



## Modelagem, Simulação e Controle de uma Planta de Nível Didática.

Felipe José de Sousa Vasconcelos<sup>1</sup>, Cláudio Marques de Sá Medeiros<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Mecatrônica – IFCE. e-mail:vasconcelos\_sf@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor Doutor em Engenharia de Teleinformática – IFCE. e-mail:claudiosa@ifce.edu.br

**Resumo:** O controle automático tornou os processos industriais mais eficientes e seguros. Seu principal objetivo é manter as variáveis dos sistemas dinâmicos em valores pré-definidos. O projeto de um sistema de controle envolve etapas como modelagem, simulação e o projeto do controlador. Para este trabalho, foi dimensionada uma planta de nível onde estas etapas foram desenvolvidas. Foi feita a modelagem de todos os elementos do sistema (atuador, recipiente, sensor, entre outros) e uma estimação de parâmetros foi realizada através do método dos mínimos quadrados para fins de comparação com o modelo obtido por ensaios. Uma etapa de simulações computacionais foi realizada para facilitar os testes de bancada e um controlador analógico foi projetado e implementado.

**Palavras-chave:** controle analógico, estimação de parâmetros, modelagem, sistema de nível.

### 1. INTRODUÇÃO

O controle automático de processos se consolidou ao longo das últimas décadas e se tornou indispensável ao quadro industrial mundial. São enormes os ganhos obtidos através da aplicação dessa tecnologia, entre eles melhor qualidade no produto final, maior confiabilidade dos sistemas, aumento de segurança nas operações industriais (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou em malha fechada. Cada abordagem possui suas vantagens e desvantagens em relação à outra, porém o controle em malha fechada oferece ao sistema uma relativa insensibilidade a distúrbios externos e variações internas nos parâmetros do sistema, por isso será a abordagem utilizada neste trabalho (OGATA, 2003).

Existem diversas maneiras para se construir um controlador, contudo o algoritmo mais tradicional e utilizado na indústria é o proporcional-integral-derivativo (PID). Esta popularidade se dá por resultados satisfatórios através de ajustes simples nos parâmetros dos sistemas (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

Para que o projeto de um sistema de controle possa ser efetuado algumas etapas devem ser realizadas. Inicialmente deve ser verificado se é possível modelar o comportamento do sistema através de equações diferenciais lineares, pois se não for possível será necessária uma estimação de parâmetros para levantar um modelo matemático que se comporte aproximadamente como o sistema real. Após a modelagem, uma etapa de simulação deve ser realizada a fim de se comparar a resposta do modelo do sistema à sua resposta real. A simulação também possibilita diferentes ajustes no controlador evitando assim transtornos em testes de bancada no sistema, como danos em dispositivos. Por fim, o controlador deve ser projetado.

O sistema de nível é um dos mais importantes na indústria moderna, logo controlar automaticamente plantas de nível se faz necessário. O projeto de um controlador de um sistema de nível de primeira ordem pode ser bastante didático, pois sua modelagem matemática envolve poucos parâmetros, a eletrônica envolvida no acionamento do atuador está bastante consolidada na literatura e existem diversos tipos de sensores que podem ser utilizados.

Para que o nível de um recipiente seja mantido, a vazão de entrada deve ser igual a vazão de saída, ou seja, quando acontece uma variação na vazão de saída (ou de entrada) o controlador de nível deve atuar de modo que a vazão de entrada (ou de saída) varie na mesma proporção (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

O formato do recipiente é fundamental para um bom ajuste do controlador. É preferível, por exemplo, recipientes cilíndricos do que esféricos, pois nos cilíndricos a resposta dinâmica será a mesma para uma mesma variação na vazão de entrada, já nos recipientes esféricos existe uma não linearidade no meio da esfera, onde a resposta será mais lenta, o que dificulta o controle (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

Portanto, objetivo desse trabalho é modelar, simular e controlar uma planta de nível didática com o intuito de oferecer aos estudantes de tecnologia uma contribuição prática de conceitos vistos nas disciplinas teóricas.

Na seção 1 é apresentada uma visão geral sobre o assunto e um breve histórico dos temas envolvidos. Na seção 2 é apresentada a metodologia utilizada e os resultados obtidos são apresentados na seção 3. A seção 4 contém a conclusão do artigo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

É apresentada nesta seção a abordagem utilizada para se realizar a modelagem, a simulação e o projeto do controlador para o sistema de controle de nível proposto.

### 2.1 Descrição e modelagem do Sistema de Nível

A modelagem de um sistema é obtida a partir de algum conhecimento teórico sobre sua dinâmica (equações diferenciais lineares que representam os princípios físicos envolvidos), contudo em alguns casos o sistema dinâmico é muito complexo ou ainda não existe teoria para explicar o seu comportamento. Nesses casos, a dinâmica do sistema é aproximada por conjuntos de dados de entrada e saída, através de métodos de estimação de parâmetros (AGUIRRE, 2007). Diferentes tipos de modelagem de sistemas podem ser encontrados em (GARCIA, 2005). A escolha da estrutura do modelo e sua complexidade geralmente são feitas por tentativa e erro e tem bastante impacto na técnica de otimização a ser utilizada (NELLES, 2001).

#### 2.1.1 Planta

A planta proposta foi desenvolvida seguindo um exemplo encontrado em (OGATA, 2003) para um sistema de nível de primeira ordem. Sua modelagem é efetuada por equações diferenciais lineares obtidas a partir da natureza física do sistema. Outros exemplos de sistemas de nível podem ser encontrados em (BAZANELLA; JR., 2005; D'AZZO; HOUPIS, 1998). Na Figura 1 é mostrado um esboço do sistema desenvolvido para se realizar o projeto. Utiliza-se dois recipientes em acrílico translúcido, um onde efetivamente se controla o nível (tanque principal) e outro como reserva de fluido do tanque principal. O tanque principal foi dimensionado de acordo com a vazão nominal do atuador (motobomba) e compatível com as dimensões do sensor. Cada parâmetro da planta é definido como segue:

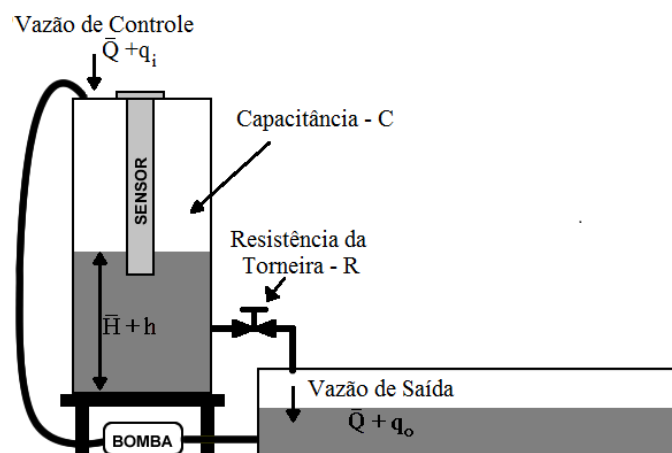


Figura 1 – Sistema de Nível de primeira ordem.

- $\bar{Q}$   $\Rightarrow$  taxa de fluxo em regime permanente ( $\text{cm}^3/\text{s}$ );
- $q_i$   $\Rightarrow$  pequeno desvio da taxa de fluxo de entrada ( $\text{cm}^3/\text{s}$ );
- $q_o$   $\Rightarrow$  pequeno desvio da taxa de fluxo de saída ( $\text{cm}^3/\text{s}$ );



- $\bar{H}$   $\Rightarrow$  altura do nível em regime permanente (cm);
- $h$   $\Rightarrow$  pequeno desvio na altura do nível (cm);
- $C$   $\Rightarrow$  capacitância de fluxo (cm<sup>2</sup>);
- $R$   $\Rightarrow$  resistência ao fluxo de líquido (s/cm<sup>2</sup>).

Considerando o fluxo como laminar, as equações diferenciais lineares que regem a dinâmica do sistema para pequenas variações de fluxo são:

$$C \cdot dh = (q_i - q_o) dt \quad (1)$$

$$R = h/q_o \quad (2)$$

Aplicando o método da transformada de Laplace às equações acima e considerando as condições iniciais nulas, temos a função de transferência que relaciona o nível do tanque principal à vazão de entrada dada por:

$$H(s) = (R/(RCs + 1)) Q_i(s) \quad (3)$$

Os parâmetros  $C$  e  $R$  da Equação (3) são estimados como segue. A capacitância é definida como a área da seção transversal do tanque principal, logo é necessária uma simples medição das arestas que a define. Em relação à resistência  $R$  da válvula de comando manual, definida na Equação (2), foi necessária a realização de ensaio experimental. Com a manutenção de nível constante no tanque principal, avaliou-se a vazão da válvula, com 100% de abertura, com o auxílio de um bquer milimetrado e um cronômetro. A capacitância medida é 156,25 cm<sup>2</sup> e a resistência encontrada para o nível constante de 5 cm (em relação à base do sensor) é 0,195 s/cm<sup>2</sup>.

### 2.1.2 Atuador

O atuador utilizado no sistema de controle é uma motobomba de limpador de para-brisas veicular. Esta, por sua vez, consiste de um motor CC de ímã permanente acoplado a uma bomba hidráulica. Como o único parâmetro disponível em catálogo é a tensão nominal do motor CC (12V), tornou-se primordial a realização de ensaios para estabelecer a relação *Tensão no Motor x Vazão da Bomba*. É importante notar que a aplicação deste conjunto motobomba é de uso intermitente, logo sua operação sob condição de tensão nominal incorre em sobreaquecimento. Assim, os ensaios foram realizados com vistas a encontrar uma região de operação linear, mas que também não produza aquecimento excessivo. Esses requisitos podem ser encontrados a partir da linearização da curva obtida com os ensaios. As curvas e a equação que modela a motobomba podem ser observados na Figura 3a).

A motobomba é acionada eletronicamente a partir de um conversor CC/CC do tipo BUCK para operação em um único quadrante (unidirecional) e utilizando a técnica de modulação por largura de pulsos com auxílio de um CI dedicado, o LM3524. A modelagem do circuito pode ser encontrada em (RASHID, 1999) e resulta na seguinte equação:

$$v_s = (V_{cc}/V_{tri}) v_{controle} \quad (4)$$

onde,  $v_s$  é a tensão média de saída aplicada à motobomba,  $V_{cc}$  é a tensão nominal da bomba,  $V_{tri}$  é a amplitude da tensão triangular gerada no LM3524 e  $v_{controle}$  é o sinal de controle. Considerando  $V_{cc} = 12V$  e  $V_{tri} = 5V$  a relação  $v_s/v_{controle} = 2,4$ . A faixa de tensão de controle é 0-5V.

### 2.1.3 Sensor

O sensor de nível utilizado é de aplicação em tanques de combustível veiculares. Consiste numa boia com deslocamento linear envolta numa carcaça cilíndrica de alumínio cujo elemento sensível é de natureza resistiva. À medida que o nível sobe, a resistência do sensor cai, o que caracteriza uma não

linearidade. Assim, o circuito apresentado na Figura 2 faz a amplificação do sinal proveniente do sensor (CI 1), adequação do nível de tensão (CI 2) e filtragem (CI 3) de tal forma que o sinal de saída  $V_{saída}$  é diretamente proporcional ao nível de líquido no tanque principal e está restrito a faixa de tensão de 0-5V.

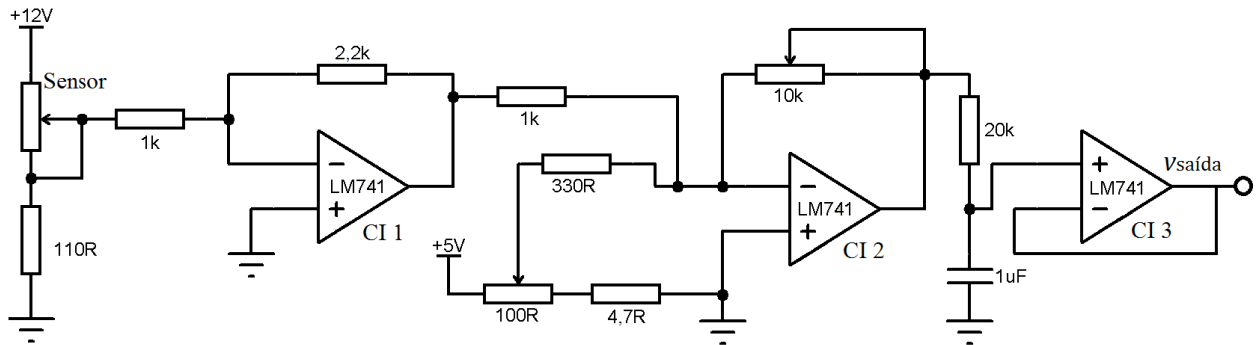


Figura 2 – Circuito de condicionamento do sinal de saída do sensor.

A modelagem do sensor e circuito de condicionamento foi obtida experimentalmente. A relação  $V_{saída} \times h$  é ilustrada graficamente e matematicamente na Figura 3b).

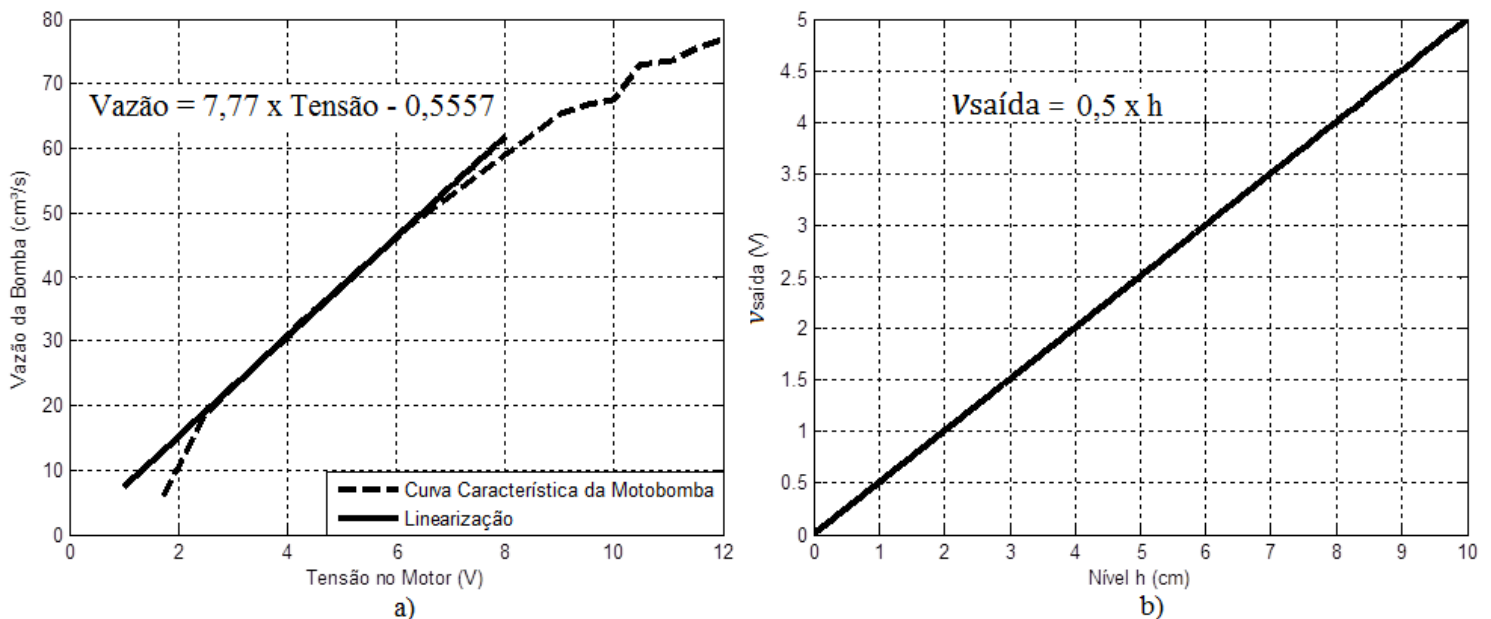


Figura 3 – a) Curvas e equação que modelam a motobomba; b) Curva e equação que modela o sensor.

### 2.1.4 Validação do Modelo

Antes de iniciar o projeto do controlador, optou-se por verificar a representatividade do modelo obtido. Assim, com a estrutura da planta disponível e os circuitos eletrônicos todos implementados, aplicou-se um sinal analógico pseudo-aleatório à entrada do gerador de PWM e foi realizada a aquisição tanto deste sinal de entrada quanto do sinal de saída do circuito condicionador do sensor de nível. De posse de 366 amostras adquiridas com uma taxa de amostragem de 3Hz, utilizou-se a técnica dos mínimos quadrados para a estimação do modelo. A aplicação desta metodologia baseia-se na presunção da ordem do modelo para a formação do vetor de parâmetros ( $\theta$ ), do vetor de saída ( $Y$ ) e da matriz de regressores ( $X$ ) conforme Equação (5) a seguir,

$$\bar{\theta} = [X^T X]^{-1} X^T Y. \quad (5)$$

O modelo assumido é de primeira ordem, com as dimensões de  $X$ ,  $Y$  e  $\bar{\theta}$ , respectivamente, iguais a  $365 \times 2$ ,  $365 \times 1$  e  $2 \times 1$ . Como resultado obteve-se a seguinte função de transferência discreta

$$H(z) = ((0,01496)/(1 - 0,9916z^{-1})) Q_i(z). \quad (6)$$

Submetendo-se a planta e os modelos  $H(s)/Q_i(s)$  e  $H(z)/Q_i(z)$  a um sinal de entrada pseudo-aleatório, obteve-se como resposta as curvas dos sinais de saída apresentados na Figura 4 (o sinal de entrada foi adequado para melhor visualização). Pode-se observar que embora haja discrepância entre as respostas em termos de valores absolutos, ambos os modelos apresentam respostas dinâmicas semelhantes a da planta e, portanto, são considerados aceitáveis para o desenvolvimento do projeto do controlador.

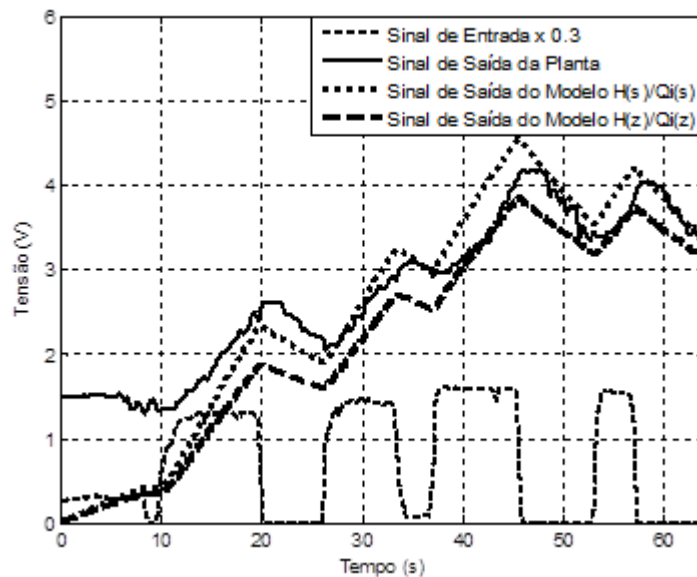


Figura 4 – Ilustração das respostas da planta e dos modelos em função de uma entrada pseudo-aleatória.

## 2.4 Projeto do Controlador

O sinal de controle aplicado à entrada do atuador do sistema de malha fechada de controle de nível, vide Figura 5, é diretamente proporcional ao erro e ao histórico do erro, ou seja, este controlador do tipo Proporcional-Integrador (PI).

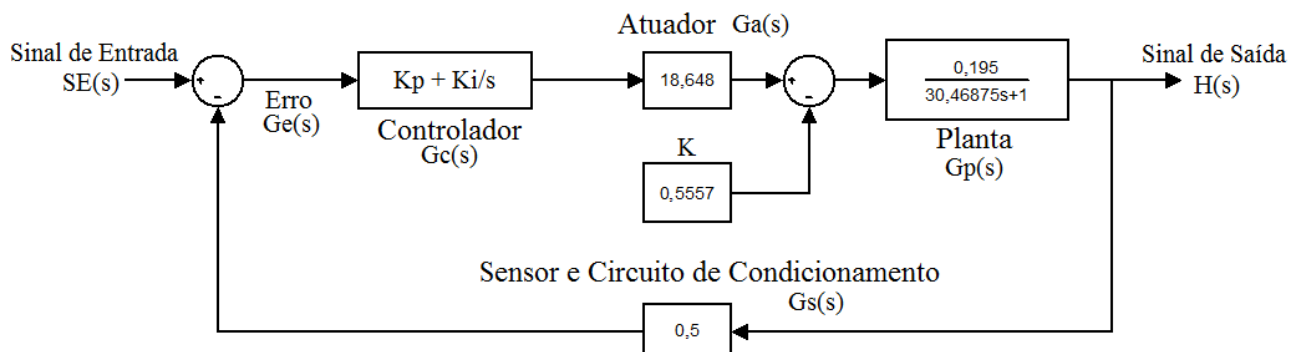


Figura 5 – Diagrama de blocos do sistema de controle de nível.

Considerando inicialmente apenas o ganho proporcional, estabeleceu-se como meta preliminar alcançar erro de estado permanente de 5%. Desta forma, a partir da aplicação do teorema do valor final sobre a equação do erro (OGATA, 2003) em função de uma excitação SE(s) em degrau

$$G_e(s) = SE(s)/(1 + G_c(s)G_a(s)G_p(s)G_s(s)K_p), \quad (7)$$

obteve-se o ganho do  $K_p$  igual a **10,4503**. Porém, esta condição provocou saturação do controlador e foi logo descartada. Lançando mão de simulações computacionais estabeleceu-se um novo ganho de 3,3787, o qual corresponde a um erro de estado permanente de 14%. Para fins de ajuste prático, foi imposta uma faixa de 0,1 a 5,1 para variação do ganho proporcional, representando respectivamente erros de 9,91% a 84,62%.

A metodologia utilizada para a determinação do ganho integrador  $K_i$  é baseada na elaboração da equação característica da função de transferência de malha fechada apresentada na Figura 5 e posterior formação do gráfico do Lugar das Raízes. Assim, impondo  $K_p=3,3787$ , a equação característica é dada como

$$1 + (0,0597K_i)/(s^2 + 0,2345s). \quad (8)$$

Definiu-se uma faixa para a variação do  $K_i$  de tal forma que o sistema pode apresentar comportamento subamortecido, criticamente amortecido e superamortecido. O  $K_i$  pode assumir valores que variam de 0,05 a 1. O comportamento do sistema, a uma entrada em degrau, em relação às faixas projetadas de  $K_p$  e  $K_i$  pode ser observado na Figura 6.

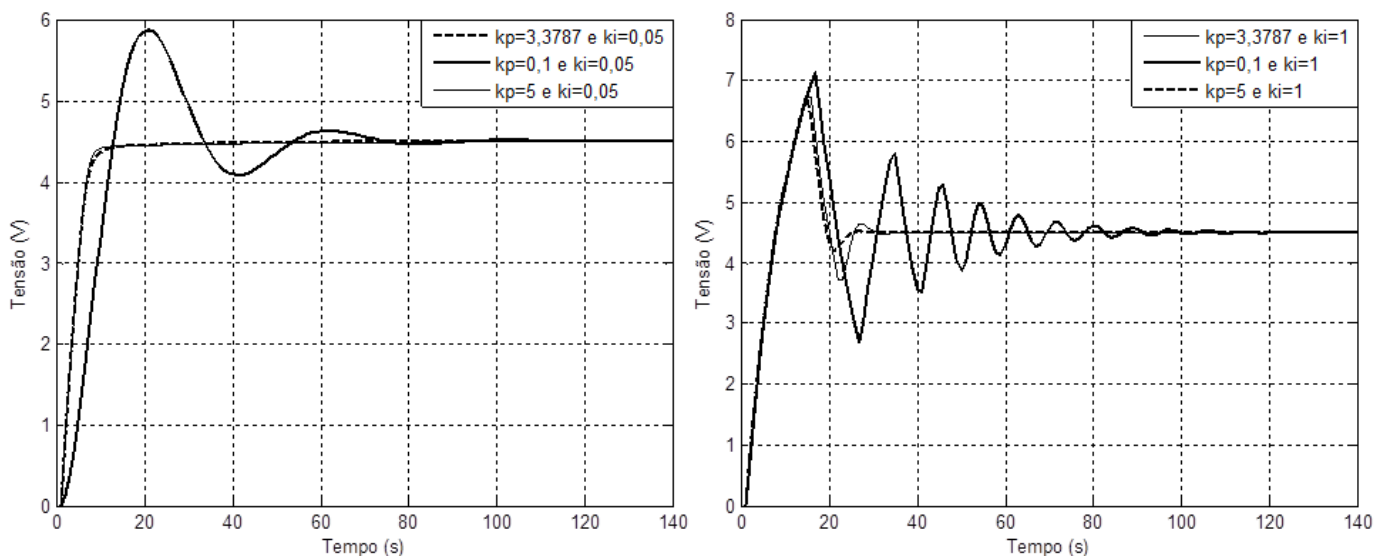


Figura 6 – Comportamento do sistema às faixas projetadas de  $K_p$  e  $K_i$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do controlador projetado foi realizada com a utilização de circuitos operacionais integrados do tipo LM741 conforme Figura 7. O circuito foi simplificado para melhor visualização.

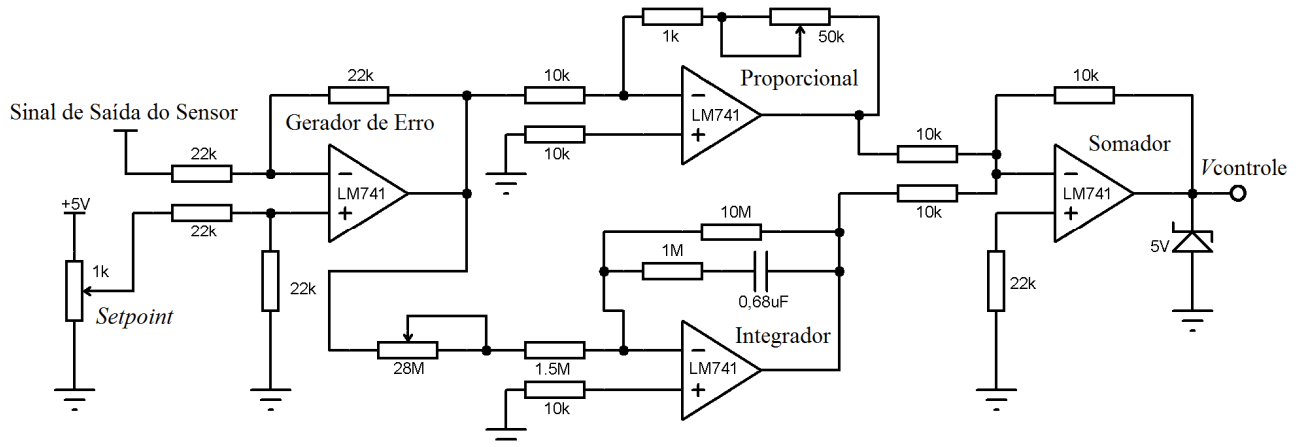


Figura 7 – Circuito do controlador.

A Figura 8 ilustra a resposta do sistema a duas condições. Uma em malha aberta, caracterizada por comportamento superamortecido, e a outra em malha fechada, com comportamento subamortecido. Percebe-se claramente a redução do tempo de subida alcançado pelo sistema em malha fechada. Desta forma, a partir do nível zero, o tempo de subida é de apenas 58s para alcançar o nível de 9cm, enquanto em malha aberta isto ocorre em 275s. Entretanto, há um sobressinal de 7,28% e um tempo de acomodação de 150s. As pequenas oscilações observadas em regime permanente na resposta de malha fechada foram analisadas e estão relacionadas a natureza e qualidade do sensor.

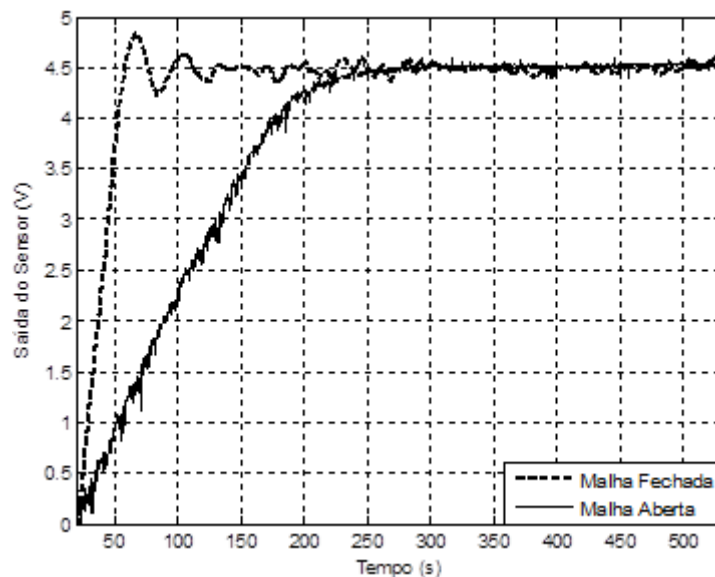


Figura 8 – Resposta do Sistema de Nível.

#### 4. CONCLUSÕES

O projeto de um sistema de controle traz ao estudante de tecnologia uma visão multidisciplinar, pois envolve diversas disciplinas como eletrônica industrial, instrumentação, modelagem de sistemas e controle.

Após a análise dos resultados observa-se que o projeto do controlador de nível atendeu as expectativas iniciais de desenvolver um equipamento de cunho didático e serve de base para futuros projetos.



Como sugestão a trabalhos futuros recomenda-se a utilização de outras técnicas de modelagem, outros tipos de sensores e a realização de novas abordagens de controle como controle digital, controle neural, controle fuzzy, entre outros.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao IFCE e ao Laboratório de Processamento de Energia (LPE).

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A.; SILVA A. P. A. da; CAMPOS, M. F. M.; AMARAL, W. C. do. **Enciclopédia de automática: controle e automação, volume III**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

BAZANELLA, A. S.; JR., J. M. G. da S. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. 1. ed. [S.l.]: UFRGS, 2005.

CAMPOS, C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de equipamentos processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

D'AZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares**. 2. ed. [S.l.]: GUANABARA, 1988. Tradução: Bernardo Severo da Silva Filho.

GARCIA, C. (2005). **Modelagem e Simulação**, 2ª ed., Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NELLES, O. (2001). **Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models**, Springer, New York.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. Tradução: Paulo Alvaro Maya. Revisão técnica: Fabrizio Leonardi. ISBN 85-87918-23-0.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações** 1. ed. São Paulo: Makron Books, 1999. Tradução: Carlos Alberto Favato. Revisão técnica: Antonio Pertence Júnior. ISBN 85-346-0598-X.