

SINTONIA DE CONTROLADORES POR TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA CONTROLE DO ÂNGULO DE APONTAMENTO DE SATÉLITES DO TIPO CUBESAT

Ivan Rodrigues de Campos ¹; Rodrigo Alvite Romano ²; Marcelo M. L. Lima ³

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

³ Colaborador da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este projeto de iniciação científica tem o objetivo de realizar um estudo envolvendo uma estratégia de sintonia de controladores baseada em otimização por simulação, SO (do Inglês Simulation-Based Optimization). Essa estratégia visa a otimização de uma função custo que reflete o desempenho do sistema através de simulações em função de variáveis de projeto. Nesse caso, a abordagem é aplicada na sintonia do controlador de uma malha de apontamento de um dos graus de liberdade de um nano satélite (CubeSat). Portanto, adota-se o erro quadrático da malha de controle como medida da função custo e os parâmetros de projeto são os ganhos de um controlador com ações proporcional, integral e derivativa (PID). O modelo de simulação utiliza uma descrição do comportamento dinâmico do apontamento do CubeSat obtida a partir de dados de operação. Um algoritmo de otimização não-linear e sem restrições (Simplex) é usado para obter os parâmetros do controlador que minimizam a função custo. A pesquisa também contempla o desenvolvimento de uma plataforma computacional que além de permitir a obtenção de dados para caracterização do sistema, permite validar fisicamente os parâmetros otimizados do controlador.*

Introdução

CubeSats são satélites miniaturizados que possuem a forma de um cubo com arestas de 100 mm e massa de até 1300 g. O desenvolvimento de CubeSats e de seus respectivos subsistemas são uma opção de baixo custo para que universidades possam iniciar seus estudos na área aeroespacial. O formato padrão de um CubeSat denominado “uma unidade” ou “1U” consiste nas dimensões de 100x100x100 mm. Os CubeSats são escalonáveis ao longo de um dos eixos, através do incremento de “1U”, permitindo a criação de CubeSats “2U” (100x100x200 mm) ou “3U” (100x100x300 mm). Como todos os CubeSats, independente do comprimento, medem sempre 100x100 mm, eles podem ser colocados em órbita através do mesmo sistema de liberação, em geral um dispositivo mecânico chamado Poly-PicoSatellite Orbital Deployer (P-POD), também projetado e construído pela Cal Poly.

Um dos principais sistemas do CubeSat é o sistema de controle de apontamento, responsável por posicionar o satélite em ângulos específicos de acordo com as necessidades de cada aplicação. O método utilizado para realizar o apontamento de CubeSats no espaço é o método dos três eixos (COSTA, et al., 2015), que utiliza rodas de reação. O método se baseia na terceira Lei de Newton, que diz: “*Para toda ação, há sempre uma reação oposta e de igual intensidade*”. Quando as rodas de reação são submetidas a acelerações e desacelerações, elas produzem um torque solidário ao eixo de rotação que age sobre CubeSat. Na arquitetura do CubeSat desta pesquisa foi utilizada uma plataforma simplificada com apenas um elemento de inércia, restringindo a movimentação a um único grau de liberdade.

Os métodos convencionais de sintonia de controladores PID podem ser classificados em duas categorias: analítico e experimental. Os métodos analíticos são baseados em modelos matemáticos que representam a dinâmica do sistema. No entanto, os métodos analíticos mais difundidos e bem estabelecidos baseiam-se em modelos lineares. Segundo (OGATA, 2003), se for desejável um modelo linear de parâmetros concentrados, faz-se necessário ignorar certas não-linearidades que podem estar presentes no sistema físico. Em outras palavras, algumas vezes esses modelos matemáticos deixam de considerar fenômenos não lineares importantes como quantização, histerese e *backlash*.

Os métodos experimentais, também chamados de práticos, como os de Ziegler-Nichols (OGATA, 2003) por exemplo, consistem em analisar o comportamento do processo e sintonizar controladores PID por meio de fórmulas pré-estabelecidas. No entanto, esses métodos experimentais envolvem aproximações nem sempre razoáveis, resultando em sistemas de controle de desempenho insatisfatório. O emprego das técnicas de otimização (*Simulation-Based Optimization*) para sintonia de controladores no lugar da aplicação das técnicas de sintonia clássicas justifica-se pelo fato de possibilitar o uso de modelos que incorporam características importantes como descontinuidades, erros de quantização dos sensores, saturação dos atuadores e até efeitos não lineares causados por atrito.

Material e Métodos

CubeSat e plataforma de ensaios

Para realizar os ensaios de caracterização foi necessário o desenvolvimento de uma plataforma de ensaios (Figura 1) capaz de adquirir e armazenar os dados experimentais. Os dados obtidos são inseridos em um algoritmo que estima um modelo matemático por técnicas Identificação de Sistemas (AGUIRRE, 2015). O modelo obtido é por sua vez inserido em outro algoritmo que otimiza os ganhos do controlador PID pela técnica de otimização não-linear (*Simplex*). Os ganhos otimizados são então inseridos no controlador do ângulo de apontamento do CubeSat para validação. Conforme ilustrado na Figura 2, a arquitetura da plataforma de ensaios desenvolvida consiste na integração de quatro subsistemas: controlador do apontamento, interface computacional, base rotativa e encoder.

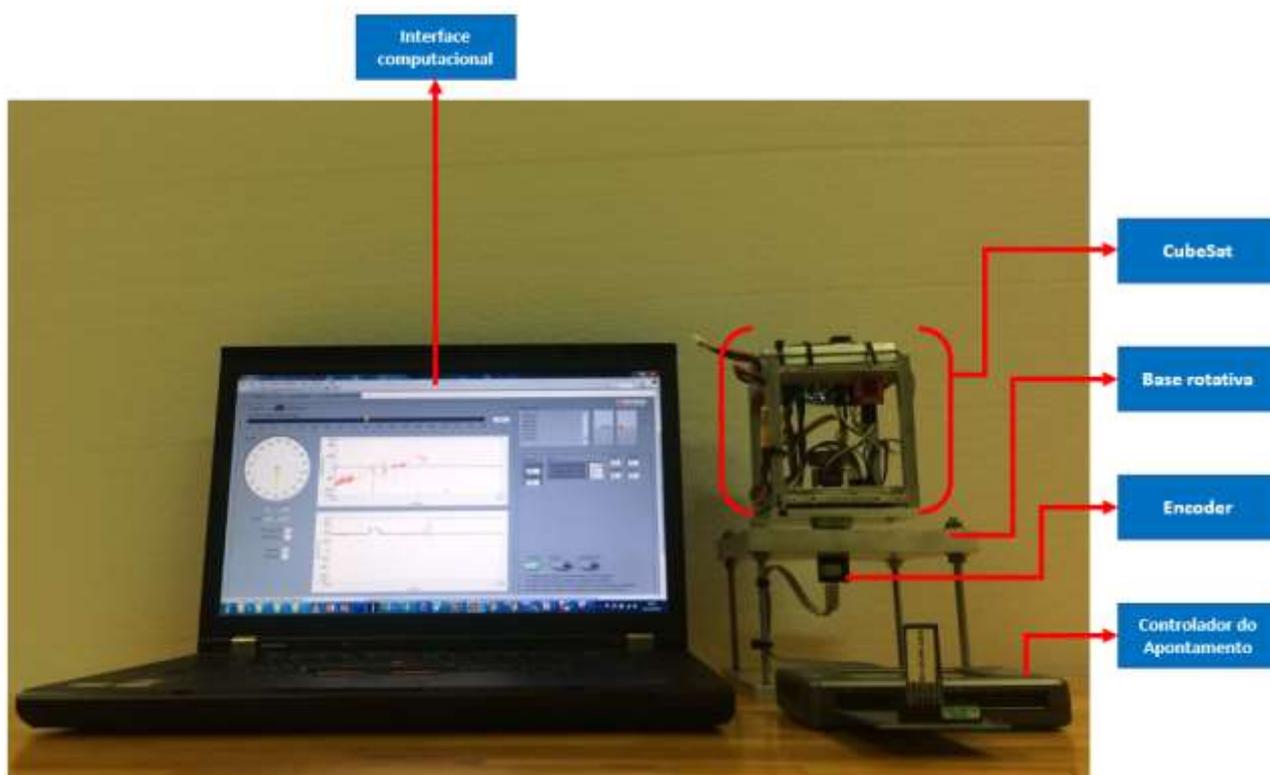


Figura 1 – Disposição dos subsistemas na plataforma de ensaios.

O controlador do apontamento foi implementado no dispositivo *myRIO*, que consistem em um equipamento de processamento em tempo real fabricado pela *National Instruments*TM. Ele é responsável por executar a lei de controle PID do apontamento do CubeSat. No *myRIO* estão conectados um encoder, o computador que realiza a interface com o usuário e com o CubeSat, via

Bluetooth®. A conexão entre o computador e o *myRIO* pode ser realizada de duas formas, via conexão USB ou Wi-Fi™.

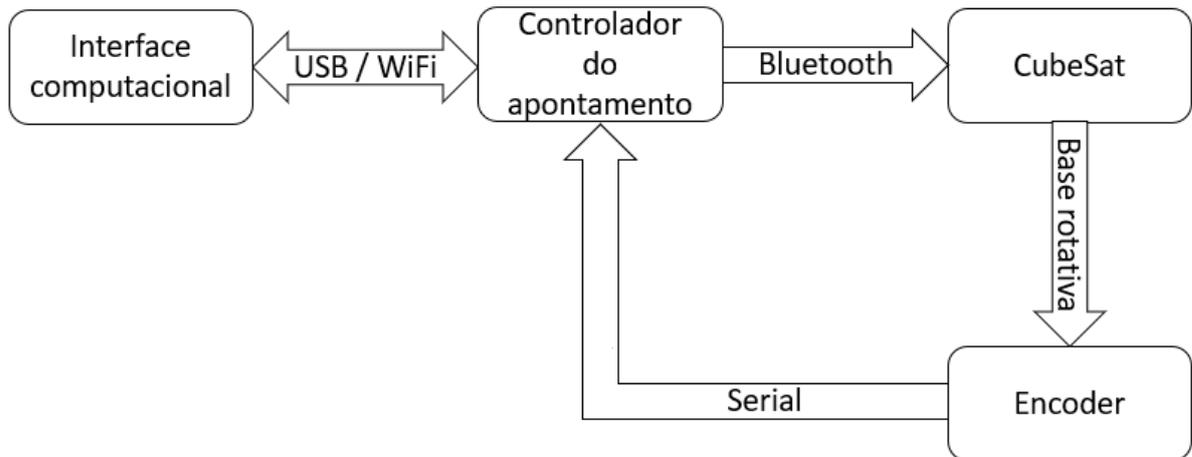


Figura 2 – Arquitetura da plataforma de ensaios.

A base rotativa possibilita que o CubeSat gire livremente em torno de um eixo normal à plataforma. Um encoder absoluto é acoplado ao eixo da base rotativa para medir o ângulo de apontamento do Cubesat. Ressalta-se que sistemas de controle de nano satélites baseiam em sensores magnéticos, solares ou até estelares que requerem algoritmos sofisticados de filtragem. A principal motivação para o uso de um encoder é que o projeto e a implementação desses algoritmos de filtragem estão além do escopo desta pesquisa.

A interface computacional foi desenvolvida na plataforma LabVIEW™, pois permite a criação de uma *software* gráfico de fácil operação bem como a aquisição e armazenamento dos dados experimentais (Figura 3). A interface computacional permite a inserção dos parâmetros do controla-

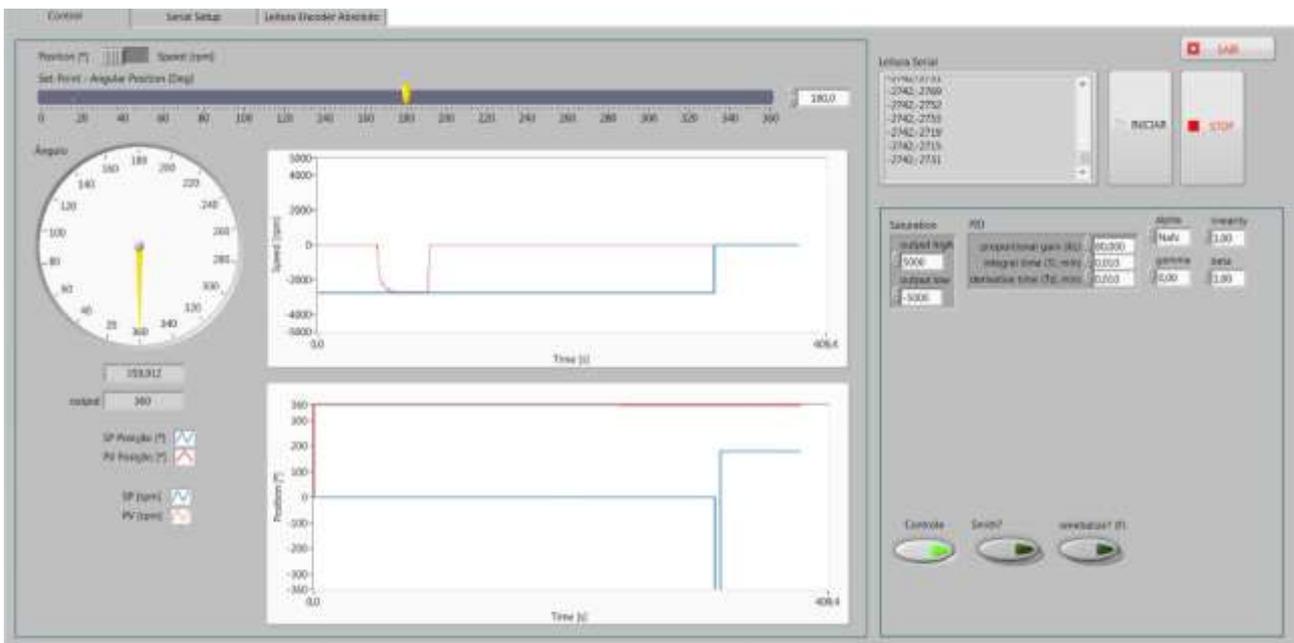


Figura 3 – Interface computacional.

-dor PID (K_c, K_i, K_d), a visualização do ângulo de apontamento e dois modos de operação: malha aberta e malha fechada. No modo malha aberta, o usuário pode especificar manualmente a velocidade e o sentido de rotação da roda de reação. Esse modo é utilizado para realizar experimentos necessários para a caracterização do comportamento dinâmico do apontamento do CubeSat. No modo malha fechada, o usuário pode especificar o ângulo de apontamento e observar o comportamento do Cubesat. Neste modo deve-se prover os ganhos do controlador PID.

Vale ressaltar que o CubeSat utilizado nesta pesquisa bem como a plataforma mecânica rotativa foram desenvolvidos em um trabalho anterior (COSTA, et al., 2015). O CubeSat possui uma eletrônica embarcada que recebe o sinal de referência de velocidade da roda de reação e executa uma lei de controle PID para controlar a velocidade da roda de reação.

Arquitetura do sistema de controle

A arquitetura do sistema de controle de apontamento é ilustrada na Figura 4. Os blocos $k(s)$, $G1(s)$ e $G(s)$ denotam, respectivamente, as seguintes funções de transferência do controlador de apontamento do CubeSat, a dinâmica da roda de reação e dinâmica do apontamento do CubeSat.

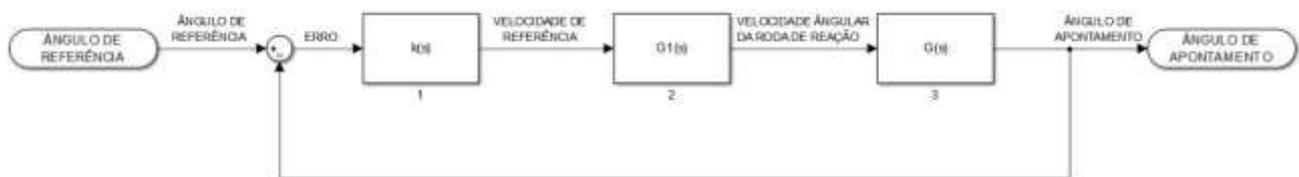


Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema de controle do apontamento.

A função de transferência $G1(s)$, equação (1), relaciona a velocidade angular da roda de reação $\Omega r(s)$ com a velocidade angular de referência $V(s)$. A função de transferência $G(s)$, equação (2), relaciona o ângulo de apontamento $\theta(s)$ com a velocidade angular da roda de reação $\Omega r(s)$. A pesquisa que contempla o estudo completo de $G1(s)$ está disponível em (COSTA, et al., 2015).

$$G1(s) = \frac{\Omega r(s)}{V(s)} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{\Omega r(s)} \quad (2)$$

Considerando-se o diagrama de blocos representado na Figura 4, a entrada do sistema é uma referência de posição angular (ângulo de apontamento) que é subtraída pelo ângulo de apontamento medido pelo encoder, gerando um sinal de erro para o controlador $k(s)$. O bloco $k(s)$ implementa uma lei de controle PID (ASTROM, et al., 1997) que tem como saída um valor de referência de velocidade angular $V(s)$, que entra no subsistema de controle de velocidade da roda de reação $G1(s)$ e sai como uma velocidade angular $\Omega r(s)$. A variação da velocidade angular da roda de reação $\Omega r(s)$ provoca mudanças na posição angular $\theta(s)$

Ensaio de caracterização do sistema

O objetivo do ensaio de caracterização é obter dados para determinar um modelo matemático que relaciona o ângulo de apontamento (θ) com a velocidade de referência da roda de reação (V). Os dados experimentais foram gerados excitando diretamente a entrada do bloco $G1(s)$ com o sinal de referência de velocidade (V), aplicada em uma sequência de degraus conforme Figura 6.

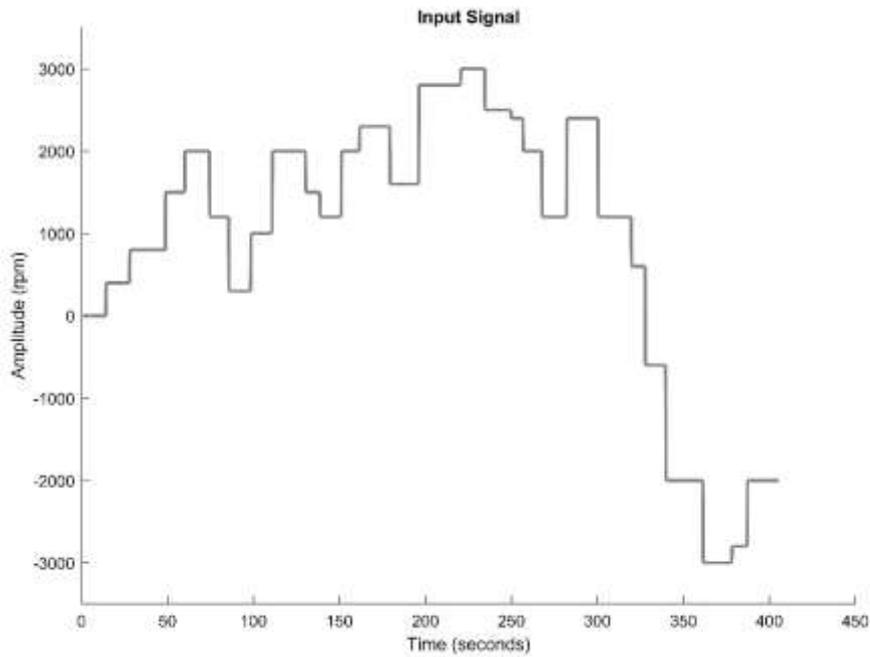


Figura 6 – Perfil de variação da velocidade de referência da roda de reação.

A partir dos dados de obtidos experimentalmente, é possível utilizar de abordagens conhecidas por caixa preta (a estrutura do modelo é desconhecida), a fim de obter um modelo que represente o mais próximo possível a relação entrada-saída presente nos dados experimentais. Para o CubeSat utilizou-se uma a estrutura ARMAX (*AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs*) que assume a seguinte forma no espaço de estados:

$$x(k + 1) = A x(k) + B V(k) + K e(k), \quad (4)$$

$$\Theta(k) = C x(k) + e(k). \quad (5)$$

O algoritmo de estimação determina os parâmetros das matrizes A, B, C e K de modo a minimizar a diferença entre o ângulo observado e o reproduzido pelo modelo. A partir do toolbox de identificação de sistemas do MATLAB, foi possível obter os seguintes valores para os parâmetros

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -0.92 \\ 0 & 1 & 1.92 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.002684 \\ 0.008982 \\ -0.006303 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 1] \quad (8)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.846 \\ 1.469 \end{bmatrix} \quad (9)$$

A qualidade do modelo pode ser obtida a partir da comparação entre o valor da saída simulada pelo modelo identificado (4)-(5) e o valor experimental registrado no experimento. Tal comparação é apresentada na Figura (7), ilustrando o valor do erro médio quadrático normalizado (NRMSE) de

69,14%. Vale ressaltar que diversas outras abordagens foram utilizadas, como modelos não lineares complexos (Máquinas de Suporte Vetorial e Redes Neurais), porém ambos não proporcionaram melhorias significativas em relação ao modelo ARMAX. Modelos dinâmicos não-lineares como Hammerstein-Wiener (AGUIRRE, 2015), também não foram capazes de reproduzir o comportamento dinâmico com fidelidade. Portanto, o modelo caracterizado por $G1(s)G(s)$ pode ser representado pelo modelo (4)-(5), com os parâmetros descritos em (6)-(9).

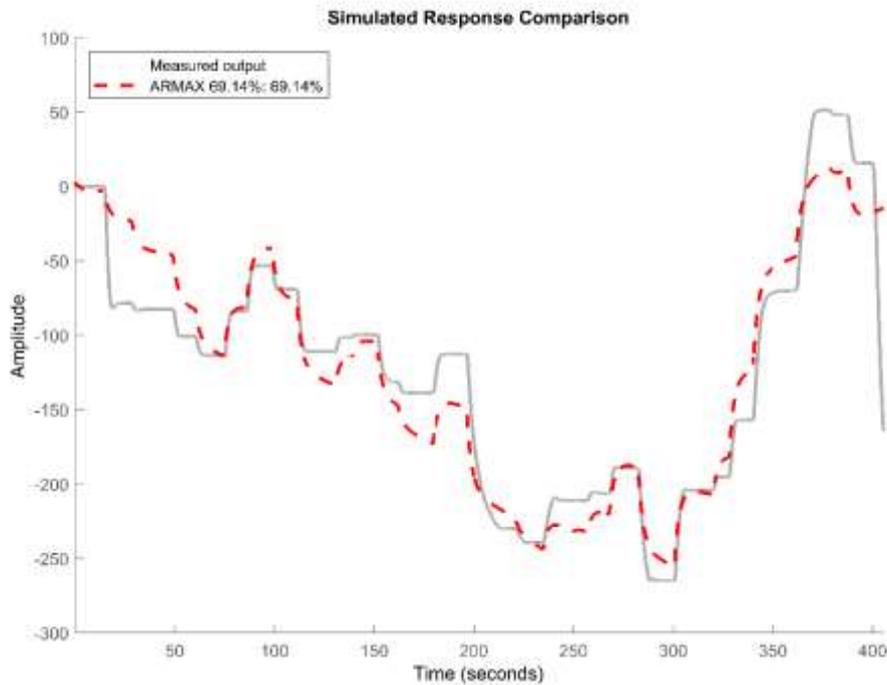


Figura 7 – Gráfico da saída real do sistema e da saída estimada pelo modelo ARMAX.

Otimização dos ganhos do controlador

O método de otimização direta de Nelder-Mead (LAGARIAS, et al., 1998), consiste em um método de otimização não linear livre de derivadas. Por meio dele é possível encontrar o mínimo de uma função mérito (J) alterando as variáveis desejadas de uma função não linear. Para os ganhos do controlador PID (Kc, Ki, Kd), ou seja, o sistema deve obter o menor valor da função mérito para três variáveis distintas. A escolha da função mérito é parte essencial para a correta otimização dos parâmetros desejados. Para o controle do ângulo de apontamento, a função mérito é o somatório dos erros quadráticos:

$$J(Kc, Ki, Kd) = \sum_k e_k^2, \quad (4)$$

em que e_k representa a diferença entre o valor de referência do ângulo de apontamento e sua medida no instante k . A escolha do erro quadrático visa tratar erros positivos e negativos e garantir maior penalidade a erros maiores. Assim, considerando que seja possível traduzir as necessidades de projeto em uma função custo, uma grande quantidade de problemas passa a ser passível de solução a partir da otimização por simulação (AMARAN, et al., 2016).

Ressalta-se ainda que o método *Simplex* de Nelder-Mead é um método de otimização local, ou seja, o mínimo global não é necessariamente obtido, entretanto outros métodos de otimização mais sofisticados poderiam ser utilizados sem grandes alterações no método proposto.

Resultados e Discussão

Para o cálculo do método *Simplex* (LAGARIAS, et al., 1998) faz-se necessário assumir os valores iniciais dos ganhos do controlador. Esses ganhos iniciais foram sintonizados empiricamente por meio da observação do comportamento do ângulo de apontamento. Por meio do algoritmo de Lagarias para o cálculo do método Simplex, foi possível obter os ganhos do controlador do ângulo (θ). A Tabela 1 apresenta o comparativo entre os ganhos calculados empiricamente e os ganhos otimizados.

Tabela 1 – Tabela comparativa dos ganhos do controlador PID.

Ganhos PID	Empírico (Inicial)	Otimizado
k_c	-80,0	-151,47
k_d	0,60	0,36
k_i	1,67	0,43

A trajetória dos parâmetros do controlador a cada iteração do algoritmo de otimização é mostrada na Figura 8. Para efeito de visualização os comportamentos do ganho K_c é separado dos resultados de K_i e K_d . Nota-se que o algoritmo de otimização converge em aproximadamente 180 iterações. Os parâmetros foram obtidos para um perfil de variação do sinal de referência do ângulo de apontamento do Cubesat específico, mostrado na Figura 9 (linha azul). Também é mostrada (linha vermelha) a resposta do sistema simulado com os ganhos do controlador após a convergência do algoritmo de otimização.

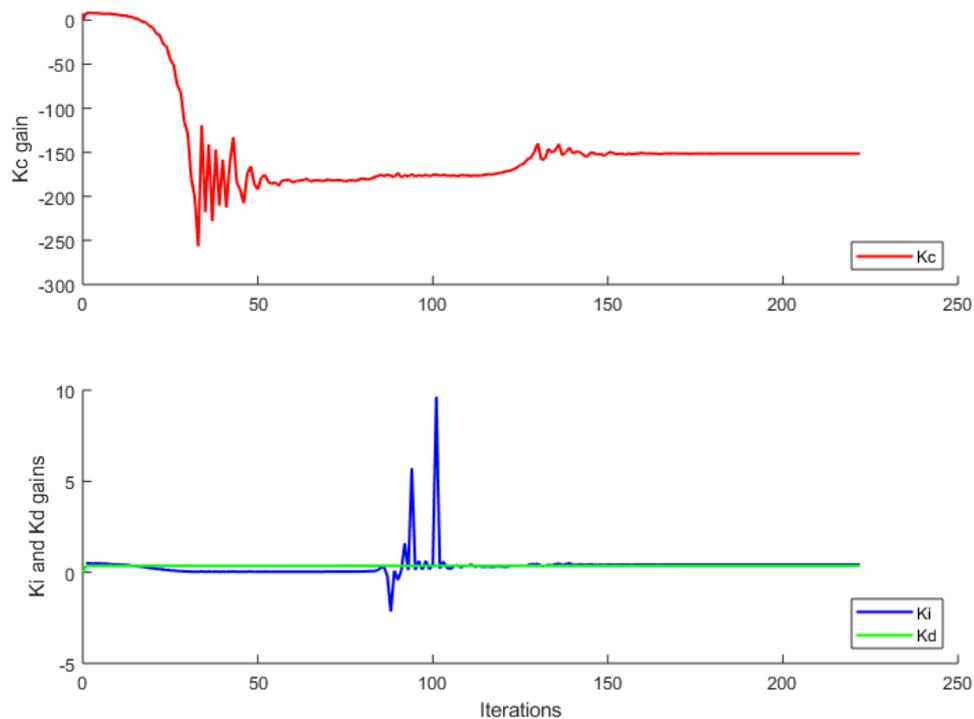


Figura 8 – Gráfico dos ganhos sintonizados pelo algoritmo de otimização.

Para fins de comparação, tanto os parâmetros do controlador obtidos empiricamente como os otimizados (segunda e terceira coluna da Tabela 1, respectivamente) foram programados no dispositivo *myRIO*, através da interface computacional. Em seguida foram realizados testes de validação em que o sinal de referência do apontamento é alterado repetidas vezes. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 10. O controlador sintonizado empiricamente apresentou tempo

de acomodação maior, assim como um sobressinal significativamente maior, quando comparado ao controlador sintonizado por meio da otimização Simplex.

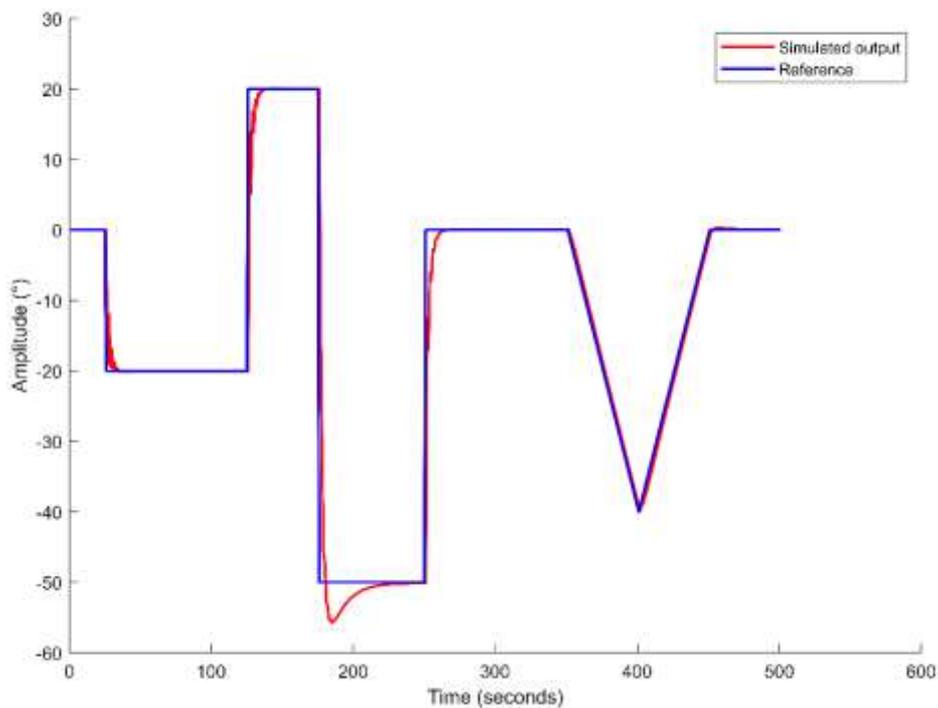


Figura 9 – Gráfico do sinal de referência e controlado em simulação.

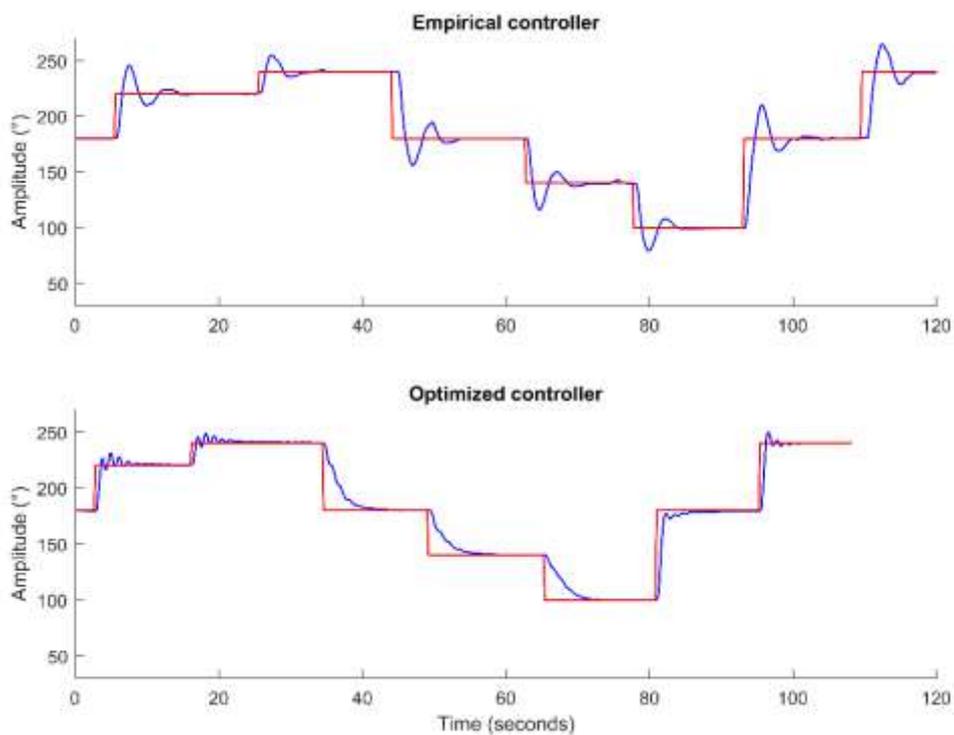


Figura 10 – Gráfico da resposta do sistema com os ganhos otimizados.

Conclusões

Os resultados mostram uma aplicação em que o uso técnicas de otimização por simulação são particularmente interessantes. Verificou-se experimentalmente uma melhoria significativa no desempenho do controle de apontamento do Cubesat com o uso dos parâmetros obtidos na otimização. Portanto, isso sugere que o modelo caracterizado através de dados experimentais é capaz de reproduzir também o comportamento do sistema em malha fechada. Ressalta-se ainda que os resultados dependem de escolhas apropriadas para a função de mérito e do perfil do sinal de referência usado nas simulações. Nesse sentido a escolha do erro quadrático mostrou-se adequada.

O trabalho utilizou um dispositivo de processamento em tempo real *myRIO* para realização da lei de controle programado usando o *software* LabVIEW® (*National Instruments*™). A plataforma de ensaios contou com o apoio do prof. Hugo da Silva Bernardes Gonçalves da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Referências Bibliográficas

- AGUIRRE, LUIS ANTONIO. 2015.** *Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação - 4ª edição revisada.* Belo Horizonte : Editora UFMG, 2015. ISBN: 978-85-423-0079-6.
- AMARAN, S., et al. 2016.** Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research.* 351, 2016, Vol. 240.
- ASTROM, KARL J. e WITTENMARK, BJORN. 1997.** *Computer-Controlled Systems.* s.l. : Prentice-Hall, 1997.
- COSTA, AUGUSTO BONANGELO, FARIA, FELIPE RAMOS e MAZI, WILLIAM. 2015.** *Sistema de Controle de Altitude para Satélites CubeSat.* São Caetano do Sul : s.n., 2015.
- LAGARIAS, J. C., et al. 1998.** *Convergence properties of the Nelder-Mead Simplex method in low dimensions.* s.l. : SIAM Journal of Optimization, 1998. V. 9, p. 112-147.
- OGATA, KATSUHIKO. 2003.** *Engenharia de Controle Moderno - 4ª Edição.* s.l. : Prentice-Hall, 2003.
- PAULIN, A. F., et al. 2014.** *Desenvolvimento de um Veículo Quadricóptero.* São Caetano do Sul : s.n., 2014.