

## 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<sup>1</sup> (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,

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

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

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

Para fluxo laminar, tem-se:

$$Q = KH \quad (3)$$

onde:

$Q$  = taxa de fluxo de líquido em estado estacionário,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $K$  = coeficiente,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

---

<sup>1</sup> 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:

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (4)$$

Para fluxo turbulento, tem-se:

$$Q = K \sqrt{H} \quad (5)$$

onde:

Q = taxa de fluxo de líquido em estado estacionário, m<sup>3</sup>/s; K = coeficiente, m<sup>2,5</sup>/s ;

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

Então,

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \quad (6)$$

A partir das equações 5 e 6,

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q} \quad (7)$$

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 variações 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

$$Q = \frac{2H}{R} \quad (8)$$

A equação diferencial de um sistema linear ou linearizado pode ser obtida a partir do fluxo de entrada q<sub>i</sub> e do fluxo de saída q<sub>o</sub> da seguinte maneira (OGATA, 2003):

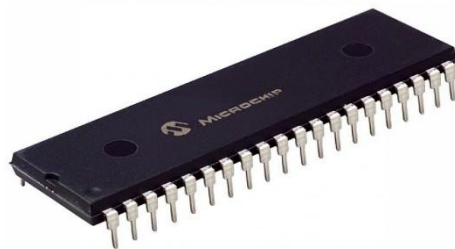
$$C dh = (q_i - q_o) dt \quad (9)$$

Neste caso, q<sub>i</sub>, q<sub>o</sub> 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.

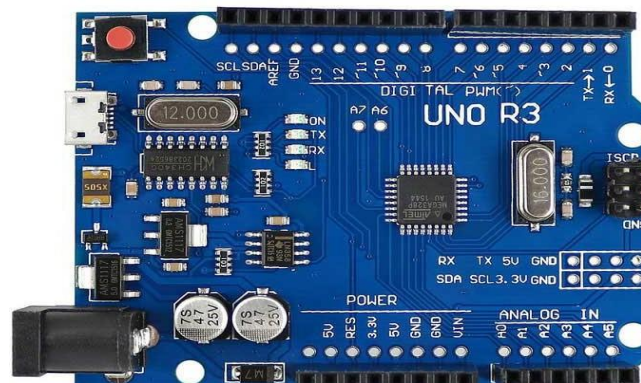


Fonte: Eletrodex.

### 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.

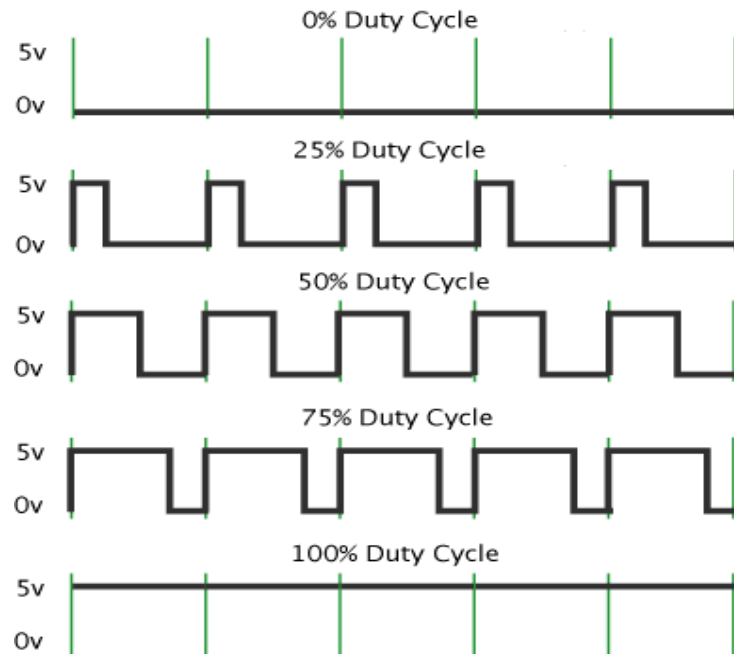


Fonte: Virtual Plásticos

### 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.  
Pulse Width Modulation



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 determinada.



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):

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

## 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,

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

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,

$$u(t) = K_p e(t) \quad (12)$$

onde  $K_p$  representa o ganho proporcional.

Sua função de transferência é dada por:

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

O erro pode ser diminuído com o aumento do ganho  $K_p$ , 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<sup>2</sup> aumente e, assim, o comportamento transitório do sistema em malha fechada<sup>3</sup> 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,

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (14)$$

onde  $K_i$  representa o ganho integral.

Sua função de transferência é dada por:

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

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,

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

onde  $K_d$  representa o ganho derivativo.

Sua função de transferência é dada por:

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

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.

---

<sup>2</sup> Tempo para a resposta do sistema situar-se na faixa entre 2% ou 5% do valor final.

<sup>3</sup> 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):

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (18)$$

Sua função de transferência é dada por:

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

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):

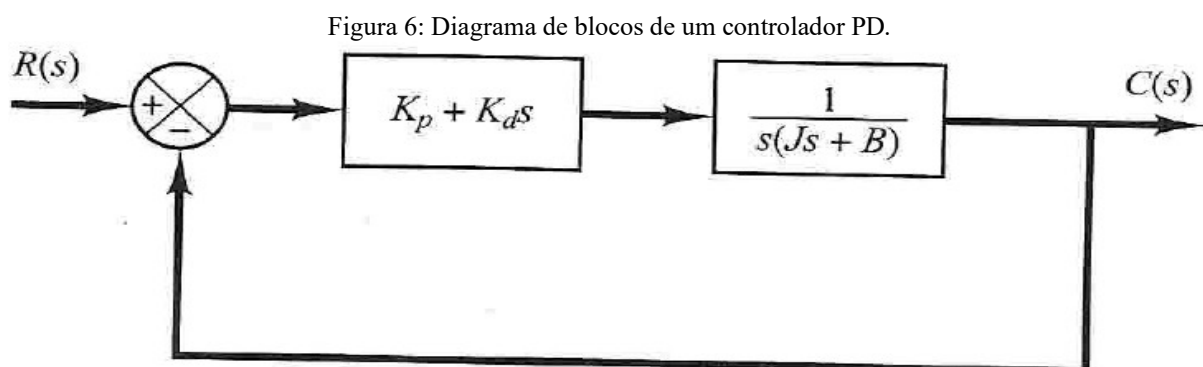
$$u(t) = k_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

Sua função de transferência é dada por:

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

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.



Fonte: Ogata.



### 2.8.7 Ação Proporcional-Integral-Derivativa (PID)

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

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

Sua função de transferência é dada por:

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

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:

- Levantamento de materiais que asseguram uma boa qualidade ao projeto com baixo custo;
- Análise do projeto, com a previsão de possíveis dificuldades e erros de implementação;
- 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  $220\text{ K } \Omega$  e  $10\text{ K } \Omega$ , como mostrado na figura 10.

Figura 10: Resistores.

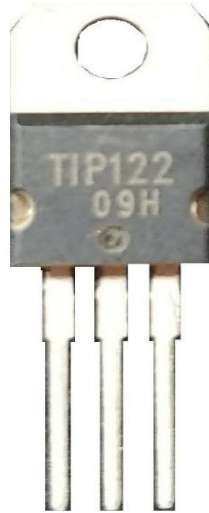


Fonte: Próprio autor.

### 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  $5\text{A}$ , 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.

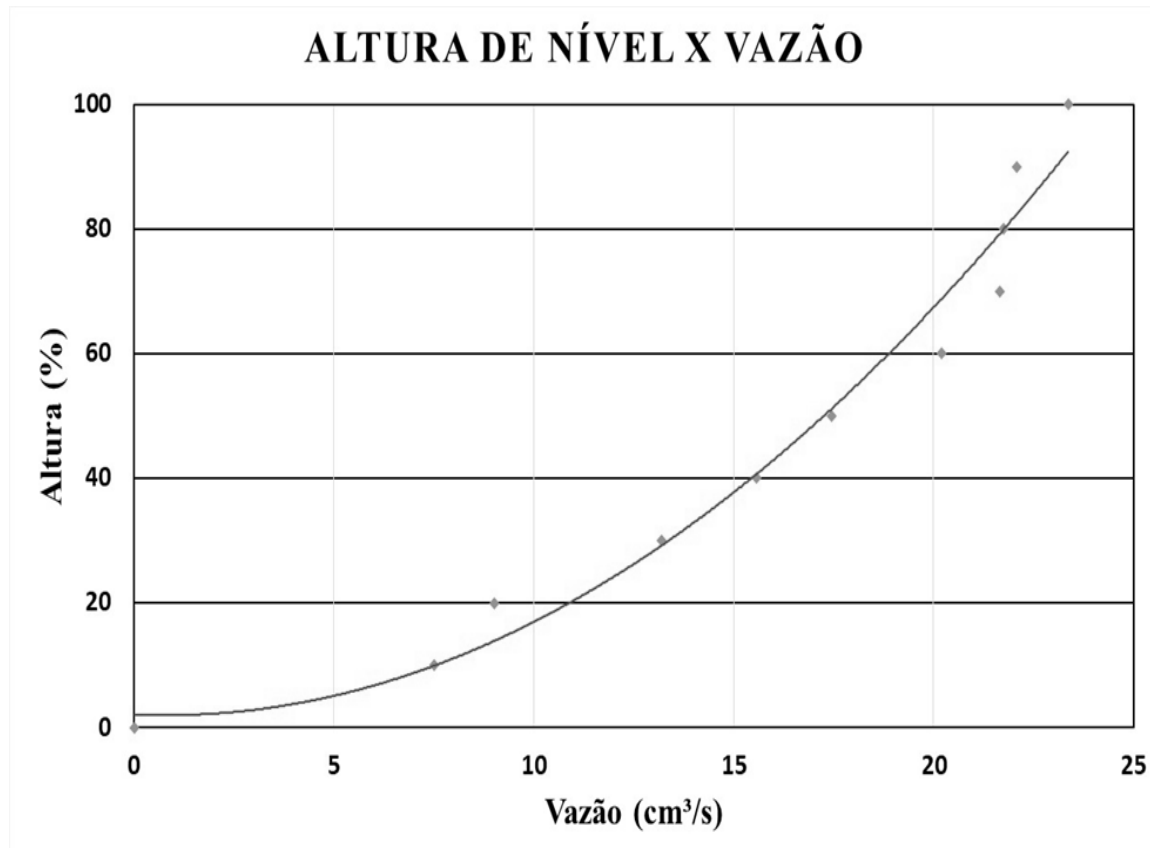
Altura de Nível (%)	Tempo (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
0	0	0
10	26,63	7,51
20	22,18	9,02
30	15,16	13,19
40	12,84	15,58
50	11,46	17,45
60	9,90	20,20
70	9,23	21,67
80	9,19	21,76
90	9,06	22,08
100	8,56	23,36

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<sup>3</sup> 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<sup>0</sup>).



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 :

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

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:

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

onde:

V = volume, m³;

H = altura, m;

d = diâmetro, m.

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



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

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  $q_o$  e  $h$  é dada por:

$$q_o = \frac{h}{R} \quad . \quad (27)$$

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

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

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

$$RC \frac{dh}{dt} + h = R q_i \quad , \quad (29)$$

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

$$(RCs + 1) H(s) = R Q_i(s) \quad , \quad (30)$$

onde  $H(s) = \mathcal{L}[h]$  e  $Q_i(s) = \mathcal{L}[q_i]$ . Considerando  $q_i$  a entrada e  $h$  a saída, a função de transferência do sistema é:

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

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

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

### 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:

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

onde:

$V_{out}$  = tensão de saída, V;

duty cycle = valor do ciclo ativo do PWM, %;  $V_{cc}$  = tensão de alimentação, V.

Para cada valor de tensão de saída aplicada na bomba mediu-se o tempo gasto para completar 200 cm<sup>3</sup> 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.

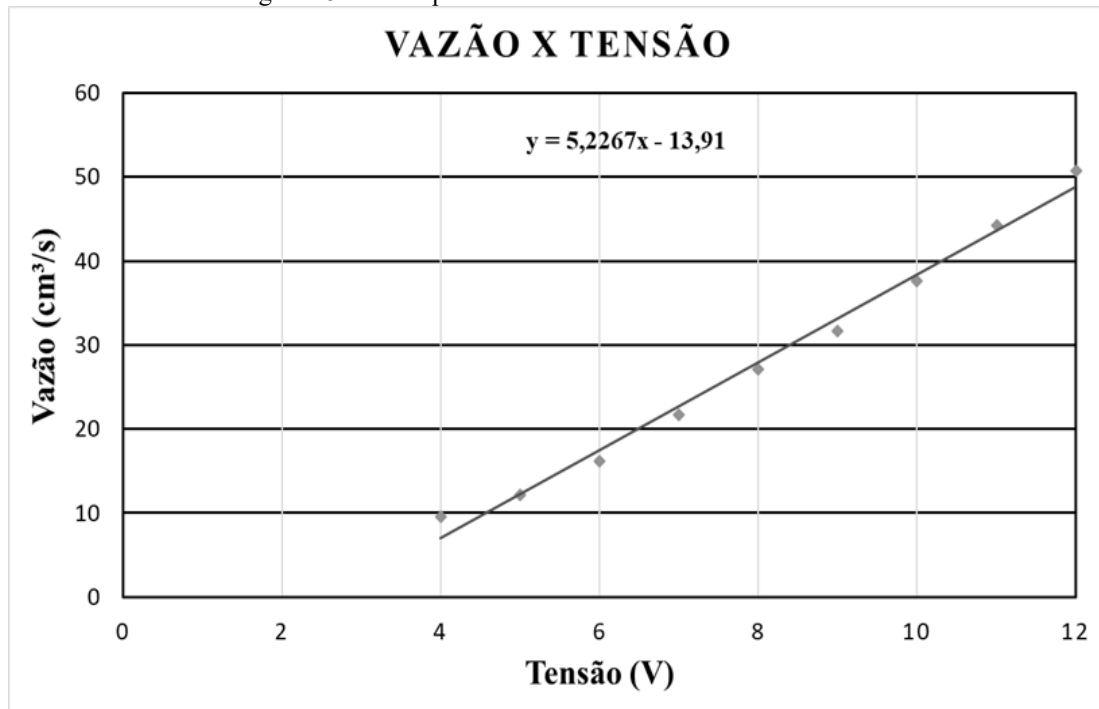
Duty Cycle (%)	Tensão (V)	Tempo (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
0	0	-	-
8,33	1	-	-
16,67	2	-	-
25	3	-	-
33,33	4	20,84	9,60
41,67	5	16,39	12,20
50	6	12,36	16,18
58,33	7	9,21	21,72
66,67	8	7,37	27,14
75	9	6,31	31,70
83,33	10	5,32	37,59
91,67	11	4,52	44,25
100	12	3,94	50,76

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:

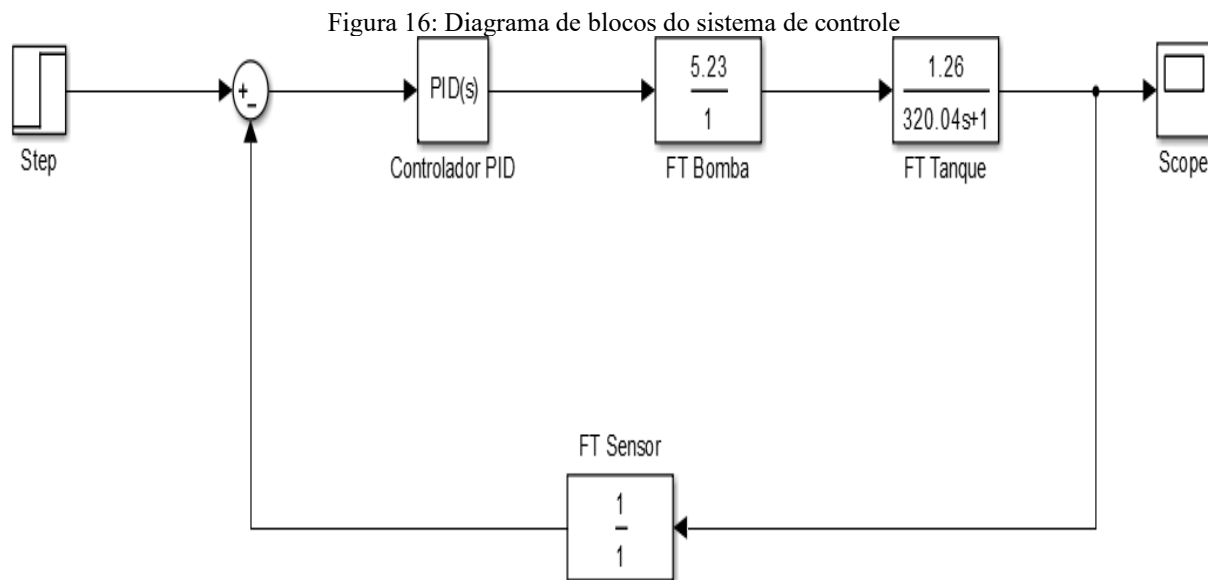
$$Q = 5,23 V - 13,91 \quad . \quad (34)$$

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:

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

### 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.



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  $\Omega$  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

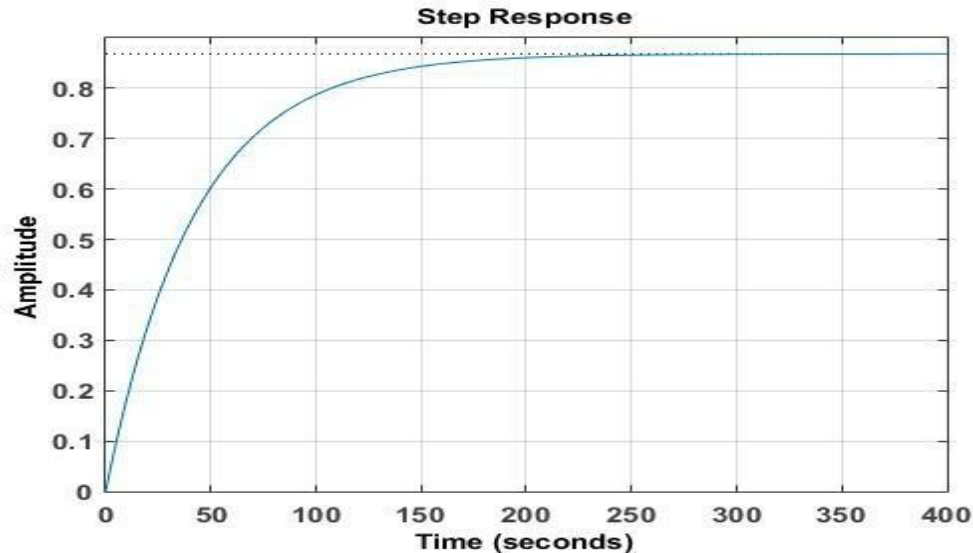
Na simulação no Matlab, de forma a demonstrar as características das ações básicas de controle, considerou-se o comportamento do sistema na ausência de controle e com os seguintes controles: proporcional (P), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo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





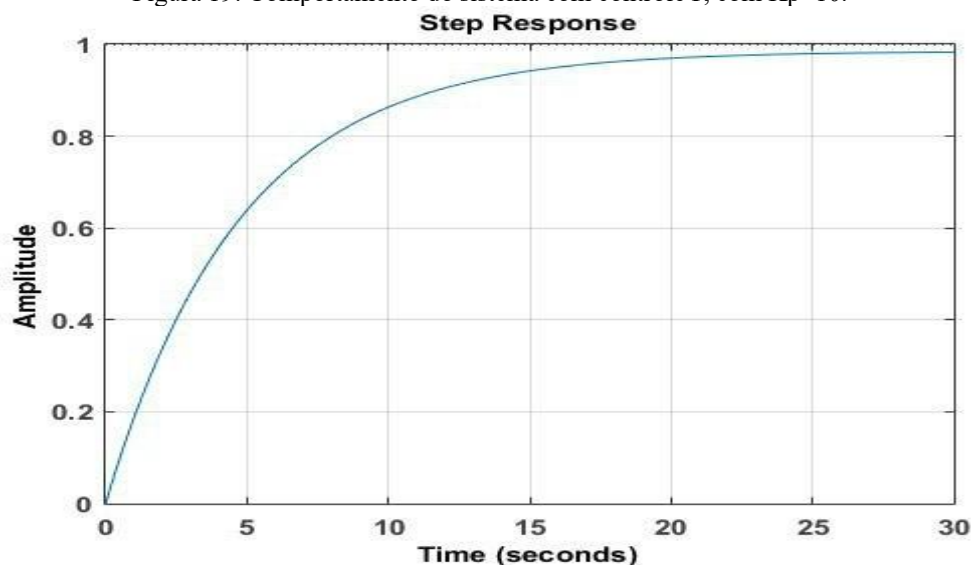
Figura 18: Comportamento do sistema na ausência de controle.



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  $K_p=10$ .

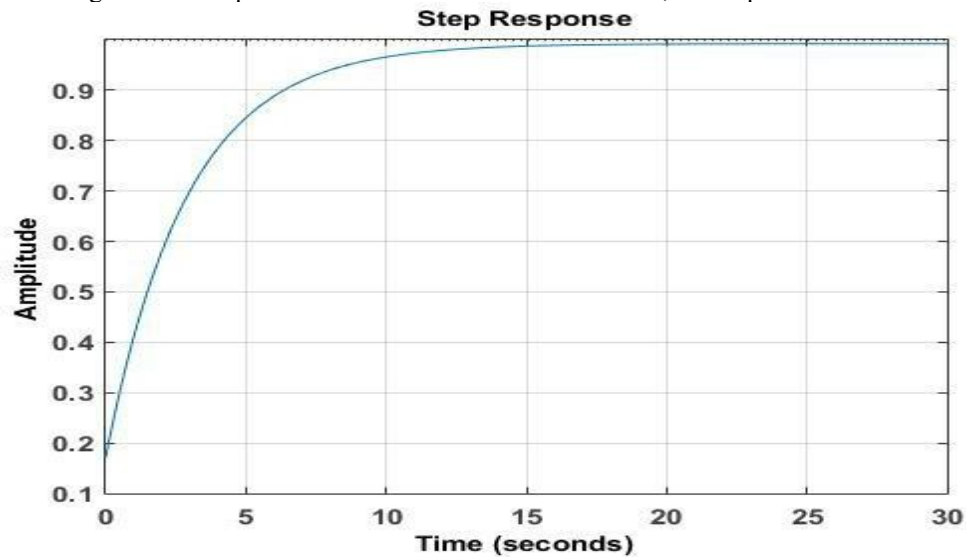


Fonte: Próprio autor.

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.



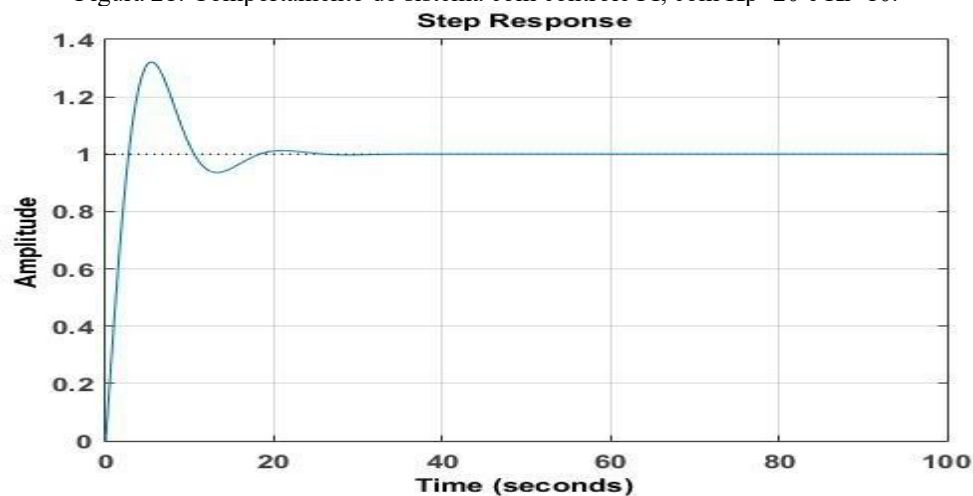
Figura 20: Comportamento do sistema com controle PD, com  $K_p=20$  e  $K_d=10$ .



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  $K_p=20$  e  $K_i=10$ .

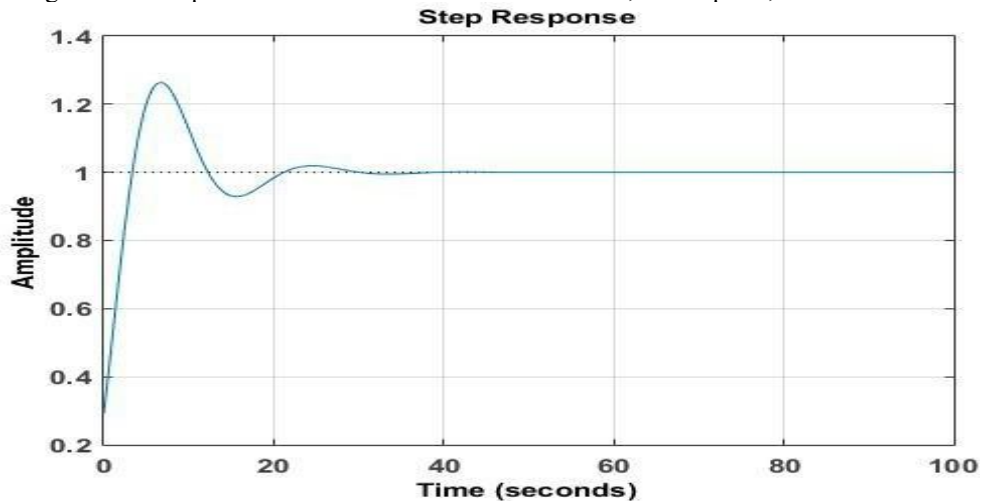


Fonte: Próprio autor.

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  $K_p=20$ ,  $K_d=20$  e  $K_i=10$ .



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  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  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 Arduino 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](http://www.vp.ind.br/detalhes.asp?prod_id=527)>. Acesso em: 15 de Junho de 2018.