IMPACTO CIENTÍFICO
EDITORA

SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL DE TANQUE VIA ARDUINO

10.56238/edimpacto2025.005-006

Marcelo Henrique Costa Santos
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Adriana da Silva Torres
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Moisés de Matos Torres
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

RESUMO

O controle de nível de tanques apresenta muita relevância na indústria, além de ser muito utilizado em aplicações residenciais. Para auxiliar no controle de sistemas, pode-se utilizar a plataforma Arduino. Tal plataforma tem se destacado nas áreas de computação e eletrônica pela facilidade de programação e transformou-se em uma ferramenta essencial na elaboração de projetos básicos de engenharia. Neste trabalho, utilizou-se a plataforma Arduino no controle de nível de líquido de um sistema de tanques em escala laboratorial. Para este controle, implementou-se um controlador liga-desliga. Realizou-se, ainda, uma simulação no Matlab com o objetivo de verificar o comportamento de um sistema sujeito a diferentes ações básicas de controle. Através da simulação no Matlab, verificou-se as particularidades das principais ações de controle, o que permitiu observar que o controlador PID gera o melhor resultado e, por isso, é o mais utilizado em sistemas de controle industrial em todo o mundo.

Palavras-chave: Sistema de Controle. Arduino. Nível. Controlador.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de controle de nível de líquidos são muito utilizados em processos industriais. Em muitas situações um controle eficiente é fundamental para o sucesso produtivo e torna-se necessária a utilização de sistemas de controle automático. Bem como nas indústrias, outros setores como o residencial e o comercial também fazem uso de sistemas de controle de líquido e podem ser beneficiados com sistemas que reduzam os possíveis erros causados por um controle manual dos processos.

Neste contexto, buscou-se desenvolver uma planta de controle de nível de líquido em escala laboratorial através da plataforma Arduino, de forma a demonstrar que esta consegue executar processos industriais simples com baixo custo e é uma alternativa atrativa e econômica em diversas conjunturas.

O funcionamento básico da planta consiste em bombear líquido pelas tubulações de um reservatório para um tanque controlado. Para isto, utiliza-se uma bomba de rotação variável e sensores de nível, sendo todo o monitoramento e controle feito através do microcontrolador Arduino.

1.1 OBJETIVO GERAL

Controlar e monitorar o nível de um tanque a partir do desenvolvimento de um sistema microcontrolado através da plataforma Arduino.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Montar um sistema de tanques em escala laboratorial;
- Montar um circuito elétrico com o Arduino;
- Programar um sistema de controle automático liga-desliga;
- Simular a resposta de diferentes ações básicas de controle no Matlab.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTROLE INDUSTRIAL

O controle industrial tem como objetivo a redução de custos, otimização do tempo, aumento da produção, eficiência e qualidade através do uso de softwares, novos equipamentos e técnicas. Esse termo se tornou conhecido a partir de 1950 com o desenvolvimento da eletrônica e hoje é essencial para a modernização dos processos industriais.

2.2 MODELAGEM

Modelos matemáticos podem ser utilizados para uma melhor compreensão de um sistema a ser desenvolvido. Através de um modelo, construído a partir de conceitos físicos conhecidos e considerações, é possível simular o processo executado por um sistema real. A modelagem permite descrever satisfatoriamente sistemas de nível de líquido.

2.2.1 Sistemas de Nível de Líquido

Os fluxos dos fluidos estão propensos a determinadas condições gerais, princípios e leis da dinâmica. Sendo assim, é importante dividir os regimes de fluxo em laminar e turbulento, baseado no número de Reynolds[1] (OGATA, 2003). Para um número de Reynolds compreendido entre 3000 e 4000, tem-se que o fluxo é turbulento e deve ser tratado matematicamente com equações diferenciais não lineares. Para um número de Reynolds menor que 2000, o fluxo é dito laminar e deve ser tratado matematicamente com equações diferenciais lineares. Processos industriais geralmente são turbulentos (OGATA, 2003).

Para descrever características dinâmicas de sistemas de nível de líquido é conveniente introduzir o conceito de resistência e capacitância (OGATA, 2003).

A capacitância C é definida como a variação no volume de líquido capaz de causar uma mudança unitária na altura. Assim,

$$C=\frac{\text{variação no volume, m}^3}{\text{variação na altura, m}} \quad . \tag{1}$$

Considerando um fluxo através de uma pequena tubulação interligando dois tanques, define-se a resistência R como a variação na diferença de nível necessária para causar a variação unitária na taxa de escoamento, ou seja,

$$R=\frac{\text{variação na diferença de nível, m}}{\text{variação na vazão em volume, m}^3/\text{s}} \quad . \tag{2}$$

Para fluxo laminar, tem-se:

$$Q = KH \tag{3}$$

onde:

Q = taxa de fluxo de líquido em estado estacionário, m^3/s; K = coeficiente, m^2/s;

[1] Número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento. É uma relação entre forças de inércia e forças viscosas.

H = altura do nível de líquido em estado estacionário, m. Então, defini-se a resistência R da seguinte forma:

$$R=\frac{dH}{dQ}=\frac{H}{Q} \quad . \tag{4}$$

Para fluxo turbulento, tem-se:

$$Q=K\sqrt{H} \tag{5}$$

onde:

Q = taxa de fluxo de líquido em estado estacionário, m³/s; K = coeficiente, m 2,5/ s ;

H = altura do nível de líquido em estado estacionário, m.

Então,

$$dQ=\frac{K}{2\sqrt{H}}dH \quad . \tag{6}$$

A partir das equações 5 e 6,

$$R=\frac{dH}{dQ}=\frac{2\sqrt{H}}{K}=\frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q}=\frac{2\mathrm{H}}{Q} \tag{7}$$

O valor da resistência R em fluxo turbulento depende da taxa de fluxo e da altura do nível de líquido, porém pode ser considerado constante se as varições na altura do nível e na taxa de fluxo forem pequenas. Neste caso, pode-se linearizar a relação não linear entre Q e H (OGATA, 2003). A relação linearizada é dada por

$$Q=\frac{2\mathrm{H}}{R} \quad . \tag{8}$$

A equação diferencial de um sistema linear ou linearizado pode ser obtida a partir do fluxo de entrada qi e do fluxo de saída q0 da seguinte maneira (OGATA, 2003):

$$C\,dh=(qi-qo)\,dt \quad . \tag{9}$$

Neste caso, qi, q0 e h representam pequenos desvios da vazão de entrada, da vazão de saída e da altura do nível em relação a seus valores em regime estacionário, respectivamente.

2.3 MICROCONTROLADOR

Um microcontrolador consiste num circuito integrado que, através de uma linguagem de programação, executa uma sequência lógica previamente programada. Segundo Souza (2001, p. 3): “Em poucas palavras, poderíamos definir o microcontrolador como um “pequeno” componente eletrônico, dotado de uma “inteligência” programável, utilizado no controle de processos lógicos.” Na figura 1 é mostrado um microcontrolador:

Figura 1: Microcontrolador.

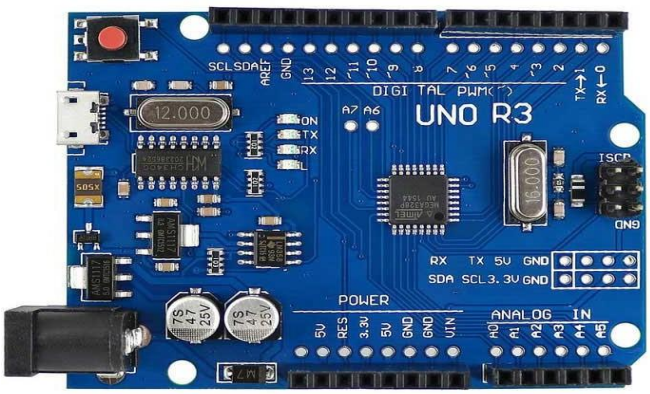


Fonte: Eletrodex.

2.3.1 Arduino

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que se destaca pelo seu baixo custo e programação fácil. Através desta plataforma é possível interagir com leds, sensores, motores e outros objetos eletrônicos. Na figura 2 é mostrada uma placa Arduino Uno, modelo utilizado no presente trabalho, o qual apresenta um microcontrolador Atmega328P, além de 14 entradas e saídas digitais, 6 entradas analógicas, comunicação USB, fonte de alimentação externa e pinos de energia com 3,3V, 5V e Terra (GND). A linguagem de programação utilizada no Arduino é a linguagem C++, com pequenas alterações.

Figura 2: Placa Arduino Uno



Fonte: DealeXtreme.

2.4 BOMBA D'ÁGUA

Bomba d'água, também denominada de bomba hidráulica, é um dispositivo que adiciona energia aos líquidos, a partir de energia mecânica. Segundo Monachesi (2005, p. 63): “Em geral, atribui-se o termo bomba a todo equipamento capaz de transferir energia de determinada fonte para um líquido, de modo que esse líquido possa realizar determinado trabalho.”

No presente trabalho utilizou-se um modelo de bomba empregado na limpeza de para-brisas de carros, como mostrado na figura 3. Este tipo de bomba funciona com uma tensão de 12V com corrente contínua e consome uma corrente de aproximadamente 1A, em regime permanente. Ela tem como vantagem seu baixo custo e a capacidade de ser alimentada com uma tensão menor que a nominal, o que possibilita o controle da velocidade de enchimento do tanque superior através do sinal PWM.

Figura 3: Bomba D'água.

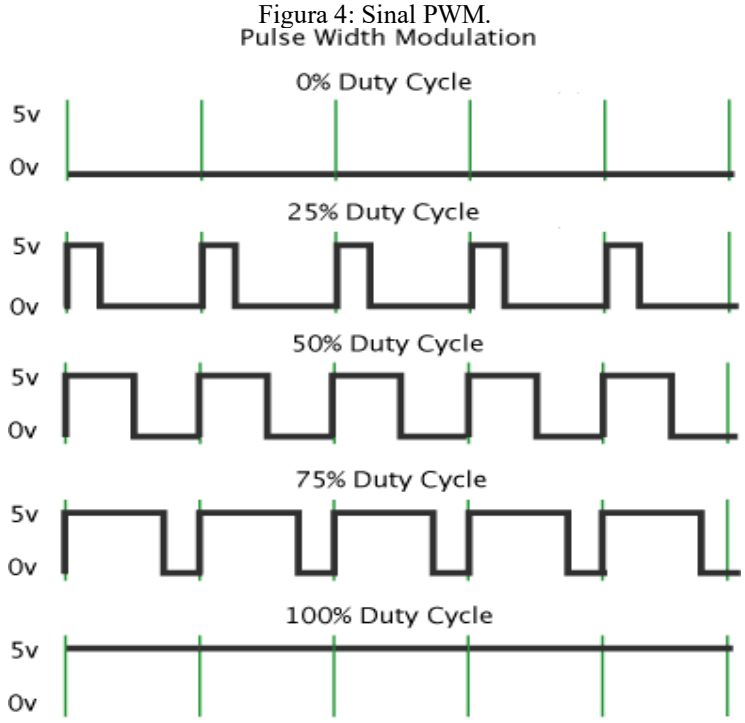


Fonte: Virtual Plásticos

2.4.1 PWM

PWM (Pulse Width Modulation) ou Modulação de Largura de Pulso é uma técnica utilizada em sistemas digitais que permite variar o valor médio de uma forma de onda periódica. Empregada em diversas áreas da eletrônica, pode ser utilizada no controle de luminosidade de leds, controle de velocidade de motores e outras aplicações. A técnica consiste em fixar a frequência de uma onda quadrada e variar o tempo que o sinal fica em nível lógico alto. Este tempo é chamado de duty cycle, ou seja, representa o ciclo ativo da forma de onda. Na figura 4 é mostrado um exemplo de sinal PWM.

Figura 4: Sinal PWM.



Fonte: Blog do Natanael.

2.5 SENSORES

Um sensor é um dispositivo que detecta um estímulo físico/químico e responde em consequência. Sensores são utilizados em diversas áreas como forma de apoio ao monitoramento e ao controle de processos.

2.5.1 Sensor de Nível

Um sensor de nível é um dispositivo utilizado para controlar líquidos em tanques e reservatórios. O nível de líquidos é detectado pelo movimento de flutuadores que geram um sinal magnético.

Visto que o controle de nível de líquidos é imprescindível em processos industriais e no dia a dia, os sensores de nível são utilizados com a finalidade de fazer com que o volume em reservatórios ou tanques permaneçam em um intervalo tolerado, de forma que os processos se realizem de maneira confiável.

Na figura 5 é apresentado um sensor de nível lateral, o qual funciona por magnetismo. Na base flutuante deste sensor existe um ímã, o qual comuta ao alcançar a extremidade do sensor e executa uma tarefa predeterminada.

Figura 5: Sensor de Nível Lateral.



Fonte: Autocore Robótica.

Outros exemplos de sensores de nível são: sensor de pressão, sensor ultrassônico, sensor capacitivo.

2.6 TRANSFORMADA DE LAPLACE

O desenvolvimento de sistemas de controle é facilitado com o uso da transformada de Laplace. Através desta, equações diferenciais podem ser transformadas em equações algébricas. Com este método, realiza-se operações algébricas normais no domínio "s" e depois retorna-se ao domínio "t" através da inversa. A transformada de Laplace de uma função f(t) é definida como (OGATA, 2003):

$$F(s)=L[f(t)]=\int_0^{\infty} f(t)\,e^{-st}\,dt \quad . \tag{10}$$

2.7 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Função de transferência é a razão entre a transformada de Laplace do sinal de saída e a transformada de Laplace do sinal de entrada de um sistema, considerando todas as condições iniciais nulas. Assim,

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)} \quad . \tag{11}$$

onde

G(s) = função de transferência;

Y(s) = transformada de Laplace do sinal de saída do sistema; X(s) = transformada de Laplace do sinal de entrada do sistema.

2.8 AÇÕES DE CONTROLE

Um controlador pode ser entendido como um dispositivo que realiza determinadas operações matemáticas sobre o sinal de erro e(t) com o objetivo de produzir um sinal u(t) a ser aplicado na planta

de forma a satisfazer um determinado objetivo. Tais operações matemáticas são chamadas de ações de controle. Segundo Ogata (2003):

> Um controlador automático compara o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referencia (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle.

A partir das operações matemáticas, pode-se identificar as seguintes ações básicas de controle:

a) ação liga-desliga (on-off);
b) ação proporcional;
c) ação integral;
d) ação derivativa;
e) ação proporcional-integral (PI);
f) ação proporcional-derivativa (PD);
g) ação proporcional-integral-derivativa (PID).

2.8.1 Ação Liga-Desliga (On-Off)

A ação de controle liga-desliga é a ação de controle mais simples e econômica. O controle é feito a partir de um ponto fixo, o setpoint. Neste tipo de controle existe duas posições: ligado e desligado. A saída do controlador altera de posição à medida que o sinal do erro passa pelo setpoint. Pode-se observar esta ação em sistemas de controle doméstico, como o controle de nível de água realizado por boias em caixas d'água ou o controle realizado por termostatos em geladeiras.

2.8.2 Ação Proporcional

Neste tipo de ação, o sinal de saída do controlador u(t) é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro e(t) (OGATA, 2003). Assim,

$$u(t) = K_p e(t) \tag{12}$$

onde Kp representa o ganho proporcional.

Sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad . \tag{13}$$

O erro pode ser diminuído com o aumento do ganho Kp , mas nunca pode ser anulado completamente. Além disso, na maioria dos processos físicos o aumento exagerado do ganho

proporcional pode levar o sistema a instabilidade, visto que o aumento do ganho faz com que o tempo de acomodação[2] aumente e, assim, o comportamento transitório do sistema em malha fechada[3] fique mais oscilatório.

2.8.3 Ação Integral

Neste tipo de ação, o sinal de saída do controlador u(t) é proporcional à integral do valor do sinal de erro e(t) (OGATA, 2003). Assim,

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)\,dt \tag{14}$$

onde KI representa o ganho integral.

Sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad . \tag{15}$$

A ação integral tende a eliminar o erro estacionário, de forma que acontece um reajuste no valor da medição igual ao ponto de ajuste. Por isso, esta ação é chamada, também, de ação reset. A ação integral atua no processo ao longo do tempo enquanto a diferença entre o valor desejado e o valor mensurado persistir. Assim, o sinal de correção age até eliminar por completo o erro.

2.8.4 Ação Derivativa

Neste tipo de ação, o sinal de saída do controlador u(t) é proporcional a derivada do valor do sinal de erro e(t) (OGATA, 2003). Assim,

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{16}$$

onde Kd representa o ganho derivativo.

Sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad . \tag{17}$$

A ação derivativa é dita antecipatória, pois faz com que o sistema reaja mais rapidamente e antecipe o erro. Esta ação atua apenas durante a resposta transitória.

[2] Tempo para a resposta do sistema situar-se na faixa entre 2% ou 5% do valor final.
[3] Sistema em malha fechada é aquele em que a saída ou resposta influencia a entrada do sistema.

2.8.5 Ação Proporcional-Integral (PI)

A ação de controle proporcional-integral é dada por (OGATA, 2003):

$$u(t)=k_p e(t)+K_i\int_0^t e(t)\,dt \tag{18}$$

Sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)}=k_p+\frac{K_i}{s} \quad . \tag{19}$$

A ação integral tende a eliminar o erro estacionário, entretanto se aplicada isoladamente tende a piorar a estabilidade relativa do sistema, pois acrescenta pólos a este tendendo a desestabilizá-lo. Para amenizar esta situação, a ação integral é geralmente utilizada em conjunto com a ação proporcional, de forma a constituir o controlador PI.

2.8.6 Ação Proporcional-Derivativa (PD)

A ação de controle proporcional-derivativa é dada por (OGATA, 2003):

$$u(t)=k_p e(t)+K_d\frac{de(t)}{dt} \quad . \tag{20}$$

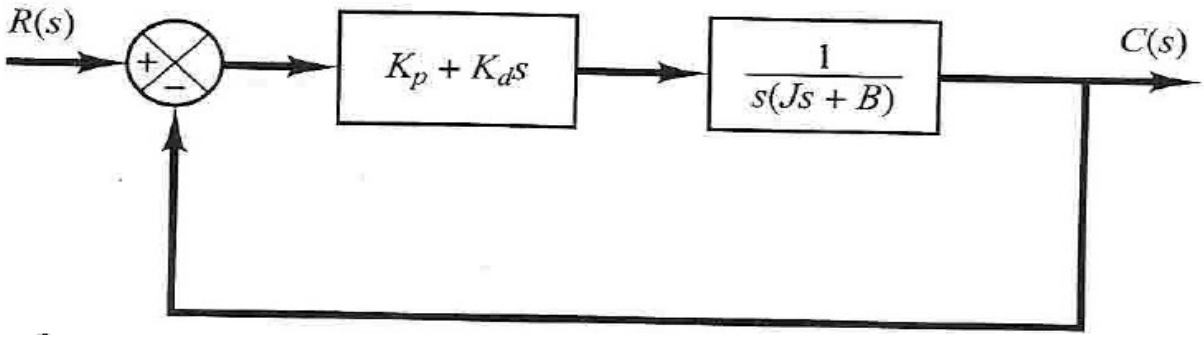
Sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)}=k_p+K_d s \quad . \tag{21}$$

A ação derivativa antecipa a ação de controle, entretanto atua apenas durante a resposta transitória. Sendo assim, a ação derivativa frequentemente é combinada com a ação proporcional a fim de que o processo reaja mais rápido. Esta combinação aumenta a estabilidade relativa do sistema e tende a tornar a resposta transitória do mesmo mais rápida.

Na figura 6 é apresentado o diagrama de blocos de um controlador PD.

Figura 6: Diagrama de blocos de um controlador PD.



Fonte: Ogata.

2.8.7 Ação Proporcional-Integral-Derivativa (PID)

A ação de controle proporcional-integral-derivativa é dada por (OGATA, 2003):

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)\,dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad . \tag{22}$$

Sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad . \tag{23}$$

O controlador PID combina as vantagens dos controladores PI e PD. A precisão do sistema está ligada a ação integral, que tende a eliminar o erro estacionário. Já a ação derivativa contribui com o aumento da estabilidade relativa do sistema e a antecipação da resposta do mesmo.

3 METODOLOGIA

Buscou-se desenvolver um sistema microcontrolado através da plataforma Arduino de forma a reproduzir um sistema de controle de nível em escala laboratorial. Realizou-se, também, uma simulação do processo através do software Matlab e, para isto, utilizou-se um controlador PID.

A metodologia utilizada neste projeto envolveu as seguintes etapas:

a) Levantamento de materiais que asseguram uma boa qualidade ao projeto com baixo custo;
b) Análise do projeto, com a previsão de possíveis dificuldades e erros de implementação;
c) Implementação do projeto.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 Bomba D'água

No presente projeto utilizou-se uma bomba injetora de água empregada na limpeza de para-brisas de carros. Tal bomba opera a 12V e para seu acionamento utilizou-se uma fonte externa de corrente contínua. Na figura 7 é mostrada a bomba empregada.

Figura 7: Bomba D'água.



Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Sensor de Nível Lateral

Utilizou-se 2 sensores de nível com flutuadores e contatos normalmente abertos (NA) e normalmente fechados (NF). Cada sensor foi fixado em uma extremidade do tanque, de forma a marcar os níveis mínimo e máximo de líquido. Um dos sensores aparece na figura 8.

Figura 8: Sensor de Nível Lateral.

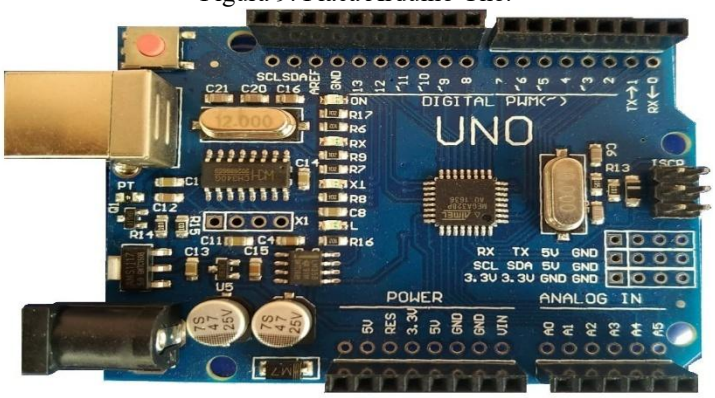


Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Microcontrolador Arduino

Apesar de relativamente novo, o microcontrolador Arduino ganha cada vez mais o mercado. No presente trabalho utilizou-se o modelo Arduino Uno devido às suas dimensões reduzidas, conector USB para conexão com um microcomputador, programação simples e baixo custo. Na figura 9 é apresentada a placa empregada no trabalho.

Figura 9: Placa Arduino Uno.



Fonte: Próprio autor.

3.1.4 Resistor

Resistores são usados com a finalidade de limitar a corrente em determinadas partes do circuito, de forma a evitar a queima de outros componentes como leds. No presente projeto utilizou-se resistores de 220 K Ω e 10 K Ω , como mostrado na figura 10.

Figura 10: Resistores.

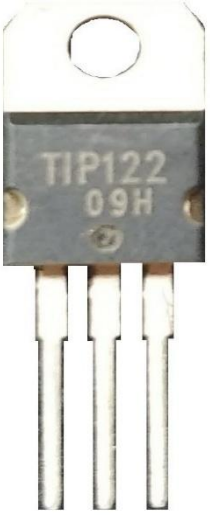


Fonte: Próprio autor.

3.1.5 Transistor

O transistor é um componente eletrônico utilizado, principalmente, como amplificador e interruptor de sinais elétricos. No presente trabalho, para o acionamento da bomba d'água, utilizou-se um transistor do tipo Darlington modelo TIP 122. O TIP 122 é um transistor de potência e alto ganho, sendo formado internamente por dois transistores, o que gera um ganho de corrente. O transistor TIP 122 suporta a passagem de uma corrente elétrica de 5A, superior à necessária para o funcionamento da bomba. Na figura 11 é apresentado o modelo empregado.

Figura 11: Transistor TIP 122.



Fonte: Próprio autor.

3.1.6 Fonte de Alimentação

Usou-se no projeto uma fonte estabilizada do tipo colmeia com tensão de saída de 12V e corrente máxima de 5A, como mostrado na figura 12.

Figura 12: Fonte Estabilizada 12V 5A.



Fonte: Próprio autor.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO

3.2.1 Sistema de Tanques

Para a montagem do sistema foram utilizados dois tanques, como mostrado na figura 13. O tanque superior é controlado e possui as seguintes dimensões: diâmetro (D) = 18 cm e altura (H) = 22 cm. O tanque inferior funciona apenas como reservatório.

Figura 13: Sistema de Tanques.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Função de Transferência do Tanque

Para a obtenção da função de transferência do tanque foi feito, inicialmente, um gráfico relacionando a altura do nível de líquido e a vazão de saída do tanque. Para isto, alguns dados foram coletados. Tais dados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Relação entre altura de nível de líquido e vazão.

Altura de Nível (%)	Tempo (s)	Vazão (cm^3/s)
0	0	0
10	26,63	7,51
20	22,18	9,02
30	15,16	13,19
40	12,84	15,58
50	11,46	17,45
60	9,90	20,20
70	9,23	21,67
80	9,19	21,76
90	9,06	22,08
100	8,56	23,36
Fonte: Próprio autor.		

Mantendo-se a válvula de saída de água aberta, variou-se a altura do nível de líquido do tanque e para cada altura foi medido o tempo gasto para completar 200 cm^3 em um recipiente graduado. Obteve-se, assim, a vazão de saída para cada altura do nível de líquido. Na figura 14 é apresentado o gráfico que relaciona a altura do nível (H) e a vazão de saída (Q^0).

Figura 14: Curva que relaciona a altura de nível de líquido e a vazão de saída do tanque.



Fonte: Próprio autor.

Para o modelamento matemático, considerou-se o tanque com 50% do seu volume total, situação na qual sua altura de nível é de 11 cm e sua vazão é de 17,45 cm³, como visto na figura 14. Assim, a resistência R foi calculada de acordo a equação 7 :

$$R = \frac{2 * 11 \text{ cm}}{17{,}45 \text{ cm}^3/\text{s}} = 1{,}26 \text{ s/cm}^2 \quad . \tag{24}$$

A capacitância C de um tanque, definida como a variação na quantidade de líquido armazenado necessário para causar uma mudança unitária na altura do nível de líquido, representa, basicamente, a área da seção transversal do tanque. Como o tanque utilizado no trabalho apresenta uma forma cilíndrica, a capacitância C é dada por:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta H} = \pi \frac{d^2}{4} \quad , \tag{25}$$

onde:

V = volume, m³;

H = altura, m;

d = diâmetro, m.

Assim, substituindo o valor do diâmetro, tem-se:

$$C = \frac{\pi * 0{,}18^2}{4} = 0{,}0254\ \text{m}^2 = 254\ \text{cm}^2 \quad . \tag{26}$$

Com a admissão de pequenos desvios na vazão de entrada, na vazão de saída e na altura do nível em relação a seus valores em regime estacionário, considerou-se o sistema como linear, o que permitiu a utilização da equação 9. A partir da definição de resistência, a relação entre qo e h é dada por:

$$q_0 = \frac{h}{R} \quad . \quad . \tag{27}$$

Com a substituição da equação 27 na equação 9, obtém-se:

$$C\,dh = \left(qi - \frac{h}{R}\right) dt \quad . \tag{28}$$

Para um valor constante de R, tem-se a seguinte equação diferencial para o sistema:

$$RC\frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad , \tag{29}$$

onde RC é a constante do sistema. Com a aplicação da transformada de Laplace na equação anterior, obtém-se:

$$(RCs+1)\,H(s) = RQ_i(s) \quad , \tag{30}$$

onde H (s)= L[h] e Qi (s)=L[qi] . Considerando qi a entrada e h a saída, a função de transferência do sistema é:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} \quad \frac{R}{RCs+1} \tag{31}$$

Com a substituição dos valores da resistência R e da capacitância C, encontra-se a função de transferência do tanque:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} \quad \frac{1{,}26}{320{,}04\,s+1} \tag{32}$$

3.2.3 Função de Transferência da Bomba

Para a obtenção da função de transferência da bomba utilizou-se o sinal PWM na placa Arduino UNO. Variou-se o ciclo ativo da forma de onda de 0 a 100%, de forma a obter uma tensão média de saída na bomba que variasse de 0V até 12V, valor máximo no qual a saída permanece sempre

em nível alto. No Arduino Uno o valor 0 faz com que a saída permaneça sempre em nível baixo, caso em que a tensão é nula e o valor 255 faz com que saída permaneça sempre em nível alto, caso em que a tensão é máxima. Para o cálculo do valor médio da tensão de saída do sinal PWM utilizou-se a seguinte equação:

$$V_{out} = \left(\frac{\text{duty cycle}}{100}\right) * Vcc \quad (33)$$

onde:

Vout = tensão de saída, V;

duty cycle = valor do ciclo ativo do PWM, %; Vcc = tensão de alimentação, V.

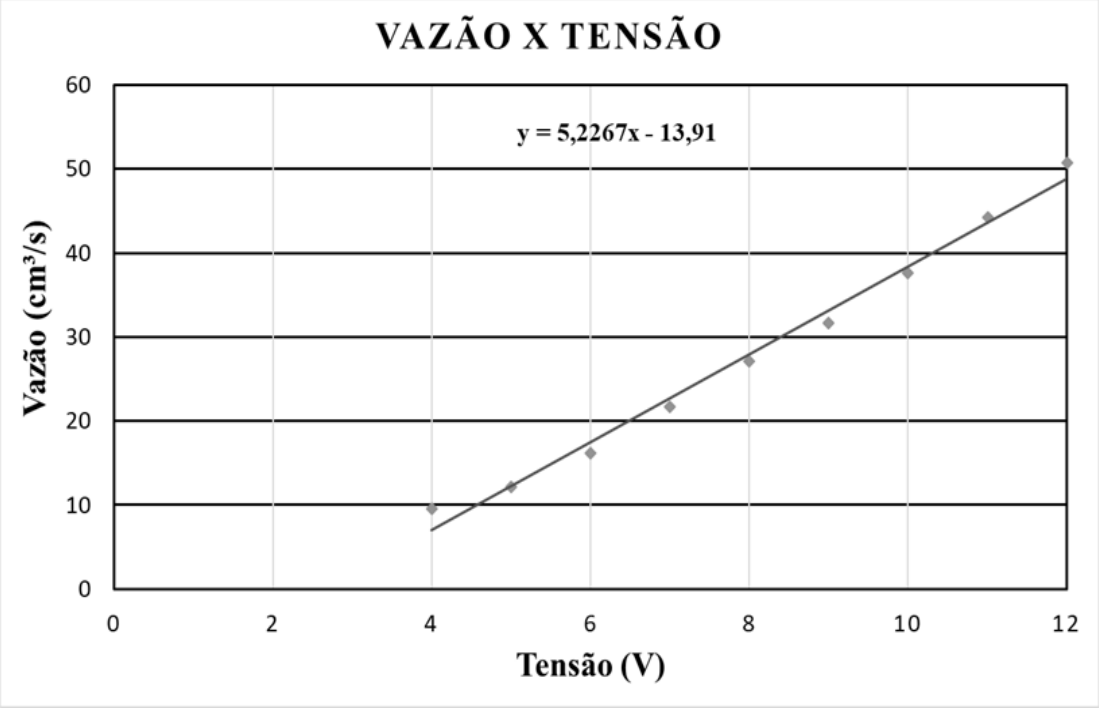
Para cada valor de tensão de saída aplicada na bomba mediu-se o tempo gasto para completar 200 cm³ em um recipiente graduado e, assim, obteve-se a vazão de saída para cada valor de tensão. Os dados obtidos estão presentes na tabela 2.

Tabela 2: Relação entre tensão na bomba e vazão.

Duty Cycle (%)	Tensão (V)	Tempo (s)	Vazão (cm³/s)
0	0	-	-
8,33	1	-	-
16,67	2	-	-
25	3	-	-
33,33	4	20,84	9,60
41,67	5	16,39	12,20
50	6	12,36	16,18
58,33	7	9,21	21,72
66,67	8	7,37	27,14
75	9	6,31	31,70
83,33	10	5,32	37,59
91,67	11	4,52	44,25
100	12	3,94	50,76
Fonte: Próprio autor.			

Na figura 15 é apresentado o gráfico que relaciona a tensão aplicada na bomba (V) e a vazão de saída (Q0).

Figura 15: Curva que relaciona a tensão na bomba e a vazão.



Fonte: Próprio autor.

A partir da linha de tendência da curva anterior, obtém-se a seguinte relação:

$$Q = 5{,}23\,V - 13{,}91 \quad . \tag{34}$$

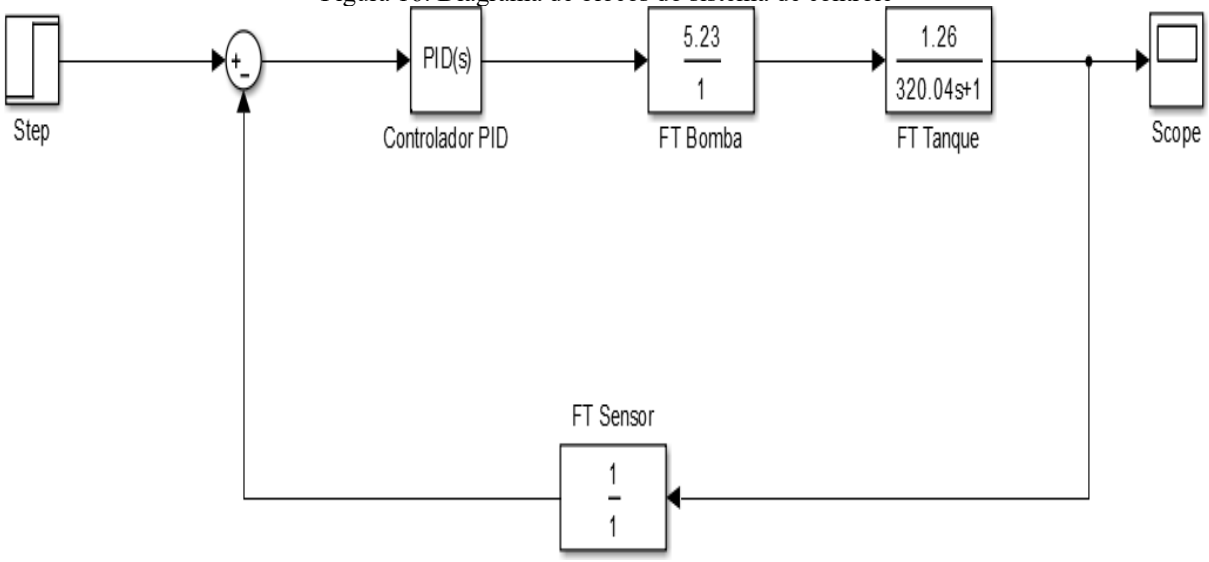
Como visto na seção 2.7, para encontrar a função de transferência de uma equação deve-se considerar todas as condições iniciais nulas. Assim, para a obtenção da função de transferência da equação 34 despreza-se o termo constante. Finalmente, com a aplicação a transformada de Laplace, encontra-se a função de transferência da bomba:

$$\frac{Q(s)}{V(s)} = 5{,}23 \quad . \tag{35}$$

3.2.4 Simulação no Matlab

A partir da obtenção das funções de transferência do tanque e da bomba, realizou- se a simulação no software Matlab. Esta simulação teve como objetivo verificar o comportamento de um sistema controlado. Para isto, fez-se o uso da ferramenta Simulink. O diagrama de blocos desenvolvido é apresentado na figura 16. Considerou-se como entrada a função degrau unitário e desprezou-se qualquer efeito do sensor na resposta do sistema de controle.

Figura 16: Diagrama de blocos do sistema de controle



Fonte: Próprio autor.

3.3 SISTEMA FÍSICO

3.3.1 Sistema de Tanques

Como visto na seção 3.2.1, para a montagem do sistema utilizou-se dois tanques. O tanque inferior funciona apenas como reservatório e no tanque superior instalou-se dois sensores de nível e uma torneira, a qual ficou fixada na parte inferior do recipiente. Um dos sensores foi instalado na parte superior do tanque e o outro foi instalado na parte inferior, de forma a marcar o nível do tanque controlado como cheio ou vazio, respectivamente.

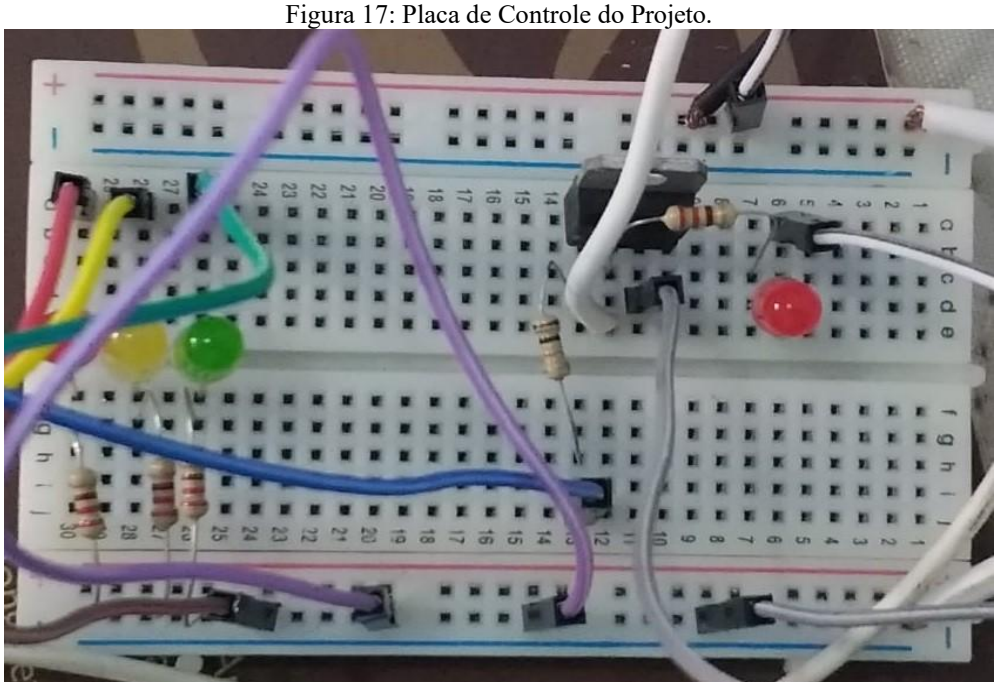
3.3.2 Controle Liga-Desliga da Bomba D'água

Devido às limitações dos componentes utilizados no projeto, a ação de controle utilizada na demonstração prática foi a ação liga-desliga (on-off). Com este controle, o acionamento da bomba d'água é realizado quando o nível do tanque superior está vazio e o seu desligamento acontece quando o nível está cheio. Para o acionamento da bomba foi utilizado um transistor TIP 122, que funciona como uma chave para a passagem de corrente entre a fonte e a bomba d'água. Na base do transistor foi conectado um resistor de 10 K Ω em uma extremidade e na outra foi conectada a porta digital 9 da placa Arduino. Para uma sinalização do funcionamento da bomba d'água, utilizou-se um led.

3.3.3 Protoboard

Uma protoboard é uma placa com orifícios e conexões condutoras utilizada na montagem de circuitos elétricos. Utilizou-se no presente projeto um modelo de protoboard simples e de baixo custo. A placa de controle do trabalho é apresentada na figura 17.

Figura 17: Placa de Controle do Projeto.



Fonte: Próprio autor.

3.3.4 Programação

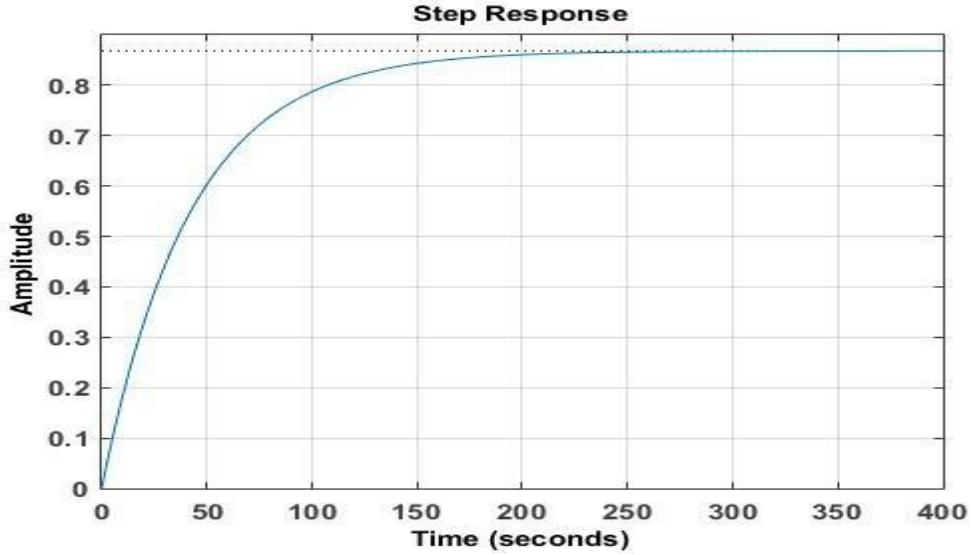
A programação do projeto foi feita no ambiente de desenvolvimento integrado do próprio microcontrolador, o Arduino. De acordo o código de programação, a bomba d'água é acionada no momento em que o nível de líquido é baixo e é desligada quando o nível de líquido é alto. A leitura de nível baixo ou alto é feita pelos sensores de nível, instalados nas partes superior e inferior do tanque controlado. O apêndice A apresenta o código de programação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na simulação no Matlab, de forma a demonstrar as características das ações básicas de controle, considerou-se o comportamento do sistema na ausência de controle e com os seguintes controles: proporcional (P), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID).

Na figura 18 é mostrado o comportamento do sistema na ausência de controle. Neste caso, observa-se um grande erro estacionário e um longo tempo de resposta do sistema, que demora a se estabilizar.

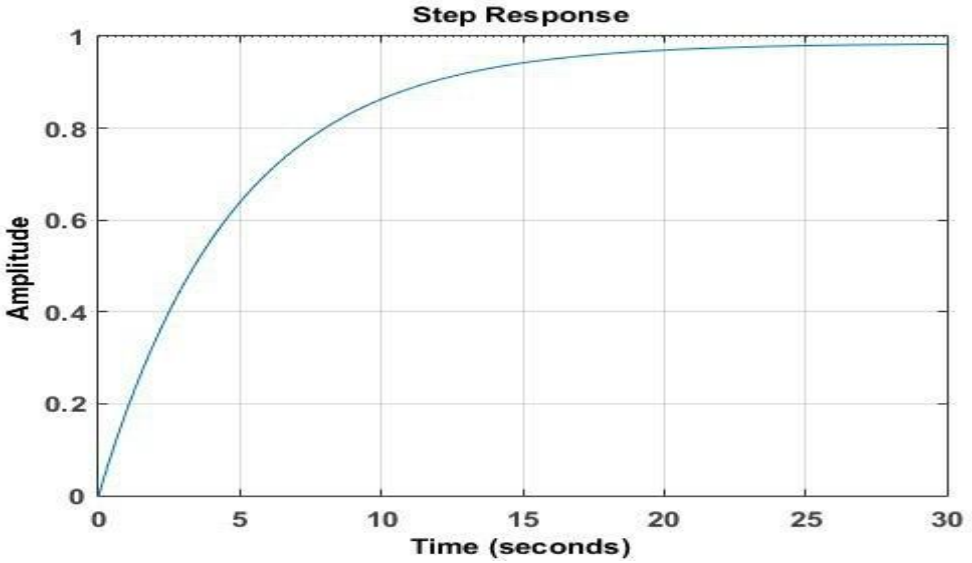
Figura 18: Comportamento do sistema na ausência de controle.



Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de diminuir o tempo de resposta do sistema, adotou-se o controle proporcional. Este controle faz com que o sistema se estabilize mais rapidamente, entretanto ainda gera um erro estacionário considerável, como pode ser visto na figura 19.

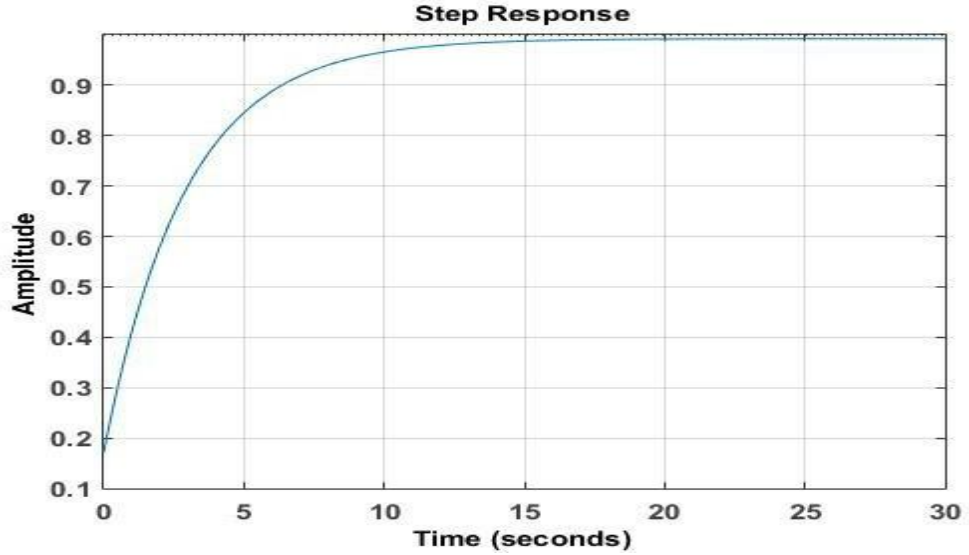
Figura 19: Comportamento do sistema com controle P, com Kp=10.



Fonte: Próprio autor.

Como visto na seção 2.8, o aumento exagerado do ganho proporcional de forma isolada pode levar o sistema a instabilidade, mas a combinação com o controle derivativo permite um aumento do ganho K_p. Assim, o controle PD faz com que a resposta do sistema seja ainda mais rápida. Além disso, esta combinação aumenta a estabilidade relativa do sistema, como representado na figura 20.

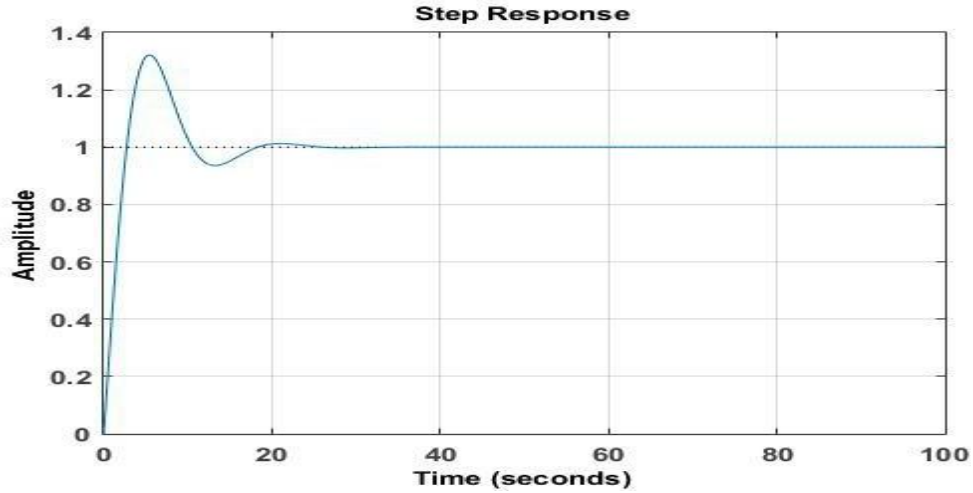
Figura 20: Comportamento do sistema com controle PD, com Kp=20 e Kd=10.



Fonte: Próprio autor.

O controle PI, ilustrado na figura 21, tende a eliminar o erro estacionário, porém também tende a piorar a estabilidade relativa do sistema.

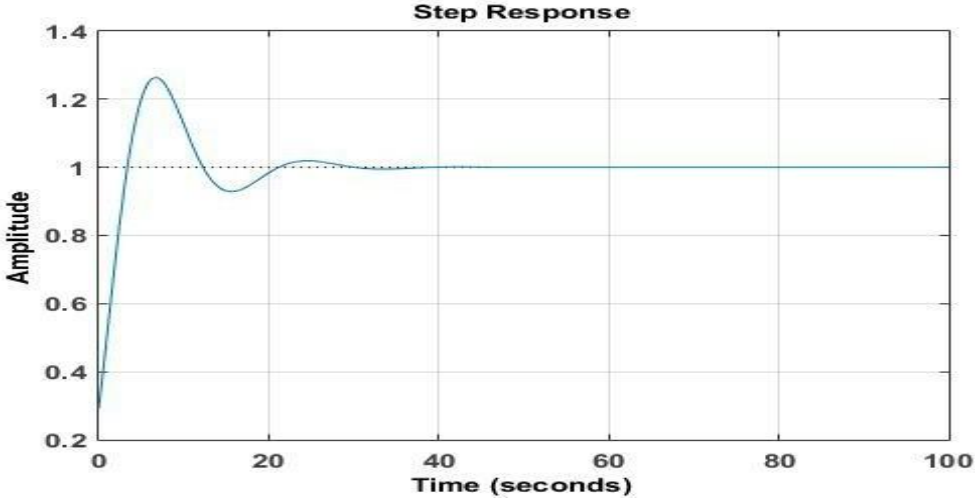
Figura 21: Comportamento do sistema com controle PI, com Kp=20 e Ki=10.



Fonte: Próprio autor.

Finalmente, o controle PID combina as vantagens dos controles anteriores, de forma que o erro estacionário é eliminado, a resposta do sistema é antecipada e a instabilidade relativa, apesar de ainda existir, é menor que a do sistema com controle PI. Na figura 22 é mostrado o comportamento do sistema com controle PID.

Figura 22: Comportamento do sistema com controle PID, com Kp=20, Kd=20 e Ki=10.



Fonte: Próprio autor.

Através da simulação no Matlab, situação na qual foi comparado o comportamento de um sistema sujeito a diferentes ações básicas de controle, observou-se que o controle PID gera o melhor resultado, com uma maior precisão, apesar do controle PI apresentar uma resposta bem próxima. Com a escolha de valores aleatórios de Kp, KI e Kd foi possível perceber as diferentes características de sistemas com controladores proporcional, proporcional-derivativo, proporcional-integral e proporcional-integral-derivativo.

Observou-se que o controle P diminui o tempo de resposta do sistema, mas ainda gera um erro estacionário. O acréscimo do controle derivativo permite uma melhora na estabilidade relativa do sistema e faz com que o tempo de resposta seja ainda menor. A combinação dos ganhos proporcional e integral aumenta a instabilidade do sistema, porém elimina o erro estacionário. O controle PID, gerado pela combinação dos ganhos proporcional, integral e derivativo, minimiza a oscilação, elimina o erro e antecipa a resposta do sistema. Devido a suas características, o controle PID é o mais usado na indústria e vem sendo utilizado em todo o mundo em sistemas de controle industrial.

Com o sistema físico pôde-se observar a importância do Arduino na execução de projetos de baixo custo e na simulação de processos industriais em escala laboratorial. Através da ação liga-desliga, controlou-se um sistema de nível de tanque, de forma a evitar que o tanque transbordasse em caso de nível alto e que a bomba funcionasse a seco em caso de nível baixo. Na figura 23 é apresentado o sistema de controle de nível do presente trabalho.

Figura 23: Sistema de Controle de Nível



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que o microcontrolador Arduino pode executar processos industriais simples com baixo custo, sendo uma alternativa economicamente viável e com resultados satisfatórios para diversos projetos.

Durante o desenvolvimento da planta de controle de nível de líquido foram encontradas dificuldades no acionamento da bomba d'água. A resolução para esse problema foi a utilização de um transistor, o qual suporta a passagem de uma corrente elétrica superior à necessária para o funcionamento da bomba.

Devido às características dos componentes da planta de controle, não foi possível implementar um controle PID no sistema físico. A programação permitiu a execução do controle liga-desliga, no qual o acionamento da bomba d'água ocorre quando o nível de líquido atinge o seu valor mínimo e o desligamento ocorre quando o nível atinge o seu valor máximo.

Com a simulação no Matlab foi possível observar as particularidades das principais ações de controle e comparar os seus resultados. Com a simulação foi possível verificar a eficiência do controlador PID, o qual apresenta os melhores resultados e, por isso, é tão utilizado atualmente em sistemas de controle industrial.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. L. L. Instrumentação, Controle e Automação de Processos. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MONACHESI, M. G. Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 4ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

REIS, L. S.; BAPTISTA, R.O. Controle e monitoramento de tanques via Arduino. Monografia (Engenharia de Controle e Automação). Barra Mansa: Centro Universitário de Barra Mansa, 2015.

SOUZA, D. J. Desbravando o PIC. 4ªed. São Paulo: Érica, 2001.

TORRES, M. M. Sistema de controle de nível de líquido de tanque utilizando bomba centrífuga de rotação variável. Monografia (Engenharia Mecânica). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

BLOG DO NATANAEL. Entendendo o sinal PWM. Disponível em: <http://www.blogdonatanael.com/2016/06/entendendo-o-sinal-pwm.html>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE AUTOCORE ROBÓTICA. Sensor de nível de água com boia horizontal 220V. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/sensor-de-nivel-de-agua-com-boia- horizontal-220v>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE EMBARCADOS. Usando as saídas PWM do Arduino. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/pwm-do-arduino/>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE CITISYSTEMS. O Controle PID de Forma Simples e Descomplicada. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE DEALEXTREME. Placa de desenvolvimento para Arduino UNO. Disponível em: <http://www.dx.com/pt/p/micro-usb-socket-atmega328p-development-board-for-arduino-uno- r3-blue-black-370842#.W2yb7biDPIU>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE ELETRODEX. Microcontrolador PIC18F4550-I/P. Disponível em: <http://www.eletrodex.com.br/microcontrolador-pic18f4550-i-p.html>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE MUNDO DA ELÉTRICA. Automação de reservatórios com Arduíno e sensores de nível. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/automacao-de-reservatorios- com-arduino-e-sensores-de-nivel/>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE MUNDO DA ELÉTRICA. Controle de nível de reservatório. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/controle-de-nivel-de-reservatorio/>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.

SITE VIRTUAL PLÁSTICOS. Moto bomba do lavador de para-brisa 12V. Disponível em: <http://www.vp.ind.br/detalhes.asp?prod_id=527>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.