



IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE UMA  
RODA DE REAÇÃO COM UM COMPUTADOR INCREMENTAL.

João Benedito Diehl  
Gilberto da Cunha Trivelato  
Juan Suñe Perez

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515  
12201 São José dos Campos - SP

Resumo

Este trabalho mostra uma aplicação, em tempo real, de um computador (digital) incremental na realização de um controlador digital de torque de uma roda de reação. Seus objetivos são: i) avaliar o emprego de técnicas de computação incremental; ii) aplicar esta técnica a um controlador em tempo real; iii) verificar o desempenho do controlador digital implementado. Inicialmente são descritas: a arquitetura do computador, a estrutura de controle implementada e os parâmetros utilizados no sistema considerado. A seguir são apresentados os resultados experimentais obtidos com os testes realizados em laboratório com o sistema de controle resultante. Estes resultados indicam que o computador e o algoritmo adotados atendem às especificações do projeto do sistema de controle que foi construído e testado.

Palavras Chaves: Sistemas Digitais, Controle Digital, Computação Incremental, Roda de Reação, Atuadores, Modelagem de Sistema, Simulação.

IMPLEMENTATION OF A REACTION WHEEL DIGITAL TORQUE CONTROLLER  
WITH AN INCREMENTAL COMPUTER

Abstract

This paper presents a real-time application of a digital incremental computer in the realization of a digital torque controller of a reaction wheel. The objectives are: i) to evaluate the application of incremental computation techniques; ii) to apply this technique in real time controller; iii) to verify the performance of the implemented digital controller. Initially, description is given of: the computer architecture, the implemented structure of control and the parameters which were utilized in the system. Afterwards, experimental results obtained with tests made in laboratory with the resulting control system are presented. These results indicate that the computer and the adopted algorithm comply with the specifications of the control system project which was built and tested.

Keywords: Digital Systems, Digital Control, Incremental Computing, Reaction Wheel, Actuators, Systems Modelling, Simulation.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho mostra uma aplicação, em tempo real, de um computador (digital) incremental para controle de torque de uma roda de reação (usada no controle de atitude de satélites artificiais). Seus objetivos são: i) avaliar o emprego de técnicas de computação incremental; ii) aplicar esta técnica a um controlador em tempo real; iii) verificar o desempenho do controlador digital assim implementado.

O computador utilizado tem como principais características: 1) arquitetura multiprocessadora, concebida especialmente para solução numérica de equações; 2) unidades de processamento conectadas por um barramento

único; 3) comunicação de dados entre processadores feita por difusão ("broadcast"); 4) modo de processamento "Multiple Instruction Multiple Data" (MIMD); 5) processadores imediatamente acoplados.

A roda de reação utilizada é o protótipo desenvolvido e descrito por Souza (1986) e a estrutura de controle empregada é a proposta por Trivelato e Souza (1987, 1988) e desenvolvida por Trivelato (1988).

Inicialmente é apresentada a arquitetura do protótipo do computador incremental ASTRO L-V2, desenvolvido no Departamento de Engenharia e Computação do INPE (Diehl e Perez, 1988). A seguir são descritos: a estrutura de controle empregada; o tipo de con

trolador utilizado; os parâmetros do sistema de controle selecionados; e o experimento realizado. Foram implementados dois tipos de controladores: Proporcional (P) e Proporcional mais Integral (PI). Finalmente são apresentados: os resultados obtidos com os testes de rejeição de distúrbios; a resposta do sistema ao degrau; os comentários sobre estes resultados; a comparação entre os dois controladores (P e PI); e as conclusões e sugestões sobre o sistema analisado.

## 2. MOTIVAÇÕES DESTE TRABALHO

As principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho são: 1) avaliar o desempenho do computador incremental ASTRO L-V2 em tempo real; 2) validar suas interfaces de entrada/saída; 3) prover conhecimentos básicos para uma aplicação com equações (modelos) mais complexas onde possam ser utilizados com maior eficiência os recursos de processamento paralelo do computador incremental; 4) verificar o desempenho dos controladores digitais propostos; 5) prover a conjugação de experiências entre dois diferentes grupos de pesquisa e desenvolvimento (o de Computação e o de Controle), que possuem experiências complementares, para o fim proposto.

## 3. ARQUITETURA DO COMPUTADOR INCREMENTAL

A estrutura de controle descrita neste trabalho foi implementada no computador ASTRO L-V2. Este computador possui uma arquitetura com capacidade de processamento paralelo, a qual está representada no diagrama de blocos da Figura 1 (Diehl, 1987).

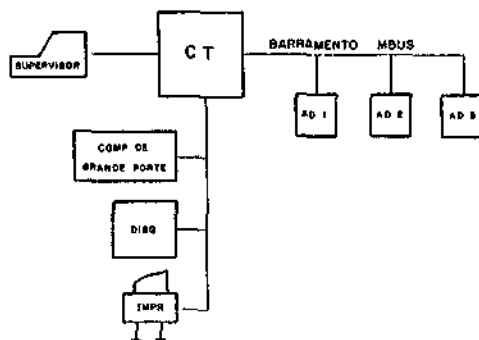


Fig. 1 - Arquitetura do computador ASTRO L-V2.

O computador ASTRO L-V2 é composto de dois tipos de unidades processamento:

- Controlador (CT): unidade mestre, responsável pelo gerenciamento do sistema e pela comunicação externa do sistema de computação.
- Analisador Digital (AD): responsável pela realização de cálculos sob controle do CT.

As unidades de processamento (CT + ADs) são interligadas por um barramento único denominado MBUS. Toda a comunicação entre as unidades de processamento passa, necessariamente, pelo MBUS. Como pode haver conflito entre várias unidades de processamento que pre-

tendem usar o barramento MBUS ao mesmo tempo, foi implementado um ARBITRO, que permite à unidade de maior prioridade usar o barramento, dentre as que concorrem pelo uso deste recurso num determinado momento.

A comunicação entre as unidades de processamento é realizada sob controle do CT, através de um mecanismo de Acesso Direto à Memória (ADM), utilizando uma área específica de memória destinada à comunicação, denominada Memória de Comunicação. A comunicação é do tipo DIFUSÃO ("broadcast"). Neste caso uma unidade de processamento, de cada vez, transmite os dados a todas as demais.

A comunicação do tipo difusão é útil em problemas que são resolvidos iterativamente por vários processadores. Neste caso, cada processador, para realizar os cálculos da iteração atual, necessita dos resultados obtidos pelos outros processadores na iteração anterior. Assim sendo, a difusão simplifica o processo de comunicação entre os processadores, pois basta que cada processador envie seus dados uma única vez para que todos os demais as recebam. Um problema deste tipo ocorre, por exemplo, na solução numérica de um sistema de N equações diferenciais de primeira ordem, quando realizada por N processadores (Bergamini e Diehl, 1987) e (Diehl, 1987).

O computador ASTRO L-V2 pode ser configurado com até 63 ADs. A versão atual contém 3 ADs.

Todas as unidades de processamento (CT + ADs) foram construídas com microprocessadores de 16 bits e possuem co-processador aritmético para cálculo de funções intrínsecas e aritmética em ponto flutuante, com operandos de 32 bits.

Para comunicação com a estrutura de controle descrita neste trabalho foram implementadas portas de entrada e saída paralelas de 16 bits, utilizando mapeamento em memória.

## 4. ESTRUTURA DE CONTROLE

O algoritmo de controle utilizado neste trabalho é um controlador por modelo de referência, tal como foi proposto por Trivelato e Souza (1987 e 1988) e desenvolvido por Trivelato (1988). O diagrama de blocos deste sistema de controle é apresentado na Figura 2.

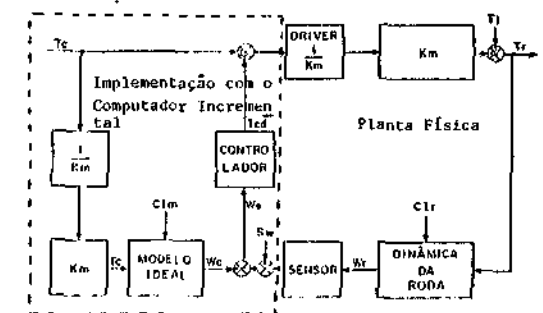


Fig. 2 - Sistema de controle por modelo de referência.

A referência de torque ( $T_c$ ) é aplicada diretamente à roda real e ao modelo de referência implementado no computador incremental. A diferença entre os seus estados ( $W_e$ ) é utilizada para excitar um controlador que força a roda real a seguir o modelo de referência. O parâmetro ( $P_w$ ) do controlador proporcional ( $P$ ) é escolhido segundo os critérios definidos por Trivelato e Souza (1987), o tempo de discretização ( $T$ ), os níveis de quantização ( $Q_i$  e  $Q_w$ ) e os parâmetros proporcional ( $P_w$ ) e integral ( $I_w$ ) do controlador proporcional mais integral ( $PI$ ), segundo os critérios definidos por Trivelato e Souza (1988). Os parâmetros utilizados na implementação (vide Tabela 1) foram selecionados com um tempo de acomodação ( $t_s$ ) de 0,33s para o controlador  $P$  e de 0,67s para o controlador  $PI$ .

TABELA 1  
Parâmetros utilizados na implementação

PARÂMETRO	VALOR
Momento de Inércia (J)	9,87E-3 kg.m <sup>2</sup>
Período de Discretização (T)	1/18 s
Quantização da corrente (Q <sub>I</sub> )	1,67 mA
Quantização da velocidade (Q <sub>w</sub> )	0,03 rpm
Constante proporcional (P <sub>w</sub> ) - caso P	0,128
Constante proporcional (P <sub>w</sub> ) - caso PI	0,12
Constante integral (I <sub>w</sub> ) - caso PI	0,48

### 5. EXPERIMENTO E RESULTADOS

O diagrama de blocos da implementação em laboratório é apresentado na Figura 3.

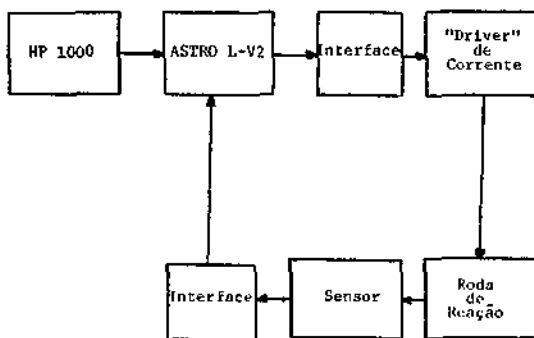


Fig. 3 - Diagrama de blocos da implementação em laboratório.

Inicialmente o computador ASTRO L-V2 fornece uma corrente ( $C_r$ ) constante de forma a levar a velocidade angular da roda de reação ( $W_r$ ) a um nível de 200 rpm, que é a condição inicial do modelo de referência. A seguir o computador passa para o modo de operação normal e mantém este ponto de equilíbrio com o

torque de saída da roda ( $T_r$ ) nulo.

Neste modo de operação o sensor digital mede a velocidade da roda ( $W_r$ ), o computador adquire esta medida, processa o algoritmo e fornece a ação de controle da roda, a interface de saída converte este controle em um sinal analógico para o "driver" de corrente, e o "driver" fornece uma corrente ( $C_r$ ) equivalente a este sinal para a roda.

O computador executa o algoritmo na seguinte ordem de tarefas: aquisição da medida de velocidade; conversão dos dados em ponto flutuante; parametrização de variáveis, cálculo com as equações diferenciais que definem o modelo de referência; cálculo do controle; conversão deste controle em ponto fixo; envio do controle para a interface de saída e, finalmente, armazenamento de dados no computador HP-1000 para análise posterior.

A alocação das tarefas nos recursos do computador é feita da seguinte forma: o cálculo do sistema de duas equações diferenciais de primeira ordem que representam o modelo de referência é feito paralelamente, sendo cada uma das equações alocada em um AD; o CT realiza as demais tarefas do algoritmo e o acionamento e o gerenciamento dos ADs no cálculo das equações diferenciais alocadas a cada um deles.

O primeiro teste efetuado é o teste de rejeição de distúrbios ( $T_i$ ), cujo objetivo é verificar o tempo necessário para que o sistema possa rejeitá-lo. Este teste consiste em aplicar um distúrbio externo de torque constante de  $5,6 \times 10^{-3}$  N.m a partir do instante  $t = 2s$ . Isto é feito com a roda de reação em regime permanente e com referência de torque ( $T_c$ ) nula.

A resposta dinâmica deste primeiro teste ( $T_r$ ,  $W_r$  e  $C_r$ ) utilizando um controlador proporcional, é apresentada na Figura 4; e utilizando um controlador proporcional mais integral, é apresentada na Figura 5.

O torque da roda de reação ( $T_r$ ) é calculado através da derivada numérica da medida da velocidade angular da roda, enquanto essa velocidade e a corrente da roda são adquiridas diretamente do sistema e armazenadas no HP-1000.

Através da resposta do sistema para o teste de rejeição de distúrbios (Figuras 4 e 5) verifica-se que os dois controladores rejeitam o distúrbio externo, mas com tempos de acomodação ( $t_s$ ) diferentes. O controlador  $P$  apresenta um  $t_s = 0,33s$ , enquanto que o controlador  $PI$  apresenta um  $t_s = 1s$ . Em regime permanente, o erro de velocidade para o controlador  $P$  é constante em média e aumenta a partir do instante em que o distúrbio externo é provocado. No controlador  $PI$  este erro é em média igual a zero antes e depois da aplicação do distúrbio. Pode-se observar um "overshoot" de aproximadamente 40% no controle para o caso  $PI$ .

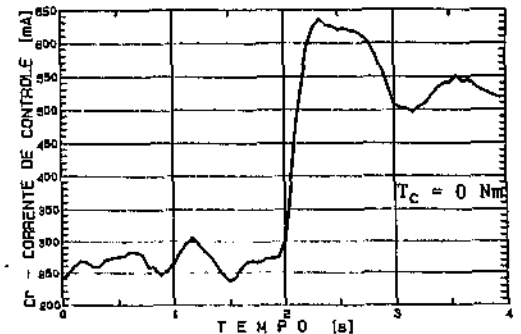
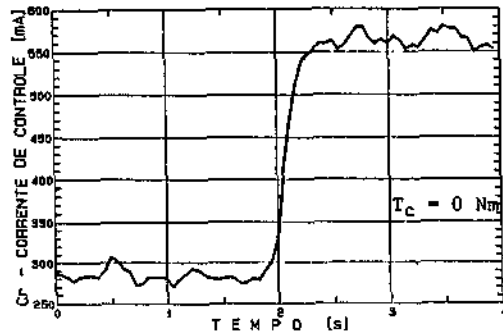
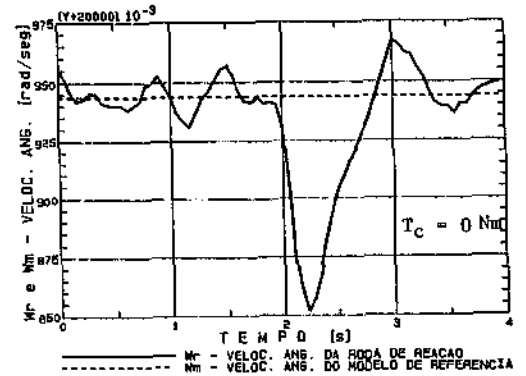
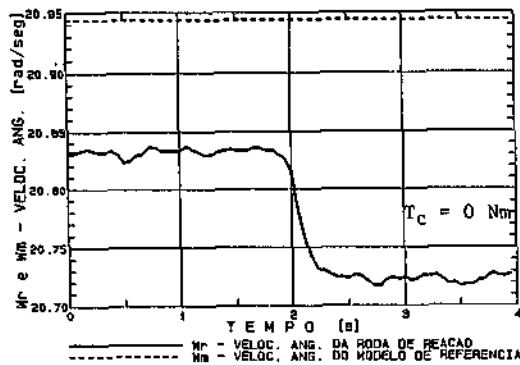
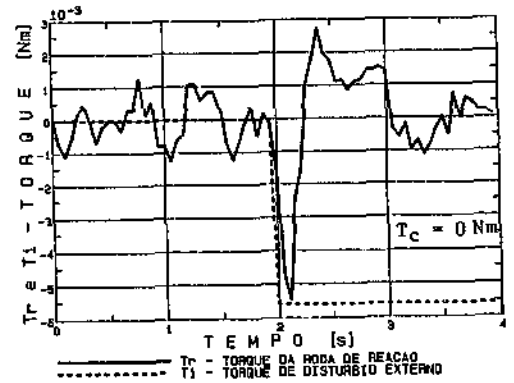
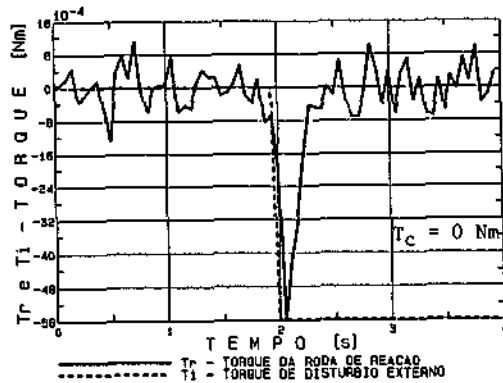


Fig. 4 - Resposta dinâmica a um distúrbio de torque  $T_1 = 5,6 \times 10^{-3}$  N.m, com controlador proporcional (P).

Fig. 5 - Resposta dinâmica a um distúrbio de torque  $T_1 = 5,6 \times 10^{-3}$  N.m, com controlador PI.

O segundo teste efetuado é o da resposta a uma entrada ( $T_c$ ) do tipo degrau de referência de torque. Seu objetivo é verificar o comportamento do sistema a uma entrada de referência de torque  $T_c = 5 \times 10^{-3}$  N.m no intervalo de 2 a 7s.

A resposta dinâmica deste teste, utilizando um controlador do tipo P, é apresentada na Figura 6; e utilizando um controlador do tipo PI, é apresentada na Figura 7.

Através das respostas do sistema para a entrada em degrau (Figuras 6 e 7) verifica-se que os dois controladores apresentam desempenhos semelhantes. O torque médio calculado no intervalo de 2 a 7s é  $T_r = 4,97 \times 10^{-3}$  N.m para o caso PI. A diferença fundamental entre os dois controladores é o erro de velocidade. Este permanece em média constante e diferente de zero para o caso P; e é nulo em média para o caso PI.

O tempo gasto pelo ASTRO L-V2 em uma iteração (aquisição, processamento e atuação) foi de 5,53 ms para o controlador P e de 6,4 ms para o controlador PI.

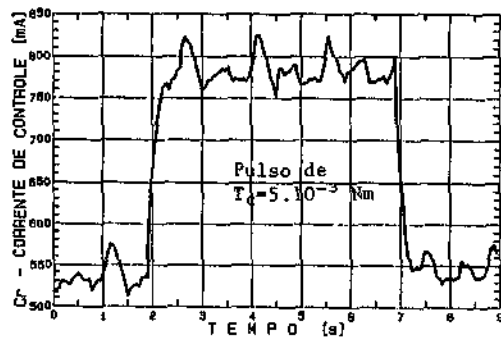
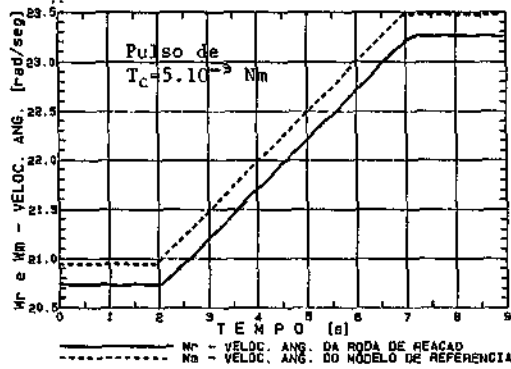
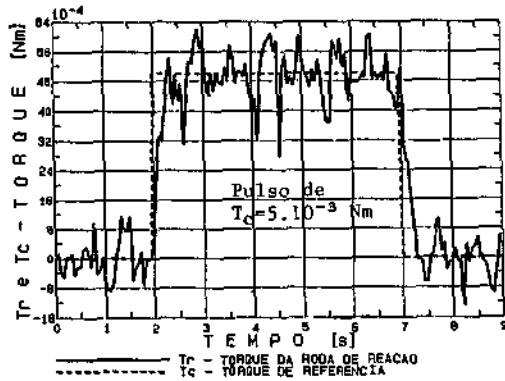


Fig. 6 - Resposta dinâmica do sistema a uma referência de torque  $T_c = 5,0 \times 10^{-3}$  N.m do tipo degrau, com controlador proporcional (P).

#### 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os testes apresentados neste trabalho sugerem as seguintes conclusões: 1) A utilização do computador incremental com processamento paralelo foi altamente satisfatória para a simulação do modelo de referência escolhido para a roda de reação; 2) O tempo comunido pelo computador ASTRO L-V2 em uma iteração é aproximadamente 10% do período de digitalização, o que certamente o capacita para uso em tempo real, mesmo com uma considerável redução do tempo de discretização utilizado (se desejável); 3) A estrutura de controle

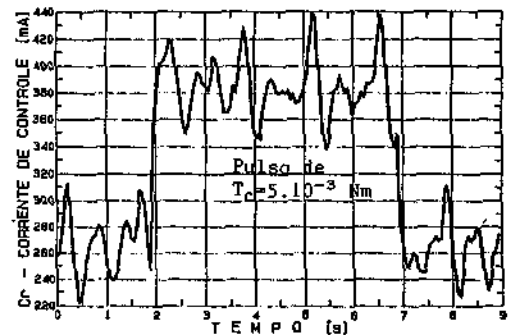
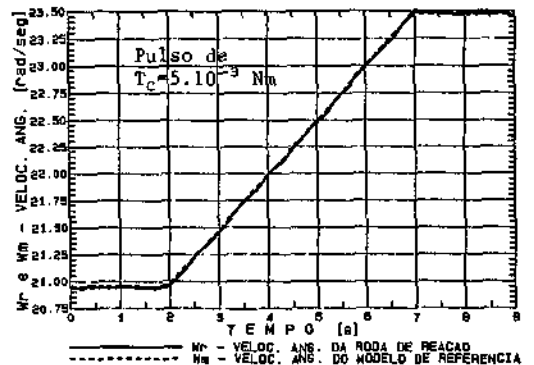
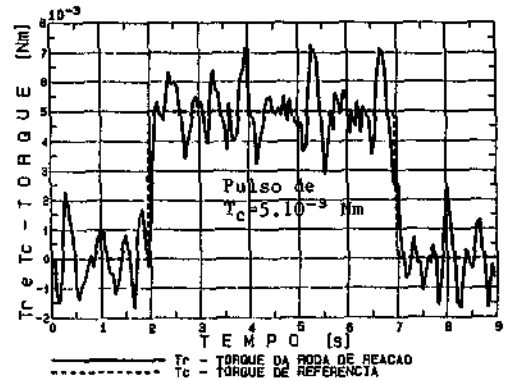


Fig. 7 - Resposta dinâmica do sistema a uma referência de torque  $T_c = 5,0 \times 10^{-3}$  N.m do tipo degrau, com controlador proporcional mais integral (PI).

proposta é satisfatória, utilizando os controladores P e PI, pois o sistema foi capaz de rejeitar distúrbios e de responder a uma entrada em degrau com os dois tipos de controlador; 4) O controlador P apresenta um tempo de acomodação mais rápido que o controlador PI, mas seu erro de velocidade, em média, é diferente de zero; 5) Este trabalho permitiu a troca de experiências entre dois diferentes grupos de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

Os resultados alcançados foram altamente compensadores e motivam utilização do ASTRO L-V2 em simulação e controle em tempo real de sistemas (modelos) mais complexos. As vantagens do processamento paralelo em relação ao monoprocessamento poderão ser observadas à medida que se aumentar a complexidade das equações diferenciais do modelo, o que deverá tornar crítico o tempo disponível para processamento. O próximo objetivo dos grupos envolvidos é aplicar este computador na simulação física experimental de Sistemas de Controle de Atitude para aplicações espaciais.

Em relação ao sistema de controle, sugere-se o acréscimo de filtros digitais no controle calculado para tornar mais suave a resposta do sistema.

#### 7. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seus agradecimentos ao Dr. Eduardo Whitaker Bergamini pelos inestimáveis estímulos e pela cooperação na execução deste trabalho.

#### 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bergamini, E.W.; Diehl, J.B. (1987) "Uma arquitetura com processamento paralelo para computação incremental". Anais do I SBAC/PP, Gramado, RS.
- Diehl, J.B. (1987). "Computador ASTRO LV2: cálculo da solução de sistemas de equações diferenciais de primeira ordem". São José dos Campos, SP. INPE-4440 - RPI/188 (DCA).
- Diehl, J.B. (1987). "Computador ASTRO L-V2: descrição lógica". São José dos Campos, INPE-4442-RPI/189 (DCA).
- Diehl, J.B.; Perez, J.S. (1988). "Computador ASTRO L-V2: descrição de hardware". São José dos Campos, SP. INPE-RPI (prelo).
- Souza, P.N. (1987). "Análise, projeto e construção e testes de um modelo de roda de reação para aplicações espaciais". Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial. São José dos Campos, SP. INPE-4358 - TDL/299.
- Trivelato, G.C.; Souza, M.L.O. (1987). "Controle de rodas de reação através de técnicas digitais usando modelos de referência". Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. 895 - 898. Florianópolis, SC.
- Trivelato, G.C. (1988). "Controle de rodas de reação através de técnicas digitais usando modelos de referência". Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial. São José dos Campos, SP. INPE (prelo).
- Trivelato, G.C.; Souza, M.L.O., (1988). "Projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação usando modelos de referência". Anais do VII Congresso Brasileiro de Automática. São José dos Campos, SP.



- DISSERTAÇÃO
- TESE
- RELATÓRIO
- OUTROS

TÍTULO

Implementação de um controlador digital de torque de uma roda de reação com um computador incremental

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

João Benedito Diehl  
Gilberto Trivelato  
Juan Sune Perez

ORIENTADOR

DISS. OU TESE

CO-ORIENTADOR

DIVULGAÇÃO

- EXTERNA    INTERNA    RESTRITA
- EVENTO/MEIO   SBA
- CONGRESSO    REVISTA    OUTROS

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGÃO

DCG

NOME DO REVISOR

Eduardo W. Bergamini

NOME DO RESPONSÁVEL

*DECIO CASTILHO CEBALLOS*

APROVAÇÃO

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

01/04/88

08/04/88

*Eduardo W. Bergamini*

APROVADO

- SIM  
 NÃO

ASSINATURA

*DECIO CASTILHO CEBALLOS*

Coordenador de Departamento de Controle e Guiagem

Nº

PRIOR.

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

53

1

12/4/88

*Márcia Prado de Carvalho*

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ALEXANDO NORMAS, SE HOUVER

DATILOGRAFIA

PÁG.

DEVOLVIDO

ASSINATURA

14

23/4/88

*Márcia P. Carvalho*

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILOGRAFA

—/—/—

—/—/—

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

- SIM  
 NÃO

—/—/—

DIRETOR

Nº DA PUBLICAÇÃO:

PÁG.:

CÓPIAS:

Nº DISCO:

LOCAL:

OBSERVAÇÕES E NOTAS