

CONTROLE DE ATITUDE AUTÔNOMO DE ROTAÇÃO DE SATÉLITES USANDO LÓGICA NEBULOSA

Rodrigo Guerra - ETE/CMC

Sandra Aparecida Sandri - LAC

Marcelo Lopes de Oliveira e Souza - DMC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

CP 515 - 12227-010 São José dos Campos - São Paulo - Brasil

Resumo: Este trabalho discute o estudo e o desenvolvimento de um controlador nebuloso para um microsatélite estabilizado por rotação numa órbita polar quase-circular baixa. Uma base de regras é mostrada para o controle autônomo de rotação em dois modos de operação através de duas bobinas magnéticas. O controlador desenvolvido foi simulado e comparado com um controlador convencional em seus dois modos de operação mostrando-se eficiente na escolha das polaridades e instantes de chaveamento com simplicidade, flexibilidade e robustez.

1. INTRODUÇÃO

O controle de atitude autônomo de satélites tem propiciado grandes melhorias de performance operacional e tem sido alvo de inúmeros estudos nos últimos anos. Uma abordagem simples e de fácil implementação para garantir um aumento de autonomia é a utilização da *Lógica Nebulosa* [1] no algoritmo de controle [2], [3], [4]. Este controle, um tipo de sistema especialista, se destaca pela robustez e adaptabilidade, já que incorpora o conhecimento que não pode ser acomodado num modelo analítico.

O Controlador Nebuloso (CN) desenvolvido neste trabalho utiliza o ambiente de simulação MATLAB®/ Simulink com o Fuzzy Logic Toolbox, e foi voltado em especial para realizar os modos de operação do primeiro Satélite de Aplicações Científicas brasileiro SACII (fig.1). O modelo original do satélite com o controlador convencional, foi projetado e simulado no ambiente MATRIXx® [5], sendo implementado em dois PCs [6] a fim de migrá-lo para o computador de bordo. Tal modelo, é utilizado para comparar o desempenho do CN com o controlador convencional [7] que será embarcado, para validá-lo sob as mesmas condições.

O controle de atitude do SACII foi concebido com 4 modos de operação distintos:

1. Aquisição do Sol: apontamento dos painéis solares (eixo Z) em direção ao Sol;
2. Controle de Precessão: manutenção dos painéis solares em direção ao Sol;
3. Spin up: Aumento da velocidade de rotação em torno do eixo Z, o de maior momento de inércia;
4. Controle de Spin: manutenção da velocidade de rotação em $36^\circ/\text{seg}$ ou 6 rpm para estabilização.

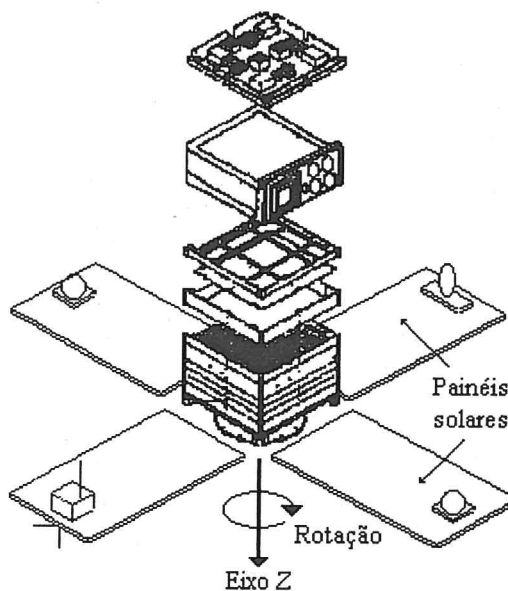


Fig.1. Microsatélite SACII

Bobinas magnéticas ao redor dos eixos XYZ do satélite são alimentadas com correntes constantes que podem ser chaveadas em dois sentidos, gerando um vetor momento de dipolo magnético \mathbf{M} . Este interage com o vetor campo de indução geomagnética \mathbf{B} gerando um torque \mathbf{N} dado pelo produto vetorial:

$$\mathbf{N} = \mathbf{M} \times \mathbf{B}$$

Mesmo que a direção de \mathbf{M} possa ser controlada, o vetor \mathbf{B} é totalmente dependente da posição orbital do satélite. Assim, o torque de controle nem sempre é favorável em certas regiões da órbita, causando perturbações indesejáveis que devem ser inibidas pelo controlador.

Um algoritmo de controle aceitável deve maximizar a influência desejável do torque num eixo e minimizar as perturbações nos outros, garantindo uma resposta rápida no tempo e mantendo o uso de energia baixo.

Neste trabalho é apresentado o modelo do CN para realizar o controle dos modos de operação 3 e 4.

2. MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação foi concebido com as seguintes características de projeto (fig. 2):

- Integração das equações de atitude do satélite;
- Propagação dos elementos orbitais;
- Modelo do Sol;
- Modelos Geogravitacional e Geomagnético;
- Modelos dos sensores solar e magnetômetro;
- Modelo dos atuadores (bobinas);
- Modelo do controlador convencional;
- Modelo do CN.

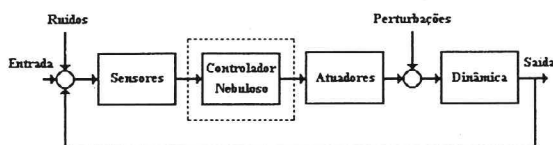


Fig.2. Modelo do satélite

O modelo foi desenvolvido utilizando-se a forma de diagramas de blocos, de tal forma a permitir modificações imediatas em qualquer ponto do processo e também garantir a avaliação do projeto mediante simulações.

No entanto, a modelagem de sistemas dinâmicos reais com características não lineares ou variantes no tempo, tem representado um grande desafio para todos os métodos existentes [8]. Apesar de existirem várias técnicas de análise e projeto matematicamente precisas, todo projeto ainda depende do bom senso do projetista. O modelo, a base fundamental desse tipo de projeto, nem sempre é igual ao processo real, caracterizando a existência de incertezas devido ao fato de que os modelos físicos são representados por modelos matemáticos que não podem ser considerados exatos e únicos.

3. CONTROLADOR NEBULOSO

Para o desenvolvimento do CN proposto, foi considerado interessante estudar de um modo formal a política de controle escolhida para o projeto SACII como base de conhecimento. A partir desta análise inicial, foi possível definir as propriedades operacionais do CN em questão, tais como a base de regras responsáveis pelo comportamento do controle em termos das entradas e saídas (fig.3).

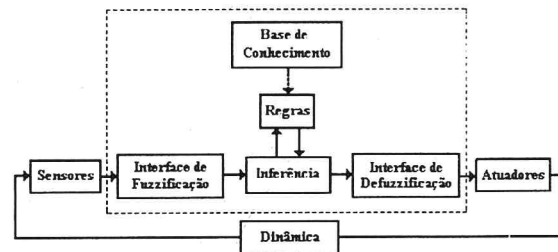


Fig.3. Arquitetura típica do CN

O controle dos modos de operação 3 e 4 é feito através do acionamento de duas bobinas independentes nos eixos X e Y. Para se atingir o "set point" de operação, foi desenvolvido um CN consistindo de um sistema de Múltiplas entradas e uma saída (MISO) descrito a diante. O diagrama de bloco do CN proposto é mostrado na figura 4.

As variáveis de entrada para o CN são o erro de velocidade angular $\Delta\omega = \bar{\omega} - \omega$ em torno do eixo Z, onde $\bar{\omega}$ é velocidade angular desejada, e o torque estimado \hat{N}_z dado pela expressão abaixo:

$$\hat{N}_z = M_x \cdot B_y - M_y \cdot B_x$$

onde M_x e M_y são os momentos de dipolo magnéticos das bobinas X e Y respectivamente; B_x e B_y são componentes do campo geomagnético. A grandeza \hat{N}_z é calculada com as bobinas "chaveadas" positivamente.

A variável de saída é a polaridade ou sinal da corrente elétrica que é imposta à bobina, determinando o módulo e o sentido do torque. O mesmo comando é aplicado nas duas bobinas.

A escolha destas variáveis de entrada e saída permitiram que uma base de regras bem simples pudesse ser escrita, facilitando a compreensão do modelo e dos vínculos nele contidos.

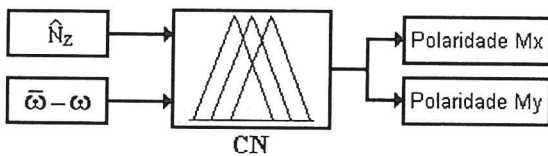


Fig.4. Diagrama de entradas e saída

O entendimento do modo de operação da lei de controle analítica convencional, em que um torque efetivo máximo e um torque transverso mínimo são gerados, foi utilizado para a formação de uma base de conhecimento que foi usada na concepção da base linguística de regras.

Para se obter um desenvolvimento eficiente, foi utilizado o software MATLAB® com a ajuda do Fuzzy Logic Toolbox [9] e do ambiente de simulação Simulink. Assim, foi possível criar um Sistema de Inferência Fuzzy (FIS) usando o modelo de Larsen [1],[10] que relaciona as variáveis de entrada com as variáveis de saída através de um conjunto de conjuntos nebulosos, uma base de regras e operadores definidos. Um conjunto nebuloso A em Ω é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$ e é dito ser normalizado se $\exists \omega_0 \in \Omega$ tal que $\mu_A(\omega_0)=1$.

Foram definidos dois conjuntos nebulosos para representar os termos linguísticos da variável linguística \hat{N}_z : o Positivo *Pos* e o Negativo *Neg*. Eles representam as duas possibilidades de sentido que o torque estimado pode assumir. O domínio de cada conjunto indica a "intensidade" de \hat{N}_z .

Com relação à variável de entrada $\Delta\omega$, dois conjuntos nebulosos também foram definidos. Devido ao fato de que o satélite parte após a separação do foguete com velocidade angular zero e a forma como foi definido o erro, este pode ser dito positivo. Assim temos dois termos linguísticos de $\Delta\omega$: o Zero *Z* e o Positivo *P*.

As funções de pertinência usadas para as variáveis de entrada são mostradas nas figuras 5a e 5b abaixo.

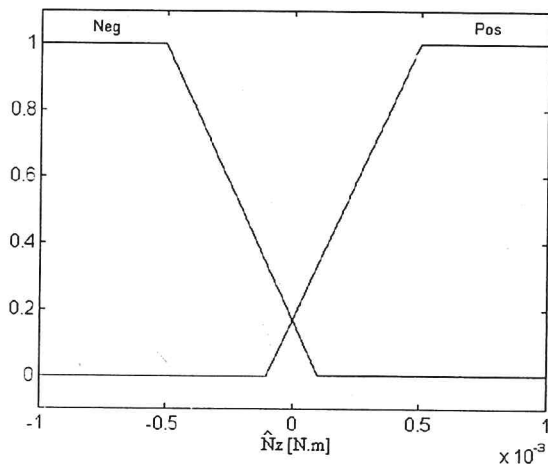


Fig.5a. Funções de Pertinência de \hat{N}_z

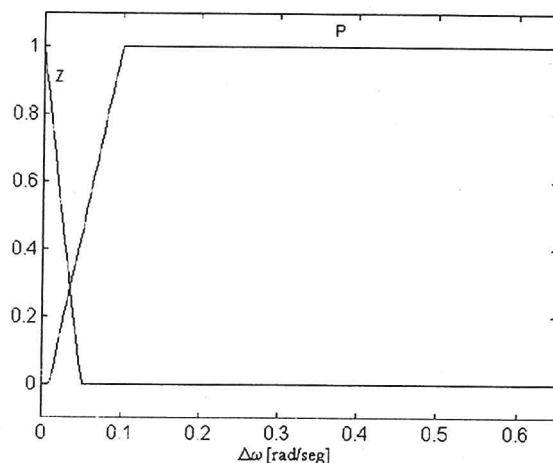


Fig.5b. Funções de Pertinências de $\Delta\omega$

A variável de saída Polaridade é inferida em três valores “crisp” que são: -1, 0 e +1.

Um conjunto de apenas 4 regras foi necessário para cobrir todas as possibilidades de realizações das variáveis de entrada (completude), de maneira que em qualquer condição existe uma regra dominante.

A relação das regras definidas são as seguintes:

Se $\hat{N}z$ é Pos e $\Delta\omega$ é P então Polaridade é -1

Se $\hat{N}z$ é Neg e $\Delta\omega$ é P então Polaridade é +1

Se $\hat{N}z$ é Pos e $\Delta\omega$ é Z então Polaridade é 0

Se $\hat{N}z$ é Neg e $\Delta\omega$ é Z então Polaridade é 0

Uma regra genérica para exemplificar todo o processo é dada por:

$$R_j : \text{Se } x_1 = A_{1,j} \text{ e } x_2 = A_{2,j} \text{ então } y = C_j$$

Então a realização de uma variável x_i é definida como sendo o valor x_i^* que esta assume nos domínios dos conjuntos nebulosos $A_{i,j}$. A *Compatibilidade* da i-ésima premissa da j-ésima regra com x_i^* é definida como:

$$\alpha_{i,j} = \mu_{A_{i,j}}(x_i^*) \quad \forall i,j$$

Após todas as premissas de uma regra serem avaliadas, a T-norma probabilista é usada para a determinação da *Compatibilidade Global* α_j para cada regra ou seja, temos $\alpha_j = (\alpha_{1,j} \bullet \alpha_{2,j})$ com $j=1,4$. Esta T-norma garante que α_j seja influenciado diretamente pelas duas premissas.

A seguir, o operador de implicação do produto relaciona o α_j de uma regra com o respectivo conjunto nebuloso C_j do consequente. Temos então:

$$\mu_{C_j'}(y) = \alpha_j \bullet \mu_{C_j}(y) \quad \forall j$$

com y é a variável de saída e μ_c a função de pertinência de y em C_j .

O mecanismo de agregação utilizado é o operador de disjunção dado pela T-conorma do Máximo:

$$\mu_c(y) = \max[\mu_{C_1}(y), \mu_{C_2}(y), \mu_{C_3}(y), \mu_{C_4}(y)]$$

Finalmente a defuzzificação é feita através do método Média dos Máximos (MOM). Esta estratégia gera uma ação de controle que é representada pelo valor médio de todas as ações de controle cujas funções de pertinência atingiram o máximo. Desta forma o valor mais significativo dentre todos torna-se a ação de controle “crisp” que representará o comando de polaridade das bobinas.

Assim, foi possível extrair a polaridade para um determinado instante, eliminando contradições e validando a consistência e a interação da base de regras.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para testar o comportamento do CN diante do modelo dinâmico e compará-lo com o controlador convencional, foram conduzidas várias simulações no ambiente Simulink. Aqui são mostrados os resultados envolvendo as duas técnicas de controle.

Tanto o controlador convencional quanto o CN foram avaliados diante das mesmas condições iniciais e de simulação. Tais condições foram baseadas em dados característicos de satélites com modos de operação similares e parâmetros específicos do projeto SACII. As simulações foram realizadas em um PC Pentium 100 MHz.

Foram conduzidas simulações num período equivalente a 4 órbitas. Cada órbita tem a duração aproximada de 100 minutos. Os resultados da aquisição de velocidade angular em torno do eixo Z com a condição inicial $\omega = 0.001^\circ/\text{seg}$ são mostrados nas figuras 6a e 6b para o controlador convencional e para o CN respectivamente. Nos gráficos 7a e 7b são mostrados os comportamentos das bobinas X e Y durante o intervalo inicial de 2000 segundos para o controlador convencional e para o CN, respectivamente.

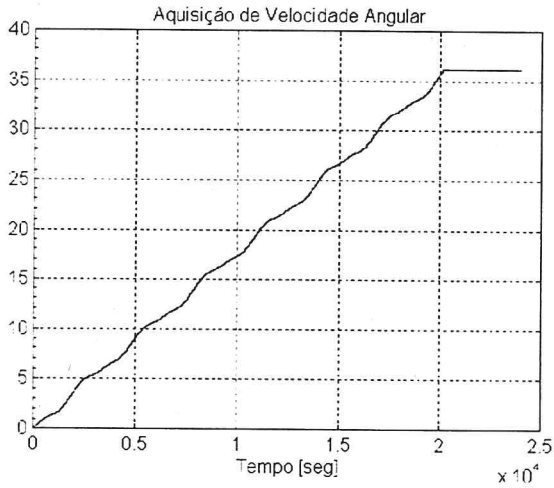


Fig. 6a. Gráfico ω [°/seg] \times tempo [seg] do controlador convencional

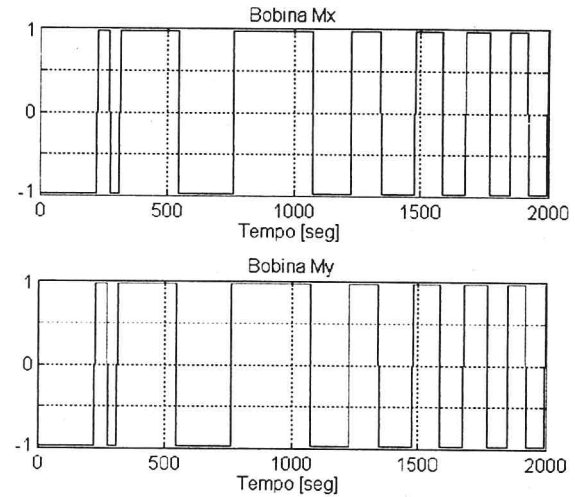


Fig. 7b. Polaridades de Mx e My do CN

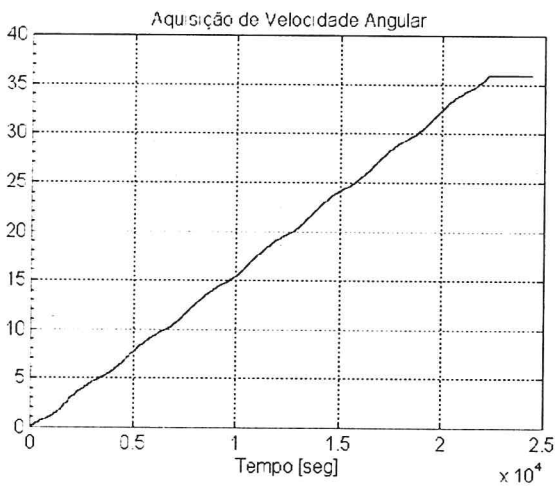


Fig. 6b. Gráfico ω [°/seg] \times tempo [seg] do CN

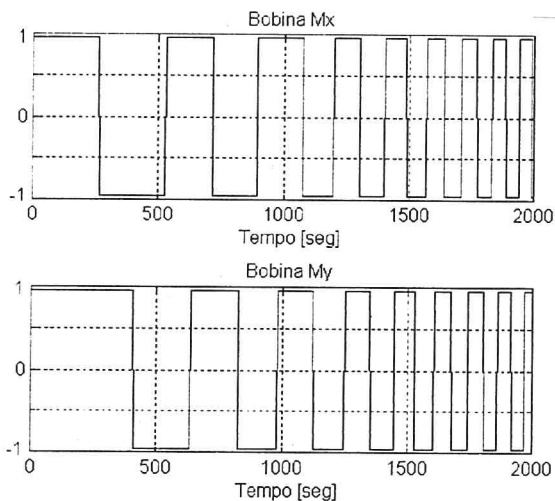


Fig. 7a. Polaridades de Mx e My do controlador convencional

A análise de desempenho consistiu em verificar a existência de erro com relação ao “set point”, oscilações em regime permanente e se o tempo de resposta era comparável com o do controlador convencional. Com esta análise no tempo, foi possível qualificar e quantificar o desempenho do CN diante da simulação e do controlador convencional.

Verifica-se através dos gráficos 6a e 6b que o desempenho do CN foi muito similar ao do controlador clássico sendo que o CN resultou num controle mais suave. No entanto, o tempo para se atingir o estado desejado de velocidade angular foi maior do que o gasto pelo controlador convencional. As diferenças nos gráficos 7a e 7b, sugerem que modificações no CN ainda podem ser feitas visando uma melhor escolha dos instantes de chaveamentos entre as bobinas, garantindo que o torque efetivo gerado seja maior.

É possível melhorar a resposta no tempo do CN fazendo ajustes na sua estrutura. Uma técnica viável é a utilização de uma versão proporcional + derivativa [10], onde além do erro de velocidade angular $\Delta\omega = \bar{\omega} - \omega$, a variação do erro no tempo $\dot{\omega}$ também passa a ser uma variável de entrada no CN.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foi apresentado e discutido um CN para o problema de controle de atitude para os modos 3 e 4. Foram conduzidas simulações cujos resultados

propiciaram comparações qualitativas e quantitativas com um controlador clássico na realização destes modos de operação do controle.

A performance do CN foi comparável ao do controlador convencional. O controlador nebuloso é mais simples, adaptável e apresenta robustez devido a completude, interação e consistência da base de regras.

Como continuidade do atual trabalho, pretende-se efetivar o desenvolvimento de um modelo PD-fuzzy com um ajuste fino da base de regras visando melhorar a performance no tempo. Além disso, pretende-se introduzir um modelo de controlador nebuloso para os modos de operação 1 e 2. Análises de estabilidade mais criteriosas não conduzidas neste trabalho serão também objeto de um estudo futuro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Driankov, D.; Hellendoorn, H.; Reinfrank, M.: "An Introduction to Fuzzy Control" Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1993.
- [2] Guerra, R.; Amoroso, A. L.; Souza, M. L. O.: "Dynamics and Autonomous Attitude Control of a Spinning Satellite Using Fuzzy Logic" 7th International Conference on Dynamic Problems on Mechanics, Proceedings, março 03 - 07, 1997.
- [3] Woodard, M., A.: "Fuzzy Open-Loop Attitude Control for the FAST Spacecraft" NASA AIAA, Guidance, Navigation and Control Conference, Proceedings, San Diego, CA, Julho 29 - 31, 1996.
- [4] Conway, D.; Sperling, R.; Folta, D.; Richon, K.; DeFazio, R.: "Automated Maneuver Planning Using a Fuzzy Logic Algorithm" NASA Flight Mechanics/ Estimation Theory Symposium, Proceedings, páginas 49 - 61, 1994.
- [5] Prudêncio, S. V.; Souza, M. L. O.: "Simulação Digital em Tempo Real de um Sistema de Controle de Atitude Magnético Autônomo de um Satélite" VIII Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital, Santos, São Paulo, novembro 18 - 22, 1996.
- [6] Barbosa, D. S.; Souza, M. L. O.: "Implementação Digital em Tempo Real do Controle Autônomo de Atitude de Satélites Estabilizados por Rotação Via Bobinas Magnéticas", VIII Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital, Santos, São Paulo, novembro 18 - 22, 1996.
- [7] Shigehara, M.: "Geomagnetic Attitude Control of an Axisymmetric Spinning Satellite" Journal of Spacecraft and Rockets, vol. 09, No. 06, 1972.
- [8] Cavalcante, C. M. C.: "Sistema de Navegação para Helicópteros não Tripulados Utilizando Controlador Nebuloso" Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFSC, junho, 1994.
- [9] Jang, R.; Gulley, N.: "Fuzzy Logic Toolbox User's Guide" The MathWorks, Inc., 1995.
- [10] Lee, C. C.: "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II" IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, No. 02, março/abril, páginas 419 - 430, 1990.
- [11] Sandhu, G. S.; Brehm, T.; Rattan, K. S.: "Analysis and Design of a Proportional plus Derivative Fuzzy Logic Controller" National Aerospace and Electronics Conference, Proceedings of IEEE, Vol. 01, Dayton, OH, maio 20 - 23, 1996.