



RADIÔMETRO DE CROOKES COMO PLATAFORMA DE ENSINO DE CONTROLE DIGITAL EM CURSOS DE ENGENHARIA

Danilo Fernandes Gomes – danilofgomes@outlook.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Eletrônica.

Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças.
80230-901 – Curitiba – Paraná.

Felipe Eduardo Sales – felipe.salesw@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Eletrônica.

Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças.
80230-901 – Curitiba – Paraná.

Carlos Raimundo Erig Lima – erig@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Eletrônica.

Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças.
80230-901 – Curitiba – Paraná.

Resumo: *Nos cursos de Engenharia da UTFPR há a demanda pelo ensino de controle e servomecanismos como elementos centrais na formação de competências esperadas nos egressos destes cursos. Muitos dos experimentos, propostos para exploração de todos os conhecimentos apresentados, são abordados na forma de simulação matemática e eventualmente com a utilização de plantas físicas reais. Neste contexto, experimentos de fácil reprodução e baixo custo, especialmente usando recursos já disponíveis na Universidade, são constantemente procurados pelos nossos professores. O radiômetro de Crookes, disponível nos departamentos de física, é um instrumento composto de quatro hélices que podem girar em torno de um pino vertical, envolto por um gás de baixa pressão, sendo utilizado para medir e detectar a intensidade da energia radiante através da medição da velocidade de rotação das hélices que giram ao ser exposta a uma fonte de radiação. O objetivo do presente trabalho é construir uma plataforma educacional aprimorada, com um sistema de controle digital da velocidade das hélices. A plataforma permitirá aos estudantes testar diversos projetos de controladores digitais em um sistema real, contribuindo para uma melhor compreensão e absorção dos conhecimentos apresentados em sala de aula.*

Palavras-chave: *Controle Digital, Radiômetro de Crookes, Ferramentas de Ensino.*



1. INTRODUÇÃO

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) fornece ao público brasileiro e a comunidade internacional vários cursos de engenharia. Hoje, são ofertados cursos de Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Controle e Automação e Engenharia da Computação. Nestes cursos há a demanda pelo ensino de controle e servomecanismos como elementos centrais na formação de competências esperadas nos egressos das engenharias. Muitos dos experimentos propostos para exploração de todos os conhecimentos apresentados são abordados na forma de simulação matemática e eventualmente com a utilização de plantas físicas reais. Apesar de a UTFPR disponibilizar laboratórios com diversas plantas industriais simplificadas, a exemplo de plantas de térmicas, hidráulicas, químicas, mecânicas e robóticas, as mesmas são altamente demandadas pelos diversos cursos, não atendendo de forma satisfatória a todas as disciplinas das Engenharias. Paralelamente, devem-se considerar os problemas associados à expansão destes laboratórios. Além do custo elevado de tais equipamentos, existe o problema de propiciar espaço físico, instalações elétricas e hidráulicas dedicadas e manutenção periódica. Por outro lado, projetos de alunos que demandem a utilização por longo prazo destas plantas (a exemplo dos Trabalhos de Conclusão de Cursos) são inviabilizados pela alta rotatividade das mesmas.

Neste contexto, experimentos de fácil reprodução e baixo custo, especialmente usando recursos já disponíveis na Universidade, são constantemente procurados pelos nossos professores.

O radiômetro de Crookes, também conhecido como moinho de luz, é um instrumento composto de quatro hélices que podem girar em torno de um pino vertical, envolto por um gás de baixa pressão. O instrumento é utilizado para medir e detectar a intensidade da energia radiante através da medição da velocidade de rotação das hélices que giram ao ser exposta a uma fonte de radiação.

O primeiro radiômetro foi inventado em 1873 por Sir William Crookes (1832 – 1919), proeminente cientista inglês que idealizou o dispositivo para medir a energia radiante do calor e da luz solar ao investigar o efeito da radiação infravermelha sobre o elemento químico tálio, também descoberto por ele. Desde a teoria corpuscular da luz, proposta por Issac Newton (1642 – 1727) vários experimentos foram projetados para medir a pressão de luz sobre corpos delgados, e por muito tempo acreditou-se que a rotação das hélices do radiômetro era devida a esta teoria. Grandes nomes da ciência dedicaram-se a compreender os fenômenos associados ao curioso movimento do dispositivo, entre eles destacam-se James Clerk Maxwell (1831-1879) que ao conhecer a invenção de Crookes acreditou ser uma demonstração do efeito da pressão da radiação prevista em sua teoria eletromagnética da luz. Após maiores investigações, o próprio Maxwell junto com dois outros famosos físicos, Arthur Schuster (1842 - 1912) e Osborne Reynolds (1842 – 1912) explicaram qualitativamente o correto funcionamento do radiômetro em dois artigos publicados em 1879. Albert Einstein (1879 – 1955) também teve importante contribuição no entendimento da invenção de Crookes. Hoje sabe-se que o efeito do moinho de luz é entendido como um fenômeno térmico, sem qualquer relação à pressão da radiação (RINO & STUARD, 2007).

No ano de 1999, Arenas *et al* propôs um sistema de controle analógico da velocidade de rotação das hélices do radiômetro. Seu sistema foi aplicado em laboratório e testado por alunos de engenharia durante cursos introdutórios de controle.

O objetivo do presente trabalho é construir uma plataforma educacional aprimorada, com um sistema de controle digital da velocidade das hélices. A plataforma permitirá aos

estudantes testar diversos projetos de controladores digitais em um sistema real, contribuindo para uma melhor compreensão e absorção dos conhecimentos apresentados em sala de aula.

2. CONSTRUÇÃO DA PLATAFORMA DIDÁTICA

2.1. Visão geral

A plataforma desenvolvida mostrada na Figura 1b tem por objetivo realizar o controle da velocidade de rotação das hélices de um Radiômetro de Crookes por meio da variação da potência de uma lâmpada incandescente colocada próxima ao dispositivo. Através de uma interface gráfica o usuário pode variar rapidamente os parâmetros de um controlador digital e visualizar o comportamento dinâmico do sistema.

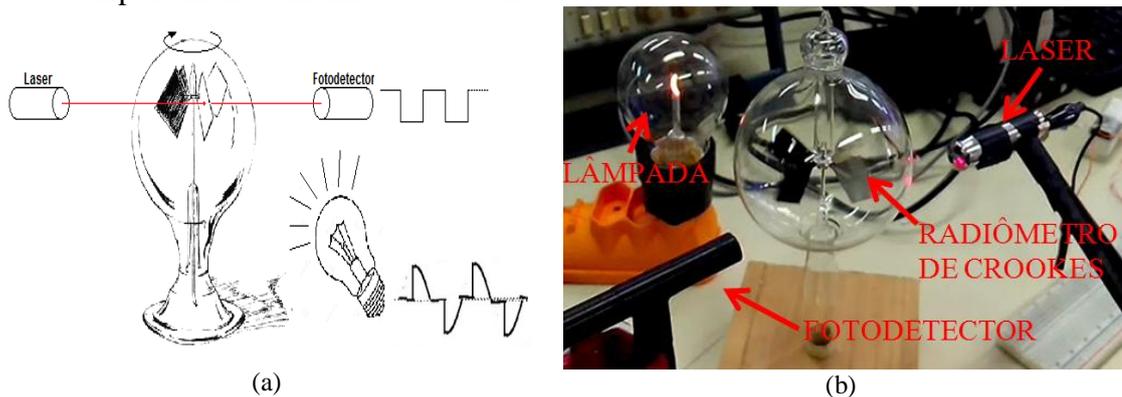


Figura 1 - (a) Esboço da plataforma. (b) Plataforma construída.

2.2. Sensor de Velocidade Angular

Para obtenção da velocidade angular de rotação das hélices do radiômetro, é utilizado um laser alinhado com um fotodetector. Ao girar, as hélices interrompem o feixe do laser alterando o sinal na saída do fotodetector. O sinal obtido é uma onda quadrada cuja frequência é proporcional à velocidade de rotação e depende do número de hélices do radiômetro.

2.3. Atuador

O atuador consiste em uma lâmpada incandescente (Figura 1b) ligada a um circuito de potência (Figura 2). O circuito desenvolvido é capaz de variar o valor eficaz de tensão entregue a lâmpada e consequentemente a potência emitida por ela. Desta forma é possível aumentar ou diminuir a velocidade de rotação das hélices, uma vez que o fluxo térmico no interior do radiômetro é modificado. A placa construída e seu layout são mostrados na Figura 3a e 3b respectivamente.

O circuito é formado por dois blocos: sincronismo com a rede elétrica e disparo do TRIAC por meio de um sinal fornecido pelo micro-controlador. O circuito sincronizador recebe como sinal de entrada o sinal da rede de 60 Hz, e gera um pulso de 3 V para cada passagem por zero desse sinal, gerando como saída um sinal de 120 Hz. Este sinal é usado como referência pelo micro-controlador para disparar o TRIAC com um ângulo de disparo específico, alterando a tensão eficaz fornecida a lâmpada. Quando o ângulo de disparo é 0°,

ou seja, não há defasagem entre os sinais, a potência transmitida é máxima. A potência transmitida será nula quando o ângulo de disparo for de 180° .

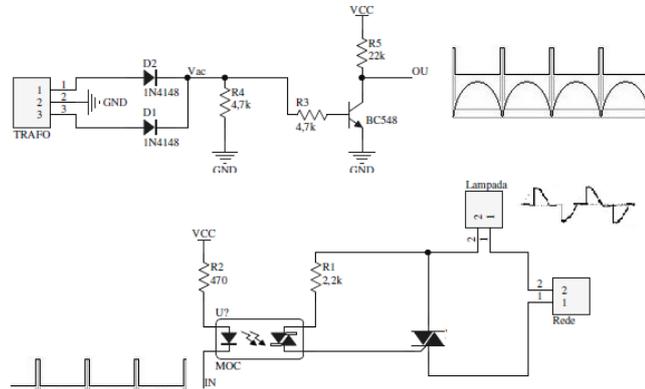
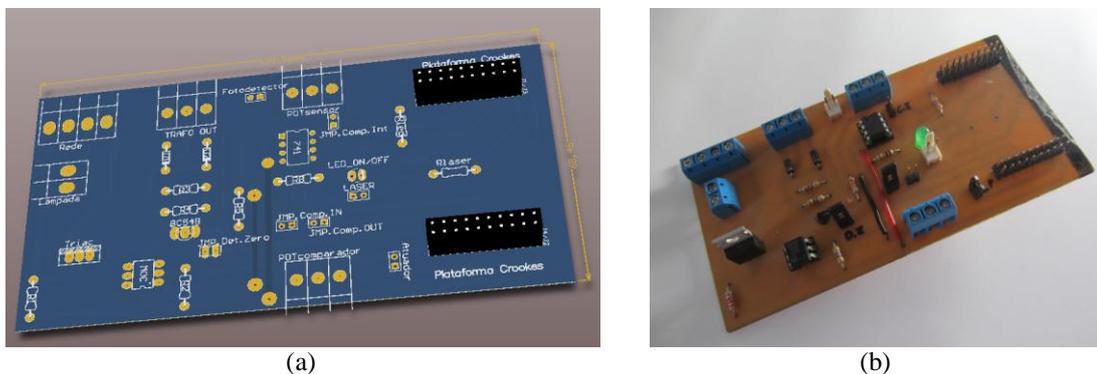


Figura 2 - Circuito de Potência.



(a)

(b)

Figura 3- (a) Layout PCB. (b) Placa desenvolvida.

2.4. Micro-controlador

O componente principal da solução é o micro-controlador STM 32 H103 da OLIMEX (Figura 4). Ele contém um processador ARM Cortex M3 de 32 bits, 128KB de Flash, 2 ADC de 12 bits, 3 Timers e pode operar até 72 MHz.



Figura 4 - Micro-controlador STM32 - H103.

O micro-controlador é responsável por receber o sinal do sensor de velocidade angular, realizar os cálculos da malha de controle e enviar os sinais de comando para o circuito de

potência. Além disso, ele fornece dados para a interface de controle e recebe dados do usuário através de comunicação serial RS232. A Figura 5 ilustra em blocos o sistema desenvolvido.

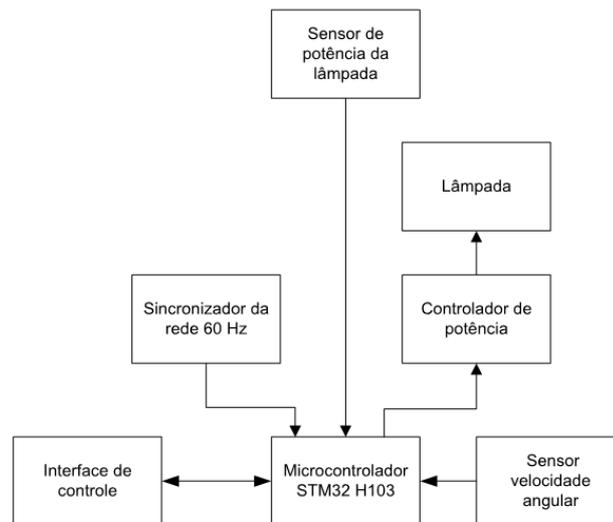


Figura 5 - Diagrama em Blocos do Sistema.

2.5. Interface Gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida em MATLAB® através da biblioteca GUIDE (GUI Development Environment) que fornece ferramentas simples e úteis para o desenvolvimento de aplicações personalizadas. A interface de controle desenvolvida para monitoramento e controle é apresentada na Figura 6.

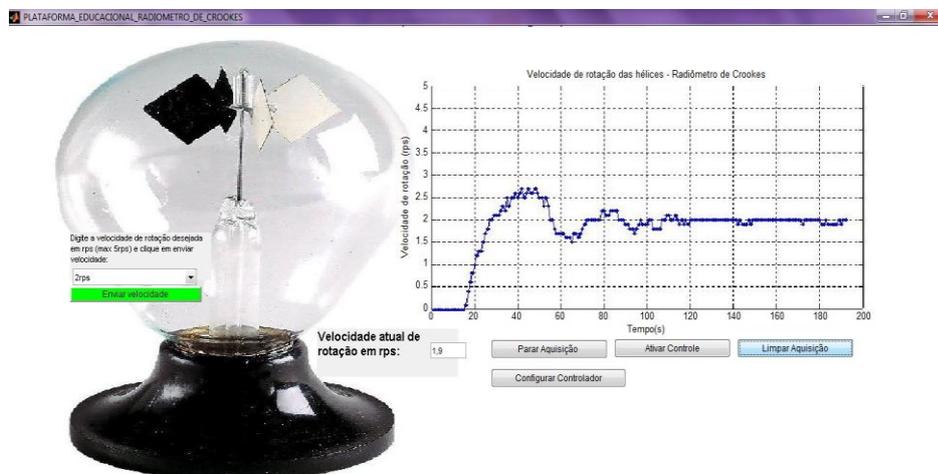


Figura 6 - Interface Gráfica Principal.

O estudante também pode alterar os parâmetros de controle, e selecionar o controlador desejado através da interface mostrada na Figura 7 que pode ser acessada ao clicar no botão “Configurar Controlador” na interface principal.

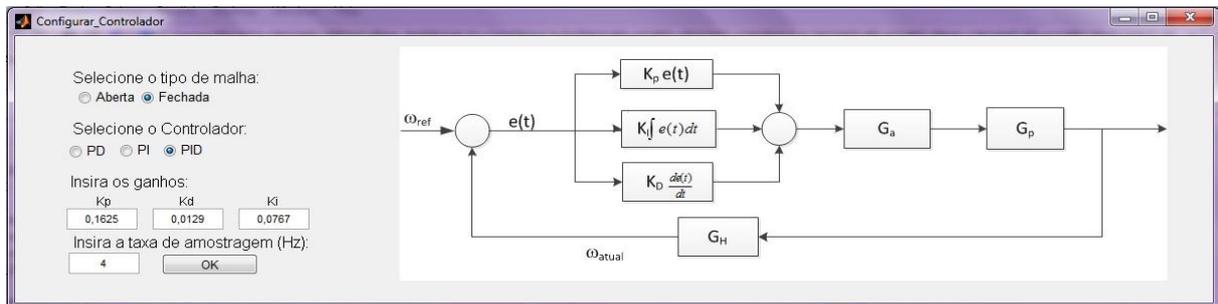


Figura 7 - Interface Gráfica - Projeto Controlador.

Através das interfaces, o usuário pode realizar as seguintes ações:

- Configurar a velocidade angular de referência (set point).
- Configurar parâmetros do controlador digital, como o ganho proporcional (K_p), integral (K_i), derivativo (K_d) e taxa de amostragem (T_s).
- Iniciar e parar sistema.
- Configurar o sistema nas seguintes situações: sem controlador, com controlador em malha aberta e em malha fechada.
- Visualizar a resposta do sistema, através da observação do gráfico da velocidade angular de rotação das hélices.

3. LÓGICA DE CONTROLE

O sistema de controle desenvolvido é representado pelo diagrama em blocos mostrado na Figura 8 abaixo. Ele é composto pelo controlador a ser projetado G_c , pelo atuador G_a (circuito de potência mais lâmpada), pela planta G_p (radiômetro) e pelo sensor ótico G_H . No controle em malha Fechada, o sinal oriundo do sensor é levado a um somador responsável por calcular o erro, efetuando a subtração do valor de referência com a velocidade atual. O sinal de referência ω_{ref} de entrada da malha de controle é informado pelo usuário.

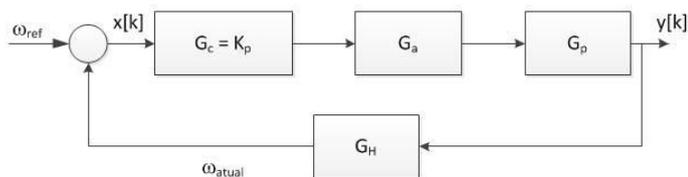


Figura 8 - Diagrama em blocos do sistema em malha fechada (Forma Discreta).

• G_p – Bloco Planta

Segundo Arenas *et al.*, o radiômetro pode ser modelado através da função de transferência dada pela Equação (1), onde β representa o coeficiente de atrito dinâmico aparente do ponto de contato entre as hélices e o eixo de rotação. I é o momento de inércia em relação ao eixo de rotação.

$$G_p = \frac{1/\beta}{s+\beta/I} \quad (1)$$

Para o projeto do controlador digital foram utilizados os mesmos parâmetros sugeridos por Arenas, e seus valores são:

$$\beta = 9,05.10^{-10} \text{ N.m.s}$$

$$I = 2,63.10^{-8} \text{ N.m.s}^2$$

- **GH – Bloco Sensor**

Em seguida, determina-se a função de transferência do bloco sensor. Como a saída do sensor ótico possui forma de onda retangular com frequência quatro vezes maior que a frequência angular de rotação das pás do radiômetro, a função de transferência do bloco sensor é apenas um ganho $G_H = K_H = 1/4$. Isso acontece em virtude de o radiômetro possuir quatro pás.

- **GA – Bloco Atuador**

Para a determinação do ajuste necessário da função de transferência do bloco atuador foi levantada a curva de potência da lâmpada (relacionada ao ângulo de disparo do TRIAC) versus velocidade angular (Figura 9).

A potência da lâmpada esta diretamente relacionada com o ângulo de disparo do TRIAC, para um ângulo igual a 0° tem-se a máxima potencia da lâmpada (100W) e para um ângulo de disparo de 180° tem-se a mínima potencia (0 W). A relação do ângulo de disparo com a potência pode ser considerada aproximadamente linear para simplificação dos cálculos.

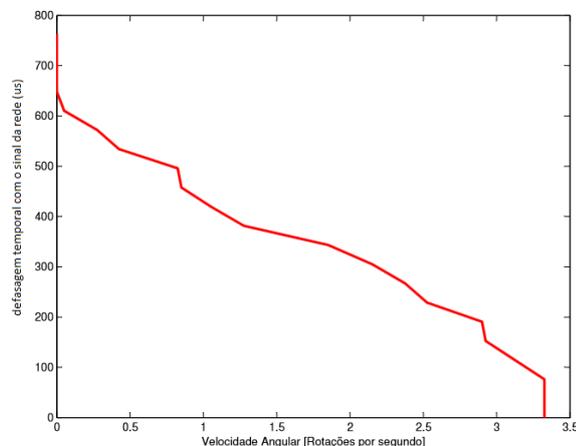


Figura 9 - Gráfico do Tempo de disparo do TRIAC (μs) versus Velocidade Angular (rps).

Dessa forma, através de uma regressão linear, é possível estimar a relação entre a potência da lâmpada (tempo de defasagem para disparo) e a velocidade angular das pás do radiômetro. A relação entre o ângulo de disparo e a velocidade angular obtida é dada pela Equação (2):

$$\theta = 650 - 180,5\omega \quad (2)$$

3.1. Controle em Malha Aberta

Para o controle em malha aberta, considera-se $G_H = 0$ e $G_c = 0$. Neste caso, o diagrama em bloco simplificado é apresentado na Figura 10.



Figura 10- Diagrama em Blocos do Sistema em Malha Aberta.

A Figura 11 apresenta a resposta do sistema para um sinal de referência de 2 rotações por segundo.

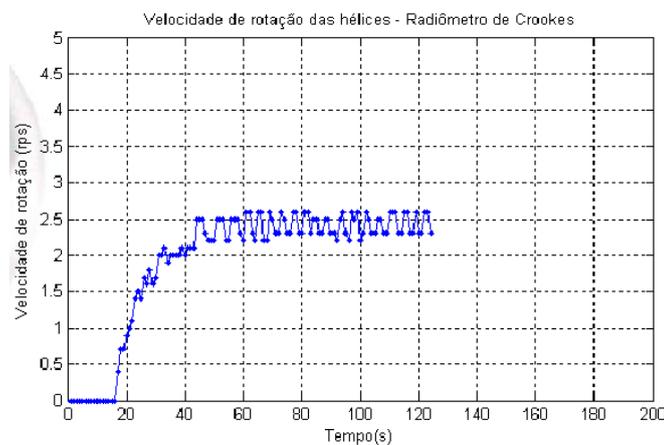


Figura 11 - Resposta do sistema em Malha aberta para velocidade de referência de 2 rps.

Nota-se que na situação de regime permanente o erro é de aproximadamente 0,5 rps (25%) e deve-se ao fato que sistemas de malha aberta não corrigem perturbações e são simplesmente comandadas pela entrada, segundo NISE (2004). A curva levantada para o atuador esta sujeita a erros devido a aproximação linear e a condições do ambiente como variação de temperatura e luminosidade.

3.2. Controle Proporcional

No controle proporcional, a correção ou ação do controlador é proporcional ao erro. Este corresponde a diferença entre o valor de referência e o valor atual da velocidade controlada. Desta forma a função de transferência G_c equivale simplesmente a um ganho K_p .

O valor de K_p é ajustado experimentalmente a um valor no qual o sistema responde mais rapidamente e com um menor erro em regime, tal valor é de 7,5. Na plataforma desenvolvida os estudantes tem a flexibilidade para variar o valor da constante de proporcionalidade e assim observar o resultado do sistema e o erro em regime permanente.

Na Figura 12 é possível observar a resposta do sistema com o controlador proporcional para a velocidade de referência de 2 rps.

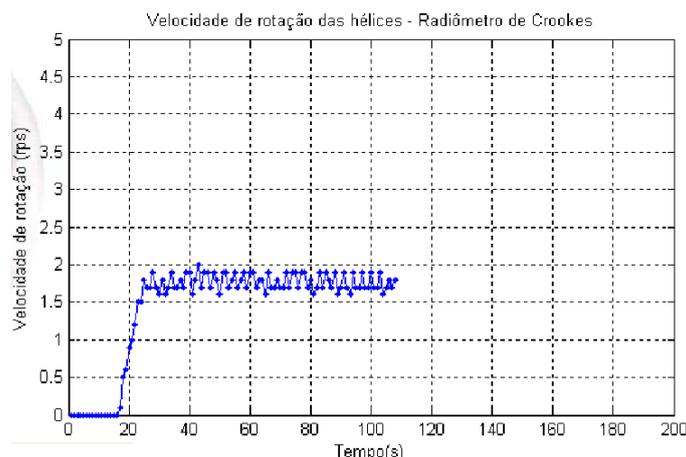


Figura 12 - Resposta do sistema com controle proporcional para velocidade de referência de 2 rps.

Com o valor escolhido para K_p a velocidade média em regime ficou em 1,8 rps. Portanto, o erro de 0,5 rps em malha aberta é reduzido para 0,2 rps, ou seja, para um valor apenas 10% defasado em relação a referência desejada (2rps).

3.3. Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)

Como solução ótima optou-se pelo projeto de um controlador PID, pois é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa (OGATA, 1990).

Como se pode notar pelo experimento do controlador proporcional, mesmo com uma variação do ganho, o sistema ainda permanece com um erro em regime. Para zerar esse erro em regime é interessante adicionar um efeito integral ao controlador, com o uso controlador PID.

O projeto do controlador PID é realizado com auxílio da ferramenta sisotool do Matlab. Também é usado a Sintonia Automatizada (Automated Tuning) com o qual é possível projetar vários tipos de controladores baseados em uma planta simulada.

Com a planta G_p discretizada e simulada, o controlador sugerido pelo Automated Tuning do Matlab para uma frequência de amostragem de 0,25 amostras por segundo é dado pela Equação (3).

$$G_c = K_p \cdot \frac{(z^2 - 0,472z + 0,0796)}{(z-1)z} \quad (3)$$

A Figura 13 mostra o lugar das raízes do sistema discretizado, com o controlador PID e também a resposta a um degrau unitário.

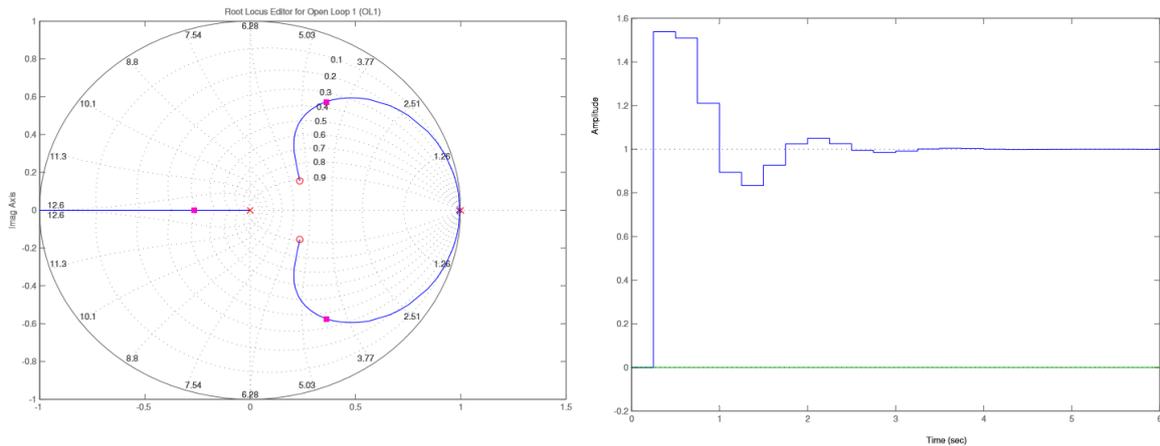


Figura 13 - Lugar das Raízes e Resposta ao Degrau do Sistema Compensado (Simulação Controlador PID).

Ao variar o ganho proporcional o sistema responde de diversas maneiras, podendo-se diminuir ou aumentar o sobressinal e também o tempo de estabilização. Uma vez obtida a função de transferência do controlador, procurou-se determinar sua equação a diferenças para posterior implementação no código embarcado no micro-controlador. Com o auxílio da anti-transformada Z é possível achar Equação (4) a diferenças.

$$y[k] = y[k - 1] + K_p(x[k] - 0,472x[k - 1] + 0,0796x[k - 2]) \quad (4)$$

Ao implementar a equação a diferenças no micro-controlador, o ganho K_p é variado até a obtenção de resultados satisfatórios. Este mesmo procedimento poderá ser realizado pelos alunos, que terão liberdade de variar não apenas K_p mas também K_i e K_d .

Na Figura 14 é apresentada a resposta do sistema com o controlador PID e usando $K_p = 0.1625$. Nota-se que a saída apresenta uma resposta oscilatória e sub-amortecida com grande sobre-sinal. O sistema leva pelo menos 100 s para atingir o valor esperado de 2 rps em regime permanente.

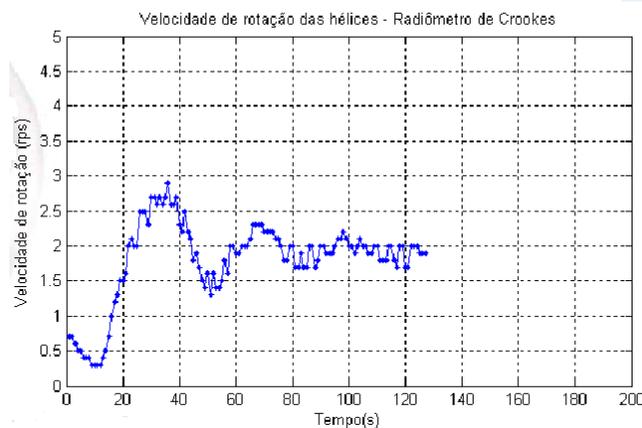


Figura 14 - Resposta do sistema com controle PID para velocidade de referência de 2 rps.

Na figura 15 é apresentada a resposta do sistema quando K_p é ajustado para 0,01654. Para este K_p o sobre-sinal é eliminado e o tempo para entrar em regime permanente é

reduzido de cerca de 100 segundos para apenas 45 segundos, uma melhora de 55%. É possível evidenciar uma variação na resposta entre 120s e 140s. Tal variação ocorreu devido a uma perturbação provocada intencionalmente a fim de verificar se o sistema era capaz de corrigir a resposta rapidamente. A perturbação foi inserida com um anteparo entre a fonte luminosa e o radiômetro de forma a reduzir a intensidade de radiação sobre o instrumento. O desempenho foi bastante satisfatório, levando apenas 10s para voltar ao valor esperado de 2 rps em regime.

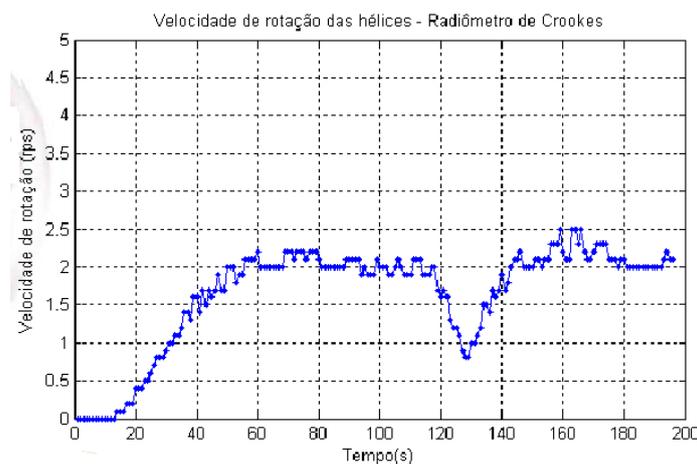


Figura 15 - Resposta do sistema com controle PID para velocidade de referência de 2 rps (Com Perturbação).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Radiômetro de Crookes, por possuir hélices que se movimentam na presença de luz, gera grande curiosidade nos alunos, despertando seus interesses pelo dispositivo e seu princípio de funcionamento. Isto pode ser usado como atrativo para chamar a atenção dos alunos, de como realizar o controle da velocidade de rotação angular das hélices, por meio de técnicas de controle.

O sistema de controle para o Radiômetro de Crookes apresentado neste trabalho pode ser usado como importante ferramenta de ensino de teoria de controle moderno, permitindo discutir desde fundamentos da teoria de controle, como análise de resposta dinâmica, até projeto de controladores digitais e técnicas de sintonia.

O desempenho da plataforma mostrou-se bastante satisfatório, uma vez que ao sintonizar o controlador PID, é possível obter uma resposta mais rápida quando comparada ao sistema desenvolvido por Arenas. O tempo para atingir o regime permanente é reduzido de 100 segundos para apenas 45 segundos, sem erro em regime. A resposta dinâmica do sistema foi ainda mais rápida quando o controlador proporcional foi usado, atingindo a situação estacionária em apenas 6 segundos. Neste caso, porém, nota-se a presença de um erro em regime de 10%.

A plataforma apresentada mostra-se como uma opção interessante para futuros estudos de técnicas e projetos de controladores digitais, podendo ter grande utilidade para o ensino de controle nas universidades brasileiras.

Como proposta futura para este trabalho, seguindo a ideia de utilização de recursos já disponíveis em outros departamentos da instituição, propõe-se pesquisar outros equipamentos



passíveis de serem controlados por malhas de controle digital, inclusive gerando projetos interdisciplinares e interdepartamentais com este foco. Paralelamente, o Radiômetro de Crookes pode ser utilizado para comparação de outras estratégias de controle e ainda para análise outras fontes de radiação e/ou outras técnicas de controle de potência destas fontes.

Agradecimentos

Ao departamento de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que concedeu o Radiômetro de Crookes para a realização do trabalho.

5. REFERÊNCIAS / CITAÇÕES

ARENAS, A.; VICTORIA, L.; Abellan, F.J. Angular Velocity Control for a Windmill Radiometer. IEEE Trans. Educ., v. 42, p. 147-152, May 1999.

NISE, S. Norman. Control Systems Engineering. 4th ed., John Wiley & Sons, Incorporated, 2004. 983 p.

OGATA, K. Modern Control Engineering. 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1990. 963 p.

RINO, J. P.; STUDART, N. O enigma do moinho de luz. Física na escola, v.8, n.1, p. 22 – 24, 2007.

CROOKES'S RADIOMETER AS A TEACHING PLATFORM FOR DIGITAL CONTROL IN ENGINEERING COURSES

Abstract: *The Engineering courses at UTFPR have a demand for the teaching of control and servomechanisms as central elements in the acquisition of expected competences for engineering students. Many experiments, proposed for the exploration of all knowledges presented in class, are adressed using mathematical simulation and eventually real physical plants are used. In this context, low cost and easily reproducible experiments, using resources especially already available in the university, are constantly searched by our professors. The Crookes Radiometer, available at the Department of Physics, consists of a rotating shaft with four vanes, envolved by a low pressure gas within a container, is used to measure and detect the intensity of radiating energy trough the measuring of the vanes' angular velocity that rotates when exposed to a radiation source. The objective of the present work is to develop an enhanced educational platform, containing a digital control system for control the vanes' velocity. The platform will enable students to test many projects of digital controllers in a real system, contributing for a better understanding and absorption of the knowledge presented in class.*

Key-words: *Digital Control, Crookes's Radiometer, Teaching Tools.*