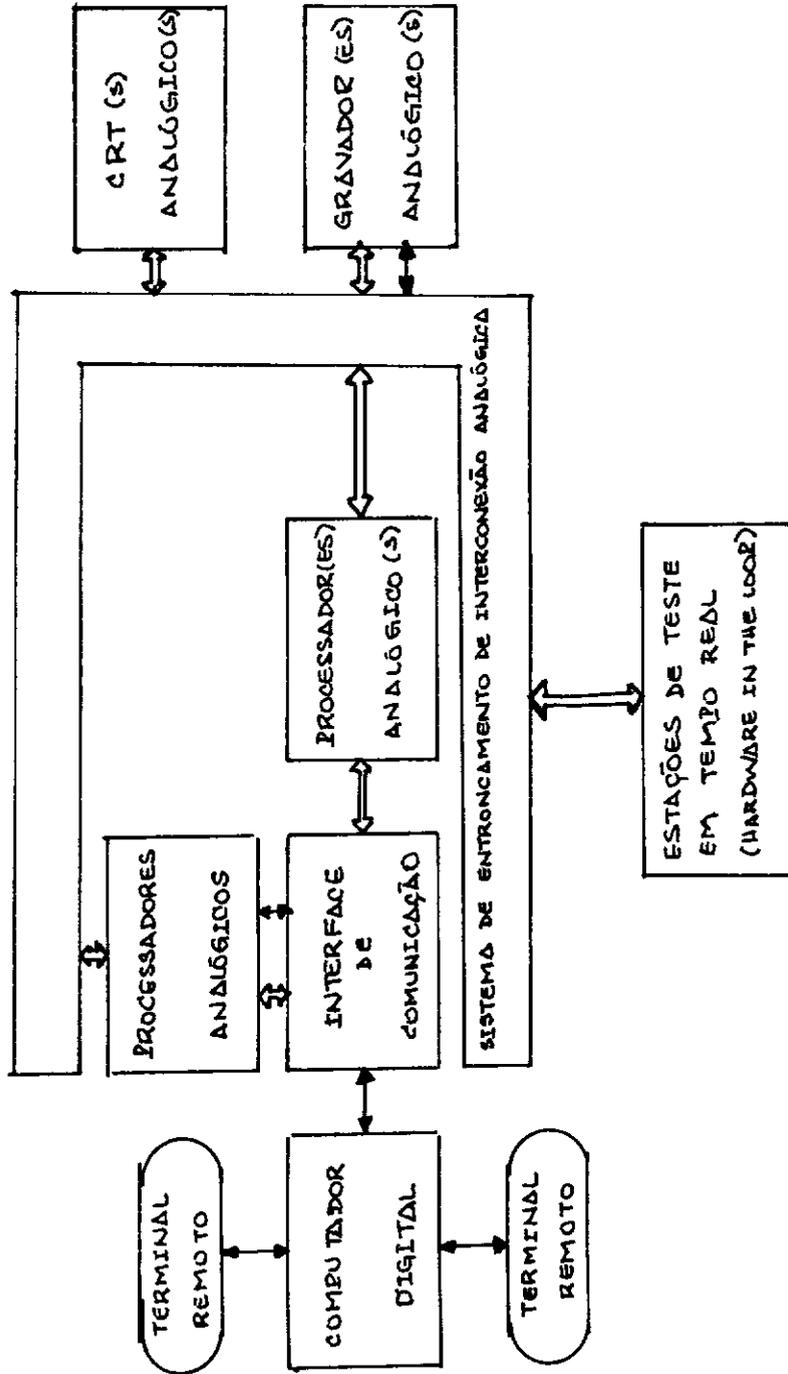


Fig. 2.1 - Estrutura de um computador híbrido para simulações de sistemas dinâmicos.

FONTE: Catálogo EAI, 1982.

A parte analógica desse sistema resolve diretamente sistemas de equações diferenciais, lineares ou não, com as características de:

- efetuar essa tarefa em uma base contínua no tempo;
- possuir alta velocidade de processamento, além do processamento paralelo (com o que várias equações diferenciais são resolvidas simultaneamente);
- servir de interface com outros equipamentos que requeiram entradas ou saídas analógicas.

A parte digital do sistema permite a solução de equações algébricas com alta precisão, ajuste automático de parâmetros necessários à programação do módulo analógico, armazenamento de dados, além de realizar funções de comunicação com os usuários do sistema. O sistema híbrido é projetado de tal forma que tanto o processador digital quanto o analógico realizam as funções para as quais possuem maior eficiência.

O módulo analógico, também chamado de processador analógico paralelo, ou simplesmente computador analógico, é constituído por vários dispositivos de computação contínua. Cada um desses dispositivos em particular é projetado para realizar uma única operação matemática em uma base contínua na qual dados numéricos são representados por magnitudes físicas analógicas ou amplitudes de sinais elétricos. Em um computador analógico existe um número determinado desses dispositivos destinados à realização de integrações (integradores), somas (somadores), multiplicações (multiplicadores), divisões (divisores), etc. Do fato desses dispositivos poderem operar simultaneamente decorre a denominação de processadores analógicos paralelos para computadores analógicos. No módulo EAI-2000 existem também dispositivos que permitem a geração de funções diretamente em "hardware". Com os mesmos, o usuário pode especificar a relação entre duas variáveis. Também se encontram

disponíveis dispositivos geradores de funções multivariáveis de até 4 variáveis. Eles são ajustados diretamente do computador digital, através do subsistema de controle de comunicação de interface. Existem também dispositivos lógicos que permitem a realização de operações booleanas, os quais podem ser interconectados de modo a formar circuitos lógicos paralelos. Elementos lógicos são usados para simular comportamentos binários paralelos de sistemas reais como, por exemplo, dispositivos "ON/OFF", funções de chaveamento e outros.

Esse sistema computacional possui aplicações voltadas exclusivamente a simulações híbridas, em tempo real. Um programa do módulo analógico consiste da interconexão de vários dispositivos componentes do mesmo, através de um painel externo, de modo a reproduzir a dinâmica do sistema a ser simulado.

Para a conexão do computador analógico EAI-2000 com um computador digital, formando um sistema híbrido, é fabricado pela Electronic Associated, Inc. um porte de comunicação serial de dados (RS-232 ou CCITT). Não existem grandes restrições quanto ao tipo de computador hospedeiro para o EAI-2000. Interfaces para uma grande gama de computadores digitais existentes estão disponíveis, como são os casos dos computadores VAX 11/750, VAX 11/780, Nova da Data General, HP 21 MX, SIGMA 7, GOULD SYSTEMS 32, DEC série PDP11 e outros. A escolha depende, portanto, da aplicação que o usuário pretende dar ao sistema computador digital - computador analógico (catálogo EAI, 1980). Uma interface paralela opcional adiciona comunicação de dados a alta velocidade, suprimindo uma trajetória bidirecional independente para o fluxo de dados de alta velocidade entre o processador paralelo e o computador digital. Quando essa interface paralela de comunicação de dados é incluída na configuração, a E.A.I. fornece uma biblioteca adicional de rotinas de execução rápida, chamadas em FORTRAN. Para visualizações de soluções analógicas contínuas é fornecido um osciloscópio multi-canais podendo ser também incluído um traçador de gráficos X-Y, ou um gravador de fitas com multi-canais.

A característica de modularidade permite que o EAI-2000 possa ser expandido à medida que isso se torne necessário. A configuração inicial é escolhida pelo comprador, que especifica o número de dispositivos necessários à sua aplicação. Para aplicações em que a configuração máxima de um console não é suficiente a modularidade do sistema permite que novos consoles EAI-2000 sejam incorporados ao sistema.

A velocidade de processamento é bastante alta em comparação com a dos computadores digitais multi-propósitos. Pode-se chegar a 200 milhões de operações normalizadas por segundo (uma operação normalizada corresponde a uma operação de adição em termos de tempo de processamento, como já frisado) enquanto que computadores digitais multi-propósitos mais rápidos chegam a 15 milhões de operações.

O sistema de "software", para computadores híbridos, da E.A.I. inclui um grande número de sub-rotinas, chamáveis em FORTRAN, para auxiliar a preparação de programas; operação do sistema; ajustes por usuários; testes; salvar, rearmazenar e reprogramar a simulação híbrida. Há sub-rotinas de alta-velocidade para processar e controlar a operação de interfaces que possuem requisitos críticos de tempo durante a simulação, incluindo transferências bidirecionais de dados, sensoramento, requisição de controle e interrupções de processamento. Também se encontra disponível um intérprete iterativo de linguagem para ajustes, testes e controles de programas analógicos/híbridos (HITRAN). A biblioteca matemática FORTRAN usual é aumentada por uma biblioteca de rotinas científicas que inclui manipulações de matrizes, integração numérica, avaliação de polinômios, análises estatísticas, etc.

O computador analógico, do tipo EAI-2000, é uma ferramenta poderosíssima para simulação de Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita pela velocidade que confere ao sistema de computação, pela facilidade com que permite a colocação de "hardware" na malha e pela possibilidade de poder ser interfaceado com diversos computadores digitais. Por outro lado existem desvantagens evidentes na configuração computador digital - computador analógico. Além das desvantagens específicas do analógico de deriva ("drift") dos integradores, o que provoca

perda de precisão após longos períodos de simulação, da manutenção muito cara e do problema de escala, a configuração digital mais analógica é de grande utilidade para simulação mas de pouca aplicação para desenvolvimento do "software" na forma exigida pelo Departamento.

2.3.2 - USO DE COMPUTADOR DIGITAL DEDICADO

O computador AD-10 é um computador digital cujo desenvolvimento foi voltado à satisfação das necessidades impostas por aplicações em simulações de grandes sistemas dinâmicos em tempo real e com a inclusão de dispositivos reais na malha de simulação ("hardware in the loop"). Esse computador não pode ser programado diretamente, exigindo para essa finalidade a utilização de um computador hospedeiro. Este último exerce as funções de programar o AD-10, carregar suas memórias de programas e de dados, testar programas e correr diagnósticos. Em suma, o computador hospedeiro se ocupa de tarefas "off-line", ou seja, tarefas efetuadas quando o AD-10 não está processando. Durante o processamento o computador AD-10 não requer hospedeiro, liberando-o para utilizações como sistema multi-usuários.

A Figura 2.2 apresenta um diagrama mostrando a arquitetura do computador AD-10 (Gilbert e Howe, 1978).

Como se vê na Figura 2.2, trata-se de um sistema de multiprocessadores, cada processador possuindo uma função específica. Todos os processadores possuem memórias de programa própria e foram projetados para realizar uma única ou um grupo de tarefas funcionais intimamente relacionadas. Isso permite que diversas operações sejam realizadas ao mesmo tempo, de modo paralelo, durante um ciclo de instrução. Todos os processadores, bem como as funções de memória e transferência de dados, são controlados sincronamente com auxílio de um relógio principal de 40 MHz.

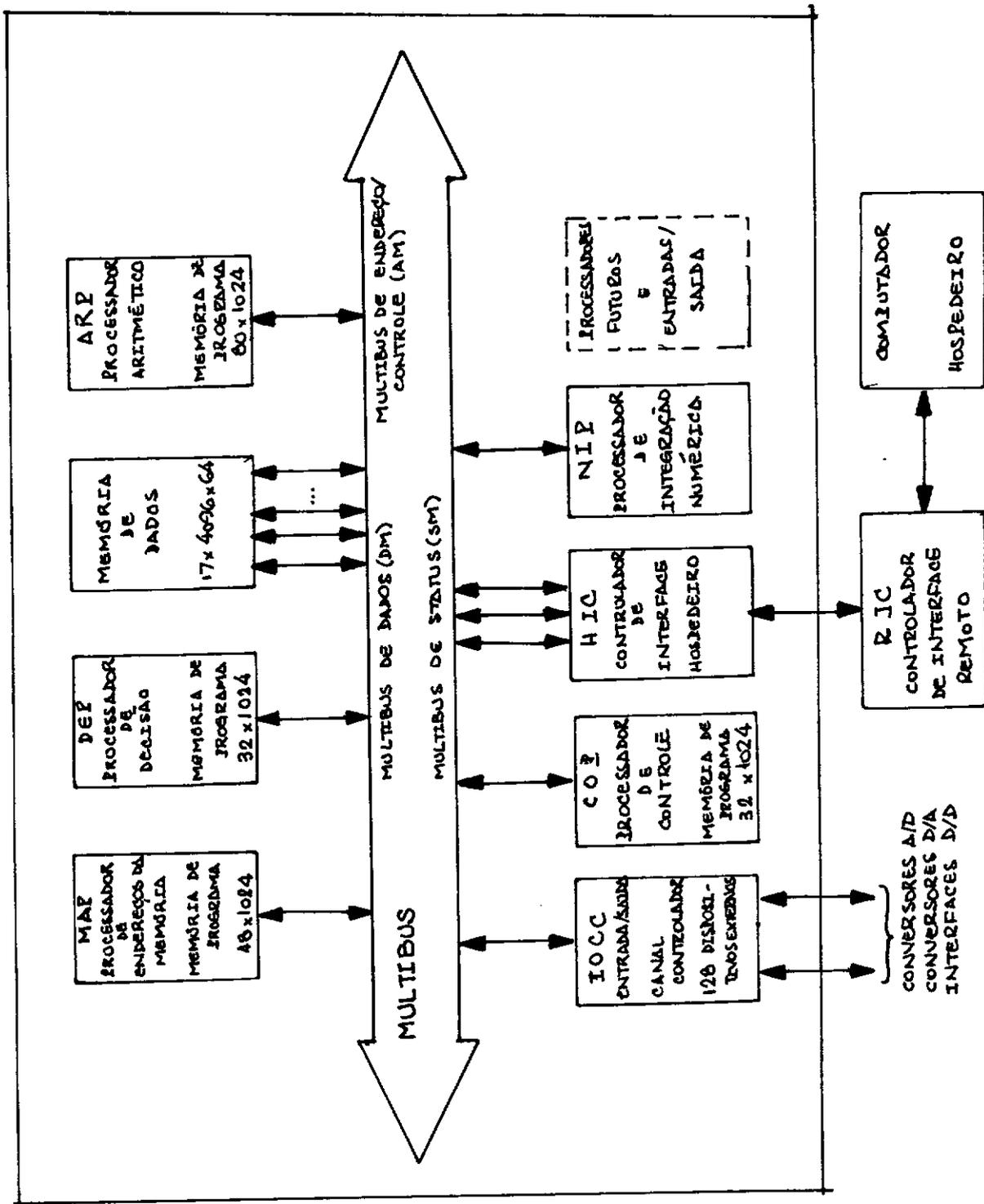


Fig. 2.2 - Diagrama de blocos do AD-10.

Para o interfaceamento com dispositivos externos o AD-10 possui 128 entradas e/ou saídas que podem ser utilizadas em qualquer combinação e que dispõem de conversores A/D e D/A e de interfaces digital-digital. As saídas e/ou entradas digitais possuem 16 bits.

O "software" disponível comercialmente para o AD-10 inclui rotinas de comunicação de interfaces, executivo interativo, "cross-assembler", biblioteca de "macrofile", simulador e programa de diagnósticos de "hardware". As rotinas de comunicação de interfaces efetuam todas as funções de controle de interfaces entre o AD-10 e o computador hospedeiro e são acessadas por chamadas de programas tanto em FORTRAN como em ASSEMBLER. O executivo interativo é responsável pelo carregamento de programas na memória do AD-10, dar partida na execução dos programas e testá-los. Aceita comando de um terminal de usuário ou de um arquivo de comandos. Permite ao usuário dar partida ou parar o AD-10, coloca o programa em passos através de ciclos específicos de instrução, permite visualizar e modificar o conteúdo de registros bem como modificar a memória de dados e de programas. O "cross-assembler" gera módulos objetos que são carregados pelo executivo interativo. O Assembler produz uma listagem compreensível do programa, a qual inclui o código objeto gerado para cada comando fonte, uma tabela de referência de símbolos cruzados e uma análise de tempo detalhada de todas as transferências que ocorreram pelo multibus durante a execução do programa. As programações em nível de Assembler são simplificadas por uma biblioteca de "macrofile". Um macro file é uma rotina em linguagem Assembler na forma de arquivo de fonte que pode ser incluída em programas de aplicações de usuários através da especificação de parâmetros de entrada e saída. Essas rotinas são otimizadas para velocidade e precisão (Manual ADI).

Encontra-se também disponível um sistema de programação modular para o AD-10, designado MPS-10. (Modular Programming System). Esse sistema utiliza uma técnica de programação em alto nível que permite que usuários que não possuam conhecimentos da arquitetura do AD-10 ou de Assembler possam elaborar programas eficientes para o AD-10. Com

a utilização do mesmo, os programas são escritos como uma sequência de chamadas a programas modulares residentes na biblioteca de programas modulares, fornecida como parte do AD-10. Cada programa modular é um programa em linguagem Assembler elaborado de modo a aproveitar de maneira otimizada as características da arquitetura do AD-10. Cada programa de aplicação é mapeado totalmente em uma memória de dados que pode ser expandida até um milhão de palavras. Apenas a biblioteca de programas modulares é armazenada na memória de programa.

Esse computador é utilizado por várias instituições científicas e industriais para simulação em tempo real de complexos e variados sistemas dinâmicos com muitos graus de liberdade e envolvendo frequências que em alguns casos chegam a 500 Hz.

Deve ser salientado porém que o computador AD-10 opera apenas em ponto fixo com o que o operador deve preocupar-se com problemas de escala quando de sua programação. Para resolver esse problema a ADI desenvolveu um módulo de expansão que incorporado ao AD-10 permite a realização de operações em ponto flutuante. Esse módulo é denominado FX (Floating Point Expansion). Desse modo, para que se obtenha um sistema computacional baseado no AD-10, com a desejável capacidade de operação em ponto flutuante, deve-se incorporar um módulo FX, o que encarece bastante o custo do sistema. Esse custo já é bastante alto mesmo no caso de não se utilizar o módulo FX.

O sistema computador digital-digital dedicado tem como principal atributo a alta velocidade de processamento que permite a simulação de sistemas de ordem e frequências características elevadas. Outra vantagem é se ter um sistema totalmente digital. No entanto, existem desvantagens nesse tipo de solução que podem ser resumidas no já citado problema de altíssimos custos envolvidos, na restrição quanto à escolha do computador digital hospedeiro e do fato de ter que utilizar operações com inteiros a menos que se disponha do módulo FX. Como no caso da configuração contendo um analógico, o sistema computador digital-digital dedicado é de enorme utilidade para simulação de sistemas físicos mas de pouco interesse para desenvolvimento de "software" de aplicação geral.

2.3.3 - USO DE UM PROCESSADOR VETORIAL

Os processadores vetoriais ("array processors") foram inicialmente desenvolvidos para resolver eficientemente, em termos principalmente de velocidade de processamento, problemas que apresentam características de cálculos que podem ser efetuados simultaneamente e repetitivamente. Como exemplo desses problemas podem ser citados os programas que envolvem transformadas rápidas de Fourier e inversões de matrizes, que normalmente exigem excessivo tempo de processamento. As arquiteturas desses processadores são projetadas de modo a permitirem a realização de um número determinado de cálculos em paralelo.

Para este estudo, em função da utilização em laboratórios estrangeiros de simulação na área aeroespacial, foram selecionados modelos da Floating Point Systems Inc., que desenvolveu e tornou disponível no mercado "Array Processors" que possuem a capacidade de operação em ponto flutuante e uma arquitetura "pipe-line" com alto nível de paralelismo. Essa arquitetura é ilustrada na Figura 2.3. Sete vias de dados independentes proveem um "bus" separado para cada entrada aritmética em ponto flutuante e um "bus" de saída, separado de cada elemento aritmético, para os outros elementos do sistema. Essa arquitetura paralela de multi-bus permite que múltiplos operandos e resultados possam ser movidos simultaneamente de um elemento a outro, minimizando conflitos de acesso. Isso torna possível ao "array processor" iniciar múltiplos comandos a cada ciclo de 167 nanosegundos. Todos os elementos do processador podem operar simultaneamente, porém de maneira síncrona, controlados por um relógio central. O formato interno para operações em ponto flutuante utiliza 38 bits mas pode receber qualquer formato em ponto flutuante de entrada, convertê-lo ao formato FPS, efetuar o processamento com mínimo propagação de erro de truncamento e converter o resultado ao desejado formato de saída.

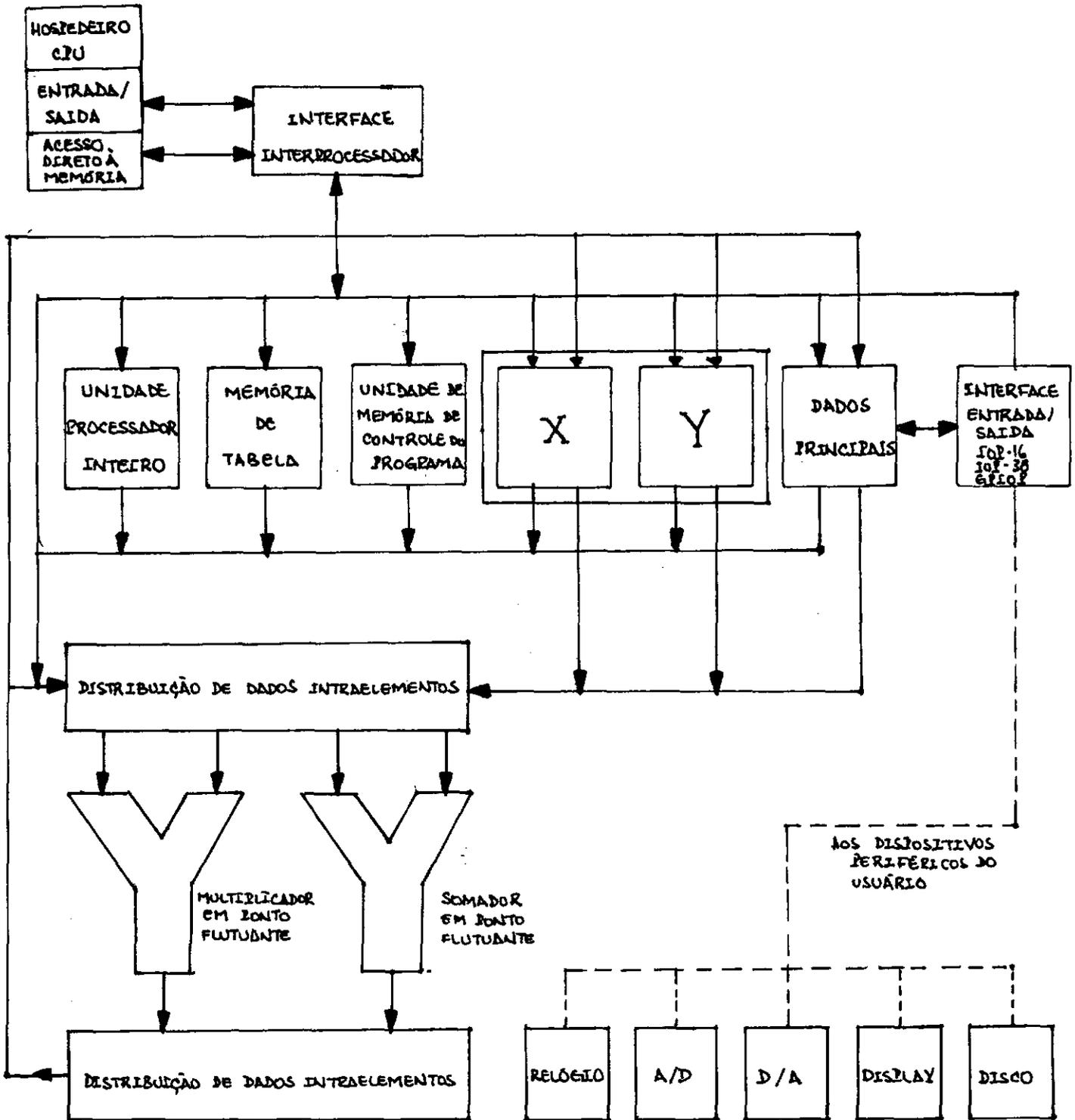


Fig. 2.3 - Diagrama de um processador vetorial FPS.

FONTE: Catálogo FPS, 1983.

A arquitetura paralela "pipe-line" permite que o multiplicador e o somador em ponto flutuante possam dar partida a uma nova operação, simultaneamente a cada 167 ns, o que significa uma capacidade de realização de 24 Mega operações normalizadas por segundo. A capacidade da memória para dados em ponto flutuante desses "array-processors" é de 512 K palavras. Também para esses processadores há a necessidade de um computador hospedeiro onde os programas do primeiro ficarão residentes. Os "array-processors" da FPS são interfaceáveis com praticamente todos os computadores mais populares.

Quanto ao "software" existem disponíveis, para a comunicação de interface com o hospedeiro os seguintes pacotes:

- APEX - "Operating System Driver/Array Processor Executivo": trata-se de uma coleção de rotinas que gerenciam o "Array processor" e as atividades de entrada e saída entre o "array-processor" e o hospedeiro.
- APDEBUG - "Array Processor Debugger": trata-se de um programa residente no hospedeiro que possui uma série de comandos que permitem ao usuário interagir no controle e execução de um programa do "array-processor".
- SMLLIB - "Standard Match Library": consiste de mais de 225 rotinas de operações matemáticas básicas.
- Rotinas de teste e verificação: É uma coleção de rotinas de programas iterativos de teste e verificação que ajudam na isolação de falhas de "hardware". Permitem também o teste de registros, memórias, caminhos de dados, unidades aritméticas e a operação do sistema como um todo.

Para criação de programas para o "array-processor" existem disponíveis os seguintes pacotes de "software" de desenvolvimento de programas:

- APAL - "Array Processor Assembly Language": permite ao programador tirar vantagem total da arquitetura "pipe-line" do "array processor" e atingir eficiência ótima.
- APLOAD - "Array Processor Loader".
- APLINK - "Array Processor Linker": são dois programas usados para criar módulos de carregamento executáveis para o ambiente de processamento.
- APLED - "Array Processor Library Editor": são utilizados para editar bibliotecas para os programas "APLOAD" e "APLINK".
- APSIM - "Array Processor Simulator".
- VFC - "Vector Function Chainer": converte chamadas sequenciais a rotinas de bibliotecas em uma única chamada.

Há ainda o sistema FORTRAN do "array processor" que permite ao usuário criar rápida e facilmente programas para o processador usando instruções padrões do FORTRAN-IV.

"Array-processors", como os da F.P.S., são também correntemente empregados em laboratório de simulação para desenvolvimento e testes de sistemas espaciais, com desempenho satisfatório em termos de precisão e velocidade de processamento.

A escolha de uma configuração computador digital - processador vetorial tem como vantagens: a maior liberdade na escolha do computador hospedeiro, ser um sistema totalmente digital, apresentar velocidade de processamento ainda compatível com as necessidades apresentadas, se bem que inferior às duas alternativas anteriores, e ter o menor custo entre os sistemas analisados. Como desvantagem, uma configuração desse tipo requer programação específica para se obter melhor rendimento do sistema. Essa desvantagem se aplica apenas em relação ao analógico, uma vez que o digital dedicado apresenta o mesmo problema.

No entanto, do ponto de vista de atendimento às necessidades de simulação com "hardware" na malha e de desenvolvimento de "software" de aplicação, a configuração digital - processador vetorial é a que apresenta maior versatilidade com menor custo.

2.3.4 - COMPUTADOR HOSPEDEIRO

Todas as opções apresentadas possuem a característica comum de necessitarem um computador hospedeiro, com exceção do sistema analógico que poderia ser usado isoladamente. No entanto, a configuração apenas com um analógico é restritiva sob o ponto de vista que o sistema a ser usado no laboratório deve ser capaz de atender às mais variadas aplicações. Dessa maneira, e tendo em vista a facilidade de interfaceamento das opções estudadas, um computador hospedeiro deve ser escolhido entre vários modelos disponíveis no mercado. As características principais que devem ser satisfeitas pelo modelo escolhido são as de que disponha 16 ou 32 bits de tamanho de palavra, ciclo de memória de 1 μ s ou menos, sistema operacional em tempo real, um compilador FORTRAN eficiente e uma estrutura de interrupções de alta velocidade. Entre os computadores que satisfazem a esses requisitos incluem-se os computadores da família Gould Concept 32, DEC's séries PDP-11 e VAX, Nova da Data General, HP 21 MX, SIGMA-7, entre outros. Apenas a opção do computador AD-10 é mais restrita quanto a escolha pois é sugerido pelo fabricante um computador da linha DEC, mais especificamente o VAX-780.

2.3.5 - SISTEMA DE DESENVOLVIMENTO DE MICROPROCESSADORES

O Laboratório de Simulação Digital deve prever ainda um sistema de desenvolvimento de microprocessadores. A necessidade desse tipo de equipamento está ligada ao Sistema de Controle de Atitude e de Órbita dos Satélites de Sensoriamento Remoto, cuja eletrônica de controle está centrada num microprocessador. Um sistema de desenvolvimento é uma ferramenta de enorme valor para se obter a configuração de "software" e "hardware" do microprocessador, permitindo:

- Análise em tempo real do equipamento.
- Versatilidade quanto a utilização de diferentes linhas de componentes.
- Otimização da configuração do "hardware".
- Otimização das diversas etapas de desenvolvimento, minimizando o tempo e o custo envolvido com cada uma delas.

Embora o sistema de desenvolvimento proposto possa ser conectado ao sistema do Laboratório de Simulação Digital do DMC, pretende-se utilizá-lo acoplado ao sistema já comprado pelo INPE, ao menos numa primeira fase. Esta solução permitiria o uso imediato do sistema de desenvolvimento pois o sistema do INPE, a ser implantado em curto espaço de tempo, deverá de imediato contar com "software" próprio e várias estações em operação. Sendo a configuração definida pelo DMC perfeitamente compatível com os equipamentos do Laboratório de Simulação Digital, o sistema de desenvolvimento deverá ser conectado ao sistema do LSD quando dos testes de simulação dos SCAO dos Satélites de Sensoriamento Remoto.

A configuração proposta para compra é constituída por uma estação a ser ligada ao sistema do INPE, este por sua vez ligado ao computador digital HP1000, instalado no prédio BETA, e ao computador central Burroughs B6800. Tal estação deve ser equivalente a uma estação de desenvolvimento completa do tipo HP64000 com analisador lógico, memórias, emuladores para micros de 8 e de 16 bits, programador de PROM e terminal.

Para finalizar, ressalta-se que a definição do sistema de desenvolvimento de microprocessadores não interfere na definição dos outros equipamentos do Laboratório de Simulação Digital, embora se antevêa a utilização conjunta desses equipamentos em futuro próximo.

2.4 - CONFIGURAÇÃO PROPOSTA

Tendo em vista a multiplicidade de tarefas a serem desenvolvidas no Laboratório de Simulação Digital do DMC, a definição de uma configuração adequada passa a ser de fundamental importância. O sistema a ser instalado deve ser capaz de, como ressaltado, suprir os trabalhos referentes a:

- Desenvolvimento de "software" em tempo não-real para as áreas de controle de atitude e de órbita, dinâmica orbital, controle térmico e estruturas.
- Simulação em tempo real do sistema de controle de atitude e de órbita.
- Supervisão geral dos testes de sistemas de controle de atitude e de órbita, incluindo o controle em tempo real de simuladores celestes.
- Aquisição, análise e interpretação de resultados dos diversos testes.

Para atender a todos esse requisitos o sistema proposto deverá contar com a seguinte configuração:

- Sistema de Computação Digital centrado em um minicomputador de 32 bits e compreendendo:
 - . Uma unidade aritmética lógica com 3M bytes.
 - . Um controlador de disco.
 - . Um multiplexador de Assíncrona.
 - . Uma unidade de fita.
 - . Uma impressora para 300 linhas por minuto.
 - . Seis terminais inteligentes.
 - . Pacote de "software" básico.
 - . Capacidade de aquisição de dados em alta velocidade da ordem de 2 M byte/s.

- Processador vetorial ("Array Processor") com:
 - . Interface GPIB.
 - . Velocidade nominal de processamento de cerca de 10 Moperações em ponto flutuante por segundo (10 M Flops).
 - . Ciclo de memória de 150 nseg.
 - . Tamanho de palavra de 38 bits no mínimo.
 - . Precisão de 8 dígitos decimais.
 - . Range dinâmico de 10^{-155} a 10^{+153} .
 - . Pacote de "software" básico.

- Terminal gráfico a cores com:
 - . Possibilidade de animação.
 - . Resolução da ordem de 20 pontos endereçáveis /cm.
 - . Pacote de "software" básico.

- Facilidades para geração de fitas magnéticas com arquivos de dados compatíveis com os utilizados pelo sistema CAD/CAM da Computervision (CADD4X).

As razões para escolha do sistema com o conjunto hospedeiro e processador vetorial são as seguintes:

- O sistema resultante é totalmente digital, em conformidade com as atuais tendências verificadas nos principais centros de simulação (Rios Neto et alii, 1984; Fleury e Rios Neto, 1984).

- O sistema resultante é o mais flexível no sentido de poder atender às exigências dos diversos grupos envolvidos com o Laboratório de Simulação Digital.

- As soluções incorporando um computador analógico ou um digital dedicado (AD-10) servem muito bem a simulações em tempo real mas são de pouco ou nenhum interesse para o desenvolvimento de outros subsistemas que não o de controle de atitude e de órbita.

- A velocidade do sistema é compatível com as necessidades de simulação em tempo real.
- A escolha de um processador vetorial permite maior liberdade na escolha do computador hospedeiro.

Definida, assim, uma configuração compatível com os requisitos do DMC, sugere-se a imediata aquisição de tais equipamentos para que se possa dispor do Laboratório de Simulação Digital como ponto inicial no desenvolvimento progressivo de atividades que levam à realização dos testes mais complexos com todo o embasamento necessário.

CAPÍTULO 3

LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO FÍSICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE E DE ÓRBITA

3.1 - PROJETO E TESTES DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE ÓRBITA E DE ATITUDE

Todo novo projeto de um sistema de controle de atitude e de órbita deve ser testado exhaustivamente antes da sua integração ao satélite. Uma série de métodos de teste, a nível de "software" ou de "hardware", já foi desenvolvida com sucesso para atender aos requisitos de desenvolvimento e qualificação desses sistemas. No entanto, os altos custos representados pelos testes e as inovações tecnológicas introduzidas nessa área têm forçado a se reestudar os métodos tradicionais em busca de soluções menos onerosas e ainda assim confiáveis (Fleury e Rios Neto, 1984). Neste capítulo, pretende-se discutir alternativas quanto a métodos e equipamentos de teste de SCAO.

Se o projeto de um Sistema de Controle de Atitude e de Órbita tivesse de partir do projeto de cada um dos componentes (sensor, atuador ou eletrônica de controle), as diversas etapas, para se chegar até o lançamento do satélite com o SCAO totalmente qualificado, seriam aquelas representadas no diagrama de blocos a seguir (Figura 3.1).

Completar cada um dos passos envolvidos nesse trabalho é uma tarefa sem dúvida penosa, extremamente custosa e, face às alternativas disponíveis atualmente, sem maior sentido prático. Assim, a compra de componentes já qualificados para vôo elimina a necessidade de caracterização e testes ambientais dos mesmos, dessa forma proporcionando substancial economia de tempo e de investimentos em equipamentos de teste e recursos humanos especializados.

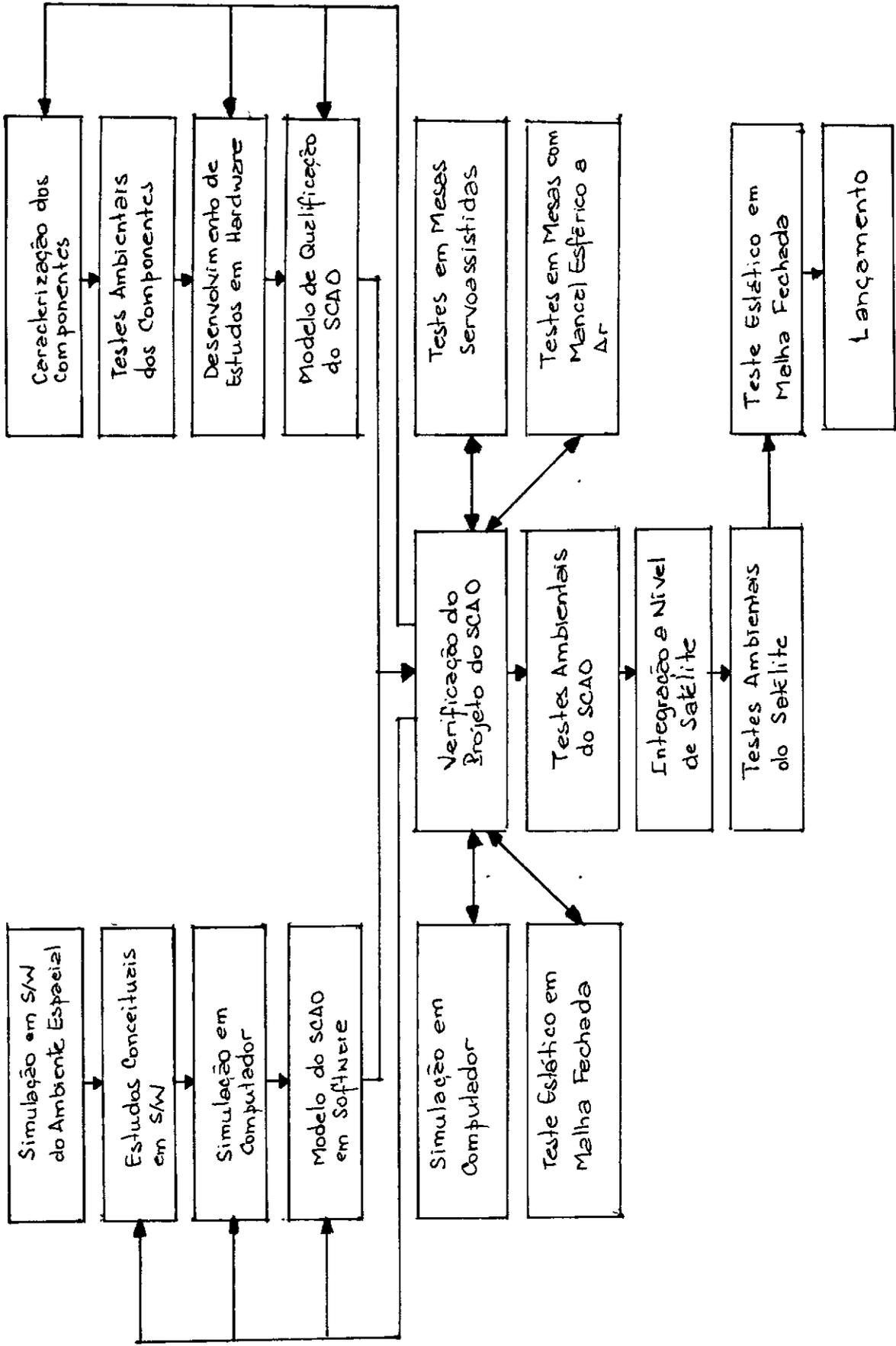


Fig. 3.1 - Diagrama de blocos das tarefas relativas a projeto, desenvolvimento e teste de um SCAO.

O Laboratório de Simulação Física do DMC tem, como principal função, o desenvolvimento e testes a nível de Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita, ficando as atividades de desenvolvimento e qualificação de componentes como uma possibilidade a ser utilizada esporadicamente somente quando forem detectadas no parque industrial brasileiro ou na instituição fortes razões para esse trabalho e desde que não haja comprometimento de cronogramas já estabelecidos.

O ponto crítico no projeto do Sistema de Controle de Atitude e de Órbita passa, com essas considerações, a ser o esquema de testes de verificação para os quais duas ou mais das alternativas apresentadas na Figura 3.1 devem ser usadas. Se for possível suprir todas as capacitações relativas à verificação do projeto integrado do SCAO, então a capacitação para as outras tarefas estarão abrangidas já que os equipamentos e recursos humanos exigidos para verificação do SCAO representam o estágio final em termos de precisão e conhecimentos quando comparados aos passos anteriores.

Não se pretende discorrer neste relatório sobre outros aspectos que não o de verificação do projeto dos Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita. Para uma melhor discussão sobre desenvolvimento de "software" e de "hardware" a nível de componentes, testes ambientais a nível de componente ou de sistema, pode-se recorrer a outras publicações (Fleury e Rios Neto, 1984; Stapf et alii, 1981).

Os testes de verificação do projeto do Sistema de Controle de Atitude e de Órbita, como colocado no Capítulo 1, consistem em reproduzir no laboratório, com a maior fidelidade possível, as manobras que o satélite deve realizar em vôo. A maneira mais simples de simular tais manobras é através do uso de computador digital. No entanto, apesar de fornecer valiosíssimos subsídios ao projeto, a simulação em computador não permite determinar todos os problemas embutidos no SCAO por mais perfeitos que sejam os modelos matemáticos usados para substituir os equipamentos da malha de controle. Verifica-se a necessidade, então, de se ter pelo menos mais um tipo de teste em que o "hardware" esteja

envolvido para que seja possível detectar as prováveis partes do sistema. Entretanto, quaisquer que sejam os tipos de teste complementares escolhidos, a presença de um sistema de computação é absolutamente essencial. O sistema de computação é usado para controlar a maioria dos equipamentos dedicados de testes de SCAO, assim como gerar e/ou organizar todas as entradas e saídas do teste que está sendo realizado. A importância fundamental do sistema de computação nos outros tipos de teste de SCAO será destacada nos itens seguintes.

3.2 - ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

Quase todos os componentes padrão podem ser testados fisicamente em um laboratório completamente equipado. Uma lista desses componentes deve incluir:

- a) Giroscópios;
- b) Acelerômetros;
- c) Sensores Solares;
- d) Sensores de Terra;
- e) Sensores Estelares;
- f) Rodas de Reação;
- g) Volantes de Inércia;
- h) Amortecedores de Nutação;
- i) Jatos de Gás Frio;
- j) Giros de Controle (Control Gyros);
- l) Eletrônica de Controle.

Exceções a uma completa caracterização em laboratório ficam por conta dos sensores e atuadores magnéticos e dos jatos de gás quente. O problema relacionado com o teste de sensores e atuadores magnéticos é o de se conseguir reproduzir com exatidão as características do campo magnético terrestre, na órbita do satélite, através de equipamentos de laboratório. Isso só pode ser conseguido em ambientes ultra isolados (câmaras amagnéticas) e com equipamentos de altíssimo custo, o que restringe a execução de testes magnéticos completos a poucos laboratórios no mundo. Como alternativa, testes mais simples de caracterização (e não qualificação) podem ser conduzidos se for possível quantificar as interferências externas e/ou utilizar bons modelos matemáticos para análise dos resultados em computador. Com relação aos jatos de gás quente a dificuldade do teste está ligada ao alto grau de contaminação associado aos gases liberados se o ensaio fosse conduzido dentro de um laboratório. No entanto, excluindo-se câmaras de combustão, bocais e combustível, toda a parte restante do sistema de propulsão pode ser ensaiada em laboratório (tanque, válvulas, tuberias) com as partes ausentes sendo substituídas por bocais que utilizam um gás inerte sob pressão como fluido de trabalho.

Para testar todos esses componentes ou o sistema de controle de atitude e de órbita que integra conjuntos desses componentes, um laboratório totalmente equipado deve contar com (Fleury e Rios Neto, 1984):

- a) Apoio de um bom sistema de computação digital ou híbrida;
- b) Mesa servoassistida de três eixos;
- c) Mesa com mancal esférico a ar de 3 graus de liberdade;
- d) Simulador Solar;
- e) Simulador de Terra;
- f) Simulador Estelar;

- g) Câmaras térmicas portáteis;
- h) Padrões de Orientação;
- i) Dispositivos de Alinhamento;
- j) Bobinas de Helmholtz para Testes Magnéticos;
- l) Pequenas mesas servoassistidas de um ou dois graus de liberdade;
- m) Mesa com mancal a ar de um grau de liberdade.

Logicamente, implantar, integrar e operar um laboratório com todos esses equipamentos e exigindo altos padrões de limpeza de ar e isolações especiais quanto a perturbações externas de vibração, iluminação e campos magnéticos, é uma tarefa difícil e altamente custosa.

Em vista disso, tem-se procurado implantar gradualmente o Laboratório de Simulação Física do DMC, isto é, a compra e/ou projeto e utilização de equipamentos deve estar associada à progressiva capacitação do pessoal técnico envolvido e à necessidade de cumprimento dos cronogramas estabelecidos para a MECB. Entre os três métodos possíveis para qualificação do SCAO juntamente com a simulação em computador (veja a Figura 3.1), o grupo envolvido está basicamente se capacitando para a realização de testes usando dois dos métodos: testes estáticos e testes dinâmicos em malha fechada usando mesas servocontroladas.

3.2.1 - TESTES ESTÁTICOS EM MALHA FECHADA

O sucessor natural para os esquemas de simulação e teste empregando apenas o sistema de computação é o chamado teste estático em malha fechada. Na sua versão mais simplificada apenas a Eletrônica de Controle de Atitude e de Órbita (ECAO) está fisicamente envolvida, enquanto os outros equipamentos são simulados pelo computador digital, como representado na Figura 3.2.

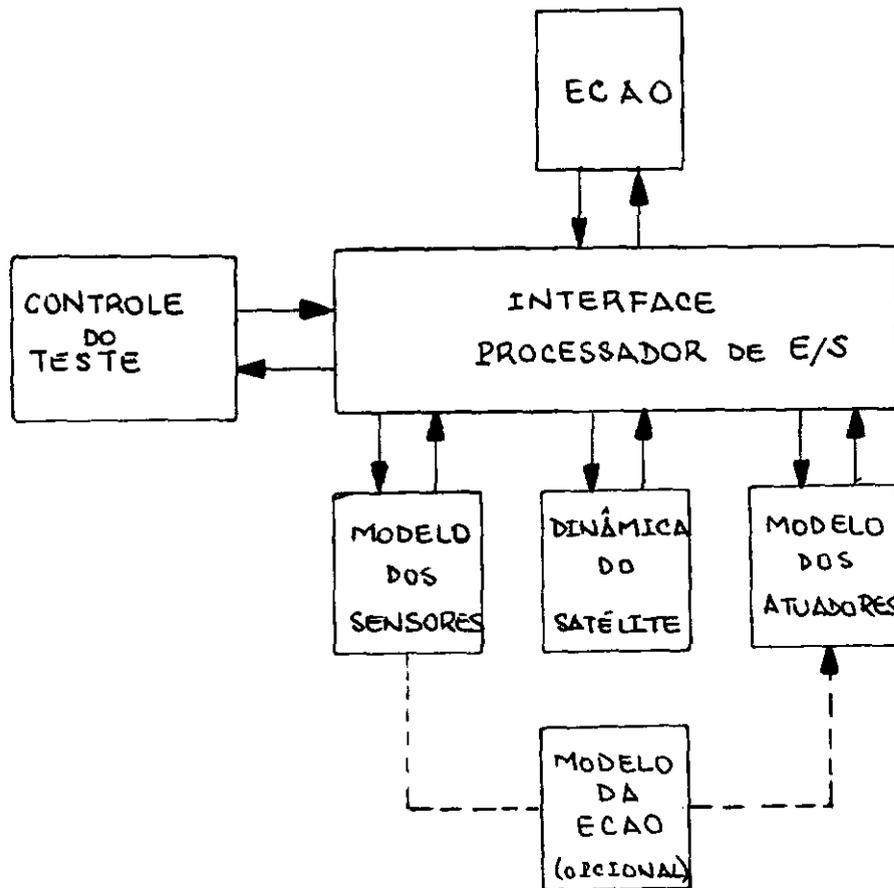


Fig. 3.2 - Teste estático em malha fechada.

Em configurações de testes estáticos mais completas ou tras unidades eletrônicas, como partes dos sensores e atuadores, podem ser incluídas fisicamente na malha. Esta nova filosofia está sendo im plantada em institutos de pesquisa espacial como a NASDA japonesa (Ninomiya et alii, 1983) de modo a aumentar o nível de confiança envol vido neste tipo de ensaio.

Testes estáticos em malha fechada são os mais simples e mais baratos ensaios que englobam "hardware" do SCAO. Servem, também, como ferramenta de qualificação de "software" de vôo. Sua grande desvan tagem é que apenas uma pequena parte do "harware" pode ser testada.

3.2.2 - TESTES COM MESAS SERVOCONTROLADAS

Mesas servocontroladas são hoje o tipo de equipamento mais

difundido em laboratórios de qualificação de sistemas de controle de atitude e de órbita. Podem ser fabricadas com até cinco eixos independentes, sendo que os modelos de 3 eixos (ou 3 graus de liberdade) são o equipamento padrão em testes de SCAO de satélites. Mesas com um ou dois eixos são usadas principalmente para qualificação e calibração de sensores inerciais ou para testes mais simples de SCAO, enquanto mesas com quatro ou cinco eixos são empregadas em aplicações de mísseis, com o quarto e/ou quinto eixos se encarregando da movimentação do alvo (Fleury e Rios Neto, 1984).

Existe grande variedade de modelos de mesa em produção, usando conceitos diferentes de motores, mancais e outros detalhes mas o esquema utilizado para testes dinâmicos em malha fechada é basicamente o mesmo, e segue a representação mostrada na Figura 3.3.

Nesse tipo de teste, os sensores ficam rigidamente ligados ao eixo mais interno da mesa servocontrolada. Os simuladores celestes (solar, de Terra ou estelar) estimulam os sensores e podem se movimentar relativamente ao laboratório com seus movimentos controlados pelo computador. Sinais dos sensores são processados pelo ECAO e os comandos de controle são enviados aos modelos de atuadores embutidos no sistema de computação através de anéis de contato deslizante (slip-rings) instalados nos mancais dos quadros (gimbals) da mesa. O sistema de computação usa os torques calculados pelos modelos dos atuadores para obter o movimento do satélite. O movimento do satélite é duplicado pelos quadros da mesa servocontrolada e, em consequência, o "satélite" adquire uma nova configuração relativa aos simuladores celestes.

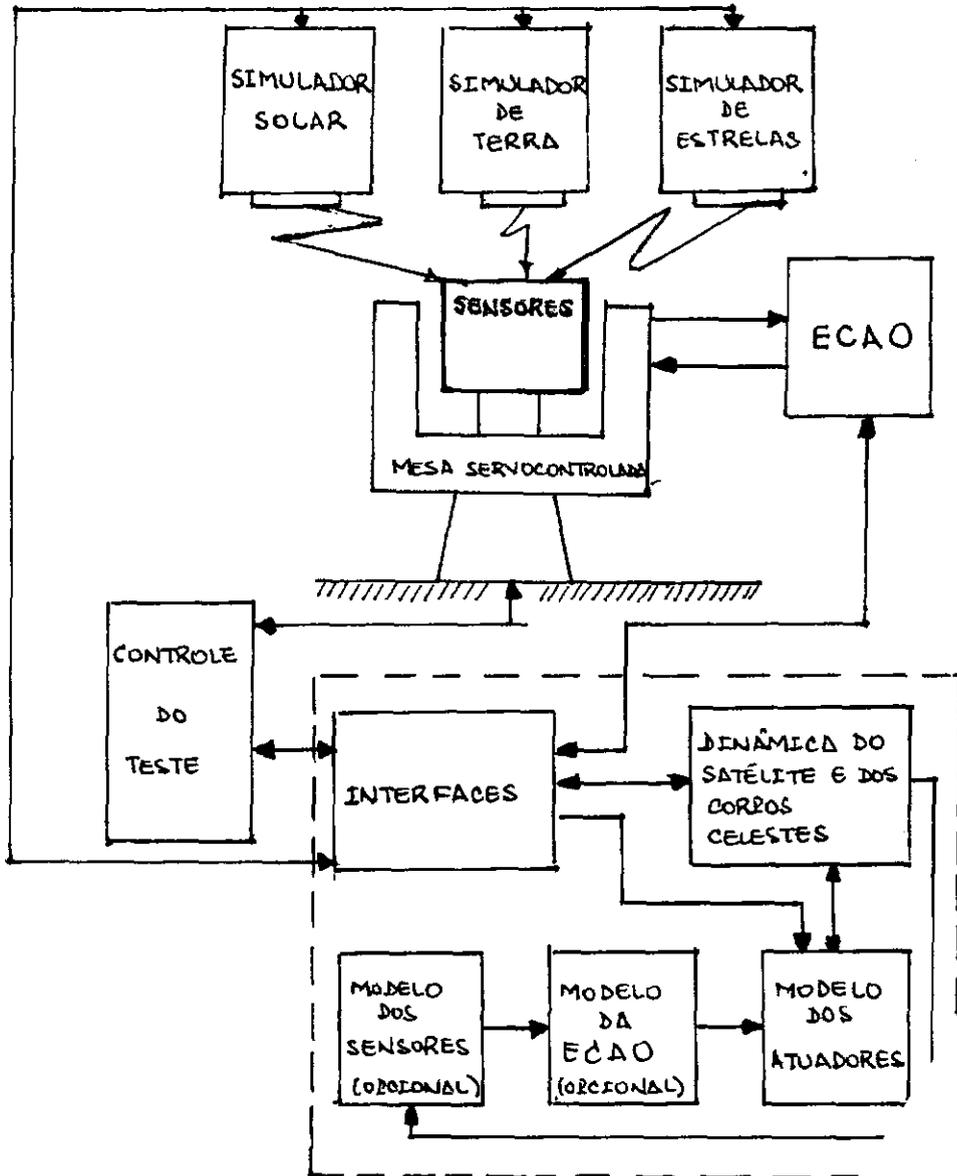


Fig. 3.3 - Teste dinâmico em malha fechada em mesa com 3 eixos.

Devido às suas características, as mesas servocontroladas são hoje o mais versátil meio de testes para SCAO: são extremamente precisas no posicionamento (da ordem de 0.0001°); podem facilmente ser interfaceadas a sistemas digitais ou analógicos de computação; permitem grandes movimentos angulares, desse modo englobando quase todas as necessidades de simulação de manobra e, uma característica muito importante nos dias de hoje, permitem facilmente a inclusão dos efeitos de flexibilidade estrutural do satélite já que o movimento é calculado no computador. Isto significa que o movimento elástico dos apêndices flexíveis, dentro de certos limites, pode ser calculado, superposto ao movimento de corpo rígido do satélite e reproduzido quase perfeitamente pelo movimento da mesa.

As dificuldades desse tipo de configuração de teste ficam por conta do limitado volume disponível para colocação do pacote de sensores sobre a mesa e do obstáculo criado pelos quadros (gimbals) ao campo de visada dos sensores, além de, no caso de simulação de satélites de baixa altitude, devido ao grande tamanho do simulador de Terra, existem problemas de interferência entre a mesa servocontrolada, o simulador de Terra e os outros simuladores celestes. Estas dificuldades foram quase totalmente resolvidas no ultramoderno Laboratório de Testes de Sistemas de Controle de Atitude da NASDA (Ikeuchi et alii, 1983) com o uso de quatro diferentes mesas servocontroladas, uma para cada pacote de sensores (inerciais, solares, estelares e de Terra), controladas por um único sistema de computação. O custo de um esquema desses, no entanto, é proibitivo.

Testes mais simples com mesas servoassistidas de um ou dois graus de liberdade podem ser realizados praticamente com a mesma configuração apresentada na Figura 3.3. Para não se alterar as características de movimento do satélite, os fenômenos ligados aos eixos não envolvidos fisicamente no teste podem ser simulados no computador, garantindo, dessa forma, um nível de confiança razoável no ensaio quando comparado ao teste nos 3 eixos.

O tipo de teste descrito neste item ainda não inclui a presença física dos atuadores. No entanto, numa configuração de teste mais complexa a eletrônica dos atuadores pode ser incluída e mesmo a presença total dos atuadores está sendo pesquisada em instituições como o DFVLR (Reinel e Stapf, 1983) com resultados promissores.

3.2.3 - TESTES USANDO MANCAL ESFÉRICO A AR

Testes usando mancais esféricos a ar são os únicos que permitem o uso da configuração física completa do Sistema de Controle de Atitude e de Órbita. A idéia básica nesse tipo de teste é construir uma plataforma que contenha o SCAO. Esta plataforma deve flutuar no mancal esférico a ar e, com isso, terá total liberdade de movimentação em relação ao laboratório. A comunicação da plataforma com o laboratório é feita através de um sistema de transmissão/recepção e os sensores são estimulados através dos simuladores celestes usuais já descritos. O esquema de teste é o da Figura 3.4.

O primeiro grande problema desse tipo de teste é a necessidade de se recorrer a técnicas de escala (Reinel, Stapf, 1983) já que é impossível reproduzir as mesmas inércias do satélite ou mesmo prover a potência necessária ao sistema em teste usando baterias ou ainda manter os torques perturbadores no ambiente do laboratório dentro da mesma ordem de grandeza dos torques perturbadores no espaço. Os parâmetros usualmente empregados para se fazer escala são: momento de inércia, torques de controle, torques perturbadores, ângulos de deriva e tempo.

não envolvidos no teste são simulados em computador, como no caso das mesas servocontroladas. A vantagem desse teste com apenas 1 grau de liberdade é a de continuar permitindo o envolvimento físico dos atuadores na malha de ensaio, o que só é conseguido nesse tipo de equipamento.

3.3 - CONFIGURAÇÃO PROPOSTA

A implantação de um Laboratório de Simulação Física de Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita dentro do INPE traz consigo as responsabilidades de:

- a) Definição, projeto e estudos conceituais dos SCAO;
- b) Execução dos testes de desenvolvimento nos modelos de engenharia;
- c) Execução e/ou supervisão dos testes de qualificação e vôo dos SCAO dos satélites da MECB.

Os critérios que devem nortear essa implantação podem ser colocados como segue (Fleury e Rios Neto, 1984):

- a) Maximizar o uso da experiência e dos resultados já existentes para simplificar as soluções propostas;
- b) Usar procedimentos técnicos e recursos materiais tão modulares quanto possível, maximizando a capacidade de acomodação a variações nos testes e minimizando os esforços de adaptação quando for necessária evolução para esquemas de teste mais complexos;
- c) Minimizar a quantidade de recursos humanos e materiais envolvidos;
- d) Minimizar tanto quanto possível a necessidade de recursos humanos e materiais especializados e dedicados.

Naturalmente, tais objetivos devem ser compatíveis com os vínculos mandatários definidos pelas funções de teste do SCAO, quais sejam:

- a) Simular as condições de operação do sistema de modo a verificar que este funciona perfeitamente, executando todas as suas funções com desempenho satisfatório;
- b) Verificação, em todos os modelos, do desempenho projetado em todos os modos usando testes em malha fechada e em tempo real;
- c) Verificação da capacidade de suportar condições de falha;
- d) Pesquisa e estudos de desenvolvimento de novas soluções.

Confrontada esta colocação com:

- a) A presente realidade da indústria aeroespacial mundial, onde se pode obter componentes qualificados e testados (sensores ou atuadores);
- b) A situação de compra e/ou desenvolvimento de equipamento de testes, limitada a poucas configurações e fabricantes;
- c) O envolvimento cada vez maior dos sistemas de computação digital, seja nos testes de verificação de SCAO, seja na própria Eletrônica de Controle de Atitude e de Órbita;
- d) O atual estágio de desenvolvimento dentro do DMC;

chega-se à conclusão que a solução mais adequada para implantação do LSCAO é aquela que progressivamente permita a realização de:

- a) Simulações em computador digital;
- b) Testes Estáticos em Malha Fechada;

- c) Testes Dinâmicos em Malha Fechada usando Mesa Servocontrolada de 3 eixos.

A realização de simulações em computador digital e dos testes estáticos em malha fechada constitui a primeira fase de implantação do Laboratório, e para isso o requisito básico é a instalação imediata do Laboratório de Simulação Digital seguindo a configuração proposta no Capítulo 2. Apoiado em um bom sistema de computação poderá ser desenvolvido progressivamente o "software" de simulação, com características de modularidade e portabilidade que permita:

- a) Simulação em tempo não real;
- b) Simulação em tempo real;
- c) Uso nos testes estáticos em malha fechada;
- d) Uso nos testes dinâmicos em malha fechada.

A construção do "software" na forma proposta permitirá que se atinja sucessivamente as configurações de teste estático em malha fechada, teste estático modular em malha fechada envolvendo a eletrônica dos componentes e teste dinâmico em malha fechada mostradas nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 (Fleury e Rios Neto, 1984).

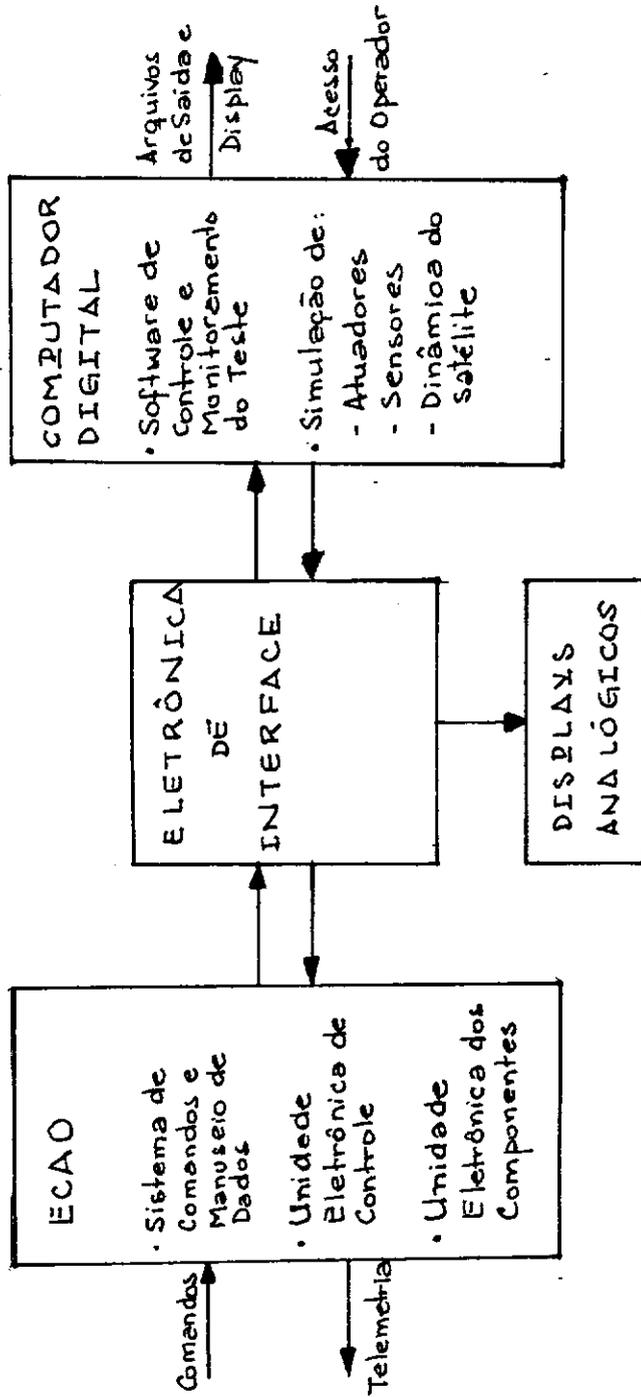


Fig. 3.5 - Teste estático em malha fechada.

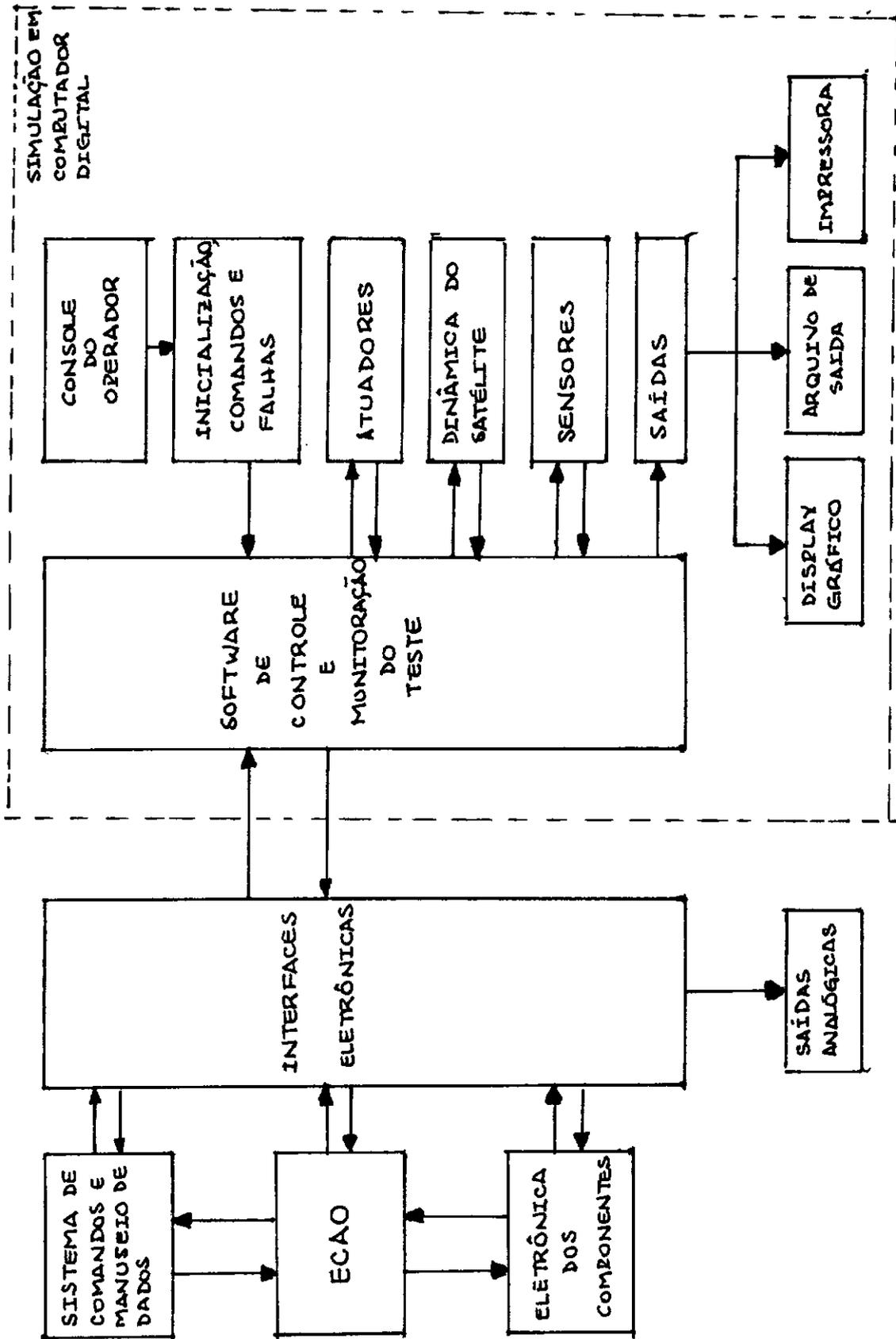


Fig. 3.6 - Teste estático modular com a eletrônica dos componentes na malha.

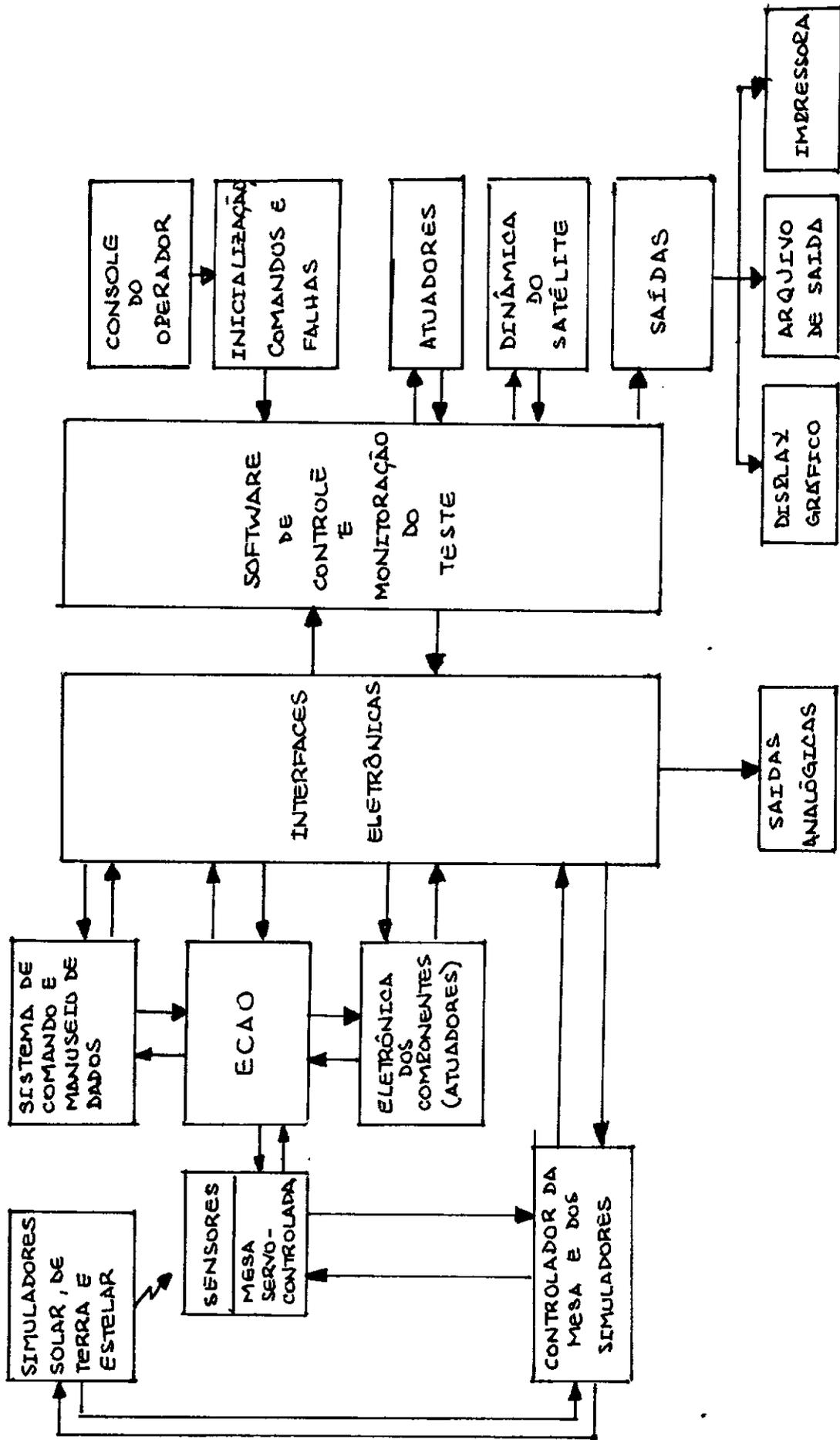


Fig. 3.7 - Teste dinâmico em malha fechada.

Como se observa nas Figuras 3.4 e 3.5, a primeira fase de implantação não exigirá equipamento dedicado, bastando, além do Laboratório de Simulação Digital, que se disponha dos equipamentos de infraestrutura necessários. Logicamente, a qualidade dos testes a serem feitos é dependente da fidelidade dos modelos matemáticos empregados para simulação e a ênfase no desenvolvimento do trabalho deve ser colocada nessa garantia de fidelidade.

Na segunda fase, o Laboratório deverá contar com uma mesa servocontrolada de 3 eixos e outros dispositivos dedicados a testes de SCAO. A configuração sugerida até o presente está centrada numa mesa CONTRAVES modelo 53M-2. A escolha desse modelo se deve a razões de versatilidade, precisão e preço após estudados outros modelos da própria CONTRAVES e dos outros fabricantes concorrentes, MBB (Alemanha) e Carco Electronics (USA).

As principais características técnicas do modelo escolhido estão colocadas na Tabela 3.1 abaixo (Contraves-Goerz Co., 1983):

TABELA 3.1

CARACTERÍSTICAS DO MODELO 53M-2

Fabricante: CONTRAVES GOERZ, Co., USA	
Modelo: 53M-2/30H	
Deslocamento dos Quadros: Interno-Contínuo	
(Gimbals)	Médio-Contínuo
	Externo-Contínuo
Montagem do Eixo Externo: Vertical	
Carga em Teste: Diâmetro	68 cm (27 in)
	Comprimento 70 cm (28 in)
	Peso 45 kg (100 lb)

continua

Tabela 3.1 - conclusão

Inércias da Carga em Teste: Eixo Interno - 2.71 kgxm ² (2 lb.ft.s ²)
Eixo Médio - 8.14 kgxm ² (6 lb.ft.s ²)
Eixo Externo - 8.14 kgxm ² (6 lb.ft.s ²)
Motores (todos os eixos): Corrente Contínua
Velocidades Máximas: Eixo Interno ± 1000 ⁰ /s
Eixo Médio ± 750 ⁰ /s
Eixo Externo ± 500 ⁰ /s
Acelerações Máximas: Eixo Interno 650 ⁰ /s ²
Eixo Médio 285 ⁰ /s ²
Eixo Externo 250 ⁰ /s ²
Slip Rings: 100 (88 contatos 3A)
(12 contatos 5A)
Repetibilidade: ± 1 arcseg nos 3 eixos
Transdutor de Posição: Grosseiro 3 min (Resolver)
Fino ± 1 arcseg (Inductosyn)
Wobble: ± 1 arcseg nos 3 eixos

Outros equipamentos necessários para a segunda fase de modo a completar as configurações de teste sugeridas nas Figuras 3.3 e 3.7 são os seguintes:

- a) Simulador Solar - em desenvolvimento no INPE, com a parte ótica sob responsabilidade do DTE e o posicionador sob responsabilidade do DMC;
- b) Simulador de Terra - em desenvolvimento no INPE, sob responsabilidade do DMC;
- c) Equipamentos Auxiliares a serem especificados:
 - i) Dinamômetros;
 - ii) Heidenhain Devices (simuladores de painéis solares);
 - iii) Teodolitos para alinhamento.

Finalmente, cabe ressaltar que, como meio de adquirir a necessária experiência prática para o desenvolvimento do "hardware" de Sistemas de Controle de Atitude e de Ôrbita, o grupo envolvido vem trabalhando numa série de projetos que visam construir equipamentos, para posterior utilização em testes, e componentes do SCAO, sem a preocupação de conseguir qualificação espacial para os mesmos.

Os projetos ora em andamento são os seguintes:

- a) Construção de uma Mesa com Mancal a Ar de um Grau de Liberdade;
- b) Construção de uma Mesa Servocontrolada de um Grau de Liberdade;
- c) Construção de uma Roda de Reação para uso na Mesa de Mancal a Ar;
- d) Construção de um Conjunto de Telemidas/Telecomando para Mesa de Mancal a Ar;
- e) Construção de uma Plataforma com Jatos de Gás Frio para Mesa de Mancal a Ar;
- f) Desenvolvimento de um Microcomputador para Supervisão do Controle de Atitude;
- g) Construção de um Posicionador de 2 Graus de Liberdade para o Simulador Solar.

Todos esses projetos tem por base a utilização de compo nentes desenvolvidos no INPE ou fabricados no Brasil desde que não haja comprometimento das especificações que se pretenda atingir.

CAPÍTULO 4

LABORATÓRIO DE CONTROLE TÉRMICO

4.1 - NECESSIDADES DO LABORATÓRIO DE CONTROLE TÉRMICO

O grupo de controle térmico tem como objetivo estabelecer o projeto térmico dos satélites a serem lançados durante a Missão Espacial Completa Brasileira ou de quaisquer outros veículos espaciais que estejam a cargo do INPE.

Para tanto, torna-se necessário o desenvolvimento de capacitação técnica na área térmica, que envolva não somente os aspectos teóricos mas também os práticos. Assim, é imprescindível, a implantação de um Laboratório de Controle Térmico que atenda às necessidades básicas de desenvolvimento na área. Estas representam um largo espectro de capacitação que vão desde a obtenção de uma essencial sensibilidade prática para solução dos problemas térmicos até o desenvolvimento do projeto e testes da maquete térmica de um satélite. Assim, pretende-se com a instalação do Laboratório de Controle Térmico, não só desenvolver trabalhos que permitam a capacitação técnica necessária para acompanhamento dos projetos e testes térmicos, como torná-lo um laboratório didático e gerador de capacitação técnica em áreas afins com o projeto térmico de satélites.

Além disso, como o controle térmico no projeto de um satélite é um subsistema que, durante a fase de desenvolvimento dos outros subsistemas, deve dar suporte a esses últimos sob o ponto de vista de garantia de correto funcionamento e, como o tipo de solução a ser utilizado depende muito das condições fornecidas pelos outros subsistemas, o grupo de controle térmico deve estar aparelhado de modo a poder atender satisfatoriamente às tarefas que se fizerem necessárias.

4.2 - ANÁLISE DOS EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Para bom andamento dos trabalhos de desenvolvimento na área térmica, deve-se contar com os equipamentos descritos na sequência.

4.2.1 - CÂMARAS VÁCUO-TÉRMICAS

O Laboratório de Controle Térmico deverá contar, a princípio, com duas câmaras vácuo-térmicas, das quais uma já está em operação.

A câmara que se encontra atualmente instalada no Prédio do Satélite tem como objetivo simular termicamente o ambiente espacial, bem como prover os meios necessários para a realização de testes térmicos de uma maneira geral.

Ela consiste basicamente de três partes: carcaça, sistema de vácuo e sistema de refrigeração.

A carcaça consiste de um tubo cilíndrico de aço inox AISI 304 de 850 mm de diâmetro interno por 800 mm de comprimento, de uma porta frontal de fácil acesso e um fundo removível para manutenção. A carcaça possui meios para permitir acesso ao interior da câmara e dos seguintes itens:

- cabos elétricos e termopares (60 pares de pinos);
- instrumentação;
- sistema de vácuo;
- linha de N₂ líquido para refrigeração.

A porta de acesso é dotada de uma janela de visualização (Pnix). Todo o conjunto da carcaça é sustentado por uma estrutura de perfis.

O sistema de vácuo consiste de 2 bombas (uma mecânica e outra difusora), válvulas, indicadores e sensores de pressão. Este sistema é capaz de fornecer um vácuo da ordem de 10^{-5} torr em 2 horas.

O sistema de refrigeração é constituído de um invólucro cilíndrico de aço inox AISI 304 de 600 mm de diâmetro interno por 800 mm de comprimento concêntrico com a carcaça. Na parte externa deste invólucro é soldado uma serpentina de cobre no interior da qual circula N_2 líquido. Para efeito de acabamento superficial no exterior do invólucro é feito um polimento enquanto no interior é aplicado um revestimento que fornece absortividade no espectro solar e emissividade no infravermelho maior que 0,90.

Os esquemas da câmara e seu sistema de vácuo se encontram nas Figuras 4.1 e 4.2.

A segunda câmara de desenvolvimento térmico terá volume útil de $\varnothing 1$ m x 1 m e será dotada de simulação solar. Essa câmara está sendo objeto de especificações finais para compra no mercado internacional.

4.2.2 - ABSORTÍMETRO OU REFLETÔMETRO

Este equipamento tem como objetivo medir a absortividade total hemisférica de superfícies no espectro solar. A faixa espectral deve se situar entre 0.2 μm e 2.5 μm .

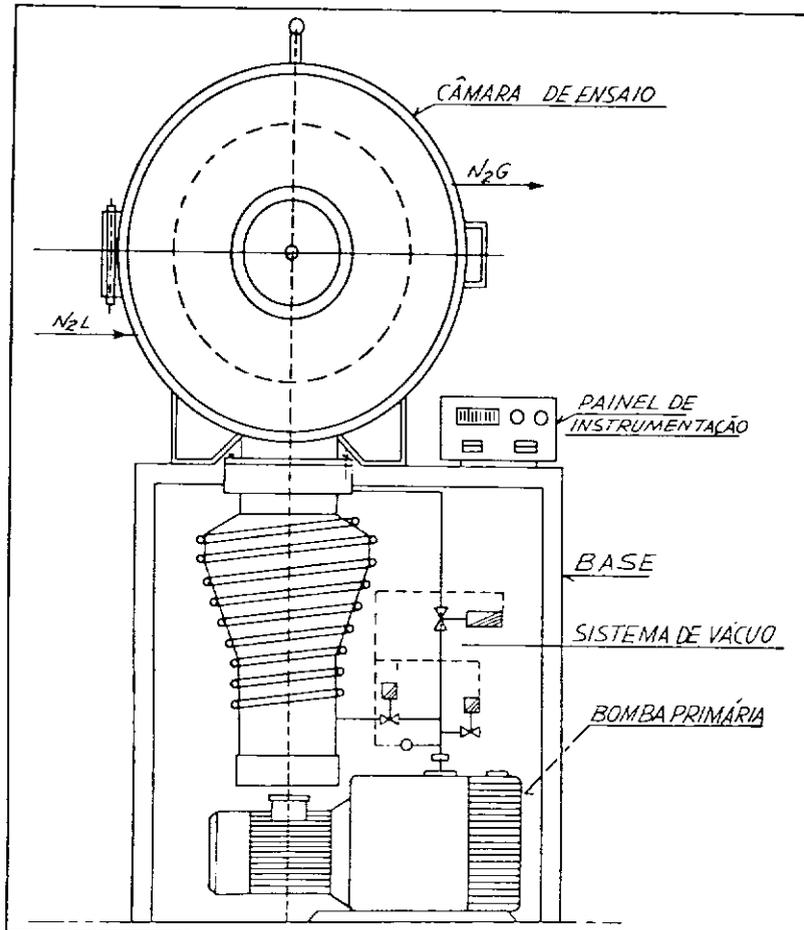
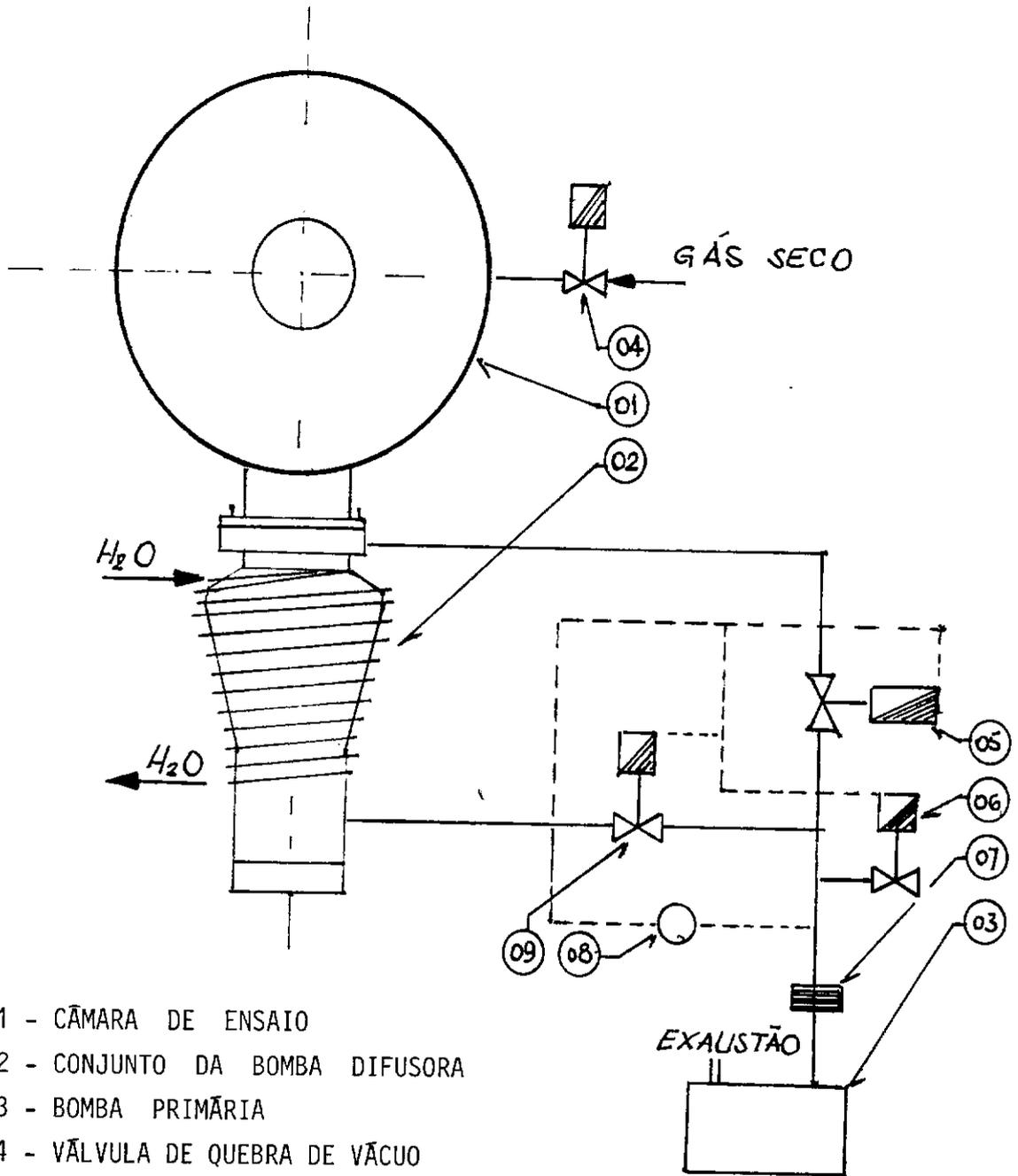


Fig. 4.1 - Câmara Térmica de 250 l.



- 01 - CÂMARA DE ENSAIO
- 02 - CONJUNTO DA BOMBA DIFUSORA
- 03 - BOMBA PRIMÁRIA
- 04 - VÁLVULA DE QUEBRA DE VÁCUO
- 05 - VÁLVULA DE VÁCUO PRIMÁRIO
- 06 - VÁLVULA DE QUEBRA DE VÁCUO
- 07 - ARMADILHA
- 08 - MEDIDOR DE VÁCUO PRIMÁRIO(SAIDA ANALÓGICA)
- 09 - VÁLVULA DE VÁCUO DE SUPORTE

Fig. 4.2 - Esquema do sistema de vácuo da Câmara Térmica de 250 l.

4.2.3 - EMISSÍMETRO

Este equipamento tem como objetivo medir a emissividade total hemisférica de superfícies no espectro infravermelho. A faixa espectral deve se situar entre 2.5 μm e 50 μm .

4.2.4 - CALORÍMETRO

Este equipamento tem como objetivo medir o calor específico de materiais. O grupo está estudando a possibilidade da utilização da câmara térmica para medições de calor específico, o que poderá, a menos em princípio, dispensar a compra de um equipamento dedicado.

4.2.5 - MEDIDOR DE CAMADAS

Tem como objetivo medir a espessura das camadas dos revestimentos térmicos a serem aplicados nas diversas superfícies do satélite na fase de desenvolvimento do projeto térmico. O modelo a ser utilizado deve ser o mais simples possível, porém compatível com as necessidades do projeto.

4.2.6 - LABORATÓRIO DE PINTURA

Na fase de desenvolvimento torna-se necessária a aplicação de revestimentos térmicos em maquete, para a obtenção das propriedades óticas determinadas no projeto térmico. Assim, contar com uma sala de pintura devidamente aparelhada é extremamente importante. Os equipamentos para a sala de pintura estão sendo especificados para compra futura.

4.3 - PROJETOS A SEREM DESENVOLVIDOS

O Laboratório de Controle Térmico do DMC deverá atender as necessidades do grupo de controle térmico na fase de desenvolvimento do projeto térmico de satélites, que inclui além do estabelecimento

gradual da sensibilidade aos problemas práticos, o próprio desenvolvimento de "hardware" e "software" e a verificação de sua confiabilidade.

Além de desenvolver projetos que visam atender as necessidades da MECB na área térmica, o Laboratório tem como objetivo também capacitar o grupo na área experimental.

Assim, pretende-se na fase inicial do projeto térmico dos Satélites de Coleta de Dados (S1 e S2) desenvolver os seguintes projetos ou atividades:

- Determinação experimental de resistência de contato.
- Determinação experimental de condutividade térmica de painéis sanduiches ("Honeycomb").
- Determinação de propriedades óticas (emissividade, condutividade, capacidade térmica).
- Determinação experimental de condutividade térmica em superisolante ("multilayer insulation").
- Projeto e testes de maquetes térmicas.
- Desenvolvimento de "hardware", na área de simulação térmica.
- Desenvolvimento de capacitação na área de medição de temperatura (especificação de tipos de sensores, indicadores, fixações, interpretação de erro de leitura, etc.).
- Medição e obtenção de propriedades termóticas para os diversos tipos de revestimentos térmicos.

- Determinação de absorvidade utilizando simulador solar.

- Aquisição e armazenamento de dados.

Para os Satélites de Sensoriamento Remoto (S3 e S4), tornar-se-á possivelmente necessária a utilização de um esquema de controle térmico ativo. Para tanto, pretende-se também desenvolver "hardware" e "software" nesta área, que deverá incluir tubos de calor ("heat pipes"), armazenadores de energia e outros dispositivos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Nos capítulos anteriores tentou-se por em destaque as atividades e necessidades, a curto e médio prazos dos laboratórios de desenvolvimento e qualificação hoje sob responsabilidade do Departamento de Mecânica Espacial e Controle do INPE, levando em conta os requisitos dos projetos dos satélites da MECB, o atual estágio de desenvolvimento do Departamento e as configurações desses laboratórios em locais tradicionais de desenvolvimento da engenharia aeroespacial, nas áreas de controle de atitude e de órbita, controle térmico, simulação matemática e estruturas espaciais.

A primeira conclusão que pode ser extraída é que o DMC já se encontra preparado para, a curto prazo:

- Instalar e operar um Laboratório de Simulação Digital na forma proposta no item 2.4, para desenvolvimento do "software" de simulação necessário a todas as áreas do DMC, com ênfase na simulação dos Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita.
- Especificar, supervisionar e instalar os meios de teste de desenvolvimento do Laboratório de Controle Térmico.
- Prosseguir no desenvolvimento de projetos não qualificados de equipamentos e componentes de Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita visando a necessária capacitação de trabalho com "hardware" para futuros ensaios de qualificação.
- Prosseguir no desenvolvimento dos projetos experimentais de Controle Térmico usando os meios já disponíveis instalados no Prédio do Satélite.

- Executar os testes de desenvolvimento necessários aos projetos dos Satélites de Coleta de Dados sob responsabilidade do Departamento.

A médio prazo, o Laboratório do DMC deve-se preparar para:

- De modo geral, desenvolver a simulação e testes dos SCAO dos Satélites de Sensoreamento Remoto.
- Em particular, numa primeira fase, desenvolver testes estáticos em malha fechada como etapa inicial dos testes de qualificação dos SCAO dos Satélites de Sensoreamento Remoto.
- Em particular, numa segunda fase, desenvolver os testes dinâmicos em malha fechada dos Sistemas de Controle de Atitude e Órbita dos Satélites de Sensoreamento Remoto.
- Especificar, supervisionar e instalar os meios de teste de desenvolvimento do Laboratório de Estruturas Espaciais.
- Definir todos os aspectos de simulação e testes do Sistema de Controle Térmico dos Satélites de Sensoreamento Remoto.

Os objetivos propostos serão atingidos de forma gradual tanto quanto a capacitação como a necessidade de desembolso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLIED DYNAMICS INTERNATIONAL. *AD-10 Reference Manual*, ADI, Ann Arbor, Michigan.
- BENET, C.A.; GAMBLE, D. *Testing of a Three Axis Stabilized Satellite Attitude Control System*, IFAC Workshop on Simulation and Validation Techniques to Establish Spacecraft Control Systems Performance, Stanford, CA, USA, August 1983.
- CONTRAVES GOERZ CO. *Proposal for a SCD-2 Satellite Control Facility*, Contraves, Document P-13550, Dec. 1983.
- DOSSIÊ TÉCNICO DO SATÉLITE, Documento nº 5, INPE, 1979.
- ELECTRONIC ASSOCIATES, INC. *EAI-2000 Parallel Analog Processors*, Bulletin AHC 1-07/7500/7-80/EAI, 1980.
- *Get the Hybrid Advantage*, EAI, 1982 (1).
- *EAI Simulation Computers - Giving Hands - on Experience with a Dream*, Bulletin AHC 1-17/10000/9-82/Lars, 1982 (2).
- FLEURY, A.T.; RIOS NETO, A. *Control Systems Dynamic Verifications - First Progress Report*, Report nº RML-009-84-24, SPAR Aerospace Limited, SASD, Saint-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada, 1984.
- FLOATING POINTING SYSTEMS, INC. *AP-120B Array Processor Specifications*, Catálogo FPS 5143 3/83, 1983.
- GILBERT, E.O.; HOWE, R.M. *Design Considerations in a Multiprocessor Computer for Continuous System Simulation*, AFIPS Conference Proceedings, vol. 47, 1978.
- IKEUCHI, M.; SUZUKI, T.; ANZAI, T.; ODA, M.; MANABE, S.; UESUGI, T. *Attitude Control System Test Facility in NASDA*, IFAC Workshop on Simulation and Validation Techniques to Establish Spacecraft Control Systems Performance, Stanford, CA, USA, August, 1983.
- ILIĆ, Z.V. *The Available and Typical Speed of EAI-2000 Parallel Processor (in Digital Terms)*, EAI, Bulletin AHC 4-03/1000/R2-70/EAI, 1979.

MARTINS NETO, A.F.; MAIZZA NETO, O.; FLEURY, A.T. *Plano de Implantação do Laboratório de Controle de Atitude e de Órbita*. São José dos Campos, SP, INPE, março 1982. (INPE-2362-NTI/161).

NINOMIYA, K.; YAMAMOTO, H.; AOYAMA, J.; TANAKA, T.; KIMURA, A. *A New Approach to Static Closed Loop Test of Attitude Control Systems Employing Rate Integrating Gyro Sensors*, IFAC Workshop on Simulation and Validation Techniques to Establish Spacecraft Control Systems Performance, Stanford, CA, USA, August, 1983.

REINEL, K.; STAPF, R. *Modern Hardware Simulation Methods in Spacecraft Dynamics*, IFAC Workshop on Simulation and Validation Techniques to Establish Spacecraft Control Systems Performance, Stanford, CA, USA, August, 1983.

RIOS NETO, A.; SPRING, K.; STRIBANY, P.; PAIVA, R.N. *Control System Analysis and Simulation - First Progress Report*, SPAR Report nº TML-009-84-30, SPAR Aerospace Limited, SASD, Sainte-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada, 1984.

STAPF, R.; HEINBOLD, G.; PULS, J. *Modern Simulation Techniques in Spacecraft Dynamics*, Spacecraft Pointing and Position Control, 1981. (AGARD AG-260).

WOLIN, L. *Procedure Evaluates Computers for Scientific Applications*, Computer Design, Nov. 1976.