

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
PROGRAMA PIBIQ-CNPQ**

ALGORITMOS DE CONTROLE ANALÓGICOS E DIGITAIS DO
EXPERIMENTO RODA DE REAÇÃO - ERR

RESUMO DO TRABALHO A SER APRESENTADO NO SEMINÁRIO DE
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

18/04/96

Bolsista : Eduardo César Pereira Vieira / ITA
Orientador : Marcelo Lopes de Oliveira e Souza / DMC

O trabalho consiste no estudo do funcionamento do sistema de controle do Experimento Roda de Reação (ERR) desenvolvido no DMC entre 1990 e 1995 e na comparação de leis de controle aplicadas àquele sistema.

O estudo do funcionamento do sistema de controle envolve as seguintes etapas :

- Apresentação do problema de controle.
- Análise do controlador escolhido.
- Apresentação do experimento desenvolvido no DMC.
- Diagrama de blocos do programa de controle implementado.
- Discussão dos resultados.
- Comentários sobre a parte eletrônica envolvida.



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

NÚMERO
MI-010/96

DATA
05/07/96

COMUNICAÇÃO INTERNA

DE: MARCELO L. S. SOUZA
PARA: COMITÊ PIBIC/INPE AC SRADÉLIO B. AMARAL

ENCAMINHO-LHEO ANEXO O RELATÓRIO
FINAL DA BOLSA DE IC DO BOLSISTA
EDUARDO CÉSAR PEREIRA VIEIRA
NO PERÍODO DE 01/08/1995 A 31/07/1996.

LEMBRO QUE:

- 1) SEU RELATÓRIO PRELIMINAR FOI ENTREGUE
A UPE EM 15/02/1996
- 2) ELE APRESENTOU SEU TRABALHO NO 2º
SEM DE IC NO INPE EM 28/05/1996,
DAS 9:45 ÀS 10:00 H.
- 3) ELE TEM SIDO ASSIDUO E TEM TIPO BOM
DESEMPENHO
- 4) PRETENDEMOS MELHORAR OS ALGORIT-
MOS IMPLEMENTADOS E SIMULÁ-LOS/
TESTÁ-LOS / COMPARÁ-LOS COM OS ORIGINALIS.
SABAVANTE, CF. O PLANO DE TRABALHO
ORIGINAL, NA RENOVACÃO DA BOLSA DE
01/08/96 A 31/07/97.

ATENCIOSAMENTE

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
PIBIC - CNPQ 1995/96

INICIAÇÃO CIENTÍFICA
RELATÓRIO FINAL
28/06/96

Algoritmos de Controle Digital do Experimento Roda de Reação - ERR

Bolsista : Eduardo César Pereira Vieira - ITA

Orientador : Marcelo Lopes de Oliveira e Souza - DMC/INPE

ÍNDICE

1. Introdução.....	4
2. Concepção da Eletrônica e do Controle.....	6
2.1 Especificações da Parte Eletrônica.....	6
2.2 Especificações do Sistema de Controle.....	6
2.3 Modelo da Planta.....	8
3. Projeto do Controlador.....	10
4. Implementação da Unidade Eletrônica.....	14
4.1 Componentes.....	14
4.2 Configuração dos Circuitos Digitais.....	16
5. Programa de Controle.....	18
6. Conclusão.....	26
7. Referências Bibliográficas.....	28

RESUMO

Este trabalho de iniciação científica tem por objetivo realizar o estudo de algoritmos de controle digital em tempo real para sistemas espaciais. Em particular, consiste no estudo da concepção, projeto, implementação e funcionamento do sistema de controle digital de um motor DC sem escovas utilizado para acionar uma roda de reação. O equipamento estudado encontra-se no Laboratório de Simulação Física da Divisão de Mecânica Espacial e Controle (DMC) no INPE sob a denominação de ME-ERR, que é o modelo de engenharia do protótipo requisitado para servir como atuador do sistema de controle da atitude do satélite SCD-02.

1. Introdução

Uma das opções mais utilizadas no controle da atitude de satélites artificiais é a roda de reação. Trata-se de um atuador (ativo) de pequenas dimensões, pequena massa, baixo consumo de energia, o qual consegue atingir altos níveis de desempenho com grande confiabilidade.

O seu princípio de operação é o da conservação da quantidade de movimento angular (QMA) do conjunto satélite-atuador. O sistema de controle da atitude (SCA) do satélite comanda a roda de reação alterando a sua QMA por meio de um torque, o qual atua no satélite em sentido contrário, o que torna possível a alteração da sua atitude dada a redistribuição da QMA total entre a roda de reação e o satélite.

Sob o aspecto construtivo, a roda de reação se apresenta como um dispositivo eletromecânico constituído por um motor elétrico que aciona um volante, ambos apoiados em mancais comuns e colocados dentro de uma caixa, formando um conjunto compacto e de fácil fixação em qualquer ponto da estrutura do satélite. A variação de sua QMA ocorre por meio da alteração da velocidade angular do volante, cujo eixo de rotação é fixo em relação ao satélite.

Os mancais podem ser de rolamentos ou magnéticos. Os mancais de rolamentos exigem um sistema de lubrificação e a manutenção de uma pressão superior à pressão de vapor do lubrificante nas temperaturas de operação. Os mancais magnéticos necessitam de sensores de proximidade e de uma eletrônica de controle da suspensão. Podem também exigir um dispositivo de trava do rotor que deve ser utilizado durante o lançamento, bem como mancais de emergência para o caso de falha da suspensão.

A roda também conta com um sensor para medir a velocidade angular do rotor e com uma eletrônica de controle do motor, capaz de controlar a velocidade angular ou o torque. Essa eletrônica deve se conectar ao SCA do satélite.

O SCA tem a possibilidade de comandar as rodas de reação de duas maneiras distintas. Na primeira delas a roda é controlada em corrente. O SCA solicita um certo torque independentemente do estado da roda (velocidade angular e sentido de rotação). O controlador da roda transforma essa ordem em corrente e a comanda. No segundo modo, a roda é controlada em velocidade. O torque é conseguido através de uma solicitação de alteração da velocidade feita pelo SCA. Há casos em que seus controladores podem operar tanto em torque (corrente) quanto em velocidade.

As exigências fundamentais no projeto de uma roda de reação são, em sua maioria, as mesmas do projeto de qualquer elemento integrante de um satélite, tais como

- ⇒ volume e massa mínimos;
- ⇒ alta confiabilidade;
- ⇒ baixo consumo de energia;
- ⇒ conceito modular.

Além disso, é necessário que a roda esteja bem caracterizada, ou seja, devem ser bem conhecidas as características do motor e o atrito da roda não deve sofrer grandes alterações ao longo da sua vida.

Os estudos sobre rodas de reação como elementos atuadores em sistemas de controle de atitude de satélites artificiais remontam no Brasil ao início da década de 70, com os trabalhos de pioneiros como o Dr. H. I. Weber, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Vale lembrar o seu trabalho, "*Satellite Attitude Control With Desaturated Rotors*", publicado no *Symposium on Satellite Dynamics* da COSPAR - IAU - IUTAM realizado em São Paulo em 1974.

No INPE este assunto foi inicialmente abordado na Divisão de Mecânica Espacial e Controle (DMC), dentro do âmbito da MECB (Missão Espacial Completa Brasileira), por Petrônio Noronha de Souza em seu mestrado, cuja dissertação foi publicada em 1986 sob o título "Análise, Projeto, Construção e Testes de Um Modelo de Roda de Reação Para Aplicações Espaciais", que resultou na construção de uma roda de reação para fins de estudo e na criação do Laboratório de Simulação Física, para atender às necessidades de construção e testes dos sistemas de controle da atitude.

Dentro deste contexto, seguiu-se o trabalho de Gilberto da Cunha Trivelato, que em 1988 publicou sua dissertação de mestrado sob o título "Controle de Rodas de Reação Através de Técnicas Digitais Usando Modelos de Referência". Neste trabalho foi utilizada a roda de reação projetada por Petrônio Souza como planta do sistema de controle e foram atingidos resultados satisfatórios quanto à precisão do controle de velocidade.

Diante da necessidade de construção de uma roda de reação - com motor DC sem escovas, mancal de rolamentos com lubrificação própria e controlada em velocidade - como elemento atuador do SCA do satélite SCD-02, foi montada uma equipe em 1990 no DMC para a realização de tal projeto que foi denominado ERR - Experimento Roda de Reação.

O ERR ficou pronto em 1995, após algumas alterações na sua equipe de projeto. O seu modelo de vôo está testado e pronto para ser incorporado ao SCD-02 e seu modelo de engenharia encontra-se no Laboratório de Simulação Física do DMC disponível para futuros estudos e como base para o desenvolvimento de modelos mais aperfeiçoados.

2. Concepção da Eletrônica e do Controle

Neste item são apresentadas as especificações da parte eletrônica e do sistema de controle do ERR, além da obtenção do modelo de sua planta.

2.1 Especificações da Parte Eletrônica

A parte eletrônica do ERR deve obedecer aos requisitos dos documentos : “SCD-02 - Reaction Wheel Experiment Subsystem Specification”, “SCD-02 - Reaction Wheel Experiment Equipment Specification”, IDS e documentos por estes referenciados.

O projeto eletrônico deve conter circuitos de :

- controle de velocidade da roda utilizando técnicas digitais;
- tratamento dos sinais de entrada de telecomando e de saída de telemetria;
- entrada e retorno de alimentação;
- *driver* de potência do motor DC sem escovas;
- medição da velocidade angular da roda.

Os circuitos a serem utilizados devem, em sua maioria, empregar tecnologia CMOS para minimizar o consumo de potência. A potência disponível para o experimento é de 6,0 W assim distribuídos : +0,5 W para +15 V; +0,5 W para -15 V; +0,5 W para +5 V e +4,5 W para +27 V.

O projeto proposto deve empregar um microcontrolador 8031, uma memória PROM, uma memória RAM, circuitos de proteção e acionamento utilizando relés, fusíveis e diodos, circuitos de recepção de telecomando de seleção de perfil utilizando acoplador óptico, circuito de envio de telemetria analógica da velocidade lida, da corrente do motor, sinais de termistores, telemetria digital do perfil selecionado e do modo de operação (ON/OFF) e ponte H de transistores para alimentação das três fases do motor DC sem escovas.

2.2 Especificações do Sistema de Controle

O sistema de controle de velocidade do ERR se pretende a rastrear a entrada de referência, que se apresenta na forma de 4 perfis de velocidade enviados por telecomando pelo computador de bordo do satélite SCD-02 e gerenciados pelo seu SCA. Os perfis possuem o seguinte formato :

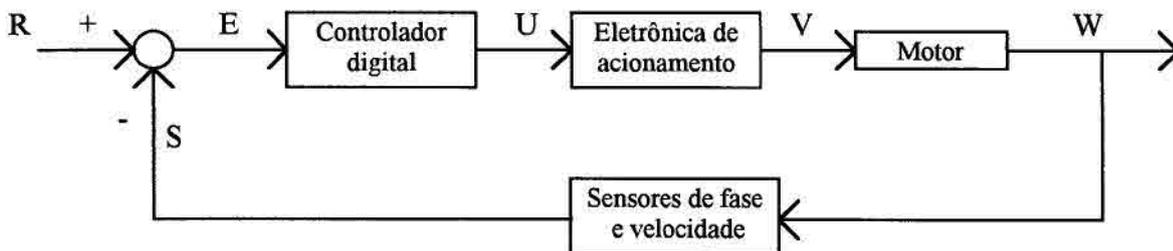
- Perfil 1 : $w_{ref} = +500$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = +100$ rpm durante 25 minutos;

$w_{ref} = -100$ rpm durante 25 minutos;

$w_{ref} = -500$ rpm durante 25 minutos.

- Perfil 2 : $w_{ref} = +1500$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = +750$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = -750$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = -1500$ rpm durante 25 minutos.
- Perfil 3 : $w_{ref} = +100$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = +1500$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = -1500$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = -100$ rpm durante 25 minutos.
- Perfil 4 : $w_{ref} = +750$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = +500$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = -500$ rpm durante 25 minutos;
 $w_{ref} = -750$ rpm durante 25 minutos.

O esquema do sistema de controle proposto encontra-se na figura abaixo.



O controlador, mostrado esquematicamente na figura 1, deve "calcular" a tensão que deve ser aplicada ao motor para que o erro de velocidade na saída seja minimizado. O controlador deve ser implementado por um microcontrolador 8031 da INTEL.

Entre o controlador e o motor deve existir um *driver* de potência basicamente constituído por um conjunto de transistores chaveados por um sinal modulado por largura de pulso (PWM unipolar) e controlados pela fase atual do motor.

O sistema PWM proposto deve utilizar uma fonte de potência DC chaveada numa frequência fixa mas com tempos de chaveamentos variados. Desta forma é possível, dependendo da largura do pulso, aplicar uma tensão média controlada aos enrolamentos do motor. A geração da curva de chaveamento é feita pelo microcontrolador e a função de transferência do circuito de chaveamento é representada por um ganho constante (K_{PWM}).

A medida da fase do motor deve ser realizada por um sensor Hall em cada uma de suas três fases, gerando cada 6 pulsos por rotação defasados de 20 graus entre si.

A medida da velocidade do motor deve ser realizada por uma lógica ou-exclusivo entre as saídas dos sensores Hall, o que gera 18 pulsos por rotação, seguida de uma multiplicação de frequência realizada por um PLL, de modo que o número de pulsos na saída do PLL dentro de um período de amostragem seja numericamente igual à velocidade do motor em rpm. Deste modo, a função de transferência do sensor de velocidade é igual à identidade.

O programa de controle do ERR deverá ser escrito em assembly, armazenado na PROM e desenvolver as seguintes funções :

- Receber telecomandos de terra e/ou computador de bordo que permitam ligá-lo/desligá-lo.
- Receber telecomandos de terra e/ou computador de bordo que permitam alterações de perfis de velocidade previamente programados.
- Executar rotinas de acionamento do motor sem escovas do ERR.
- Implementar a lei de controle que possibilite o acionamento do motor nas velocidades desejadas.
- Enviar sinais de telemetria para terra contendo os indicadores de perfil selecionado, modo de operação (ON/OFF), o valor da corrente consumida pelo motor e o valor do erro em velocidade do motor.

2.3 Modelo da Planta

A planta do sistema de controle do ERR é constituída pelo motor DC sem escovas e o mancal de rolamentos.

Ela comporta um modelo elétrico e um modelo dinâmico. Como se pretende controlar a velocidade angular a partir de uma tensão, é necessário que se estabeleça a relação entre os dois modelos.

Modelo elétrico da planta :

$$v = L \cdot di/dt + R \cdot i + E_g \quad (2.1)$$

, onde :

- v : tensão aplicada aos enrolamentos do motor;
- i : corrente de armadura do motor;
- L : indutância associada aos enrolamentos do motor;
- R : resistência de perdas no circuito elétrico;

E_g : força contra-eletromotriz.

Modelo dinâmico da planta :

$$T_g = (J_m + J_l) \cdot dw/dt + D_w + T_f + T_l \quad (2.2)$$

, onde :

- T_g : torque gerado pelo motor;
- T_f : torque de atrito constante;
- D_w : torque de atrito dinâmico;
- T_l : torque líquido disponível;
- J_m : momento de inércia do motor;
- J_l : momento de inércia da carga (rolamentos);
- w : velocidade angular do motor.

Relação entre os modelos elétrico e dinâmico da planta :

$$E_g = K_e \cdot w \quad (2.3)$$

$$T_g = K_t \cdot i \quad (2.4)$$

, onde :

- K_e : constante de força contra-eletromotriz do motor;
- K_t : constante de torque do motor.

Desprezando os torques T_l e T_f e definindo $J = J_m + J_l$, a função de transferência da planta fica :

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{K_t \cdot K_e}{(L \cdot s + R) \cdot (J \cdot s + D_w) + K_t \cdot K_e} \quad (2.5)$$

Esta função tem dois pólos que na prática são reais e negativos. Os pólos são dados por

$$p_{1,2} = -\frac{(LD_w + RJ)}{2JL} \pm \frac{1}{2JL} \sqrt{(LD_w + RJ)^2 - 4JL(RD_w + K_e K_t)} \quad (2.6)$$

As constantes de tempo relacionadas com estes pólos são :

$$\tau_m = -1/p_1 \quad e \quad \tau_e = -1/p_2$$

Uma constante está associada às características mecânicas da planta e a outra às suas características elétricas.

3. Projeto do Controlador

Uma vez concluído o projeto da parte mecânica do ERR, pôde-se escolher o motor adequado às suas características, ficando então definidos todos os parâmetros da planta do sistema de controle.

Foi escolhido o motor BMS-2801 da Inland Motors, que , acoplado ao mancal projetado, fornece os seguintes parâmetros para o modelo da planta :

- $R = 16.00 \text{ ohm}$;
- $L = 10.81 \text{ mH}$;
- $J = 3.08e-4 \text{ kg.m}^2$;
- $D_w = 7.966e-5 \text{ N.m/rpm}$;
- $K_e = 9.425e-3 \text{ V/rpm}$;
- $K_t = 0.09 \text{ N.m/A}$.

Com estes parâmetros, temos a seguinte função de transferência para a planta :

$$G_p(s) = \frac{W(s)}{V(s)} = \frac{1.529e4}{(s + 1.47e3) \cdot (s + 26)} \quad (3.1)$$

O PWM projetado possui os seguintes parâmetros :

- valor máximo no chaveamento da tensão : $i = 22 \text{ V}$;
- clock do microcontrolador : $cl = 10 \text{ Mhz}$;
- inclinação : $\alpha = cl / 12$;
- período de chaveamento : $ti = 306 \text{ }\mu\text{s}$;

Das especificações da parte eletrônica e controle do ERR, e tendo em vista a função de transferência da planta calculada e os recursos disponíveis, determinou-se o intervalo de amostragem do controlador digital : $T = 208 \text{ ms}$.

O ganho do PWM é dado por :

$$K_{PWM} = \frac{2 \cdot i}{\alpha \cdot ti} \quad (3.2)$$

Com os parâmetros determinados, temos : $K_{PWM} = 0.173$.

O controlador escolhido é do tipo proporcional mais integral, cuja função de transferência no domínio discreto através da transformada de Tustin é :

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_i T (z+1)}{2 (z-1)} + K_p \quad (3.3)$$

onde K_i e K_p são os ganhos do controlador, já levando em conta K_{PWM} , e T é o período de amostragem.

A função de transferência discreta de malha aberta do sistema não compensado, pelo método do segurador de ordem zero é :

$$G_p(z) = (1 - z^{-1})Z\{G_p(s) / s\} \quad (3.4)$$

Que resulta :

$$G_p(z) = \frac{0.398z + 3.21e - 5}{z^2 - 0.00446z} \quad (3.5)$$

A função de transferência de malha fechada do sistema não compensado é :

$$G_{mf}(z) = \frac{0.398z + 3.21e - 5}{z^2 + 0.3935z + 3.21e - 5} \quad (3.6)$$

Os pólos desta função são $z_1 = -8e-5$ e $z_2 = -0.393$.

A função de transferência de malha aberta, considerando o controlador, é :

$$G_{ma}(z) = \frac{(K_i T + 2K_p)z + (K_i T - 2K_p)}{2(z-1)} G_p(z) \quad (3.7)$$

Definindo :

$$a = (K_i T + 2K_p)/2 \quad (3.8)$$

$$e \quad b = (K_i T - 2K_p)/(2a) \quad (3.9)$$

tem-se :

$$G_{ma}(z) = \frac{a(z+b)}{(z-1)} G_p(z) \quad (3.10)$$

A escolha de "a" e "b" (equivalentemente de K_p e K_i) depende de critérios de performance a serem estabelecidos seja no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

A análise no tempo pode ser dividida em duas partes : análise em regime transitório e análise em regime permanente.

O comportamento do transitório pode ser descrito por três variáveis : o tempo de estabelecimento (t_s), o tempo necessário para a resposta variar de 10% a 90% do valor final (t_r) ou tempo de subida e o coeficiente de amortecimento (ξ).

O fator de amortecimento está relacionado com o "overshoot" do sistema (M_p) por :

$$M_p = \exp\{-\pi\xi / \sqrt{1 - \xi^2}\} \quad (3.11)$$

O tempo de subida depende da frequência natural (w_n) do sistema e do fator de amortecimento. Para um $\xi = 0.5$, t_r é aproximadamente :

$$t_r = 2.5 / w_n \quad (3.12)$$

O tempo de estabelecimento é função do período de amostragem T , e, em se considerando um critério de 1% de erro, t_s se relaciona com o raio no plano z (r_o) por :

$$r_o = \exp(-4.6T/t_s) \quad (3.13)$$

No caso do projeto aqui discutido foram eleitos como parâmetros de desempenho :

$$\bullet \quad M_p \leq 20\% \quad \Rightarrow \quad \xi \geq 0.5 \quad (3.14)$$

$$\bullet \quad t_r \leq 5 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad w_n \geq 0.5 \text{ rad/s} \quad (3.15)$$

$$\bullet \quad t_s \leq 15 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad r_o \leq 0.912 \quad (3.16)$$

Dado que a função de transferência de malha aberta $G_{ma}(z)$ apresenta um pólo em $z = 1$, o erro em regime permanente devido a uma entrada degrau, que é a entrada típica do ERR, é nulo. A constante de erro de posição (k_p) é portanto infinita.

Em se aproximando o sistema motor-controlador por um sistema de segunda ordem, é sabido que a frequência w_c onde o ganho é unitário é dada por :

$$w_c = w_n \sqrt{\sqrt{1 + 4\xi^4} - 2\xi^2} \quad (3.17)$$

A frequência w_c depende do período de amostragem T . Em termos práticos usa-se

$$(2\pi)/(10T) < w_c < (2\pi)/(5T) \quad (3.18)$$

A desigualdade acima representa um vínculo imposto ao sistema pelo desempenho esperado no domínio da frequência. De certa forma define a banda passante do sistema.

O projeto do controlador se resume no cálculo de "a" e "b" dados por (3.13) e (3.14). Isto pode ser feito usando-se o aplicativo MATLAB e obedecendo-se aos seguintes passos:

- Estabeleça os requisitos de resposta em regime transitório (M_p , t_r e t_s);
- Escolha w_c dentro da banda passante aceitável (3.18);
- Escolha ξ observando (3.14);
- Calcule w_n dado por (3.17) e observando (3.15);
- Escolha de forma iterativa o zero do controlador, valor de "b", de modo que a curva do lugar das raízes, a curva de ξ e a curva de w_n interceptem-se num único ponto. Cuide para que este ponto esteja dentro da região definida pelos vínculos de desigualdade expressos por (3.14), (3.15) e (3.16) e estabelecidos no começo deste procedimento;
- Determine o ganho para este ponto, que é o valor de "a".

Foram feitas várias simulações e emulações, seguidas de testes no próprio "hardware" do projeto final, chegando-se à seguinte função de transferência para o controlador PI :

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.1680(z - 0.8721)}{(z - 1)} \quad (3.19)$$

A lei de controle referente a esta função de transferência é :

$$u(k) = u(k-1) + 0.1680 * e(k) - 0.1465 * e(k-1) \quad (3.20)$$

4. Implementação da Unidade Eletrônica

Nesta seção encontra-se uma descrição sucinta do conteúdo das quatro placas de circuito e dos conectores da unidade eletrônica do ERR, com detalhes relativos à sua implementação, além da configuração dos circuitos digitais que implementam o controle de velocidade.

4.1 Componentes

O módulo CI-1 contém o circuito digital que implementa o controlador PI do ERR. É composto por :

- um *chip* 8031 (microcontrolador de 8 bits);
- um *chip* 82S191A (PROM de 8 bits e 2 Kbytes);
- um *chip* HM-65642 (RAM CMOS estática de 8 bits e 8 Kbytes);
- um *chip* 82C55 (interface paralela programável de 8 bits e 3 portas);
- três *chips* 54HC244 (*octal buffer e line driver*);
- um *chip* 54HC138 (demultiplexador/decodificador);
- um *chip* 54HC373 (*latch octal transparente*);
- um *chip* AD558 (conversor D/A de 8 bits);
- circuitos auxiliares de *RESET*, *START*, *CLOCK*, interrupções, compatibilidade de padrões e lógicas combinacionais.

O módulo CI-2 contém :

- circuitos para ativar/desativar a alimentação do ERR (constituem-se de entrada de telecomandos de liga/desliga, relés bipolares, fusíveis, filtros de entrada contra ruído e limitador de corrente para a fonte de +27V);
- circuitos de tratamento dos sinais de SI do motor e velocidade para telemetria.

O módulo CI-3 contém :

- o circuito do sensor de velocidade (constituído por um PLL, um contador e uma lógica combinacional ou-exclusivo com as saídas dos sensores Hall);
- um circuito pré-amplificador para a saída do controlador (contendo acopladores ópticos para isolamento de estágios);
- circuitos para tratamento das telemetrias de perfil e *status* da fonte de +5V;
- circuitos de medição de temperatura do motor e dos mancais e tratamento das respectivas telemetrias.

O módulo de potência contém :

- o circuito amplificador de potência do sinal de controle e a lógica de chaveamento dos respectivos transistores para acionar corretamente as três fases do motor.

A cablagem do ERR constitui-se dos cabos :

- entre o módulo CI-1 e o CI-2;
- entre o módulo CI-2 e o CI-3;
- entre o módulo CI-3 e o módulo de potência;
- entre o módulo de potência e o motor;
- de alimentação;
- de telemetria e telecomando;
- de testes.

Através do conector de telemetria e telecomando (ERR0237PD), o computador de bordo do SCD-02 realiza :

- a leitura das telemetrias de velocidade do motor (TM034), corrente de armadura do motor (TM035), perfil atual (TM146 e TM147) , *status* da fonte de +5V (TM063) e temperatura do motor e dos mancais (TM036, TM038 e TM039);
- a aplicação dos telecomandos de liga/desliga (TCO01, TCO02, TCO74 e TCO75) e mudança de perfil (TCO15).

Este conector possui além das entradas e retornos das telemetrias e telecomandos, os retornos das fontes de +5V, +15V, -15V e uma ligação com o chassi do ERR.

O conector de testes (ERR0350PD) encerra os terminais de :

- leitura da velocidade digitalizada do motor (VELO1 a VELO8);
- leitura do sentido desta velocidade (SENT);
- leitura da saída do PLL (PLL);
- leitura das saídas do sensor Hall (SHA, SHB e SHC);
- leitura da saída do controlador (T1 a T6);
- leitura de (SI MOTOR);
- leitura da tensão do motor (V MOTOR);
- leitura das fases do motor (FASE A, FASE B e FASE C);
- entrada e retorno das fontes de tensão (+5V, +15V, -15V e +27V), além do chassi.

Este conector é utilizado apenas para testes. Quando em vôo, não será utilizado, devendo ser lacrado.

O cabo de alimentação está ligado ao conector de alimentação (ERR0115PD), cujos pinos possuem as entradas e os retornos das fontes de tensão (+5V, +15V, -15V e +27V), além da ligação com o chassi.

Alguns detalhes relevantes sobre o projeto e implementação do ERR encontram-se relacionados abaixo :

- Devido à restrição imposta pela fonte de alimentação dos circuitos do satélite SCD-02 para os circuitos do ERR (teto de 15 mA para a sua corrente de alimentação), foi necessária a inclusão de um limitador de corrente ao circuito de alimentação do dispositivo, dando ao sistema de controle uma característica não linear do tipo saturação.
- Foi atendida a exigência de separação do chassi e dos retornos das fontes de tensão de +5V, +15V, -15V e +27V requerida pela fonte do SCD2.
- Foi necessária a introdução de filtros tanto na entrada quanto no retorno das fontes de tensão para a redução de ruído. O projeto de tais filtros foi empírico.

4.2 Configuração dos Circuitos Digitais

O microcontrolador 8031 do circuito digital que implementa o controlador PI possui em seu *chip* uma CPU de 8 bits, 128 bytes de RAM, 21 registradores, 32 linhas de I/O, espaço para endereçamento de 64 Kbytes de memória externa de dados e 64 Kbytes de memória externa de programa, 2 *timers/counters* de 16 bits, estrutura de interrupções de 5 tipos com dois níveis de prioridade, uma porta serial *full duplex* e endereçamento de bits para processamento booleano. Este microcontrolador está configurado para trabalhar com :

- Dois tipos de interrupção : interrupção externa do pino INT0# , de maior prioridade, para detectar mudança de perfil, e interrupção interna do *timer/counter* 0, para implementar o período de amostragem do controlador.
- Um *timer/counter* na forma de contador de 16 bits, para realizar a leitura da velocidade do motor, e o outro na forma de temporizador de 8 bits com carga automática, para implementar a largura do pulso do PWM. Este último *timer/counter* armazena ora o tempo do PWM ativo, ora o tempo do PWM inativo.
- Nenhuma operação com a porta serial.

- 16 pinos destinados para dados : P1.0 a P1.5, reservados para a saída do controlador, e P0.0 a P0.7, usados tanto para operações com as memórias PROM e RAM, quanto para operações com a interface paralela 82C55.
- 11 pinos para endereçamento das memórias e da interface 82C55 : P0.0 a P0.7 e P2.0 a P2.2, sendo os oito primeiros pinos multiplexados no tempo junto com os dados.

A interface paralela 82C55 está configurada para operar com :

- porta A : entrada dos sinais de saída do sensor Hall;
- porta B : saída do sinal digital da velocidade lida no contador do 8031;
- porta C : saída do perfil atual.

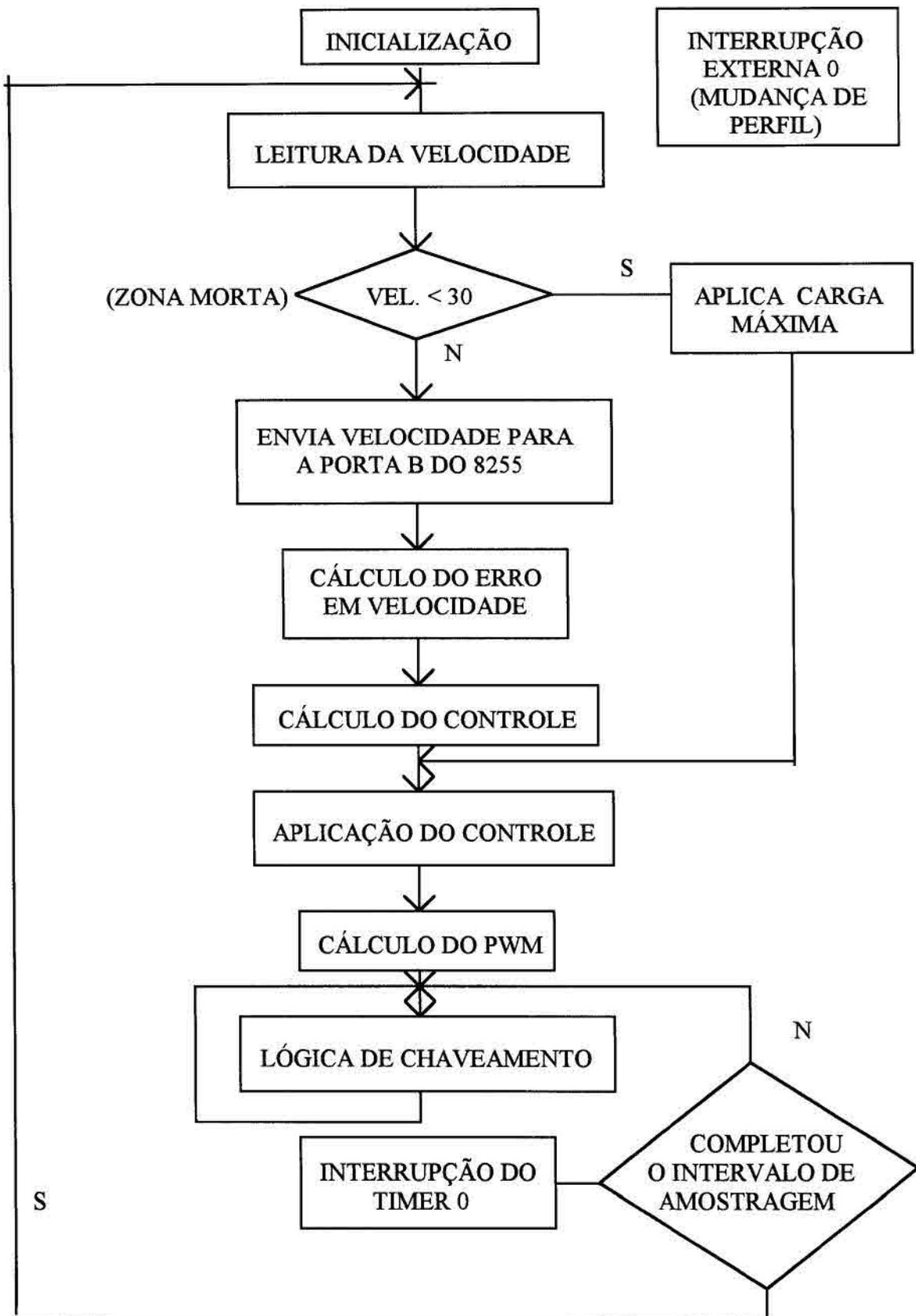
O pedido de interrupção para mudança de perfil é realizado por telecomando através de um circuito com um acoplador óptico.

O sentido da velocidade lida é determinado por uma lógica com um *flip-flop* D e com as saídas SHA e SHB do sensor Hall.

5. Programa de Controle

A memória PROM contém o programa em Assembly (MV_ERR.ASM) do 8031 que implementa o controle de velocidade do sistema no circuito digital do módulo CI-1 do modelo de vôo do ERR. A seguir tem-se um diagrama de blocos sobre o funcionamento do mesmo, seguido do detalhamento de cada bloco e de um mapa da memória RAM utilizada para variáveis e constantes.

DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA DE CONTROLE DO ERR



INICIALIZAÇÃO

- Define os endereços de atendimento das interrupções:
 - 0000H - Reset [0030H]
 - 0003H - Interrupção externa 0 (Int. Ext. 0) (Mudança de perfil) [0700H]
 - 000BH - Interrupção do timer/counter 0 (Timer 0) (Temporização) [0550H]
- Inicializa a interface 8255:
 - Porta A : Entrada (sensor Hall - sequência de fase)
 - Porta B : Saída (velocidade lida)
 - Porta C : Saída (perfil - 2 bits menos significativos)
- Transfere o programa da PROM para a RAM.
- Desliga a PROM.
- Define gatilhamento por transição da Int. Ext. 0 e desaciona os 2 timers/counters.
- Carrega o timer/counter 1 com 0000H.
- Inicializa as constantes e variáveis.
- Indica o perfil default (Porta C do 8255).
- Define a prioridade das interrupções:

Int. Ext. 0	high
Timer 0 overflow	low
Int. Ext. 1	low
Timer 1 overflow	low
Porta serial	low
- Habilita apenas as interrupções Int. Ext. 0 e Timer 0 overflow.
- Seleciona a operação do timer/counter 1 como contador de 16 bits (modo 2) e do timer/counter 0 como temporizador (timer) de 8 bits com carga automática (modo 3).

INTERRUPÇÃO EXTERNA 0 (MUDANÇA DE PERFIL)

- Endereço de início : 0700H.
- Salva o acumulador na pilha.
- Carrega o valor dos multiplicadores e multiplicandos dos controles de intervalo de amostragem e tempo de patamar com #01D.
- Seleciona o novo perfil.
- Carrega as variáveis de perfil com os valores para o novo perfil.
- Indica o novo perfil (Porta C do 8255).
- Retoma o valor do acumulador na pilha.
- Volta ao programa principal.

INTERRUPÇÃO DO TIMER 0

- Endereço de início : 0550H.
- Carrega TH0 com o novo Toff (Ton anterior).
- Complementa B.0.
- Se não completou o intervalo de amostragem, vai para a lógica de chaveamento.
- Desaciona os timers/counters.
- Recarrega o multiplicador e o multiplicando do controle do intervalo de amostragem com os valores iniciais.
- Se não completou o intervalo de tempo de patamar vai para a lógica de chaveamento.
- Recarrega o multiplicador e o multiplicando do controle de intervalo de tempo de patamar com os valores iniciais.
- RL Acumulador.
- De acordo com o valor em 4AH (flag de patamar), troca-se o patamar carregando as respectivas variáveis com os novos valores.
- Atualiza 4AH.
- Volta para a leitura de velocidade.

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

- Endereço de início : 0178H.
- Carrega o valor da velocidade lida (conteúdo do contador 1) nas respectivas variáveis (TH1 em 51H e TL1 em 50H).
- Reseta o contador 1 (0000H).
- Aciona o contador 1.

APLICA CARGA MÁXIMA

- Carrega U(k-1) com #0022D (máxima tensão do PWM).
- Carrega o sinal de U(k-1) com o oposto do sinal da velocidade de referência.
- Carrega Ton com #DCH (máximo).

ENVIA VELOCIDADE PARA A PORTA B DO 8255

- Carrega o nibble menos significativo da porta B com os 4 bits mais significativos da velocidade LSB, os 3 bits menos significativos do nibble mais significativos da porta B com os 3 bits menos significativos da velocidade MSB e o bit mais significativo da porta B com o sinal da velocidade (0 se positiva, 1 se negativa). Se for negativa, complementa os 7 bits menos significativos da porta B. O oposto do sinal é carregado em 52H

DETERMINAÇÃO DO ERRO EM VELOCIDADE

- Calcula a diferença entre a velocidade de referência e a velocidade lida e carrega o módulo do resultado no registrador DPTR (DPH e DPL) e o sinal no registrador R5.

CÁLCULO DO CONTROLE

- Endereço de início : 0470H.
- Calcula a lei de controle : $U(k) = U(k-1) + N0 * E(k) + N1 * E(k-1)$.
- Se o sinal de $U(k)$ for diferente do sinal de $E(k)$, carrega $U(k)$ com 0.
- Se $U(k)$ for maior do que 22, carrega $U(k)$ com 22.
- Atualiza $U(k-1)$ com $U(k)$.
- Atualiza $E(k-1)$ com $E(k)$.
- Carrega Ton com 10 vezes o valor de $U(k)$ e o Acumulador com Ton.
- Carrega o registrador R5 com o oposto do sinal da velocidade lida.

APLICAÇÃO DO CONTROLE

- Carrega o espaço do buffer rotativo para Ton com o Acumulador.
- Carrega o espaço do buffer rotativo para Toff com o complemento do Acumulador.
- Se o sinal da velocidade lida for negativo seta a flag C senão reseta C.

CÁLCULO DO PWM

- Carrega TH0 com o espaço do buffer rotativo para Toff.
- Carrega TL0 com o espaço do buffer rotativo para Ton.
- Seta B.0.
- Aciona o timer 0.

LÓGICA DE CHAVEAMENTO

- Endereço de início : 01FAH.
- Lê a Porta A do 8255 (offset de fase : A,B,C,-A,-B,-C).
- Se fase C :
 - Se B.0 estiver resetado, envia #FFH para a Porta P1.
 - Se C estiver setada, envia #F5H para a Porta P1.
 - Se C estiver resetada, envia #EEH para a Porta P1.
 - Volta para o início do bloco.
- Se fase B:
 - Se B.0 estiver resetado, envia #FFH para a Porta P1.
 - Se C estiver setada, envia #EBH para a Porta P1.
 - Se C estiver resetada, envia #DDH para a Porta P1.
 - Volta para o início do bloco.
- Se fase -A :
 - Se B.0 estiver resetado, envia #FFH para a Porta P1.
 - Se C estiver setada, envia #F3H para a Porta P1.
 - Se C estiver resetada, envia #DEH para a Porta P1.
 - Volta para o início do bloco.
- Se fase A :
 - Se B.0 estiver resetado, envia #FFH para a Porta P1.
 - Se C estiver setada, envia #DEH para a Porta P1.
 - Se C estiver resetada, envia #F3H para a Porta P1.
 - Volta para o início do bloco.
- Se fase -B :
 - Se B.0 estiver resetado, envia #FFH para a Porta P1.
 - Se C estiver setada, envia #DDH para a Porta P1.
 - Se C estiver resetada, envia #EBH para a Porta P1.
 - Volta para o início do bloco.
- Se fase -C :
 - Se B.0 estiver resetado, envia #FFH para a Porta P1.
 - Se C estiver setada, envia #EEH para a Porta P1.
 - Se C estiver resetada, envia #F5H para a Porta P1.
 - Volta para o início do bloco.
- Se nenhuma das fases, volta para o início do bloco.

MAPA DA MEMÓRIA RAM

Endereço - Conteúdo [default]

41H - Espaço do buffer rotativo	66H - E(k) (LSB) [#00H]
42H - Valor de Toff [#23H]	67H - E(k) (MSB) [#00H]
43H - Espaço do buffer rotativo	68H - E(k) (sinal) [#FDH]
44H - Valor de Ton [#DCH]	69H - E(k-1) (LSB) [#00H]
45H - Multiplicador do controle do intervalo de amostragem [#08D]	6AH - E(k-1) (MSB) [#00H]
46H - Multiplicando do controle do intervalo de amostragem [#170D]	6BH - E(k-1) (sinal) [#FDH]
47H - Sinal da velocidade de referência [#FDH = '+']
48H - Multiplicador do controle de tempo de patamar [#01H]	6FH - Tipo de perfil [#03H]
49H - Multiplicando do controle de tempo de patamar [#01H]	70H - Oposto do sinal da velocidade lida [52H]
4AH - Flag de controle de patamar do perfil selecionado [#08H]	71H - (V = 22V) [#22D]
.....
50H - Conteúdo de TL1 (velocidade lida) (LSB)	75H - Valor de N1 [#4BH]
51H - Conteúdo de TH1 (velocidade lida) (MSB)	76H - Sinal de N1 [#02H]
52H - Oposto do sinal da velocidade lida	77H - Valor de N0 [#56H]
53H - Velocidade de referência (LSB) (79H)	78H - Sinal de N0 [#FDH]
54H - Velocidade de referência (MSB) (7AH)	79H - Velocidade de referência (LSB) [7BH]
55H - Sinal da velocidade de referência (47H)	7AH - Velocidade de referência (MSB) [7CH]
56H - Variável aritmética auxiliar 1 (LSB)	7BH - w2 (LSB) [#64H]
57H - Variável aritmética auxiliar 1 (MSB)	7CH - w2 (MSB) [#00H]
58H - Sinal da variável aritmética auxiliar 1	7DH - w1 (LSB) [#F4H]
59H - Variável aritmética auxiliar 2 (LSB)	7EH - w1 (MSB) [#01H]
5AH - Variável aritmética auxiliar 2 (MSB)	7FH - Seleção de perfil [#01H]
5BH - Sinal da variável aritmética auxiliar 2
5CH - Valor de K2 (N1) [75H]	1800H - Offset de fase (A,B,C,-A,-B,-C) (Porta A do 8255)
5DH - Sinal de K2 (N1) [76H]	1801H - Velocidade lida (Porta B do 8255)
5EH - Valor de K1 (N0) [77H]	1802H - Indicação do perfil (Porta C do 8255)
5FH - Sinal de K1 (N0) [78H]	1803H - (Porta de controle do 8255)
60H - U(k) (LSB)	
61H - U(k) (MSB)	
62H - U(k) (sinal) [#FDH = '+', #02H = '-']	
63H - U(k-1) (LSB) [#00H]	
64H - U(k-1) (MSB) [#00H]	
65H - U(k-1) (sinal) [#FDH]	

6. Conclusão

A coleta de vários depoimentos de membros da equipe que desenvolveu o ERR, o estudo de seus documentos de especificações, construção e testes, a realização de medidas no seu modelo de engenharia, a análise de todos esses dados e a confecção de uma documentação didática levaram a conclusões interessantes e instrutivas acerca do projeto de um sistema de controle com qualificação espacial.

As características mais marcantes do projeto do sistema de controle do ERR foram :

- Partida, devido à ocorrência nos primeiros protótipos de uma corrente de *in-rush* acima do aceitável para a entrada de 27 V, que fez necessária a introdução de um limitador de corrente naquela entrada, dando ao sistema uma característica de saturação.
- Ruído indesejável, nos primeiros protótipos, que fez necessária a introdução de filtros (através de projeto empírico) nas entradas e retornos de alimentação.
- Passagem da roda pelo intervalo de velocidade de -30 a +30 rpm (inversão do sentido de rotação), caracterizado pela incapacidade de sensoriamento, sendo necessária a aplicação de carga máxima ao motor nesta situação.
- Alta sensibilidade a temperaturas baixas, devido ao sistema de lubrificação existente, impossibilitando a sua operação nesta situação.

Uma vez chegado o final deste primeiro ano de trabalho de iniciação científica, encerra-se uma fase de estudo e entendimento de um sistema de controle digital em tempo real de um motor DC sem escovas utilizado para acionar uma roda de reação. Pretende-se dar prosseguimento a este trabalho, a partir deste ponto, iniciando-se uma nova fase : a da comparação de leis de controle digital em tempo real aplicadas àquele sistema, mais especificamente, ao modelo de engenharia do ERR (ME-ERR), que se encontra no Laboratório de Simulação Física do DMC no INPE disponível para estudos. O procedimento a ser adotado está resumido a seguir.

- **Estabelecimento de critérios de desempenho.** Esta etapa inicial consiste na especificação dos critérios de desempenho desejados para a dinâmica da planta controlada com a lei a ser projetada. Devem ser especificados os critérios de desempenho no domínio da frequência e no domínio do tempo em regime transitório e permanente.
- **Escolha de um tipo de lei de controle.** Baseada em diversas categorias de controladores, tais como P, PI, PD, PID, compensação em atraso e/ou avanço, controladores ótimos, entre outros.
- **Projeto da lei.** Levando em conta os requisitos de desempenho estabelecidos, o intervalo de amostragem do controlador, os níveis de quantização do controlador, dos sensores e conversores digitais, o tempo de atraso devido aos cálculos computacionais, atritos no mancal, ruído e perturbações externas e podendo utilizar pacotes computacionais como auxílio.
- **Simulação da dinâmica da planta controlada.** Utilizando pacotes computacionais.

- **Correção da lei projetada.** Após a simulação, ajustes devem ser feitos na lei projetada, caso os requisitos de desempenho não tenham sido totalmente atendidos. O processo ajuste-simulação deve ser repetido iterativamente até que os critérios de desempenho sejam completamente atendidos, sem que a lei seja descaracterizada com relação à sua categoria. Caso não seja possível, deve-se alterar os requisitos de desempenho ou abandonar a lei.
- **Implementação da lei no ME-ERR.** Deve-se alterar o programa de controle do ME-ERR para implementar a lei projetada no microcontrolador do seu circuito de controle.
- **Testes da dinâmica do ME-ERR controlado.** Coletar os dados relativos à dinâmica do ME-ERR controlado com a lei projetada através dos sinais de telemetria fornecidos pelo mesmo.
- **Ajuste fino da lei aplicada ao ME-ERR.** Caso os requisitos de desempenho não tenham sido realmente atendidos totalmente.
- **Análise dos resultados.** Uma vez atendidos todos os requisitos de desempenho, realizar um tratamento estatístico dos dados coletados da dinâmica do ME-ERR controlado com a lei projetada.
- **Comparação com outras leis.** Relativamente a cada um dos critérios de desempenho e a fatores como distúrbios externos, rejeição a ruído, não-linearidades e consumo de energia.
- **Redefinição dos critérios de desempenho.** Caso estes estejam muito "frouxos" ou "apertados" com relação ao conjunto de leis estudadas.

Pretende-se também realizar um estudo de viabilidade para a construção de uma nova roda de reação baseada em uma eletrônica híbrida, caracterizada por componentes mais velozes e eficientes, que tornam o projeto mais confiável, enxuto e robusto.

7. Referências bibliográficas

1. Franklin, G. F. e J. D. Powell, Digital Control of Dynamic systems, Addison Wesley, 1980.
2. Souza, P. N., "Análise, Projeto, Construção e Testes de Um Modelo de Roda de Reação Para Aplicações Espaciais", Dissertação de Mestrado em Ciências Espaciais, DMC, INPE, São José dos Campos, SP, 1986.
3. Trivelato, G. C., "Controle de Rodas de Reação Através de Técnicas Digitais Usando Modelos de Referência", Dissertação de Mestrado em Ciências Espaciais, DMC, INPE, São José dos Campos, SP, 1988.
4. Weber, H. I., "Satellite Attitude Control With Desaturated Rotors", Symposium on Satellite Dynamics, COSPAR-IAU-IUTAM, São Paulo, SP, 1974.