



SIMSAT: SISTEMA PARA O RASTREAMENTO E A RECEPÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITES ARTIFICIAIS TERRESTRES

Sebastião Cícero Pinheiro Gomes
Vagner Santos da Rosa
Desirée Leopoldo da Silva
Miguel Ângelo Conceição Medeiros
Felipe Jofre Renon

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, Km 8, 96201-900, Rio Grande, RS
dmtscpg@furg.br; vagner@lula.dmat.furg.br; desiree.ottoni@ic.unicamp.br; miguel@dmc.furg.br

***Resumo.** Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados teóricos e experimentais sobre o desenvolvimento de um sistema completo para o rastreamento e a recepção de sinais de satélites artificiais terrestres. O grande desafio reside na integração de diversas áreas do conhecimento em um único projeto. Inicialmente, desenvolveu-se um simulador para a dinâmica orbital de satélites artificiais terrestres. Este simulador é o responsável pela geração das trajetórias de referência para o controle em azimute e elevação da antena. Desenvolveu-se um modelo dinâmico que considera os dois primeiros modos flexíveis da antena, além de considerar também as dinâmicas não lineares dos atuadores do tipo moto redutores. Projetou-se um controle do tipo PID, aplicado de forma independente para cada atuador. Os resultados de simulações atestaram a eficiência do controle projetado, mostrando ser possível a sua aplicabilidade prática, apesar da flexibilidade da antena. A filosofia adotada para o desenvolvimento do sistema completo de rastreamento e recepção de imagens foi pautada pela redução máxima de custos sem perda de desempenho. Os projetos mecânico e eletrônico foram então balizados por esta filosofia, fato que obrigou o projeto e implementação em tempo real de uma lei de controle simples, mas que proporcionou desempenho semelhante ao obtido com o controle PID. Os resultados experimentais mostraram o bom desempenho geral do sistema.*

***Palavras Chave.** Satélites Artificiais, Antena, Processamento de Imagem, Robótica, Eletrônica.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma grande quantidade de satélites artificiais em órbita do nosso planeta, havendo ainda uma nítida tendência de acréscimo em razão das inúmeras vantagens que os satélites proporcionam, nos mais variados domínios da tecnologia. Os principais tipos são os satélites de comunicação, meteorológicos e de sensoriamento remoto. Alguns destes satélites são geoestacionários, ou seja, possuem órbita inserida no plano equatorial, com velocidade orbital aproximadamente igual à velocidade de rotação da Terra. Um importante grupo de satélites meteorológicos e de sensoriamento remoto possui órbita polar ou quase polar, significando dizer

que os planos das órbitas estão com inclinação de aproximadamente noventa graus com o plano equatorial. Receber sinais de satélites geostacionários é tarefa relativamente simples uma vez que a antena receptora aponta sempre para a mesma região do espaço. Porém, no caso dos demais satélites, é necessário fazer com que a antena acompanhe a passagem do satélite enquanto ele permanecer visível da estação receptora em Terra. Este acompanhamento é conhecido como rastreamento do satélite. A construção de uma estação completa para receber sinais de satélites necessita então de:

- Simulador do movimento orbital;
- Sistema robótico para o rastreamento;
- Antena receptora.

O simulador utiliza as equações diferenciais da dinâmica orbital (Escobal, 1971) para prever quando o satélite entrará na região de visibilidade a partir da estação, prevendo ainda a trajetória espacial que o mesmo fará durante a sua passagem. Dessa trajetória deduz-se as trajetórias de referência em termos de azimute e elevação, que vão para o módulo de controle da antena.

O sistema robótico é dividido basicamente nos módulos mecânico e eletrônico. O módulo mecânico consiste na estrutura de suporte e movimentação da antena, incluindo atuadores do tipo moto-redutores, mancais de sustentação e antena. O módulo eletrônico contém todo o *hardware* de controle em tempo real, além da etapa de potência dos motores. Existe ainda uma interface de comunicação entre o simulador e o sistema robótico, a partir da qual são enviadas as trajetórias de referência para os atuadores.

A antena consiste no próprio dispositivo físico, que pode ser do tipo parabólica ou trifilar e ainda, nos decodificadores de sinais para a posterior visualização de imagens.

2. MOTIVAÇÃO

A primeira constatação, quando se resolve construir uma estação receptora de sinais de satélites, é a grande multiplicidade de áreas de atuação envolvidas em um projeto de tal envergadura. Pode-se perceber facilmente que são necessários conhecimentos nas áreas de: dinâmica orbital de satélite (Escobal, 1971); modelagem dinâmica de sistemas mecânicos (Meirovitch, 1970); projeto de sistemas mecânicos; robótica (Spong, 1989); teoria de controle (Franklin *at al*, 1994); projeto de sistemas eletrônicos para o controle em tempo real (Malvino, 1995); computação (programação e desenvolvimento de simuladores, (Knuth, 1997; Miller and Powell, 1997)). Esta foi a principal motivação para a realização do projeto como um todo, o qual terá seus resultados expostos no presente artigo. Outra importante motivação refere-se ao custo de uma estação completa para a recepção de imagens de satélites, produzida por empresas exteriores ao Brasil (desconhecemos a existência de um produto nacional para este fim), custo este que pode chegar a alguns milhares de dólares americanos. Para se Ter uma idéia, o custo da estação construída pela equipe autora do presente artigo não ultrapassou três mil reais em termos de equipamentos, incluindo o computador. Evidentemente, não está inserida neste custo a grande quantidade de horas de trabalho da equipe, principalmente no desenvolvimento e programação do simulador orbital, o qual teve seu início em 1996.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Fig. 1 dá uma idéia geral sobre o sistema construído. O simulador é continuamente executado em um computador PC, com no mínimo 200 MHz. Este simulador possui uma

interface amigável com o usuário, se encarregando também de enviar ao *hardware* de controle as trajetórias de referência da antena, em termos de azimute e elevação. A lei de controle implementada no *hardware* envia os troques para os motores, recebendo os sinais dos sensores (*encoders*) indicando as reais posições angulares (azimute e elevação da antena).

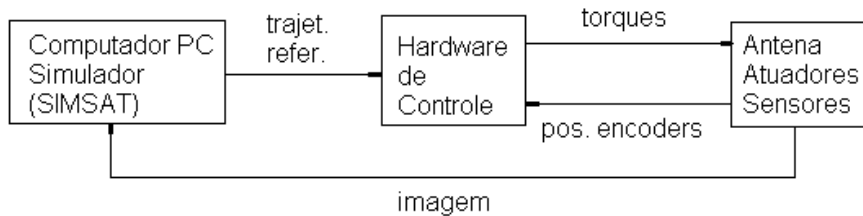


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de recepção de imagens de satélites.

A antena deve ser movimentada em dois graus de liberdade, objetivando o acompanhamento das trajetórias de referência em azimute e elevação, trajetórias estas que são geradas pelo simulador. Portanto, projetou-se um sistema mecânico de acionamento com dois atuadores do tipo moto-redutores para o movimento da antena, conforme exemplificado na Fig. 2.

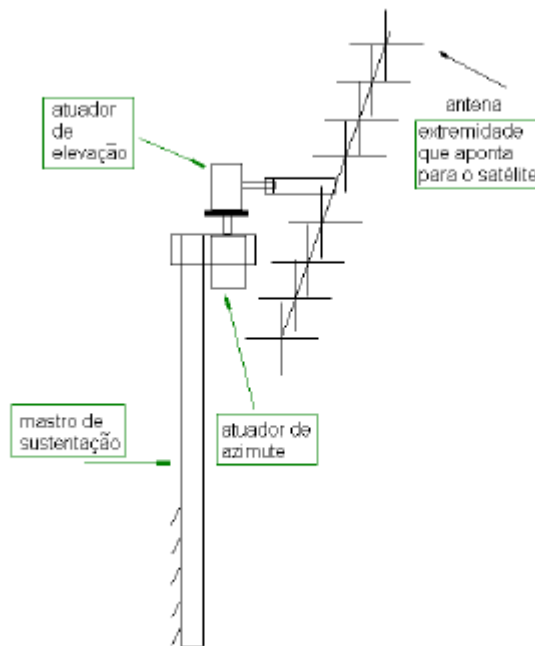


Figura 2. Desenho esquemático do sistema para a movimentação da antena em azimute e elevação.

Os atuadores são do tipo moto-redutores, com índice de redução total de 1:2000. Os motores dos atuadores são os mesmos utilizados em limpadores de para brisa de veículos, de fabricação da Bosch. Estes motores são de corrente contínua e já vêm com uma redução de 1:50. Uma nova redução de 1:40, feita com parafuso sem fim e engrenagem foi acoplada à saída da primeira redução, atingindo assim o índice de redução total que de fato existe em cada atuador. Dois sensores do tipo *encoder* foram acoplados aos eixos dos rotores dos moto-redutores. Estes sensores foram construídos artesanalmente, de forma a contar apenas um pulso por volta dos rotores, perfazendo assim, na saída dos atuadores, uma resolução 0.18 graus. A antena é fixa ao

eixo de saída do atuador de elevação na metade da sua extensão de quatro metros, com varetas perpendiculares entre si.

O projeto eletrônico (Ercegovac *et al.*, 1999) consiste em um sistema para o posicionamento em tempo real, responsável pelo controle de posição da antena a partir das coordenadas geradas pelo simulador SIMSAT. O sistema de posicionamento foi idealizado para ser simples e de baixo custo. Baseado no microcontrolador PIC16F84 (www.microchip.com), ele é capaz de controlar os dois atuadores responsáveis pelo apontamento da antena (azimute e elevação) e comunicar-se com um PC através de um canal serial *full-duplex*. O sistema é composto por dois moto-redutores com *encoders* acoplados aos eixos dos rotores dos motores, quatro sensores de fim-de-curso para os atuadores, duas pontes “H”, um PIC16F84, um conversor de sinais TTL/RS232 e uma fonte de alimentação. Um *software* foi desenvolvido para atuar como *driver* entre o SIMSAT e o *hardware* de posicionamento.

Conforme ilustrado na Fig. 3, o microcontrolador PIC16F84 é o coração do sistema e sua capacidade foi explorada ao máximo. Trata-se de um microcontrolador de 8 *bits* de uso geral com 68 *bytes* de memória RAM, 1K palavras de memória de programa, 1 *timer* com *prescaler* de 8 bits e 13 pinos de I^o. Visando reduzir ao máximo os circuitos auxiliares, varias funções foram implementadas no *firmware* como “periféricos virtuais” (www.scenix.com). Com um canal serial *full-duplex*, dois decodificadores para os *encoders* e dois geradores PWM (*pulse width modulator*) implementados como “periféricos virtuais”, o numero de circuitos integrados necessários no sistema foi reduzido a apenas dois: o próprio microcontrolador e um conversor de sinais TTL/RS232.

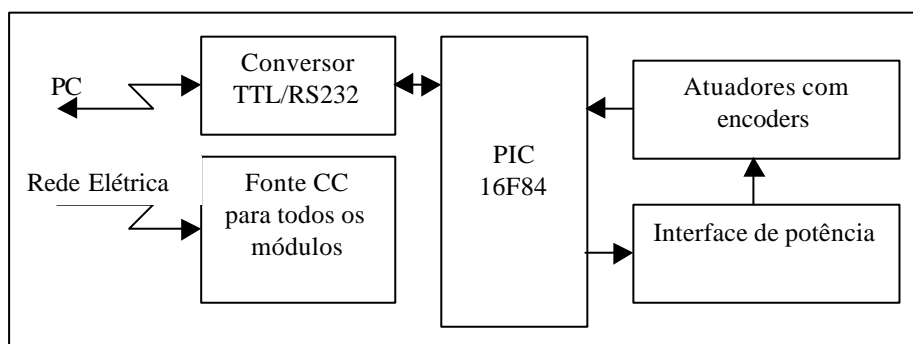


Figura 3. Diagrama em blocos do sistema de posicionamento.

4. MODELO DINÂMICO E PROJETO DE CONTROLE

Dois moto-redutores movimentam a antena e seus índices de redução são de um para dois mil. A antena possui uma gôndola em alumínio de quatro metros de comprimento, com varetas de dois metros. Estas dimensões conferem uma certa flexibilidade ao conjunto, representada no modelo até os dois primeiros modos flexíveis. Utilizou-se o formalismo discreto para o modelo desta estrutura (Machado *et al.*, 1999), o qual substitui a flexibilidade contínua por uma aproximação discreta a partir da introdução de articulações fictícias. Devido à grande redução nos atuadores, o torque de atrito estático (aproximadamente igual ao seco) dos mesmos é muito significativo, aproximadamente 30% do torque máximo. Estas não linearidades inerentes aos atritos nos atuadores foram introduzidas utilizando-se o modelo de atuador robótico desenvolvido por Gomes, 1995. O modelo completo (atuadores mais estrutura), assume a seguinte forma de estado: $\dot{\vec{X}} = A(\vec{X})\vec{X} + Bu$, onde u é o controle e \vec{X} o vetor de estado. Projetou-se um controle do

tipo PID atuando de forma independente para cada moto-reductor, sendo que, para efeito do projeto, considerou-se uma aproximação linear para os atuadores. Neste caso, a matriz da dinâmica A não mais depende do estado. Deve ser observado que a simulação mostrada a seguir foi realizada com o modelo não linear, apesar do controle Ter sido desenvolvido baseado na aproximação linear.

A Fig. 4 contém os resultados de uma simulação referente ao seguimento em azimute de uma trajetória real de um satélite, trajetória esta gerada pelo simulador SIMSAT. Os resultados para a elevação são semelhantes em termos dos erros, aqui sendo omitidos por razões de espaço. Pode-se perceber que os erros são maiores na região de maior variação da posição de referência. Nas ampliações, pode-se perceber ainda a ativação dos modos, originada a cada mudança da posição de referência (degraus de aproximadamente 6 segundos).

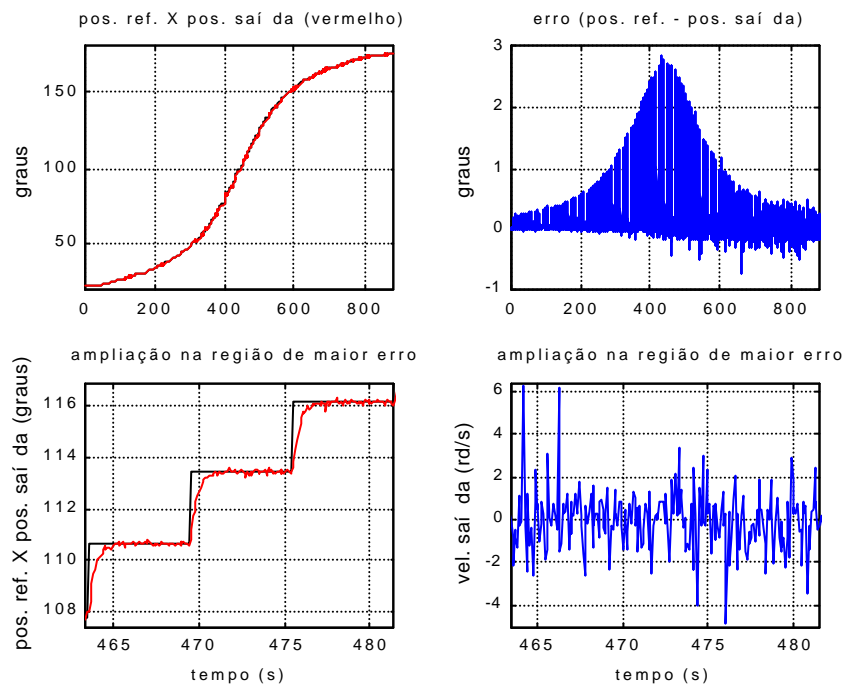


Figura 4. Simulação com um controle PID para o seguimento de uma trajetória em azimute.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Devido às limitações inerentes ao projeto eletrônico (a lei de controle no microcontrolador deve trabalhar apenas com aritmética inteira), implementou-se uma lei de controle bastante simples, objetivando facilitar as condições de implementação prática, sem, no entanto, perder o desempenho quando comparada com a lei de controle PID testada em simulação. Um algoritmo contendo a lei de controle é descrito a seguir:

$$\begin{aligned}
 &e_i = \mathbf{q}_{d(i)} - \mathbf{q}_i ; \\
 &\text{if } \text{abs}(e_i) > \text{tol} , \\
 &\quad T_{m(i)} = P \text{ sign}(e_i); \\
 &\quad \text{else} \\
 &\quad T_{m(i)} = 0; \\
 &\text{end;}
 \end{aligned} \tag{1}$$

O índice i assume os valores 1 ou 2, nos casos de se tratar do atuador de azimute ou de elevação, respectivamente. $q_{d(i)}$ é o ângulo de referência em azimute ou elevação e q_i os respectivos ângulos obtidos dos encoders. O parâmetro tol (tolerância para o erro) foi estipulado em 0.67 graus. Este valor foi estimado após várias simulações, pois verificou-se que um valor muito pequeno provocava flutuações no sinal do erro e_i , contribuindo para ativar mais ainda os modos de vibração da antena. O torque motor $T_{m(i)}$ corresponde a uma constante P vezes o sinal do erro, ou a zero, quando o erro é menor do que a tolerância. A constante P foi estipulada em 60% do torque máximo (o torque máximo é aplicado a 100% do PWM), valor também estipulado após várias simulações até se conseguir valores de tol e P que evitassem flutuações do erro em praticamente todas as situações testadas em termos de trajetórias reais de satélites.

A partir do momento em que o sistema entrou em operação, diversos resultados experimentais foram obtidos, tendo a antena rastreado satélites nas mais diversas órbitas. Mostra-se a seguir o resultado do rastreamento de um satélite da série NOAA, de órbita quase polar. Na Fig. 5 vê-se a trajetória de referência em azimute (curva em verde) e a trajetória real da antena também em azimute. Uma ampliação, na região de maior velocidade, é vista na Fig. 6. Pode-se perceber um pequeno erro, semelhante ao previsto em simulação, atestando assim que, apesar da simplicidade, a lei de controle implementada apresentou um desempenho satisfatório para o cumprimento do objetivo de rastrear o satélite. Resultados com erros semelhantes foram verificados também para a trajetória em elevação, aqui omitidos por razões de espaço. Deve ser observado que a resposta experimental vista na figura é a posição do rotor (o encoder é solidário ao rotor) expressa na saída do redutor e que, devido ao grande índice de redução (1:2000), as vibrações da antena não passam para o rotor. Esta é a razão da ausência de vibrações no resultado experimental, ou seja, não se dispõe de sensor na antena para captar sua vibração, embora esta vibração seja visível quando a antena está em operação.

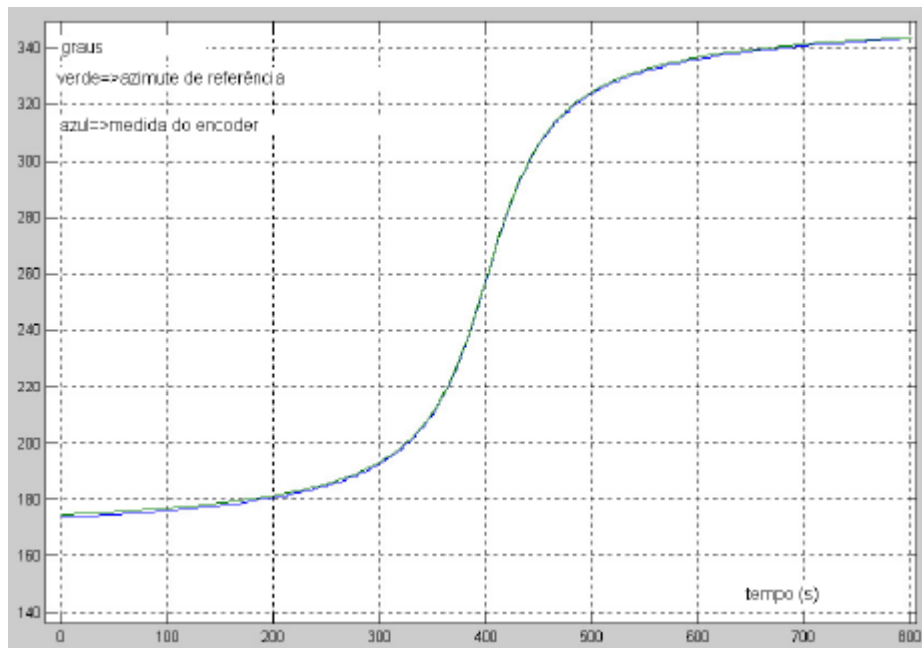


Figura 5. Resultado experimental relativo ao rastreamento de um satélite da série NOAA (trajetória em azimute).

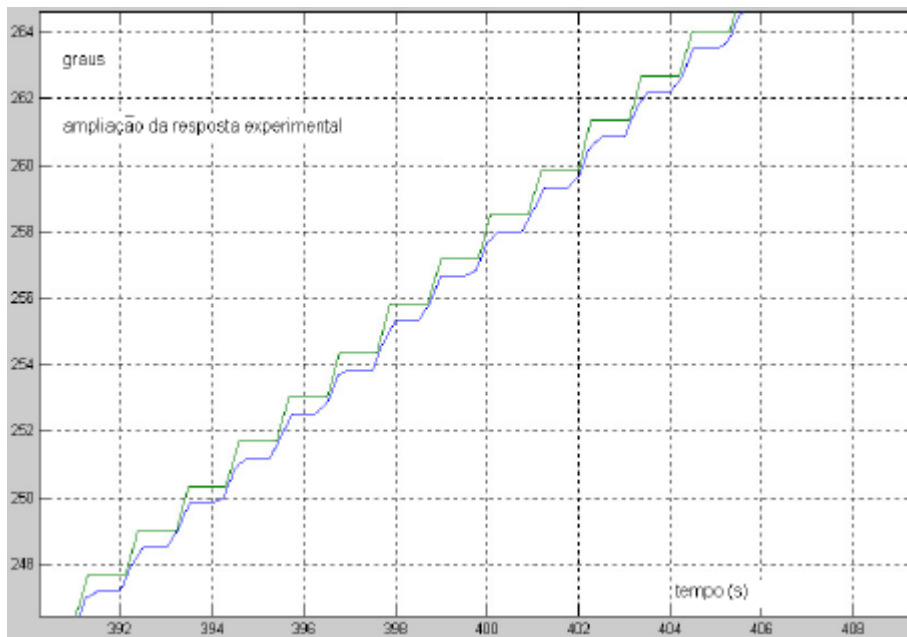
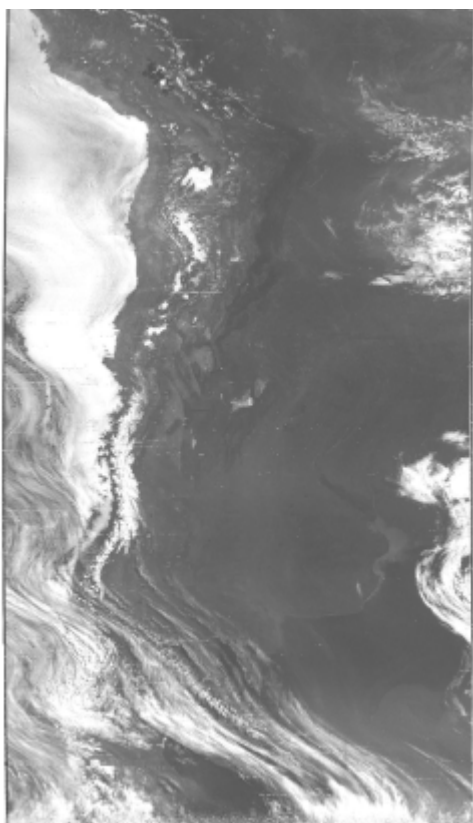


Figura 6. Ampliação da figura anterior (região de maior velocidade).

Na Fig. 7 mostra-se uma imagem captada com o sistema desenvolvido. Trata-se de uma imagem enviada pelo satélite de fabricação russa RESURS, em 21/08/2001. O tempo de visibilidade do satélite a partir da estação da FURG (Rio Grande, RS) foi de aproximadamente 15 minutos. Ao lado da imagem, mostra-se uma simulação da mesma. Esta simulação é gerada recortando-se, no mapa principal (projeção ortogonal), a região observada pela varredura da câmera do satélite durante toda a sua passagem. A determinação desta região a ser recortada no mapa é feita mediante o conhecimento (dados fornecidos pelo simulador SIMSAT) da altitude e da trajetória orbital do satélite, levando-se em conta também a rotação do planeta. Não fazia parte do objetivo do trabalho a análise interpretativa das imagens e mesmo, os autores não têm a competência devida, sendo esta atributo dos pesquisadores das áreas de sensoriamento remoto, meteorologia e afins. Porém, este satélite parece ressaltar em suas imagens a formação de nuvens, podendo-se perceber que a costa do pacífico, ao longo de toda a extensão da Cordilheira dos Andes, estava tomada por densas nuvens no momento da recepção da imagem. Esta análise só foi possível graças à simulação da imagem, a qual serviu de georeferência para a imagem recebida do satélite.



SIMSAT (imagem – RESURS – 21/08/01)



SIMSAT (simulação da imagem)

Figura 6. Imagem do satélite meteorológico russo, RESURS, captada em 21/08/2001, posta ao lado de uma simulação da geração da imagem.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho expôs-se os resultados de uma pesquisa iniciada há cinco anos, pesquisa esta que tinha um objetivo maior bem específico: projetar e desenvolver um sistema completo para o rastreamento e a recepção de imagens de satélites artificiais, a um custo baixíssimo quando comparado com sistemas comerciais semelhantes. A perseguição deste objetivo levou a equipe de trabalho a desenvolver um simulador da dinâmica orbital de satélites artificiais, bem como a propor soluções para os diversos problemas encontrados na fase de projeto, que fossem ao mesmo tempo simples e eficientes, ou seja, que conservassem um desempenho mínimo especificado previamente. Um exemplo bem marcante foi a própria lei de controle projetada e implementada na prática, que de tão simples de implementar, permitiu a utilização de um micro controlador com baixa capacidade de memória e velocidade de processamento, trabalhando apenas com aritmética inteira, mas que por conta destas limitações custa apenas dezesseis reais. Nem por isso a lei de controle deixou de manter o seu desempenho mínimo requerido. Finalmente, pode-se ressaltar o desafio que representa a construção de um sistema como o exposto aqui no trabalho, desafio este devido principalmente à grande quantidade de áreas do conhecimento envolvidas. A continuação da pesquisa consistirá no projeto e construção de um sistema de recepção de imagens via antena parabólica também controlada em azimute e elevação. A estrutura como um todo terá mais inércia, os atuadores deverão desenvolver maiores potências,

mas a experiência adquirida com a presente pesquisa permitirá uma maior facilidade nesta nova etapa do projeto.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) pelo suporte financeiro da pesquisa realizada.

8. REFERÊNCIAS

- Boylestad, R. 1997. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. PRENTICE HALL.
- Escobal, P. R., 1971. Methods of orbit determination. Jonh Wiley & Sons, New York.
- Ercegovac, M., Lang, T. and Moreno, J. H., 1999. Introduction to digital systems. John Wiley & Sons, Ney York.
- Gomes, S. C. P. and Chrétien, J. P., 1992. *Dynamic modeling and friction compensated control of a robot manipulator joint*. In *IEEE Robotics and Automation Conference*, pg. 1450-55, Nice, France, Nov.
- Gomes, S. C. P. and Kuga, H. K., 1989. *Formulation of numerical orbit propagation and time error correction*. Orbital Dynamics of Natural and Artificial Objects, Capítulo de Livro, editado pelo Observatório Nacional, RJ.
- Gomes, S. C. P., 1995. Modelagem de atritos internos às articulações de robôs manipuladores. In XIII COBEM, CD-ROM, Belo Horizonte.
- Knuth, D., 1997. *The art of computer programming*. Ed. Addison-Wesley.
- Malvino, a P., 1995, "Eletrônica", Vol. 1 e 2, 4ª ed.
- Mayrovith, L., 1970. Analytical dynamics.
- Miller, T. & Powell D., 1997. *Special Edition Using Delphi 3*. Ed. QUE.
- Murray, S., Shoemaker, R., 1998. The Personal Computer from the Inside Out : The Programmer's Guide to Low-Level PC Hardware and Software. 3rd ed, Book News, Inc.
- Shanley, T, Anderson, D., 1996. "ISA System Architecture", Mindshare, Inc.
- Silva, W. C. C. & Ferreira, L. D. D., 1984. Satélites artificiais: movimento orbital. INPE-3163-RPE/458, Julho.
- Spong, M. W. and Vidyasagar, M. 1989. *Robot dynamic and control*. John Wiley and Sons, New York.
- Souza, D. J. 1999. Desbravando o PIC. Ed. ERICA.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SIMSAT: SYSTEM FOR TRACKING AND RECEPTION OF TERRESTRIAL ARTIFICIAL SATELLITES IMAGES

Sebastião Cícero Pinheiro Gomes

Vagner Santos da Rosa

Desirée Leopoldo da Silva

Miguel Ângelo Conceição Medeiros

Felipe Jofre Renon

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, Km 8, 96201-900, Rio Grande, RS
dmtscpg@furg.br; vagner@lula.dmat.furg.br; desiree.ottoni@ic.unicamp.br; miguel@dmc.furg.br

***Abstract.** This work has the objective to present theoretical results and the building of a complete system for the tracking and signal capture of terrestrial artificial satellites. The great challenge resides on the integration of several areas of the knowledge in one unique project. Initially, we developed a simulator for the orbital dynamics of terrestrial artificial satellites. This simulator is the responsible for the generation of reference paths for the control in azimuth and elevation of the antenna. It was obtained a dynamic model that consider the first two flexible modes of the antenna, beyond considering the non linear dynamics of the reduction with gear actuators. Initially, the PID control was projected and applied in an independent way for each actuator. The simulations results attested the efficiency of the control law, showing the possibility of its practical applicability, in spite of the flexibility of the antenna. The philosophy adopted in the development of the complete system of tracking and images reception was ruled by the maximum reduction of costs without performing loss. Mechanical and electronic systems were based on this philosophy, forcing the project and real time implementation of a simple control law, provided similar behavior compared to that obtained with the PID control. Experimental results showed good general performance of the system.*

***Keywords.** Artificial Satellites, Antenna, Image Processing, Robotics, Electronics.*