



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÍTALO RENAN DA COSTA BARROS
MARCELO AUGUSTO MEDEIROS E SILVA

**SISTEMA DE CONTROLE DE TANQUE SIMPLES, ACOPLADO E TRAPEZOIDAL
USANDO O KIT DIDÁTICO QUANSER**

MOSSORÓ, 2017

ÍTALO RENAN DA COSTA BARROS
MARCELO AUGUSTO MEDEIROS E SILVA

**SISTEMA DE CONTROLE DE TANQUE SIMPLES, ACOPLADO E TRAPEZOIDAL
USANDO O KIT DIDÁTICO QUANSER**

Trabalho apresentado como forma de avaliação parcial, na disciplina de Controle Digital, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

Prof. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale

MOSSORÓ, 2017

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle são de uma enfática importância para os dias atuais, estando presente em diversas aplicações, principalmente na indústria. Assim, vê-se a extrema importância de um sistema operado por um controlador, já que o mesmo permite execuções de tarefas com uma maior exatidão e flexibilidade.

Porém, devido ao nível de complexidade, todos os sistemas de controle necessitam ser operados por profissionais habilitados, tendo como objetivo uma diminuição de erros que podem acontecer no decorrer de determinada aplicação, planta ou sistema. Outras limitações que podem existir são o preço do sistema, que dependendo da sua aplicação, pode se tornar caro, e a necessidade de o controle ser executado da maneira mais correta possível, pois por exemplo, um controle mal dimensionado pode afetar um sistema de tanques em uma empresa de petróleo.

Os parâmetros do sistema que sofrem uma ação direta do controlador, são denominadas de variáveis manipuladas, enquanto que os parâmetros no qual se deseja obter as mudanças que satisfaçam as dadas especificações, denominam-se variáveis controladas. Assim, é visto que os sistemas de automação apresentam muita precisão, pois são sistemas altamente controláveis quando for implementado corretamente. Muitas aplicações da sociedade moderna apresentam muita agilidade devido a correta execução de diversos sistemas de automação que existem no mercado.

Diante da problemática que existe quando se trata de sistemas de controle por automação, são desenvolvidos projetos em laboratório com o intuito de comprovar certas leis de controle, ou analisar o comportamento de sistemas. Isto colabora para que os erros existentes possam ser teoricamente erradicados, dando um alto índice de flexibilidade a sua execução.

Depois de serem debatidos as problemáticas do sistema como um todo, é necessário traçar objetivos para que a automação do sistema ocorra de uma forma mais próxima do comportamento real. Uma importante ferramenta utilizada foi o software MATLAB, o qual possui uma linguagem de alto nível, simples e que permite a análise do comportamento da planta e a captura de todos os dados pertinentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL

Para determinados sistemas de controle modernos, o controlador é um computador digital. A vantagem da utilização de um computador é que as variáveis podem ser controladas ou compensadas pela mesma máquina através do compartilhamento de informações ao decorrer do tempo. Assim, determinados ajustes dos parâmetros do compensador necessários para fornecer uma resposta que tenda a determinada aplicação. Um ponto positivo é que podem ser realizadas alterações no programa ao invés de mudanças no equipamento. Também podem ser realizadas funções de supervisão por meio do computador e/ou software para que sejam implementadas as ações necessárias ao sistema. Para se garantir o funcionamento do sistema e exatidão nos resultados e, para que isso ocorra, um sensor é necessário para preciso medir a variável controlada e comparar com o sinal de referência (NISE, 2010).

Segundo Fadali&Visioli (2013), atualmente, a maioria dos sistemas de engenharia necessitam controlar um sistema com uma ou mais variáveis dependentes do tempo. Para se garantir a performance do sistema, mesmo que ele possua distúrbios e modelos não exatos, a maioria dos controladores utilizam algum feedback negativo; e devido a isso, um sensor é necessário para preciso medir a variável controlada e comparar com o sinal de referência.

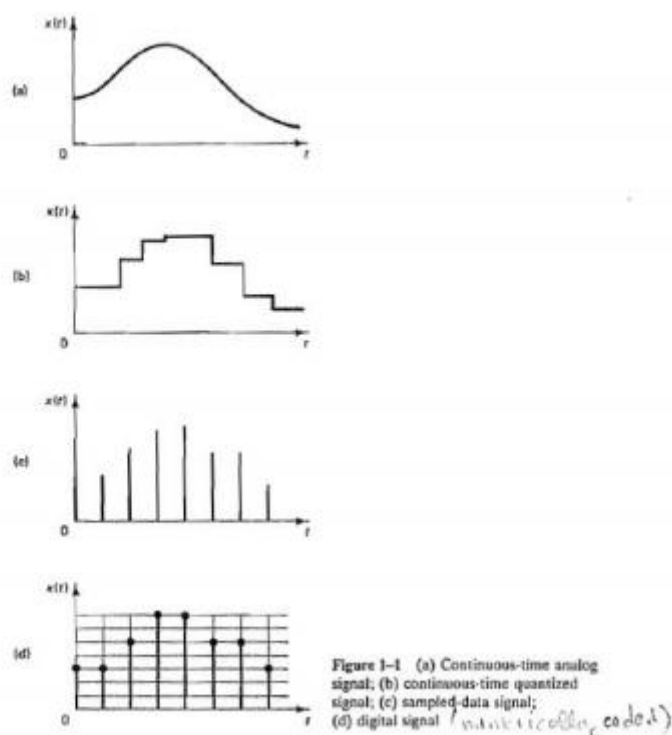
Classicamente, o controlador que manipulava o erro de sinal, e determinava a ação de controle a ser tomada se baseava em sistemas analógicos, sejam eles: elétricos, de fluidos, pneumáticos ou componentes mecânicos. Todos esses sistemas possuem entradas e saídas analógicas, já que seus sinais de saída e entrada são definidos em um intervalo de tempo contínuo, e possuem valores que são definidos pelo limite contínuo de amplitude. Nas últimas décadas, controladores analógicos foram substituídos por controladores digitais, que possuem saídas e entradas

definidas por tempos discretos. Esses controladores estão na forma de circuitos digitais, computadores digitais ou microprocessadores.

Para Ogata (1995), existem quatro tipos de sinais variantes no tempo. Um sinal contínuo no tempo é um sinal definido em um certo intervalo contínuo de tempo. Por definição, a amplitude do sinal pode assumir um intervalo contínuo de valores ou valores distintos de números finitos. O processo que representa uma variável pelos seus valores distintos é chamado quantização, e seus valores distintos são denominados valores quantizados.

Um sinal analógico é definido como um intervalo de tempo contínuo, em que os valores de amplitude podem assumir valores contínuos. Na figura 1, podemos ver detalhadamente como é a distribuição de cada tipo de sinal.

FIGURA 01: Tipos de sinais.



Fonte: OGATA (1995).

Note que o sinal analógico é um caso especial de um sinal em tempo contínuo. Na prática, frequentemente usamos a terminologia “tempo contínuo” como “analógico”, mas vale ressaltar que eles não são sinônimos.

Um sinal em tempo discreto é um sinal definido somente em instantes discretos de tempo, ou seja, quando variável independente t é quantizada. Neste tipo de sinal, se a amplitude puder assumir um intervalo de valores contínuos, o sinal será denominado sampled-data signal, onde a amplitude será um sinal de pulso.

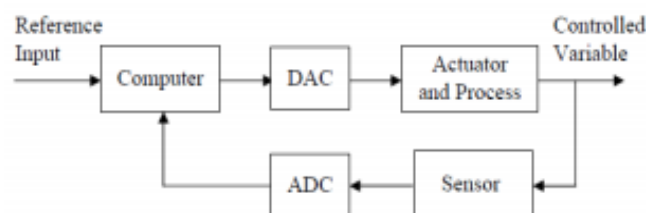
Já um sinal digital é um sinal em tempo discreto com amplitudes quantizadas. Este sinal pode ser representado por uma sequência de números, como por exemplo, na forma de números binários. Na figura 1d, claramente percebe-se que é um sinal quantizado em tempo e amplitude, algo necessário quando utilizamos controladores digitais.

2.2 ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL

Para se controlar um sistema físico ou processo usando um controlador digital, o controlador precisa receber as medidas do sistema, processar os dados e enviar o sinal de controle para o atuador, que irá comandar a ação de controle. Na maioria das aplicações, a planta e o atuador são sistemas analógicos. Devido a isso, se torna necessário uma “tradução” para se ter a comunicação entre o atuador e o controlador.

A tradução de um controlador (digital) para um processo físico (analógico) é feita por um Conversor Digital-Analógico (DAC), e o princípio inverso é feito por um Conversor Analógico-Digital (ADC). A combinação dos elementos já discutidos pode ser visualizada na Figura 02.

FIGURA 02: Estrutura em blocos de um sistema digital.



FONTE: Fadali&Visioli (2013)

Para a execução do projeto de controle de tanques feito em laboratório, o modelo de sua estrutura segue a figura acima. Onde a parte do computador é o conjunto de notebook, MATLAB e uma rede de Wi-Fi responsável pela comunicação com o atuador. O conversor DAC está presente no kit didático da QUANSER, que foi utilizado para fazer os testes. Já o atuador é um ARDUINO UNO, sendo implementado no sistema para serem carregadas e enviadas informações do sensor, ou seja, sua utilidade é fazer a leitura da variação de níveis dos tanques (processo).

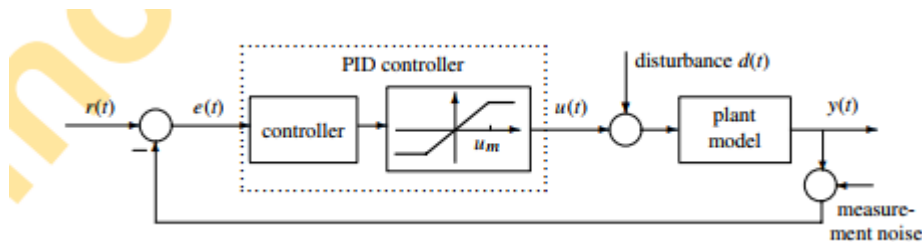
2.3 CONTROLADOR PID

Uma estrutura típica de um sistema de controle PID é mostrada na Figura 03, onde pode ser visto que em um controlador PID, o sinal de erro $e(t)$ é usado para gerar o proporcional, integral e ações derivadas, com os sinais resultantes ponderados e somados para formar o controle sinal $u(t)$ aplicado ao modelo da planta. Uma descrição matemática do controlador PID é:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

Onde $u(t)$ é o sinal de entrada para o modelo da planta, o sinal de erro $e(t)$ é definido como $e(t) = r(t) - y(t)$, e $r(t)$ é o sinal de entrada de referência.

FIGURA 03: Estrutura típica de controlador PID.

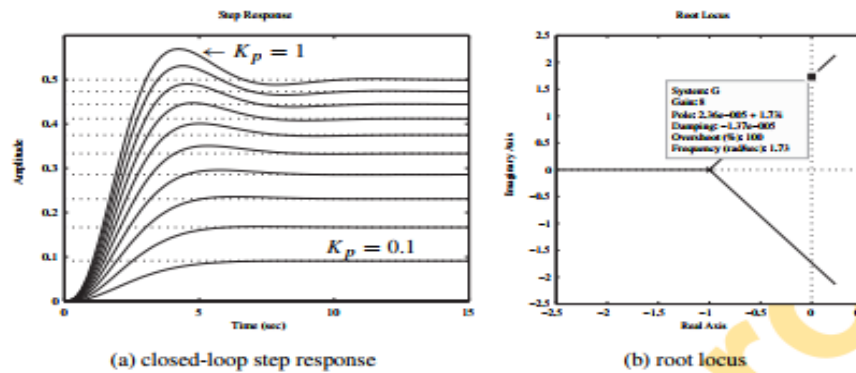


Fonte: XUE; CHEN; ATHERTON (2007)

As respostas em malha fechada com step em um determinado circuito é mostrado na figura 04 (a), e pode ser visto que quando K_p aumenta, a velocidade de resposta do sistema aumenta, o overshoot do sistema aumenta. O sistema de malha

fechada aumenta e o erro de estado estável diminui. No entanto, quando K_p é suficientemente grande, o sistema de malha fechada torna-se instável.

FIGURA 04: Malha fechada com step.



Fonte: XUE; CHEN; ATHERTON (2007)

Na figura 04 (b), onde é visto que quando K_p está fora do intervalo de (0, 8), o circuito de malha fechada torna-se instável. Em aplicações práticas, a ação derivada pura nunca é usada, devido à "derivada chute" produzido no sinal de controle para uma entrada de passo e para a amplificação de ruído indesejável. É geralmente substituído por um filtro passa-baixa de primeiro ordem. Assim, a representação da transformada de Laplace do controlador PID aproximado pode ser escrita como:

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{s T_d}{1 + s \frac{T_d}{N}} \right) E(s).$$

2.3.1 FIRST ORDER-PLUS DEADTIME (FOPDT) MODEL

A melhor maneira de se entender os dados de um processo é através da modelagem. E um sistema de primeira ordem com um atraso no tempo, é uma descrição empírica da dinâmica estável de vários processos. Desta forma, o modelo FOPDT é utilizado para se obter as constantes iniciais do controlador. A formula deste modelo pode ser dada como:

$$\tau_p \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p u(t - \theta_p)$$

Onde:

- $y(t)$ é a variável medida no processo;
- $u(t)$ é o sinal de saída do controlador.
- K_p é o ganho, indica a ação do controlador (reversa ou direta);
- τ_p é a constante de tempo do processo, e indica o loop máximo do período de amostragem ($T_s < 0.1\tau_p$);
- θ_p é o “dead time” do sistema.

Por definição, o ganho afeta a magnitude da resposta, e pode ser definido como a mudança na saída y induzida por uma mudança unitária em u nas condições iniciais e finais do estado estacionário. O cálculo é feito através da fórmula:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_{ss2} - y_{ss1}}{u_{ss2} - u_{ss1}}$$

Devido à mudança em $u(t) = \Delta u$, a solução para a equação diferencial de primeira ordem será:

$$y(t) = \left(e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) y(0) + \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) K_p \Delta u$$

Considerando as constantes iniciais como $y(0) = 0$ e $t = \tau_p$

$$y(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) K_p \Delta u = (1 - e^{-1}) K_p \Delta u = 0.632 K_p \Delta u$$

Ou seja, a constante de tempo afeta diretamente a velocidade de resposta, já que é a quantidade de tempo necessária para a saída alcançar 63,2% das condições de estado estacionário. Por fim, o atraso no tempo é o deslocamento na variável $u(t)$.

Supondo que um sinal degrau que mude de 0 a 1 no tempo 0, mas sofra um deslocamento de 5s, as variáveis $u(t)$ e $y(t)$ também sofrerão um atraso de mesma magnitude. Logo, a solução para a equação diferencial de primeira ordem, com um atraso no tempo pode ser obtida substituindo as variáveis t por $t - \theta_p$, desta forma:

$$u(t - \theta_p)$$

$$y(t < \theta_p) = y(0)$$

$$y(t \geq \theta_p) = \left(e^{-\frac{(t-\theta_p)}{\tau_p}} \right) y(0) + \left(1 - e^{-\frac{(t-\theta_p)}{\tau_p}} \right) K_p \Delta u$$

A equação do FOPDT para funções no domínio do tempo e no tempo discreto são encontradas abaixo:

$$G(s) = \frac{k}{1 + sT} e^{-sL}$$

Atualmente, dois métodos podem ser aplicados para modelos FOPDT, e a determinação das constantes:

- Método Gráfico;
- Método de otimização.

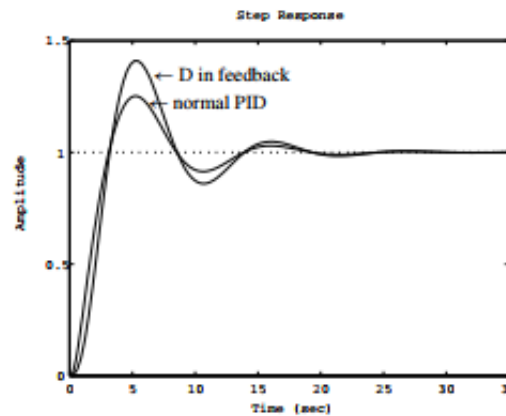
2.3.2 Fórmula de ajuste Ziegler–Nichols

2.3.2.1 Fórmula de ajuste empírico de Ziegler-Nichols

Uma fórmula de ajuste empírica muito útil foi proposta por Ziegler e Nichols no início de 1942. A fórmula de sintonização é obtida quando o modelo da planta é fornecido por um tempo morto de primeira ordem (FOPDT) que pode ser expresso por:

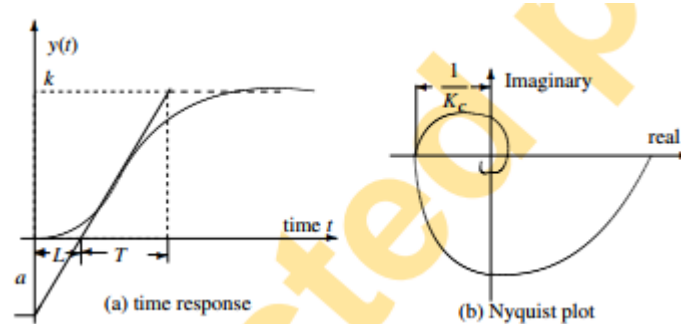
$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{-sT}$$

FIGURA 05: Resposta em comparação de step em malha fechada.



Fonte: XUE; CHEN; ATHERTON (2007)

FIGURA 06: Esboços das respostas de um modelo FOPDT.



Fonte: XUE; CHEN; ATHERTON (2007)

Nos sistemas de controle de processo em tempo real, uma grande variedade de plantas pode ser aproximadamente modelo de Ziegler-Nichols. Se o modelo do sistema não puder ser derivado fisicamente, as experiências podem ser realizadas para extrair os parâmetros para o modelo aproximado. Por exemplo, se a resposta step da planta pode ser medida através de uma experiência, o sinal de saída pode ser gravado como esboçado na figura 5, a partir do qual os parâmetros de k , L e T (ou a , onde $a = kL / T$) podem ser extraídos pela abordagem simples mostrada.

Se uma resposta em frequência seja necessária, a frequência de cruzamento ω_c e o ganho final K_c pode ser obtido a partir do gráfico de Nyquist como mostrado na figura 6. Como $T_c = 2\pi / \omega_c$, os parâmetros do controlador PID também podem ser encontrados na tabela de Ziegler-Nichols.

2.3.2.2 PID revisado, segundo Wang–Juang–Chan

Com base no critério ITAE ideal, o algoritmo de ajuste proposto por Wang, Juang e Chan é um método simples e eficiente para selecionar os parâmetros PID. Se os parâmetros k , L , T do modelo da planta são conhecidos, os parâmetros do controlador são dados por:

$$K_p = \frac{(0,7303 + \frac{0,5307T}{L})(T + 0,5L)}{K(T + L)}$$

$$T_i = T + 0,5L$$

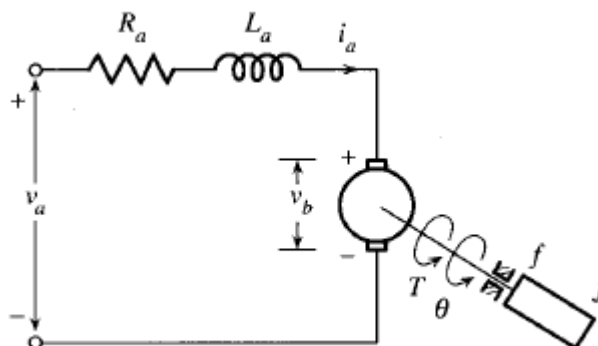
$$T_d = \frac{0,5LT}{T + 0,5L}$$

3 MODELO MATEMÁTICO

3.1 EQUAÇÃO DA BOMBA DE ÁGUA

A parte elétrica é representada através de um motor de corrente contínua (DC) excitado pela armadura, onde o campo magnético é produzido através de um ímã permanente (vide Figura 07).

FIGURA 07: Motor CC



FONTE: NISE (2011)

Onde R_a é a resistência da armadura, L_a é a indutância da armadura, T é o torque do motor, Θ é o deslocamento angular do eixo do motor, b é o coeficiente de atrito viscoso nos mancais, J é o momento de inercia do eixo do motor, V_a é a tensão de armadura e i_a é a corrente de armadura.

Em geral, o torque gerado por um motor DC é proporcional à corrente de armadura e força do campo magnético. Neste projeto, iremos considerar que o campo magnético é constante, portanto, o torque do motor é diretamente proporcional à corrente de armadura i_a , determinada por um fator constante K_2 , ou seja:

$$T = K_2 i_a \quad (1)$$

Já a força eletromotriz é proporcional à velocidade angular, determinada por um fator constante K_e

$$e = K_1 \dot{\theta} \quad (2)$$

A equação que descreve o comportamento do deslocamento angular Θ em relação à tensão de armadura V_a é obtida combinando-se a equação elétrica do motor com sua equação mecânica, dadas por:

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= V_a - K_1 \frac{d\theta}{dt} \\ J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} &= T = T = K_2 i_a \end{aligned} \quad (3)$$

Para se manter o princípio de conservação de energia no motor, iremos considerar que $K_1=K_2$. Logo, determinaremos uma constante de valor K para ambas as variáveis, ficando:

$$\begin{aligned} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} &= T = T = K i_a \\ L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= V_a - K \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Aplicando a transformada de Laplace, teremos as seguintes equações:

$$\begin{aligned} s(Js + b) \theta(s) &= KI(s) \\ (Ls + R) I(s) &= V(s) - Ks \theta(s) \end{aligned} \quad (5)$$

Logo, a função de transferência do sistema em malha aberta que relaciona o deslocamento angular com a tensão de armadura é dada por:

$$P(s) = \frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad \left[\frac{\text{rad/sec}}{V} \right] \quad (6)$$

Segundo Lobato et al. (2017), para se facilitar a análise, pode se considerar que a dinâmica elétrica é muito mais rápida que a dinâmica da parte mecânica, desta forma a equação de transferência fica:

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (7)$$

K_m é o ganho do motor, encontrado pela fórmula:

$$K_m = \frac{\tau}{\sqrt{P}} \quad (8)$$

Onde τ é o torque do motor em $N.m$ e P é energia dissipada pelo efeito Joule. T_m é a constante de tempo.

3.2 SISTEMAS DE TANQUES

Para cada tanque ($i = 1, 2, 3, 4$), o modelo matemático deve seguir a regra do balanço de massa e a equação de Bernoulli, onde por definição:

$$\left\| \begin{array}{l} \text{Mudança de nível} \\ \text{de um Líquido} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{l} \text{Entrada de} \\ \text{Fluido} \end{array} \right\| - \left\| \begin{array}{l} \text{Saída de} \\ \text{Fluido} \end{array} \right\|$$

Antes de fazer a derivação dos modelos matemáticos, devemos considerar que:

- A relação de abertura das válvulas será definida como totalmente aberta, ou seja, $\gamma_1 \gamma_2 = 1$;
- O ganho da bomba segue a relação $K=Q/V_n$, ou seja, para a bomba teremos respectivamente um ganho direto de fluxo conforme aumentamos a tensão, na forma $k1v1$;

Pela lei da conservação da massa, teremos que:

$$\frac{dm_T}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (9)$$

Onde:

$m_T =$ massa acumulada no tanque

$m_{in} =$ massa de entrada

$m_{out} =$ massa de saída

Considerando as relações de densidade, fluxo, área de secção transversal:

$m_T = \text{vol. do tanque} \times \text{densidade do líquido}$

$m_{in} = \text{fluxo volumétrico entrada } (q_{in}) \times \text{densidade do líquido de entrada } (\rho_1)$

$m_{out} = \text{fluxo volumétrico saída } (q_{out}) \times \text{densidade do líquido de saída } (\rho_2)$

Logo:

$$\frac{d\rho v}{dt} = \rho q_{in} - \rho q_{out} \quad (10)$$

Considerando que o fluido para todo o sistema é o mesmo, ou seja, $\rho = \rho_1 = \rho_2$, e que A é a área da seção transversal ($i = 1,2,3,4$), o modelo para o processo de tanques quádruplos será:

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = q_{in,i} - q_{out,i} = \frac{q_{in,i} - q_{out,i}}{A_i} \quad (11)$$

O $q_{in,i}$ depende unicamente da tensão aplicada na bomba, e $q_{out,i}$ depende da aceleração da gravidade e da quantidade de água no tanque. Logo, utilizando as equações de Bernoulli e a relação entre a tensão nas bombas teremos:

$$\begin{aligned} q_{in,1} &= \gamma_1 k_1 v_1 \text{ (tanque simples)} \\ q_{in,2} &= k_1 v_1 (1 - \gamma_1 \delta_1) \text{ (tanque duplo acoplado)} \end{aligned} \quad (12)$$

E para o fluxo de saída ($i = 1,2,3,4$), onde a é a área de seção transversal dos tubos, g a aceleração da gravidade e h o nível de água no tanque:

$$q_{out,i} = a_i \sqrt{2gh_i} \quad (13)$$

Vale ressaltar, que a equação para um nível de líquido também pode ser montada na forma de resistência e capacitância. A resistência R para um fluxo de líquido é definida como a diferença de nível, ou seja:

$$R = \frac{\text{diferença de nível (m)}}{\text{mudança no fluxo (m}^3/\text{s)}} \quad (14)$$

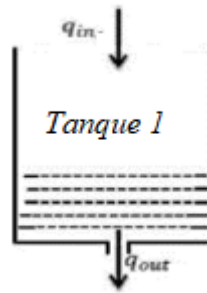
Onde caso um tanque esteja acoplado com um tubo cilíndrico, a resistência do fluxo de saída será representada por:

$$R = \frac{8\eta L_{tubo}}{\pi r_{tubo}^4} \quad (15)$$

Onde η é a viscosidade do fluido.

3.2.1 Tanque Simples

Considerando um tanque simples, devemos observar todas as variáveis que influenciam no sistema. O balanço de massas pode ser visualizado na figura 08.

FIGURA 08: Tanque simples

Por definição, pela definição de Bernoulli, teremos:

$$q_{in,1} - q_{out,1} = \frac{dV}{dt}$$

Onde:

$$V = A_{cilindro} \times h$$

Percebe-se que h é a única variável do sistema, portanto, podemos definir que:

$$dV = d(h_1 A_1)$$

Logo:

$$q_{in,1} - q_{out,1} = A_1 \frac{dh_1}{dt}$$

Fazendo o jogo de forças para $q_{out,1}$, e considerando que teremos um resistência no fluxo de saída devido à um tubo (ou válvula) na saída do tanque, teremos:

$$q_{out,i} = \frac{\rho g h_1}{R_{1,out}}$$

Considerando que o fluxo da bomba é constante (Km), e possui uma relação linear com a tensão V_p , podemos considerar que:

$$q_{in,i} = Km V_p$$

Onde R é expresso na forma de $N.s/m^5$ e pode ser encontrado pela fórmula (15), e ρ é a densidade do líquido. Portanto, a equação poderá ser escrita na forma:

$$q_{in,1} - q_{1,out,1} = A_1 \frac{dh_1}{dt}$$

$$KmV_p - \frac{\rho g h_1}{R_{1,out}} = A_1 \frac{dh_1}{dt}$$

$$\frac{KmV_p}{A_1} - \frac{\rho g h_1}{A_1 R_{1,out}} = \frac{dh_1}{dt}$$

$$\frac{KmV_p}{A_1} = \frac{dh_1}{dt} + \frac{\rho g h_1}{A_1 R_{1,out}}$$

Fazendo a transformada de Laplace, e considerando que $f(0)$ para $h(0)$ é 0, teremos:

$$\frac{KmV_p(s)}{A_1} = sH_1(s) + \frac{\rho g H_1(s)}{A_1 R_{1,out}}$$

$$\left(s + \frac{\rho g}{A_1 R_{1,out}}\right) H_1(s) = \frac{Km}{A_1} V_p(s)$$

$$G(s) = \frac{H_1(s)}{V_p(s)} = \frac{Km}{\left(sA_1 + \frac{\rho g}{R_{1,out}}\right)} = \frac{Km}{\left(s\frac{\pi d^2}{4} + \frac{\rho g}{R_{1,out}}\right)} \quad (16)$$

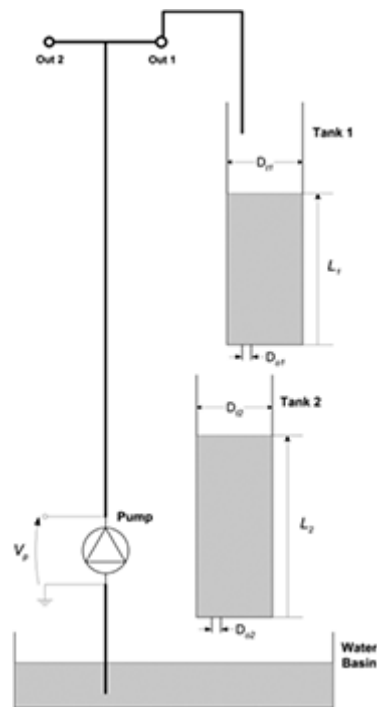
Considerando uma entrada em *step*, teremos o seguinte sistema em malha aberta:

$$G(s) = \frac{Km}{s\left(s\frac{\pi d^2}{4} + \frac{\rho_{fluido}g}{R}\right)} = \frac{Km}{s^2 R \frac{\pi d^2}{4} + s \frac{\rho g}{R_{1,out}}}$$

3.2.2 Tanques acoplados

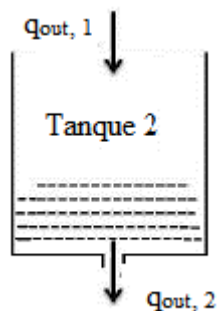
Considerando o sistema de tanques acoplados, devemos observar todas as variáveis que influenciam no sistema. O balanço de massas pode ser visualizado na figura 09.

FIGURA 09: Tanques acoplados.



Para o Tanque 1 já temos sua devida função de transferência, agora vamos observar o Tanque 02. O balanço de massas pode ser visualizado na figura 10.

FIGURA 10: Diagrama de Massas para o Tanque 02



Logo, pela equação de Bernoulli, teremos:

$$q_{out,1} - q_{out,2} = \frac{dV_2}{dt}$$

Onde:

$$V = A_{cilindro} \times h$$

Percebe-se que h é a única variável do sistema, portanto, podemos definir que:

$$dV_2 = d(h_2 A_2)$$

Logo

$$q_{out,1} - q_{out,2} = A_2 \frac{dh_2}{dt}$$

Fazendo o jogo de forças para $q_{out,2}$, e considerando que teremos uma resistência no fluxo de saída devido à um tubo (ou válvula) na saída do tanque, teremos:

$$q_{out,2} = \frac{\rho g h_2}{R_2}$$

Onde R_2 é expresso na forma de $N.s/m^5$ e pode ser encontrado pela fórmula (15), e ρ é a densidade do líquido. Portanto, a equação poderá ser escrita na forma:

$$q_{out,1} - q_{out,2} = A_2 \frac{dh_2}{dt}$$

$$q_{out,1} - \frac{\rho g h_2}{R_2} = A_2 \frac{dh}{dt}$$

Porém,

$$q_{out,1} = \frac{\rho g h_1}{R_{1,out}}$$

Logo:

$$\frac{\rho g h_1}{R_{1,out}} - \frac{\rho g h_2}{R_2} = A_2 \frac{dh_2}{dt}$$

Considerando que os tanques são os mesmos, logo $R_{1,out} = R_2$

$$\frac{\rho g h_1}{R} - \frac{\rho g h_2}{R} = A_2 \frac{dh_2}{dt}$$

$$h_2' = \frac{\rho g h_1}{A_2 R} - \frac{\rho g h_2}{A_2 R}$$

Utilizando a transformada de Laplace, considerando que $h(0) = 0$, teremos:

$$sH_2(s) = \frac{\rho g H_1(s)}{A_2 R} - \frac{\rho g H_2(s)}{A_2 R}$$

$$sH_2(s) + \frac{\rho g H_2(s)}{A_2 R} = \frac{\rho g H_1(s)}{A_2 R}$$

$$\left(s + \frac{\rho g}{A_2 R}\right) H_2(s) = \frac{\rho g H_1(s)}{A_2 R}$$

Dividi ambos os termos por $Vp(s)$

$$\left(s + \frac{\rho g}{A_2 R}\right) \frac{H_2(s)}{Vp(s)} = \frac{\rho g H_1(s)}{A_2 R Vp(s)}$$

Sabendo que:

$$\frac{H_1(s)}{V_P(s)} = \frac{Km}{\left(sA_1 + \frac{\rho g}{R_{1,out}}\right)} = \frac{Km}{\left(sA + \frac{\rho g}{R}\right)}$$

Teremos

$$\left(s + \frac{\rho g}{A_2 R}\right) \frac{H_2(s)}{Vp(s)} = \frac{\rho g}{A_2 R} \frac{Km}{\left(sA + \frac{\rho g}{R}\right)}$$

Como as áreas são iguais:

$$\left(s + \frac{\rho g}{AR}\right) \frac{H_2(s)}{Vp(s)} = \frac{\rho g Km}{sA^2 R + A\rho g}$$

$$\frac{H_2(s)}{Vp(s)} = \frac{\rho g Km}{sA^2 R + A\rho g} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{\rho g}{AR}\right)}$$

$$\frac{H_2(s)}{Vp(s)} = \frac{\rho g K m}{A^2 R s^2 + A \rho g s + A \rho g s + \frac{\rho g^2}{R}}$$

$$\frac{H_2(s)}{Vp(s)} = \frac{K m}{\frac{R A^2}{\rho g} s^2 + 2 A s + \frac{\rho g}{R}}$$

3.2.3 Tanque trapezoidal

Um tanque não linear a ser controlado é mostrado na figura 11. Esse tanque possui uma parcela de sua seção transversal invariante com a altura e outra parte totalmente dependente do nível do líquido do tanque. A área da seção transversal total é dada pela equação a seguir.

$$A_1 = d3 * (d1 + d2)$$

Assim, manipulando a área não linear em função da altura do volume de água (h), obtém-se a equação abaixo.

$$A_1 = d3 * \left(d1 + \frac{L1}{tg(\emptyset)} \right)$$

Onde - $d1$ – Comprimento relacionado a seção transversal linear

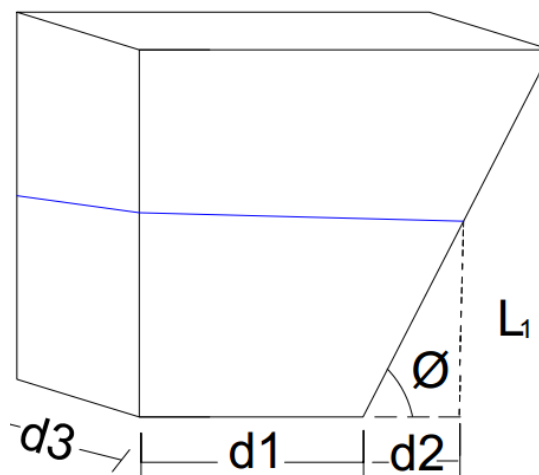
$d2$ – Comprimento relacionado a seção transversal não linear

$d3$ – Profundidade do tanque

L_1 - nível do tanque

\emptyset - inclinação relacionado a seção transversal não linear

FIGURA 11: Tanque trapezoidal.



A Equação que representa fisicamente um tanque simples, como visto, é dada pela Equação 12, onde A_1 é dada pela Equação 29. Assim, a Equação que rege o comportamento físico de um tanque trapezoidal é mostrada na Equação 30

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = -\frac{a_1}{d3 * \left(d1 + \frac{L_1}{tg(\emptyset)}\right)} \sqrt{2g L_1} + \frac{K_P}{d3 * \left(d1 + \frac{L_1}{tg(\emptyset)}\right)} V_P$$

A Equação 30 é não-linear e deve ser linearizada em torno do ponto L_{10} usado a expansão de Taylor.

$$\delta L_1 = L_1 - L_{10} \rightarrow L_1 = \delta L_1 + L_{10}$$

$$\frac{\partial(\delta L_1 + L_{10})}{\partial t} = -\frac{a_1}{d3 * \left(d1 + \frac{\delta L_1 + L_{10}}{tg(\emptyset)}\right)} \sqrt{2g(\delta L_1 + L_{10})} + \frac{K_P}{d3 * \left(d1 + \frac{\delta L_1 + L_{10}}{tg(\emptyset)}\right)} V_P$$

Deve-se linearizar o termo que contém a raiz quadrada, para transformar em uma equação linear. Derivando esse termo e aplicando na expansão de Taylor, desconsiderando o termo de segundo grau e de ordens superiores, obtém-se:

$$-\frac{a_1}{d3 * \left(d1 + \frac{\delta L_1 + L_{10}}{tg(\emptyset)}\right)} \sqrt{2g(\delta L_1 + L_{10})} = -\frac{a_1}{d3 * \left(d1 + \frac{L_{10}}{tg(\emptyset)}\right)} \sqrt{2g(L_{10})} - \frac{a_1 \sqrt{2g}}{d3} \left\{ \frac{\left[L_{10}^{-\frac{1}{2}} (tg \emptyset d1 + L_{10}) - 2L_{10}^{\frac{1}{2}} \right] tg \emptyset}{2(d1 tg \emptyset + L_{10})^2} \right\} \delta L_1$$

Substituindo, tem-se

$$\frac{\partial \delta L_1}{\partial t} = -\frac{a_1}{d3 * \left(d1 + \frac{L_{10}}{tg(\emptyset)}\right)} \sqrt{2g(L_{10})} - \frac{a_1 \sqrt{2g}}{d3} \left\{ \frac{\left[L_{10}^{-\frac{1}{2}} (tg \emptyset d1 + L_{10}) - 2L_{10}^{\frac{1}{2}} \right] tg \emptyset}{2(d1 tg \emptyset + L_{10})^2} \right\} \delta L_1 + \frac{K_P}{d3 * \left(d1 + \frac{L_{10}}{tg(\emptyset)}\right)} V_P$$

$$\frac{\partial \delta L_1}{\partial t} = -0,0806 + 0,00104 \delta L_1 + 0,00605 V_P$$

Aplicando Laplace, vêm

$$L \left\{ \frac{\partial \delta L_1}{\partial t} \right\} = L \{ -0,0806 + 0,00104 \delta L_1 + 0,00605 V_P \}$$

$$sL_1(s) = 0,00104L_1(s) + 0,00605V_p(s)$$

Dessa forma, a equação de transferência $G_3(s)$ é dada por:

$$G_3(s) = \frac{L_1(s)}{V_p(s)} = \frac{0,00605}{s-0,00104}$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a concretizar a execução dos testes de controle para os tanques foram utilizados alguns materiais e ferramentas que serão mostrados no decorrer desse tópico.

FIGURA 12: Tanques acoplados do kit QUANSER.



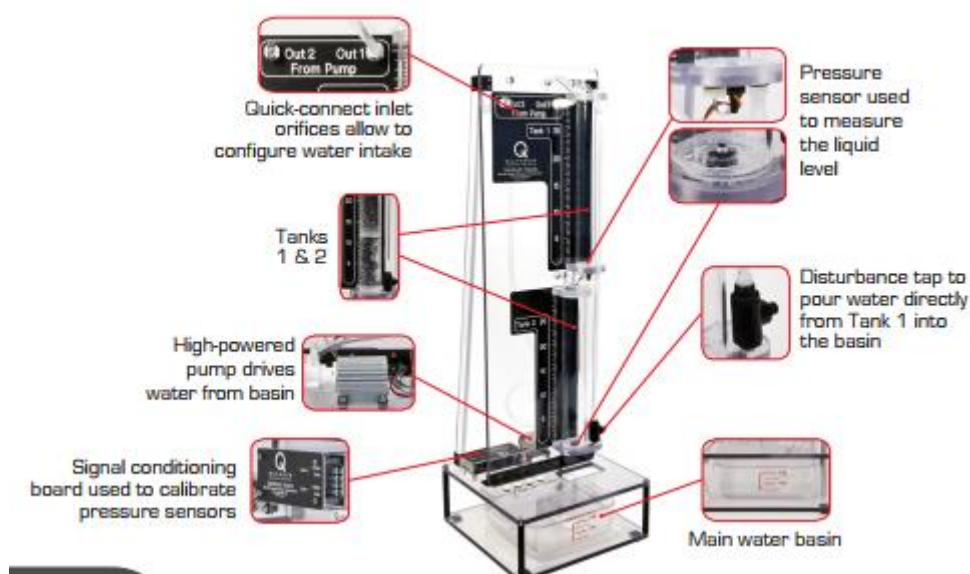
Fonte: TechSim (2017)

4.1.2 Tanques acoplados

Como já fora visto, o kit didático da QUANSER foi de extrema importância para a realização dos testes. Esse kit contém: uma base para a sustentação do sistema,

dois tanques cilíndricos com as mesmas dimensões, uma bomba para receber dados e fazer o controle do fluxo de água, um recipiente para fazer receber o líquido provenientes dos tanques, uma válvula de segurança, mangueiras para fazer o transporte da água, dois sensores de níveis, entre outros acessórios. Vê-se detalhadamente todos seus acessórios na imagem abaixo.

FIGURA 13: Acessórios do kit QUANSER.



Fonte: TechSim (2017)

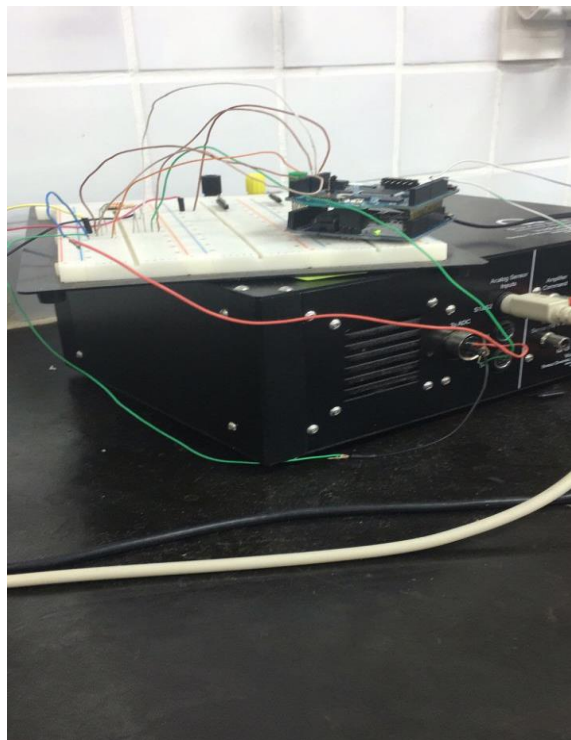
As especificações deste kit são mostradas a seguir:

- Gravidade: 981 cm/s^2 ;
- Densidade da água (ρ): 1 g/cm^3 ;
- Diâmetro interno dos tanques: 4.45 cm ;
- Comprimento dos Tubos de Saída: 5 cm ;
- Diâmetro dos Tubos de Saída: 0.48 cm ;
- Viscosidade da água (η): 0.01003 g/cm.s
- Altura máxima dos tanques: 30 cm ;
- Constante de Fluxo da Bomba: $3.3 \text{ cm}^3/\text{V.s.}$

4.1.3 Amplificador

Foi utilizado um amplificador onde sua função é interligar o arduíno ao sensor dos tanques, sendo utilizado para se dar um ganho de tensão em 3x, e também para converter o sinal em *binário* ↔ *analógico*, através de conversores A/D e D/A. Na figura a seguir, pode-se visualizar o amplificador utilizado.

FIGURA 14: Amplificador utilizado.



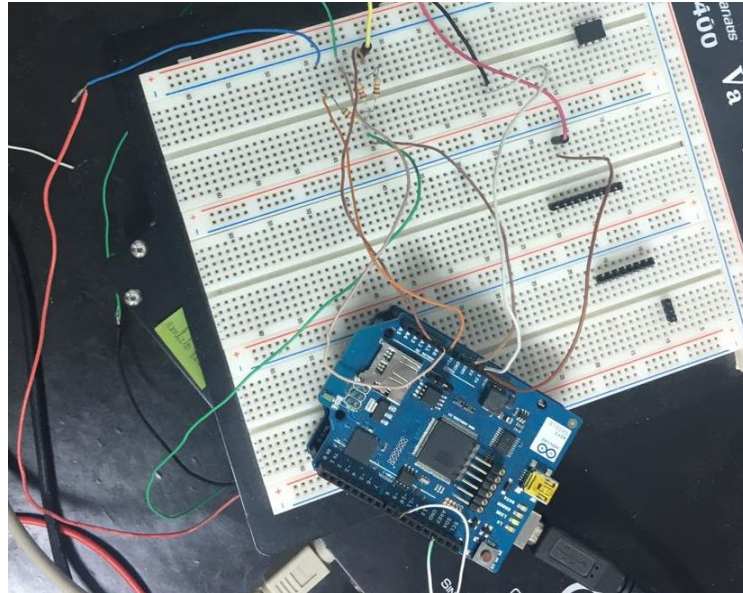
Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Arduíno, Shield Wi-Fi e demais equipamentos

Foi usado um Arduíno Uno nos testes, onde este fazia a função de comunicação e atuação, recebendo os dados do Shield, rodando o código especificado no ANEXO I, e enviando sinais para o amplificador. O comando enviado pelo computador era recebido através de um Shield Wi-Fi, conectado a uma rede local específica. Para o envio dos dados, foi criada e utilizado este mesmo circuito e rede Wi-Fi, sendo feita a comunicação através de um roteador. Para fazer a interconexão das portas do arduíno e do amplificador, foram utilizados um protoboard, cabos e

alguns resistores, para que fosse garantido o perfeito funcionamento do sistema. Na figura 15 pode-se ver uma imagem do arduino, Shield, protoboard e alguns outros equipamentos utilizados.

FIGURA 15: Imagem de alguns equipamentos utilizados.



Fonte: Autoria própria.

4.1.5 Motor CC (Bomba)

No kit didático da QUANSER está presente uma bomba de corrente contínua com uma limitação de alimentação de 15V e constante de fluxo de $3.3 \text{ cm}^3/\text{V.s}$. Sua função no sistema é de fazer o bombeio de água através de pulsos PWM enviados pelo arduino.

4.1.6 Tanque trapezoidal

Além do sistema de tanques acoplados, outra finalidade da presente pesquisa é fazer o controle de um tanque trapezoidal. Ele tem um comprimento (no seu lado linear) de 30cm, com dimensão e largura de 5cm. Pode ser visto o tanque com seu respectivo sensor na sua parte inferior na figura abaixo.

FIGURA 16: Tanque trapezoidal com seu respectivo sensor.



Fonte: Autoria própria.

4.1.7 Sensor do tanque trapezoidal

Foi utilizado um sensor de pressão para que fosse possível determinar o nível da água no tanque. Junto com o tanque trapezoidal, foi implementado outros tipos de testes que não estavam presentes no kit didático da QUANSER. Na figura abaixo pode ser visto o modelo do sensor utilizado.

FIGURA 17: Sensor utilizado no tanque trapezoidal



Fonte: Digi-key (2017)

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Tanque simples

Para a realização dos testes no tanque simples, foi aplicado um degrau ao sistema observando o setpoint desejado. No presente trabalho, foram realizados 4 testes: 5cm, 10cm, 15cm e 20cm.

Como comentado anteriormente, para se projetar um PID robusto em um determinado sistema, devemos seguir os seguintes passos:

- Obter a resposta em malha aberta através da aplicação de um degrau que leve a estabilidade no setpoint desejado;
- Recolher o gráfico do sistema, calculando os valores de K_p , T_d e T_i ;
- Calcular os valores de K_p , K_i e K_d .

Diante do exposto, foi verificado os valores para cada degrau que poderá ser visto na tabela abaixo.

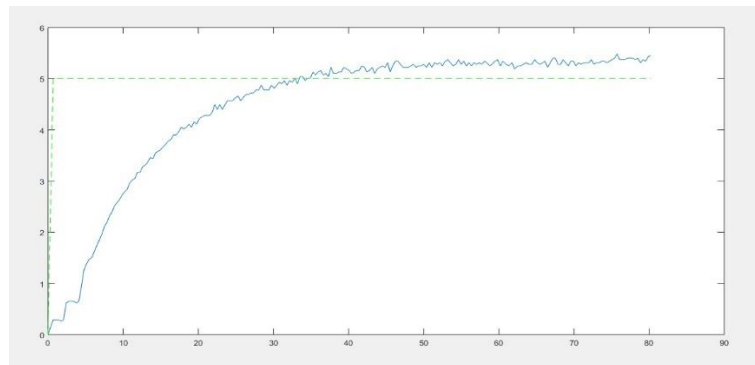
TABELA 1: Valor do degrau para seu respectivo nível.

DEGRAU (volts)	NÍVEL
1.3	5 cm
1.7	10 cm
2.1	15 cm
2.35	20 cm

Fonte: Autoria própria.

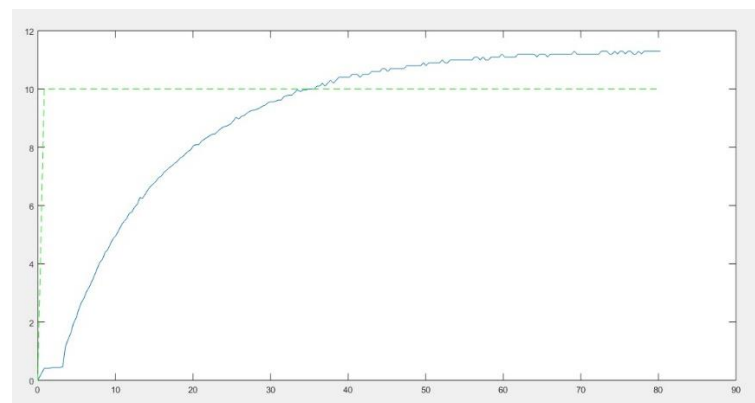
Nas próximas 4 imagens é possível verificar o comportamento do sistema com auxílio do software MATLAB, e a respectiva resposta em degrau.

FIGURA 18: Gráfico para o setpoint de 5cm.



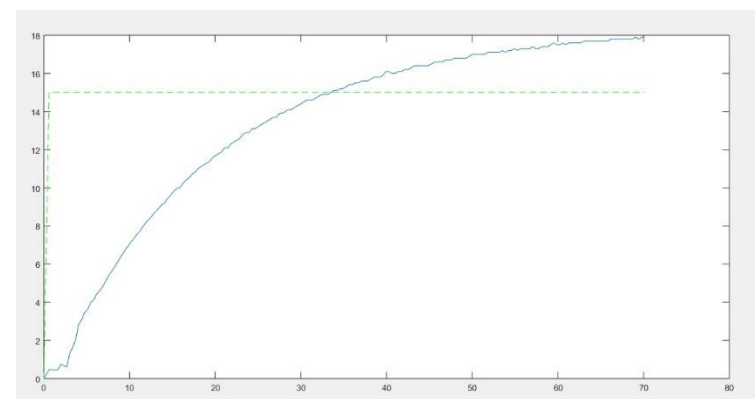
Fonte: Autoria própria

FIGURA 19: Gráfico para o setpoint de 10cm.

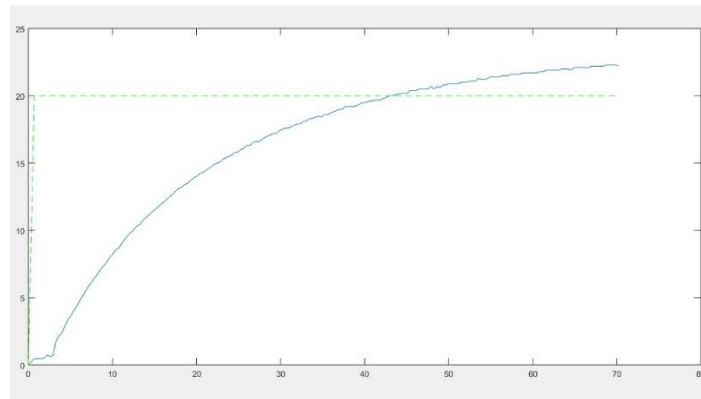


Fonte: Autoria própria.

FIGURA 20: Gráfico para o setpoint de 15cm.



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 21: Gráfico para o setpoint de 20cm.**Fonte::** Autoria própria.

Através de análise experimental com base na análise gráfica de Ziegler-Nichols onde, podemos agora determinar as devidas constantes do sistema, visualizadas nas próximas 4 imagens abaixo.

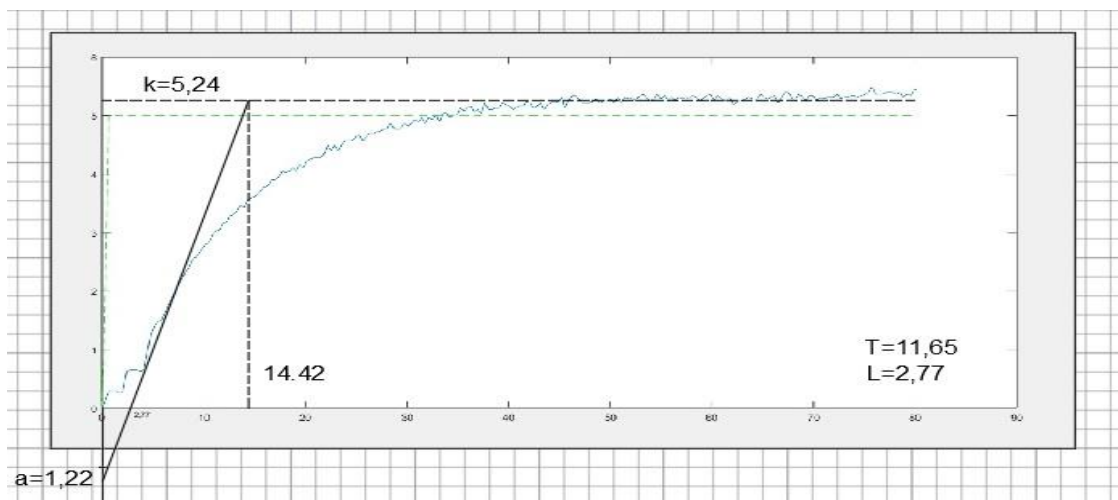
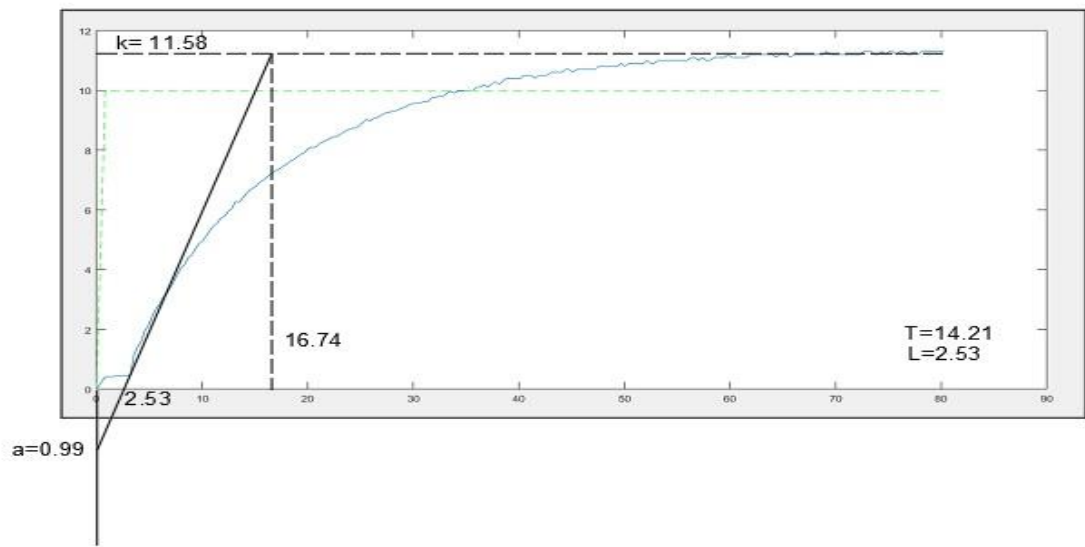
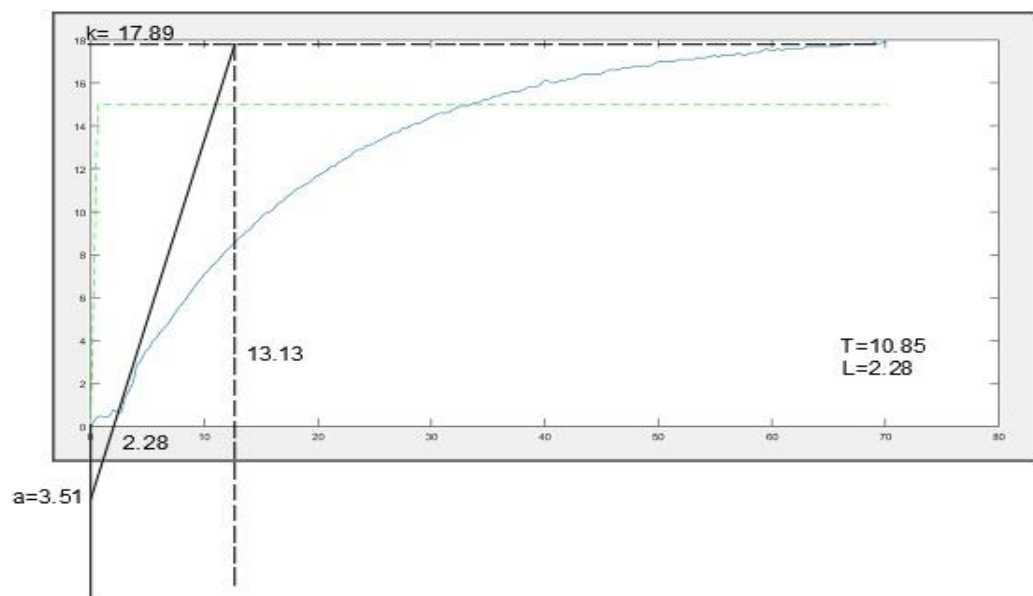
FIGURA 22: Gráfico com as constantes de Ziegler-Nichols para 5cm.**Fonte:** Autoria própria.

FIGURA 23: Gráfico com as constantes de Ziegler-Nichols para 10cm.



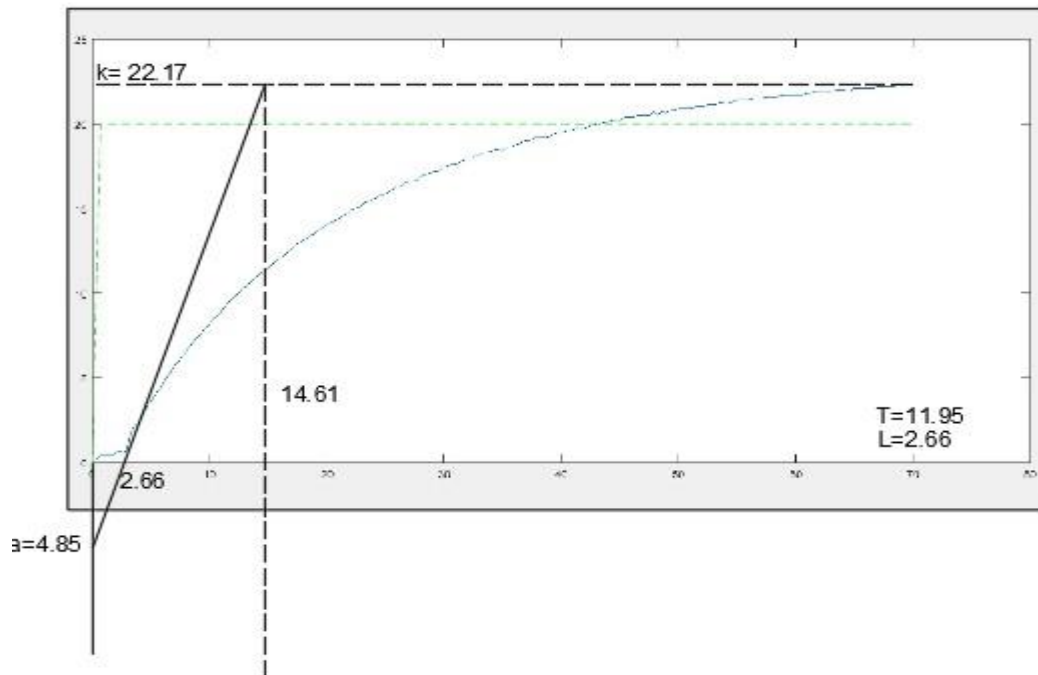
Fonte: Autoria própria.

FIGURA 24: Gráfico com as constantes de Ziegler-Nichols para 15cm.



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 25: Gráfico com as constantes de Ziegler-Nichols para 20cm.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Tanque acoplado

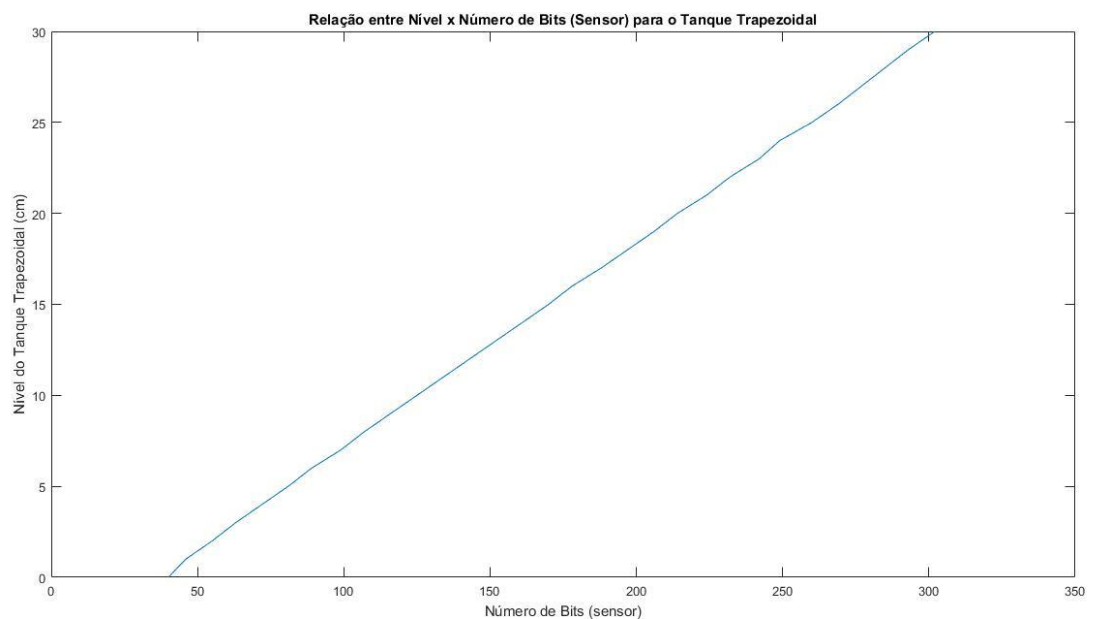
Para ser feito o controle dos tanques acoplados e, conseqüentemente, serem obtidos seus respectivos gráficos, foi escolhido um valor inicialmente de setpoint em 10cm. Assim, foi realizada uma análise gráfica do oscilatório, zerando o valor de K_d e K_i , e aumentando o valor de K_p até o sistema entrar em oscilatório perfeito.

4.2.3 Tanque trapezoidal

Os experimentos no tanque trapezoidal são bem parecidos com os do tanque simples, porém, como o tanque não faz parte do kit didático da QUANSER e sua geometria não é totalmente linear, foi necessária a realização de alguns ajustes. Primeiro foi feito um ajuste físico, onde foi feita a implementação de um sensor de pressão na sua extremidade inferior, para que fosse feita a leitura e amostragem do nível de água no tanque.

Também foi de extrema necessidade a realização de uma regressão polinomial para que a leitura dos níveis pelo sensor fosse feita da maneira mais correta possível. Essa regressão foi feita depois de ser realizados testes para cada altura, recolhendo os valores lidos pelo sensor (binário) e relacionando com o respectivo nível de água. Essa regressão foi implementada no MATLAB para que fosse executada a leitura do sensor. Na imagem abaixo, é possível verificar a curva do sensor, relacionando o valor lido pelo sensor (bits) e o nível de água no tanque (0 a 30 cm).

FIGURA 27: Curva do sensor.



Fonte: Autoria própria.

4.2.3.1 PID escalonado

Como solicitado, foi realizado testes no tanque trapezoidal com um PID escalonado, onde o mesmo consiste em fazer uma mudança dos valores de K_p , K_i e K_d para cada nível desejado. No tópico de resultados, será explicitado o comportamento desses gráficos com tais mudanças realizadas.

4.2.4 Código do arduíno

Para a concreta realização da comunicação, foi necessário a elaboração de um código para ser carregado no arduíno. Esse código funciona da seguinte forma: primeiro é feito a checagem se o Shield Wi-Fi acoplado no arduíno está conectado. Se essa informação for verdadeira, é feita a conexão com a rede que foi criada no laboratório para locomoção dos dados enviados e/ ou recebidos.

Também foi definida as portas analógicas que serão utilizadas para a leitura de dados do sensor. São determinadas as variáveis que serão atribuídas aos níveis de cada, pois, a partir delas, é feita sua respectiva leitura, onde esses valores analógicos são de 0 a 1023 bits. O arduíno passa uma resposta em http para o navegador para a amostragem de resultados. São também criados limites para valores de tensão enviados pelo MATLAB para que a bomba opere em seus limites e assim não ocorra algum evento indesejado, como, por exemplo, que a bomba queime, pois, sua tensão é de até 5 volts e o amplificador ainda multiplica essa tensão em três vezes, pois internamente ele tem um ganho de 3x. O código que foi criado no arduíno está presente no ANEXO 1.

4.2.5 Código do MATLAB

4.2.6 Funções EscreverURL e LerURL

O sistema que relacionou o envio e recebimento de dados foi através duas funções implementadas no software MATLAB. Uma dessas funções é a EscreverURL, onde ela consiste em enviar os dados para o arduíno usando limites de 0 a 255, a outra função é a LerURL, onde ela lerá o valor do sensor lido pelo arduíno, e enviado para a rede Wi-Fi. Essa leitura url deve ser passada no formato string e o nível será retornado no formato float. O formato string consiste em ler a url enviada em forma de caracteres. Já o formato float é uma conversão de dados, pois essa função serve para transformar o valor lido em caractere em valores decimais para serem expostos pela rede Wi-Fi. Nas próximas duas figuras abaixo, é possível visualizar essas funções.

FIGURA 28: Função EscreverURL

```

1 %A url deve ser passada no formato string e o valor nos padrões arduino
2 %0-255
3 function EscreverURL(url,valor)
4     URL = [url num2str(valor)];
5     filename = 'samples.html';
6     urlwrite(URL,filename,'get',{'term','urlwrite'});
7 end

```

Fonte: Autoria própria.

FIGURA 29: Função LerURL.

```

1 %A url deve ser passada no formato string e o nivel será retornado no
2 %formato float
3
4 function [nivel1,nivel2,nivel3,yr]=LerURL(url)
5 %url = 'http://192.168.1.105/';
6 str = urlread(url,'Get',{'term','urlread'});
7 %x=strfind(str,'/b>');
8 nivel1=str2num(str(46:50));
9 nivel2=str2num(str(67:71));
10 nivel3=str2num(str(88:92));
11 yr=str2num(str(106:end));
12 %nivel=str2num(str(45:end));
13 end

```

Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS

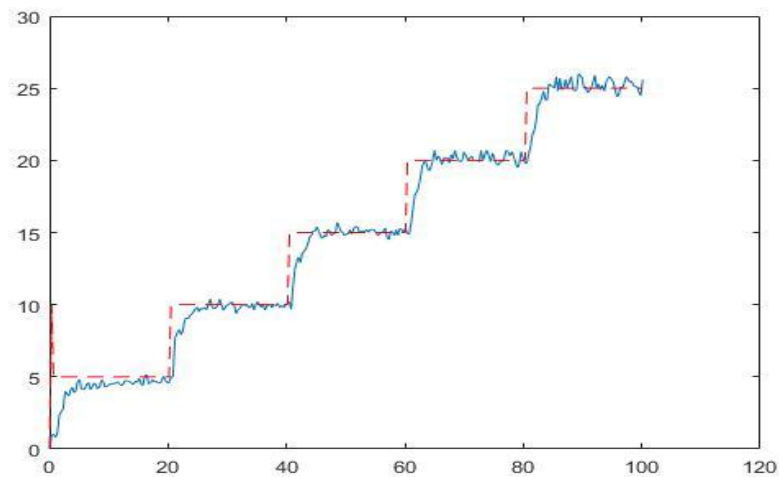
5.1 Tanque simples

Depois de serem realizados diversos testes, foram obtidos alguns resultados de acordo com o que foi proposto para tal experimento. Como já mencionado anteriormente, é necessário que sejam calculados os índices Kp, Ki e Kd.

Para o tanque simples foram feitos dois tipos de testes. Em um dos testes, foram utilizados os valores dos índices calculados pelo método de Wang–Juang–Chan, sem

ajuste fino. Os valores para esse teste foram: $K_p=0.79283$, $K_i=0.0165$ e $K_d=0.0001$. Primeiramente, com base nesses dados foi feito um controle para cinco níveis (5cm, 10cm, 15cm, 20cm e 25cm) com um tempo total de 100 segundos (20 segundos para cada nível). Na figura abaixo é visto como se comportou a estabilização para cada nível.

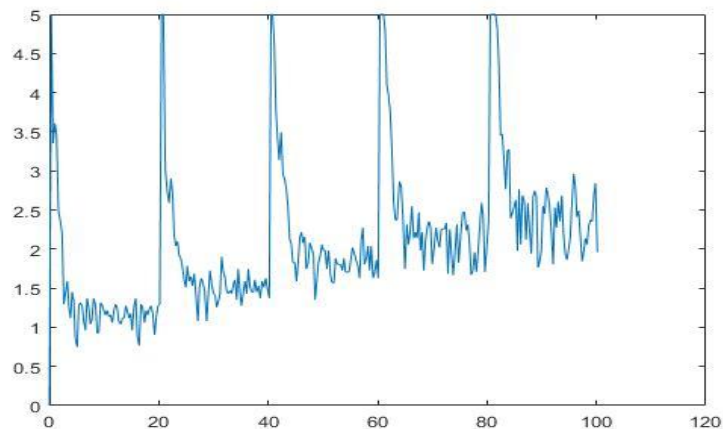
FIGURA 30: Comportamento tanque simples (1º teste).



Fonte: Autoria própria.

Já o gráfico do comportamento da tensão na bomba enquanto enchia o tanque, ficou da seguinte forma:

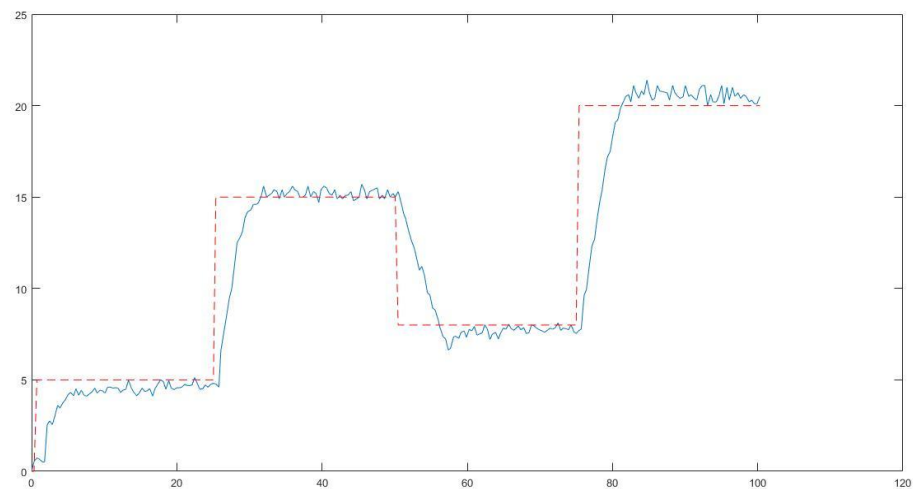
FIGURA 31: Comportamento da tensão na bomba.



Fonte: Autoria própria.

Logo após esse teste, foi feita uma alternância nos valores de setpoint, para se observar como o pid se comporta em valores alternados. O setpoint ajustado foi em 5cm, depois em 15cm, descendo para 8cm e, por fim subindo para 20cm. Foi utilizado o mesmo intervalo de tempo do teste anterior de 100 segundos. Na figura abaixo é possível ver como o gráfico se comportou para se estabilizar em cada nível escolhido.

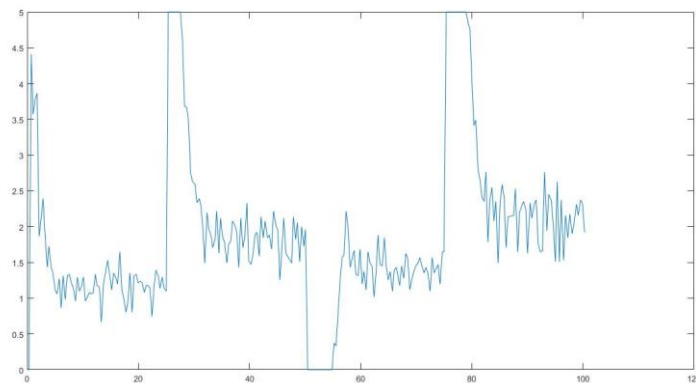
FIGURA 30: Comportamento tanque simples (2º teste).



Fonte: Autoria própria.

Assim, foi gerado também um gráfico de tensão na bomba nesse tipo de teste como pode ser visto na figura abaixo:

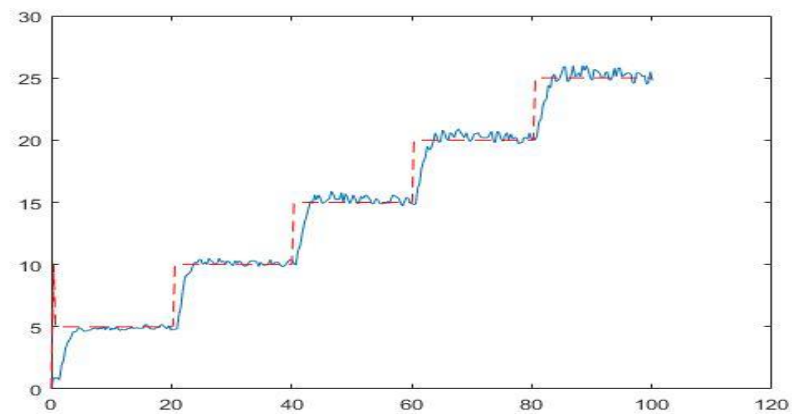
FIGURA 31: Comportamento da tensão na bomba.



Fonte: Autoria própria.

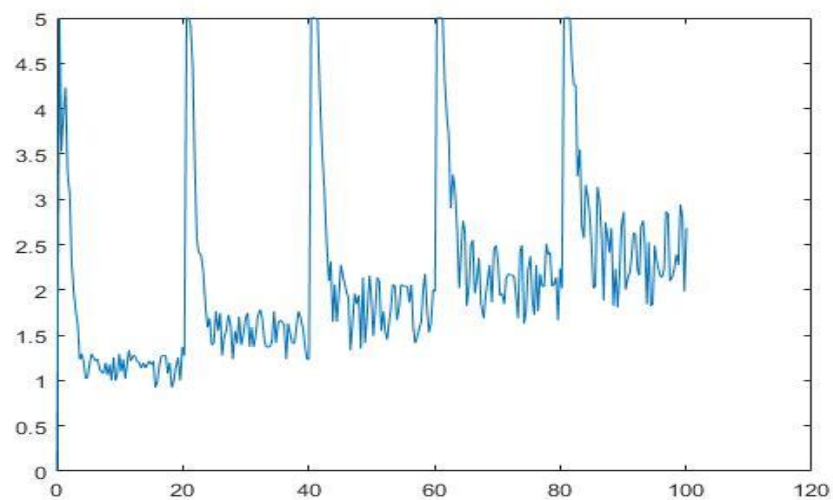
O outro teste para esse tanque, foi feito com um ajuste fino dos valores de K_p , K_i e K_d . Os índices utilizados foram: $K_p=0.846$, $K_i=0.028$ e $K_d=0.07$. Esse teste foi feito utilizando os mesmos níveis e o mesmo intervalo de tempo para que pudesse ser feita uma comparação de como os gráficos iriam se comportar. Nas próximas duas imagens abaixo é mostrado como o gráfico em seus níveis escolhidos e, posteriormente, o gráfico da tensão na bomba.

FIGURA 32: Comportamento gráfico com ajuste fino.



Fonte: Autoria própria.

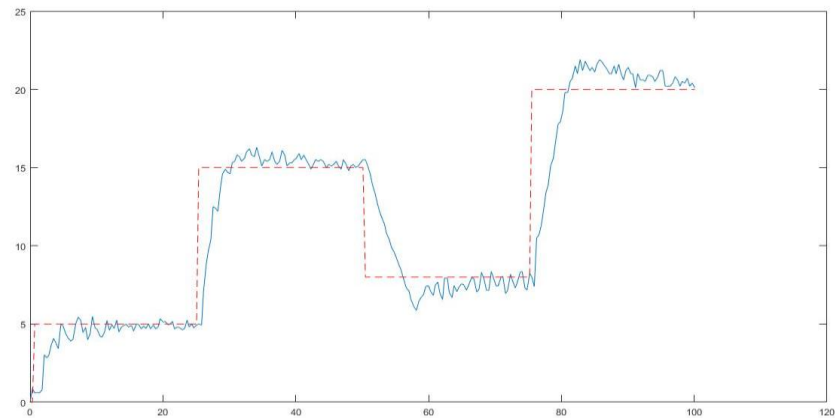
FIGURA 33: Comportamento da tensão na bomba com ajuste fino.



Fonte: Autoria própria.

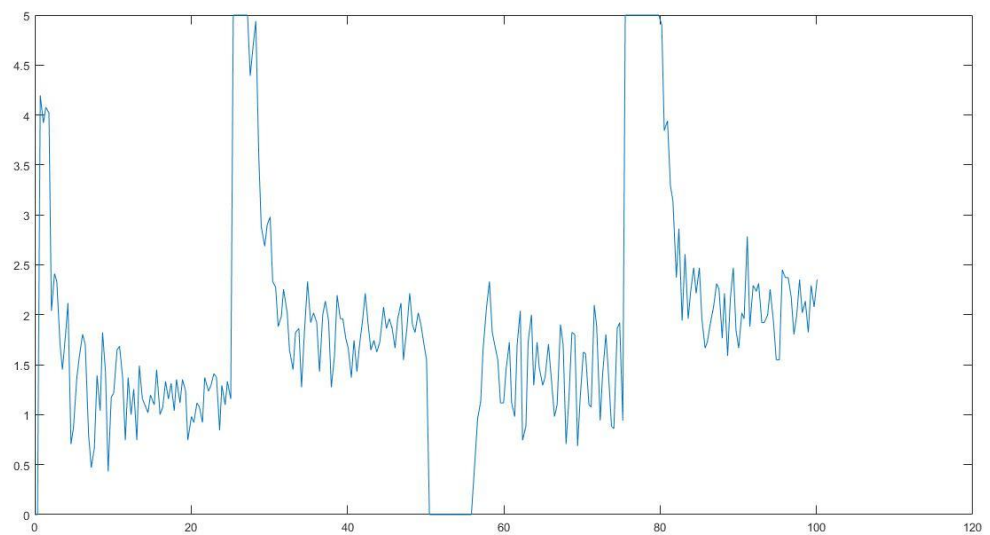
Seguindo a mesma metodologia, outro teste também foi feito com a alternância nos valores de setpoint. Assim, nas duas seguintes figuras, é mostrada o gráfico da estabilização para cada nível e de como a tensão enviada para a bomba de comporta.

FIGURA 34: Comportamento para teste alternado com ajuste fino.



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 35: Comportamento na bomba para teste alternado com ajuste fino



Fonte: Autoria própria.

Também foram extraídos também os índices de desempenho para o teste variado e para o alternado, utilizando os índices de K_p , K_i e K_d dos testes com ajuste fino. Nas figuras abaixo segue índices de desempenho para cada teste.

FIGURA 36: Índice de desempenho para teste variado.

```
Nivel do tanque: 25.8
Nivel de referência: 25
Tensão na Bomba: 5.1765
Tempo(s): 100.118
Índice de Desempenho: 3.4272
```

Fonte: Autoria própria.

FIGURA 36: Índice de desempenho para teste alternado.

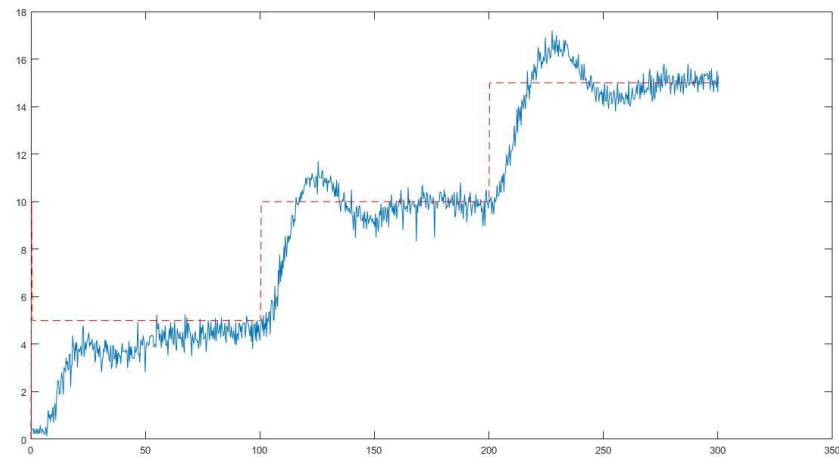
```
Nivel do tanque: 20.1
Nivel de referência: 20
Tensão na Bomba: 7.0588
Tempo(s): 100.0899
Índice de Desempenho: 5.38
```

Fonte: Autoria própria.

5.2 Tanque acoplados

Seguindo os mesmos procedimentos do tanque simples, no tanque acoplado também foi feito dois testes, verificando como o gráfico se comportaria de acordo como a mudança de nível desejado. Primeiramente, foi feito um teste em “escada” com o controle para 3 níveis (5cm, 10cm e 15cm). Foi utilizado um intervalo de tempo total de 300 segundos (5 minutos), sendo 100 segundos para cada nível. Os índices utilizados foram: $K_p=0.428706$, $K_i=0.002478$ e $K_d=0.001$ Na imagem abaixo pode-se ser visto como foi o desempenho de estabilidade graficamente para cada nível.

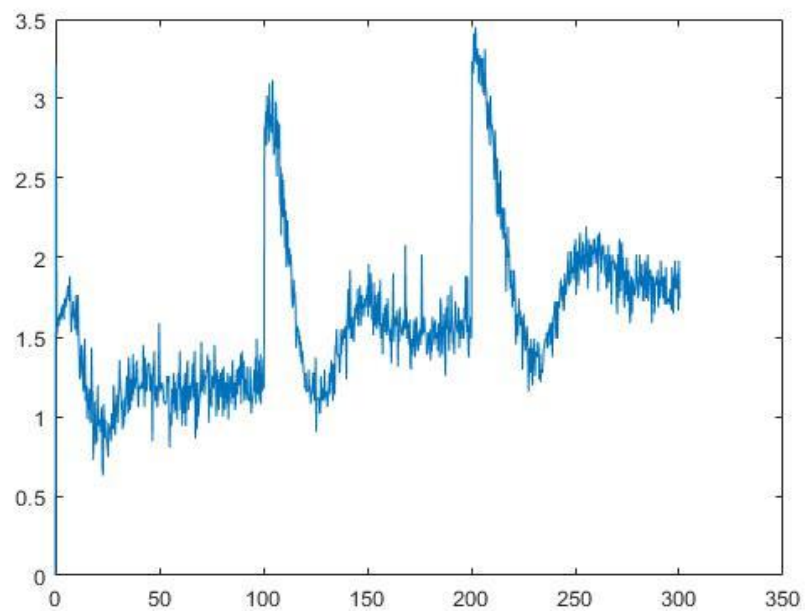
FIGURA 37: Comportamento do Controle para tanques acoplados.



Fonte: Autoria própria.

Também foi feita a análise de como seria a tensão na bomba. A figura abaixo mostra como a variação de tensão na bomba.

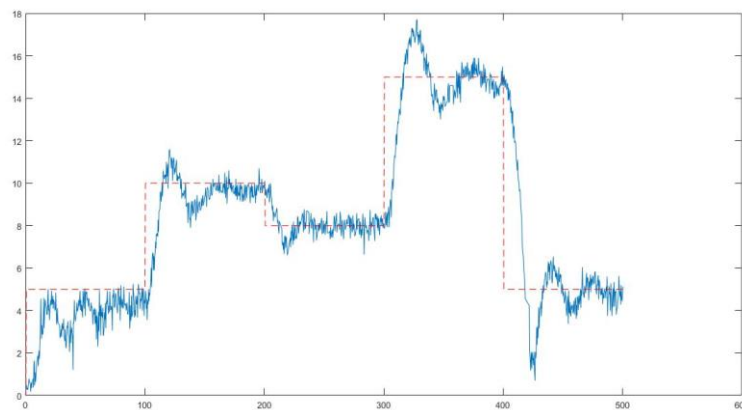
FIGURA 38: Variação tensão na bomba para tanques acoplados



Fonte: Autoria própria.

Outro teste realizado para os tanques acoplados, assim como no simples, foi o teste alternando o nível desejado do tanque. Para tal teste, o nível desejado começou em 5cm, posteriormente subiu para 10cm, depois desceu para 8cm, logo após subiu para 15cm e, por fim, baixou para 5cm. É muito nítida a presença de um overshoot na estabilidade de certos níveis. Foi percebido que quanto maior a diferença entre os níveis, maior seria o overshoot. O intervalo de tempo utilizado foi de 500 segundos (100 segundos para cada nível). A figura abaixo mostra o comportamento gráfico da sua estabilidade.

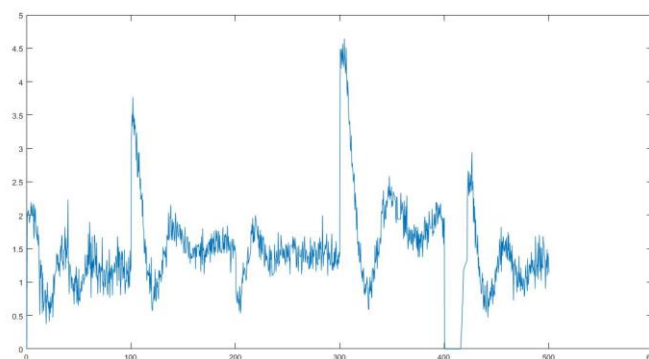
FIGURA 38: Estabilidade gráfica para níveis alternados



Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, foi realizado a análise do comportamento da tensão, como segue na imagem abaixo:

FIGURA 39: Tensão na bomba para níveis alternados



Fonte: Autoria própria.

Foi realizada também uma análise do índice de desempenho do sistema para o controle de tanques no primeiro teste (teste em “escada”). Segue abaixo uma imagem explicitando tal índice.

FIGURA 40: Índice de desempenho

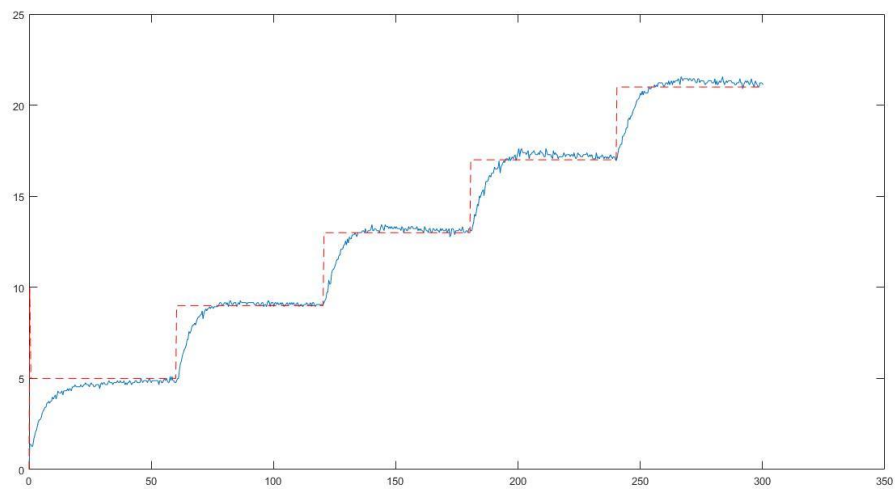
```
Nivel do tanque: 15.3  
Nivel de referência: 15  
Tensão na Bomba: 5.2353  
Tempo(s): 300.1922  
Índice de Desempenho: 2.7778
```

Fonte: Autoria própria.

5.3 Tanque trapezoidal

Como já citado anteriormente, foram realizados experimentos para o tanque trapezoidal. Seguindo o mesmo roteiro dos outros tanques do kit didático da QUANSAR, foram realizados dois testes. Um teste ascendente e outro em níveis alternados. Para o teste ascendente, foram usados 5 níveis diferentes (5cm, 9cm, 13cm, 17cm e 21cm). Foi colocado um intervalo de tempo total de 300 segundos. O valor de K_p , K_i e K_d foi determinado utilizando os valores do tanque simples sendo feito apenas um ajuste fino, pois como visualizado na figura de comportamento do sensor, o sistema é praticamente linear. Os valores utilizados foram $K_p=0.846$, $K_d=0.008$ e $K_i=0$. A estabilidade gráfica para cada nível segue na figura abaixo.

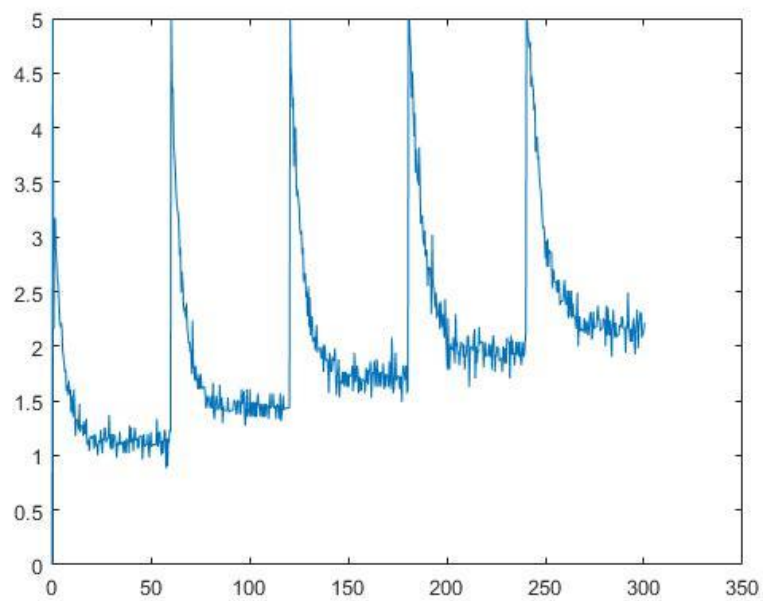
FIGURA 41: Comportamento do Controle para tanque trapezoidal.



Fonte: Autoria própria.

Já na figura abaixo, é mostrada como foi o comportamento da tensão na bomba para os níveis ascendentes.

FIGURA 42: Tensão na bomba para os níveis ascendentes.



Fonte: Autoria própria.

Foram feitos os registros para essa prática para mostrar como o nível real do tanque está condizente com os dados obtidos através do software. Isso é possível ser visualizado nas próximas 5 figuras abaixo (uma figura para cada nível).

FIGURA 43: Nível 5cm para tanque trapezoidal



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 44: Nível 9cm para tanque trapezoidal



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 45: Nível 13cm para tanque trapezoidal



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 46: Nível 17cm para tanque trapezoidal

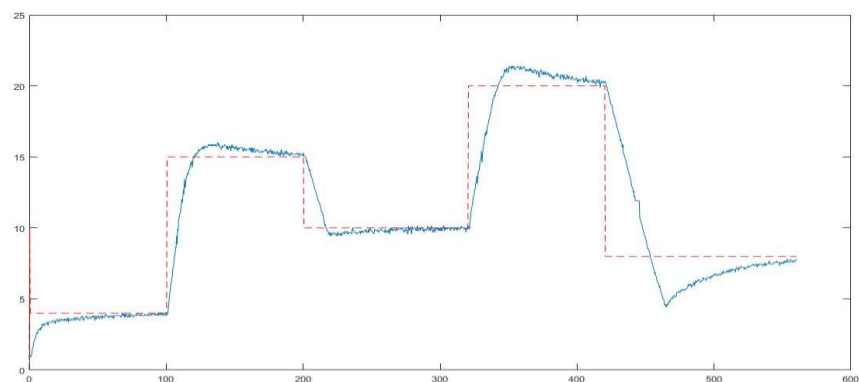


Fonte: Autoria própria.

FIGURA 47: Nível 21cm para tanque trapezoidal

Fonte: Autoria própria.

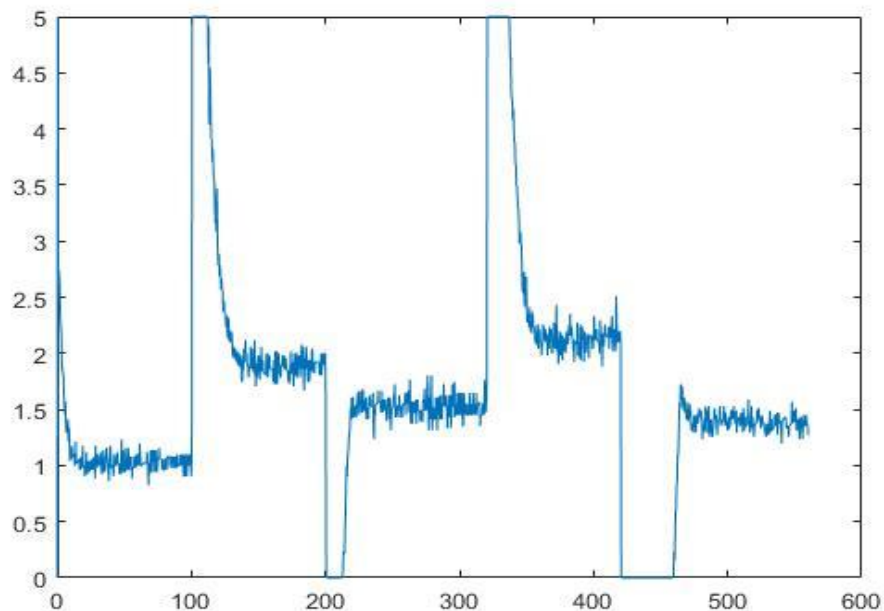
Já o teste para o teste com a alternância de níveis do tanque trapezoidal, foram utilizados 5 níveis diferentes (4cm, 15cm, 10cm, 20cm e 8cm). Foi percebido também que quanto maior a diferença de nível, maior será o overshoot, assim como o sistema para tanques acoplados. Foi determinado um intervalo de tempo total de 560 segundos. Na figura abaixo é mostrado o comportamento gráfico do sistema.

FIGURA 48: Teste de alternância de nível para tanque trapezoidal.

Fonte: Autoria própria.

Já o gráfico de comportamento da tensão na bomba está na figura abaixo.

FIGURA 49: Tensão na bomba para tanque trapezoidal.



Fonte: Autoria própria.

Foi também exibido o índice de desempenho do sistema. A figura abaixo mostra tal índice que foi extraído através do MATLAB.

FIGURA 50: Índice de desempenho do tanque trapezoidal.

```
Nível de referência: 21
Tensão na Bomba: 6.6471
Tempo(s): 300.2347
Índice de Desempenho: 3.1347
```

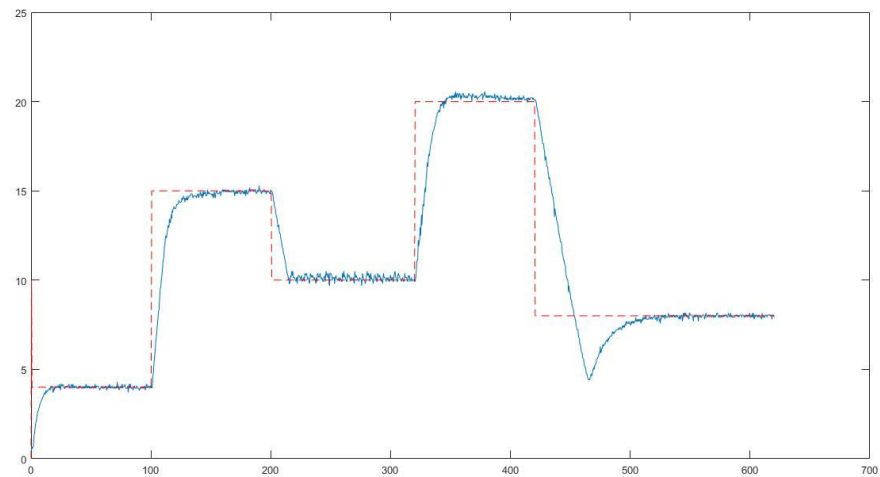
Fonte: Autoria própria.

5.3.1 PID escalonado

O teste do PID escalonado consiste em um teste muito parecido com os outros. A única diferença é que para cada nível que foi feita a análise, foi calculado os valores de K_p , K_i e K_d , os valores utilizados podem ser visualizados no ANEXO V. O teste foi feito da com os níveis alternados com alturas de 4cm, depois 15 cm, posteriormente desceu para 10cm, subiu para 20cm e baixou para 8 cm. Foi colocado um intervalo

de tempo de 620 segundos. Foi percebido por essa técnica que o overshoot foi relativamente diminuído. E que também a estabilidade da tensão nos níveis desejados deu uma melhorada. Assim, a figura abaixo ilustra o comportamento do gráfico para esse tipo de teste.

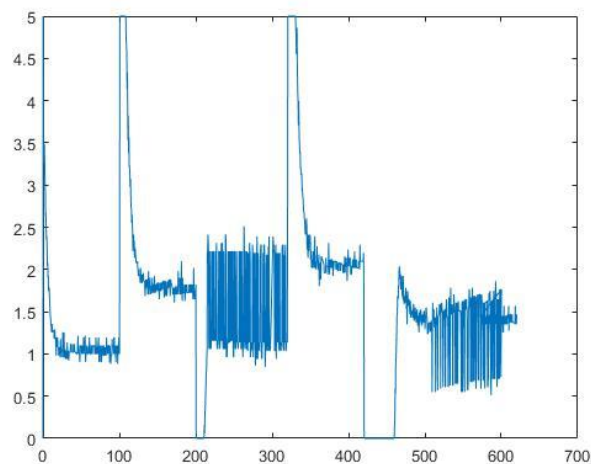
FIGURA 51: Controle de nível para PID escalonado



Fonte: Autoria própria.

Na imagem abaixo é mostrado o comportamento de tensão na bomba quando foi implementado o PID escalonado.

FIGURA 52: Comportamento na bomba para PID escalonado



Fonte: Autoria própria.

Foi também verificado que índice de desempenho para tal teste foi bastante satisfatório, como pode-se ser visto na figura abaixo.

FIGURA 53: Índice de desempenho PID escalonado

```
Nível do tanque: 7.8088  
Nível de referência: 8  
Tensão na Bomba: 5.2941  
Tempo(s): 600.2875  
Índice de Desempenho: 4.2546
```

Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÕES

Contudo, depois de um grande empenho, estudos e testes, foi visto que o controle de um sistema de tanque é extremamente viável, principalmente para ser aplicado tais técnicas na indústria. E não apenas se restringir ao espaço experimental e laboratorial. Foram exploradas técnicas que já eram de nosso conhecimento, outras foram adquiridas no decorrer dessa atividade. Aprendizados esses que vem para somar. Em relação às todas as análises feitas, foi de extrema importância os índices encontrados, e todos foram de acordo com a literatura que foi pesquisada. Nenhum dado foi em “sentido oposto” ao que foi tomado como embasamento. Assim, foi visto que todos os resultados são pertinentes, pois, com algumas ferramentas que foram utilizadas, pode-se expandir para outros para outros tipos de aplicações que não sejam apenas para sistemas de tanques.

ANEXO I – CÓDIGO DO ARDUINO

ANEXO II – CÓDIGO DO TANQUE SIMPLES

ANEXO III – CÓDIGO DO TANQUE ACOPLADO

ANEXO IV – CÓDIGO DO TANQUE TRAPEZOIDAL

ANEXO V – CÓDIGO DO PID ESCALONADO PARA O TANQUE TRAPEZOIDAL

REFERÊNCIAS

ASTRÖM, Karl; HÄGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. Usa: Instrument Society Of America, 1995.

FADALI, M. Sami; VISIOLI, Antonio. **Digital Control Engineering: Analysis and Design**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2013.

LOVE, Jonathan. **Process Automation Handbook: A Guide to Theory and Practice**. London: Springer, 2007.

OGATA, Katsuhiko. **Discrete-Time Control Systems**. 2. ed. Minnesota: Prentice-hall, 1995.

PHILIPS, Charles L.; NAGLE, H. Troy. **Digital Control System: Analysis and Design**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

XUE, Dingyü; CHEN, Yangquan; ATHERTON, Derek P.. **Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB**. Philadelphia: Siam, 2007.

