

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU

GABRIEL SIMÕES COELHO DE CAMPOS

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE DE
NÍVEL DE 4 TANQUES, UTILIZANDO PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS
NIUSB6009, CONTROLADOR PID E SISTEMAS SUPERVISÓRIOS
PROGRAMADOS NO LABVIEW**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto
2017

GABRIEL SIMOES COELHO DE CAMPOS

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA CONTROLE DE
NÍVEL DE 4 TANQUES, UTILIZANDO PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS
NIUSB6009, CONTROLADOR PID E SISTEMAS SUPERVISÓRIOS
PROGRAMADOS NO LABVIEW**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: JOÃO CARLOS VILELA DE CASTRO

Co-orientador: JOSÉ ALBERTO NAVES COCOTA JUNIOR

Ouro Preto

2017

C198d Campos, Gabriel S. C.
Desenvolvimento de bancada didática para controle de nível de 4 tanques, utilizando placa de aquisição de dados NIUSB6009, controlador PID e sistemas supervisórios programados no LabVIEW [manuscrito] / Gabriel S. C Campos. - 2017.

49f.: il.: grafs; tabs.

Orientador: Prof. MSc. João Carlos V. de Castro.

Coorientador: Prof. MSc. José Alberto N Cocota Jr.

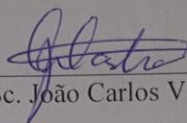
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. LabVIEW. 2. Controladores PID. I. Castro, João Carlos V. de. II. Cocota Jr, José Alberto N. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

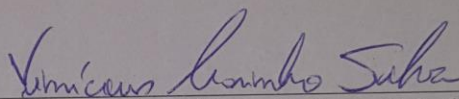
Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

CDU: 681.5

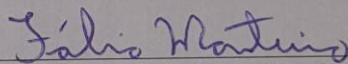
Monografia defendida e aprovada, em 25 de agosto de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. M. Sc. João Carlos Vilela de Castro - Orientador



Vinícius Marinho Silva – Professor Substituto Convidado



Fábio Alexandre Martins Monteiro – Professor Substituto Convidado

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda a minha família pelo apoio incondicional durante todo esse período.

À minha mãe, em especial, que trabalhou muito para me manter somente nos estudos durante um bom tempo.

À UFSJ e UFOP, duas grandes Universidades que me proporcionaram o melhor ambiente de estudo.

À todos os amigos de Ouro Branco e Ouro preto, em especial ao pessoal da RepúblicaCajado.

RESUMO

A bancada de controle de nível de 2 ou 4 tanques é bastante interessante para o curso de Engenharia de Controle e Automação, pelo fato de envolver diversas áreas de ensino na busca do resultado final, que seria o controle do nível de água em algum, ou em todos os tanques. Nesse trabalho vamos discutir a experiência educacional do projeto e desenvolvimento de um sistema de controle de nível de tanques de baixo custo. O protótipo foi desenvolvido utilizando tanques de acrílico com sensores piezo resistivos, motobombas, placa de aquisição de dados NI, módulo PWM, fonte e computador equipado com o instrumento virtual LabVIEW. Para alcançar os resultados desejados, foi programado um controlador PID com um sistema supervisório no LabVIEW, que atingiu o objetivo de controlar o nível de água nos tanques desejados. A bancada didática pronta, torna-se, portanto, um forte instrumento de ensino para os futuros alunos do curso de Engenharia de Controle e Automação da UFOP.

ABSTRACT

The 2 or 4 tanks level control bench is very interesting for the course of Control Engineering and Automation, because it involves several teaching areas in search of the final result, that is the control of water in some or in all tanks. In this work we will discuss an educational experience of the design and development of a low cost control system. The prototype was developed using acrylic tanks with piezo resistive sensors, motor pumps, NI data acquisition board, PWM module, power source and a computer equipped with the LabVIEW virtual instrument. To achieve the desired results, a PID controller and a supervisory system has been programmed in the LabVIEW. The ready didactic bench, therefore, becomes a strong teaching instrument for the future students of the Control Engineering and Automation course at UFOP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada.....	19
Figura 2.2: Sistema de malha fechada com distúrbio e ruído.....	19
Figura 2.3: Resposta típica de um sistema PID de malha fechada.....	20
Figura 2.4: Resposta de um loop de um sistema de malha fechada com deadtime.....	21
Figura 2.5: Diagrama de blocos de um algoritmo de controle PID.....	23
Figura 2.6: Representação gráfica da função de cada ganho no controlador PID.....	24
Figura 2.7: Placa de aquisição de dados NIUSB6009.....	25
Figura 2.8: Informações técnicas da placa NIUSB6009.....	26
Figura 3.1: Processo de quatro tanques.....	27
Figura 3.2: Configuração adotada para sistema de dois tanques.....	28
Figura 3.3: Configuração adotada para sistema de quatro tanques.....	28
Figura 3.4: Sensor de pressão piezoresistivo.....	29
Figura 3.5: Diagrama esquemático do módulo de potência.....	29
Figura 3.6: Supervisório com controle PID desenvolvido.....	31
Figura 3.7: Código em diagrama blocos para resposta ao degrau do sistema real.....	33
Figura 3.8: Resposta ao degrau do sistema real.....	33
Figura 3.9: Reta tangente ao ponto de declividade.....	34
Figura 3.10: Reta tangente ao ponto de declividade no sistema real.....	35
Figura 3.11: Tabela PID Ziegler Nichols.....	35
Figura 3.12: Configuração da VI “Daq Assistant”.....	36
Figura 3.13: Configuração do filtro passa baixa no LabVIEW.....	37
Figura 3.14: Leitura dos níveis reais, tratamento e semáforos no LabVIEW.....	38
Figura 3.15: Diagrama de blocos do controlador PID desenvolvido.....	39
Figura 3.16: Período de amostragem “dt”.....	40
Figura 3.17: Tratamento do limite para a tensão no motor.....	40
Figura 4.1: Sinal de controle.....	42
Figura 4.2: Tensão no motor.....	42
Figura 4.3: Sinal do ganho proporcional.....	43
Figura 4.4: Sinal do ganho integrativo.....	43
Figura 4.5: Sinal do ganho derivativo.....	43
Figura 4.6: Nível medido do tanque 1.....	44

Figura 4.7: Nível medido do tanque 2.....	44
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	<i>Controlador Lógico programável</i>
DAQ	<i>Data aquisition</i>
GUIDE	<i>Graphical User Interface Development Environment</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PI	<i>Proporcional-Integral</i>
PID	<i>Proporcional-Integral-Derivativo</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
SISO	<i>Single Input, Single Output</i>
UFOP	<i>Universidade Federal de Ouro Preto</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VI	<i>Virtual Input</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\int$	Integral
d/dt	Derivada em relação ao tempo
dt	período de amostragem
Gnd	Terra
K_c	ganho proporcional
K_d	ganho derivativo
K_i	ganho integral
K_p	ganho proporcional
LC	Controlador de nível
LT	Sensor de nível
T_d	tempo derivativo
T_i	tempo integral
V	Volts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo Geral	174
1.2 Objetivos Específicos	174
1.3 Justificativa do Trabalho	184
1.4 Metodologia Utilizada	185
1.5 Estrutura do Trabalho	185
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Importância do controle de processos na engenharia de controle e automação	17
2.2 O controle de nível	17
2.3 O controle realimentado	18
2.3.1 Definição das Terminologias	19
2.3.2 O Controlador Proporcional Integral-Derivativo	22
2.3.3 PID Tuning	23
2.4 Dispositivo de aquisição de dados NIUSB6009	25
3 DESENVOLVIMENTO.....	27
3.1 Descrição da bancada didática.....	27
3.1.1 Possíveis configurações da bancada didática	30
3.2 Interface com usuário – Supervisório	30
3.3 Projeto do controlador PID.....	32
3.4 Implementação do controlador – Ambiente de projeto	36
4 RESULTADOS	41
5 CONCLUSÕES FINAIS	45

1 INTRODUÇÃO

O curso de Engenharia de Controle e Automação foi criado, principalmente, para suprir a demanda de profissionais qualificados na área de sistemas automáticos na indústria. A qualidade da formação desses profissionais, depende da qualidade do ensino que lhes foi fornecido, tanto na teoria quanto na prática.

Neste contexto, são necessários laboratórios, equipamentos e bancadas didáticas para realização de experimentos que auxiliem o aprendizado dos estudantes. Na área de controle e automação existem diversas bancadas didáticas desenvolvidas por empresas do ramo. Uma delas é a bancada de controle de nível de 2 ou 4 tanques. Este tipo de bancada é bastante interessante para o curso, pelo fato de envolver diversas áreas de ensino na busca do resultado final, que seria o controle do nível de água em algum, ou em todos os tanques.

No mercado mundial destacam-se algumas marcas que fornecem bancadas didáticas nesta área, entre elas está a Quanser que oferece uma bancada com 2 tanques acoplados, configurando um sistema SISO, portanto com uma unidade adicional pode-se configurar um sistema MIMO, com 4 tanques acoplados. Este dispositivo é de excelente qualidade, porém o seu preço é exorbitante, além da utilização de hardware e software ser bastante restrita. Diante destes fatos, sentiu-se a necessidade de se construir uma bancada didática para uso no curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto.

Tal plataforma foi inicialmente desenvolvida utilizando O CLP Versa-Max® conectado ao MatLab, que funcionou muito bem, mas os alunos sempre ficavam limitados a este software e hardware. Por este motivo, viu-se também a necessidade de desenvolver a bancada utilizando o software LabVIEW e a placa de aquisição de dados NIUSB6009, ambos produzidos pela National Instruments – NI.

O resultado deste trabalho é mais uma ferramenta com a qual os futuros alunos de Engenharia de Controle e Automação da UFOP poderão contar, tendo, a partir desta bancada um suporte para diversas disciplinas, não só utilizando Matlab e o CLP Versa-Max® mas também o LabVIEW e placa de aquisição de dados NI.

Este trabalho se torna, portanto, determinante para a melhoria da formação dos futuros Engenheiros de Controle e Automação desta conceituada Universidade, na medida

em que estarão mais preparados e confiantes para o concorrido mercado de trabalho que os espera.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo geral de desenvolver uma bancada didática para controle de nível de 4 tanques, utilizando uma placa de aquisição de dados NIUSB6009, controlador PID e sistemas supervisórios programados no LabVIEW.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- Adquirir dados dos sensores através da placa NIUSB6009
- Desenvolvimento de semáforos para a aquisição de dados de diferentes sensores pela mesma placa.
- Desenvolver algoritmo PID matematicamente no LabVIEW
- Desenvolver o Sistema Supervisório no LabVIEW

1.3 Justificativa do trabalho

A bancada didática para controle de nível de 4 tanques aqui desenvolvida, oferece para os alunos grande praticidade no aprendizado de diversas matérias, tanto para controle, quanto também para instrumentação, programação, modelagem de sistemas dinâmicos, acionamentos elétricos, física, entre outros.

Na busca sempre do melhor aprendizado para os alunos, o desenvolvimento desta bancada, além de ajudar os futuros alunos na prática, também fortalecem os que estão envolvidos em seu projeto, fazendo com que a aquisição de conhecimento seja ainda maior.

Além disso, caso fosse necessário a compra de um equipamento parecido já existente no mercado, o preço seria muito acima do valor gasto no desenvolvimento interno pela UFOP e ainda assim esta bancada seria de uso restrito de hardware e softwares, ao contrário do que acontece em nossa própria bancada.

1.4 Metodologia Utilizada

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica para saber se há estudos publicados na área de controle de nível multivariável, encontrou-se muito material de qualidade, mas nenhum artigo que se tratava do desenvolvimento da plataforma utilizando o LabVIEW.

A partir deste princípio, foi resolvido utilizar uma parte física da bancada já desenvolvida em semestres anteriores por alguns professores do Departamento de Engenharia de Controle e automação da UFOP, no artigo publicado “O Sistema de Controle de Nível de Tanques no Ensino de Graduação” (J. A. N. J. Cocota, P. M. B. Monteiro, L. M. Viana e L. V. Meireles). Desta maneira o reservatório de água, os sensores e o módulo PWM já estavam previamente preparados para o uso. O CLP Versa-Max foi substituído pela placa de aquisição de dados NIUSB6009, e o Matlab também foi substituído pelo LabVIEW.

O primeiro passo para o desenvolvimento do programa no LabVIEW foi a comunicação com os sensores, que foi feita através da placa de aquisição de dados NI, juntamente com a VI instalada “Daq Assistant”. Depois disso, foram realizados estudos sobre o controlador PID (proporcional integral derivativo) no LabVIEW. Pôde-se logo perceber que o caminho mais fácil para desenvolvimento deste PID seria com a VI de controle pronta fornecida por um pacote específico do programa, mas como no laboratório da UFOP não havia acesso a esta VI, foi desenvolvido um controlador PID utilizando blocos aritméticos disponíveis no LabVIEW, que funcionou muito bem.

Em seguida, com os sinais dos sensores já preparados e o controlador já pronto para ser utilizado, foi necessário a instalação de semáforos, pois a placa de aquisição de dados só conseguia ler um dado por instante, o que não permitia a leitura de 2 ou 4 tanques conforme desejado. A instalação dos semáforos resolveu o problema, fazendo com que cada sensor fosse verificado a cada instante de tempo separadamente. Ao final foi desenvolvido o sistema supervisório.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é constituído de cinco capítulos. O capítulo 1 tem o intuito de introduzir ao leitor o assunto, bem como o de expressar os objetivos e estrutura deste

trabalho. O capítulo 2 consiste na descrição da bancada, onde o leitor poderá ter melhor percepção de como foi montada a bancada, assim como as suas características físicas, sensores, motores, reservatórios, controladores e módulos. No capítulo 3 é tratado mais especificamente do dispositivo NIUSB6009, que é o responsável pela aquisição de dados da bancada, neste capítulo será apresentado um resumo completo do aparelho assim como suas características físicas, desempenho e limitações. O capítulo 4 reporta todo o desenvolvimento do controlador PID, desde a sua revisão bibliográfica teórica até a sua implementação matemática no LabVIEW. A discussão do desenvolvimento completo da plataforma é feita no capítulo 5, lá será tratado de diversos recursos utilizados ao decorrer do trabalho, tanto na programação do terminal quanto do sistema supervisor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância do controle de processos na Engenharia de Controle e Automação

Sistemas de Controle Automático de Processos ocupam um papel fundamental em vários setores da indústria, tais como fabricação de produtos, linhas de montagem automáticas, controle de ferramentas, e até mesmo no controle completo de veículos espaciais (ALVES, J. 2005).

A Engenharia de Controle e Automação é a área dentro da engenharia voltada ao controle de processos industriais e automação de processos de manufatura, utilizando-se para isso de elementos sensores, elementos atuadores, sistemas de controle, sistemas de supervisão, aquisição de dados e outros métodos que utilizem os recursos da elétrica, eletrônica, mecânica e informática.

Segundo Alves (2005), pequenas mudanças em um processo podem ter um grande impacto sobre o resultado final. As variações nas proporções, temperatura, fluxo, turbulência, e muitos outros fatores devem ser cuidadosamente controlados e consistentes para produzir o produto final desejado com o mínimo de matéria-prima e energia. A tecnologia de controle de processo é a ferramenta que permite que os fabricantes mantenham suas operações funcionando dentro dos limites especificados, além de fazer também com que possam estabelecer limites mais precisos para maximizar a rentabilidade, garantir a qualidade e a segurança do processo.

2.2 O controle de nível

O controle de nível surgiu com a necessidade de manter o nível de algum reservatório sempre nos patamares desejados, sejam esses reservatórios residenciais, industriais, de laboratórios ou de qualquer outro processo. Em ambientes industriais, além do controle de nível ser utilizado para este motivo, ele é bastante utilizado também para o arrefecimento de equipamentos, neste caso o controle permite a entrada de um líquido de menor temperatura, mantendo o resfriamento desejado, sempre respeitando o nível no patamar configurado pelo projetista (QUANSER, 2004).

As piscinas de clubes podem contar com o controle automático para manter o nível de água desejado, além de poder também levar uma quantidade desejada de água para os aquecedores, mantendo assim a temperatura sempre nos níveis configurados. O controle de nível está por toda parte, muitos processos necessitam de um controle preciso do nível de líquidos, como em indústrias químicas e laboratórios. Nestes locais, muitos processos são feitos a partir da combinação de substâncias e a proporção deve ser exata, para o sucesso da reação.

Na maioria das vezes o controle de nível utiliza a tecnologia de controle realimentado ou *feedback control*, que será discutido no próximo sub-capítulo.

2.3 O controle realimentado

Em um sistema de controle típico, a variável de processo é o parâmetro do sistema, que deve ser controlado, tal como a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), a pressão (psi), ou taxa de fluxo (litros / minuto). Um sensor é usado para medir a variável de processo e fornecer feedback ao sistema de controle. A referência, ou *set point*, é o valor desejado ou comando para a variável de processo, como por exemplo 20 cm, no caso de um sistema de controle de nível de um pequeno reservatório. Em determinados intervalos de tempo, a diferença entre a variável de processo e a referência é usada pelo algoritmo do sistema de controle (compensador), para determinar a saída desejada do atuador, que por sua vez, irá acionar o sistema (planta) (DORF, R.C., BISHOP, R.H, 2005). Por exemplo, se a variável de processo “nível” medida é de 10 cm e o setpoint de nível desejado é de 20 cm, então a saída do atuador especificada pelo algoritmo de controle pode ser uma unidade de corrente ou tensão, que irá acionar um motobomba para subir o nível do tanque. Isto é chamado de um sistema de controle em malha fechada, porque o processo de leitura dos sensores para fornecer feedback constante e o cálculo para definir a saída desejada do atuador se repete continuamente, como ilustrado na Figura 2.1.

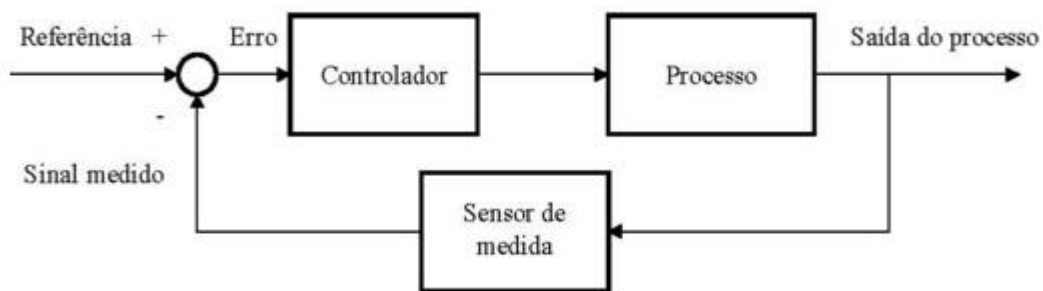


Figura 2.1: Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada.

Em muitos casos, a saída do atuador não é o único sinal que tem um efeito sobre o sistema. Por exemplo, em uma câmara de temperatura pode existir uma fonte de ar fresco que sopra em determinados instantes para dentro da câmara, o que altera a temperatura. Tal termo é referido como distúrbio. Geralmente tentamos projetar o sistema de controle para minimizar os efeitos dos distúrbios sobre a variável de processo (Figura 2.2)

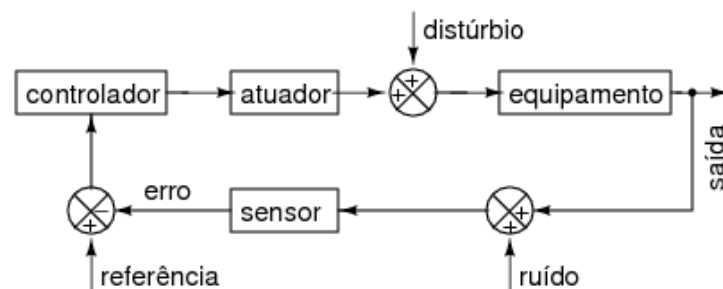


Figura 2.2: Sistema de malha fechada com distúrbio e ruído.

2.3.1 Definição das Terminologias

O projeto do controlador começa pelos requisitos de desempenho. O desempenho do sistema geralmente é determinado a partir da aplicação de uma função degrau definida como comando set point, em seguida é medida a resposta da variável de processo. Geralmente, a resposta é quantificada pelas características da onda de resposta. Os requisitos de desempenhos mais utilizados são: tempo de subida, sobressinal, tempo de acomodação, erro em regime permanente, tempo morto e período de amostragem. (DORF, R.C., BISHOP, R.H, 2005).

O tempo de subida (*Rise Time*) é uma medida da velocidade de resposta de um sistema de 2ª ordem e representa o tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do

estado estacionário, ou valor final. O Sobressinal (*Percent Overshoot*) é o valor que a variável de processo ultrapassa o valor final, expresso como uma porcentagem do valor final. Tempo de acomodação (*Settling Time*) é o tempo necessário para a variável do processo chegar dentro de uma determinada porcentagem (normalmente 5%) do valor final. Erro em regime permanente (*Steady-State Error*) é a diferença final entre as variáveis do processo e a referência (OGATA, KATSUHIKO, 2011). Note que as definições exatas dessas quantidades podem variar.

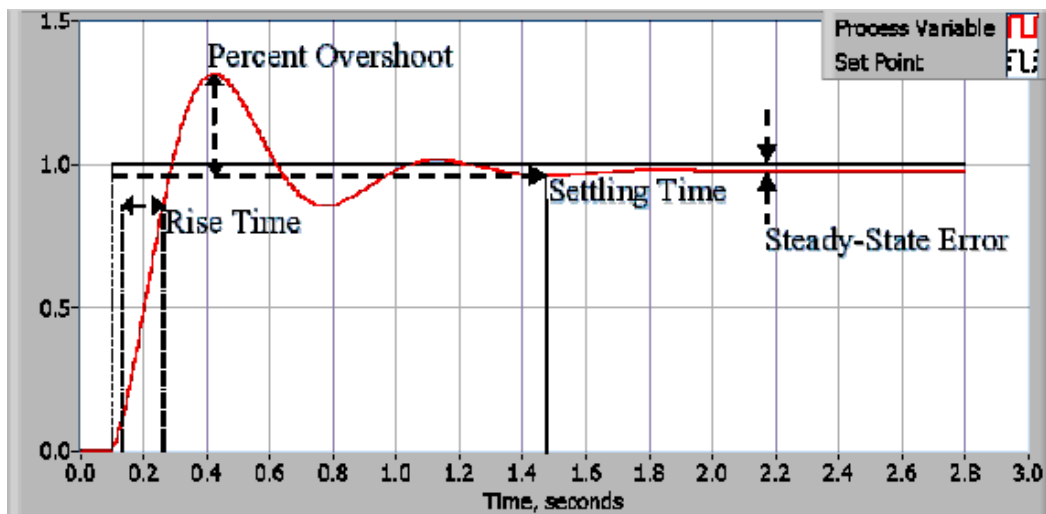


Figura 2.3: Resposta típica de um sistema PID de malha fechada.

<http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/a/12fbdcae1636.gif>

Depois de usar um ou todos os parâmetros para definir os requisitos de desempenho de um sistema de controle, é importante definir as condições de pior caso e o sistema de controle deverá atender esses requisitos de projeto. Muitas vezes, há um distúrbio no sistema que afeta a variável de processo ou a medição da variável de processo. É importante criar um sistema de controle que responda satisfatoriamente em condições de pior caso. A medida de quão bem o sistema de controle é capaz de superar os efeitos dos distúrbios é conhecida como a rejeição de distúrbios do sistema de controle ou robustez (ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. 2001).

Em alguns casos, a resposta do sistema a um sinal de controle pode mudar ao longo do tempo ou em relação a algumas variáveis. Um sistema não linear é um sistema no qual os parâmetros de controle produzem uma resposta desejada a um ponto de operação e não produzem uma resposta satisfatória em relação a outro ponto de operação. Por exemplo, uma câmara parcialmente preenchida com um líquido vai apresentar uma resposta muito

mais rápida na saída de um aquecedor do que quando estiver mais cheia deste mesmo líquido. A robustez do sistema de controle é entendida como a medida com que o sistema irá tolerar os distúrbios e as não-linearidades (ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. 2001).

Segundo Ogata (2011), alguns sistemas apresentam um comportamento indesejável chamado tempo morto ou atraso de Transporte (*deadtime*). O tempo morto (*deadtime*) é um atraso entre o momento que ocorre uma mudança da variável de processo e quando essa mudança pode ser observada. Por exemplo, se um sensor de temperatura é colocado longe de uma válvula de entrada de água fria, não será medida a mudança da temperatura imediatamente se a válvula for aberta ou fechada. Este atraso, também pode ser causado por um atuador do sistema ou por uma saída lenta, demorando para responder ao comando de controle. Por exemplo, uma válvula lenta para abrir ou fechar. Uma fonte comum de tempo morto (*deadtime*) em fábricas de produtos químicos é o atraso causado pelo fluxo do fluido através de tubulações. O período de amostragem (*Loop Cycle*) também é um parâmetro importante de um sistema de loop fechado. O período de amostragem (*Loop Cycle*) é o intervalo de tempo entre as chamadas para um algoritmo de controle. Sistemas que mudam rapidamente ou tem comportamentos complexos, exigem taxas de loop de controle mais rápidas.

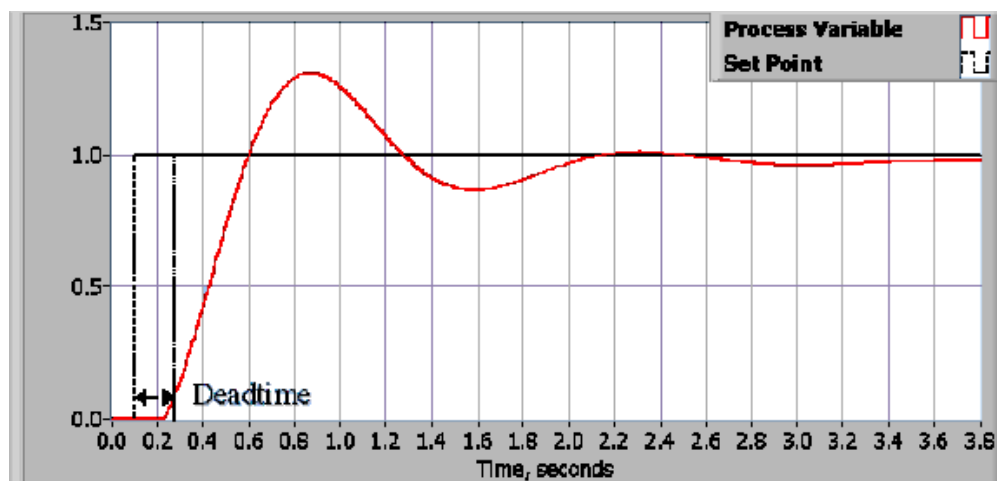


Figura 2.4: Resposta de um loop de um sistema de malha fechada com deadtime.

<http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/a/12fbdcae1637.gif>

Uma vez especificados os requisitos de desempenho, o próximo passo é analisar o sistema e projetar um controle adequado.

2.3.2 O Controlador Proporcional Integral-Derivativo

O controle PID (Proporcional Integral Derivativo) é o algoritmo de controle mais comum utilizado na indústria em todo o mundo atualmente. A popularidade dos controladores PID pode ser atribuída, em parte, ao seu desempenho relativamente robusto numa vasta gama de condições de funcionamento e, em parte, à sua simplicidade funcional, o que permite aos engenheiros projetá-los de forma simples e direta (ÅSTRÖM E HÄGGLUND, 2001).

O PID consiste em uma técnica de controle de processos que une as ações proporcional, integral e derivativa, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa (OGATA, KATSUHIKO, 2011).

Um controlador PID calcula continuamente o sinal de erro do sistema realizando a diferença entre o nível desejado (referência) e a variável de processo medida por um sensor. A ideia básica por trás deste controlador é de ajustar as variáveis de controle para diminuir o sinal de erro, sempre tentando fazer isso de forma com que o sistema nunca perca a sua estabilidade e robustez (OGATA, KATSUHIKO, 2011).

A componente proporcional depende apenas da diferença entre o ponto de ajuste e a variável de processo. Esta diferença é referida como o termo de erro. O ganho proporcional (K_c) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Por exemplo, se o termo de erro tem uma magnitude de 10, um ganho proporcional de 5 produziria uma resposta proporcional de 50. Em geral, aumentando o ganho proporcional irá aumentar a velocidade da resposta do sistema de controle. No entanto, se o ganho proporcional é muito grande, a variável de processo começará a oscilar. Se K_c é aumentado ainda mais, as oscilações ficarão maior e o sistema poderá se tornar instável (DORF, R.C., BISHOP, R.H, 2005).

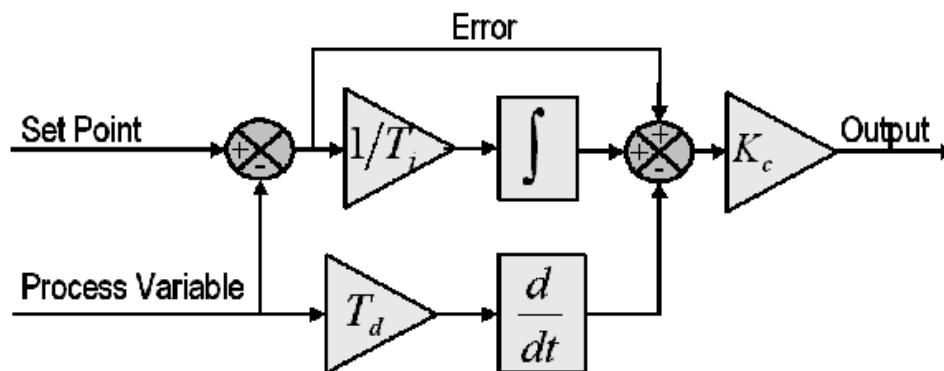


Figura 2.5: Diagrama de blocos de um algoritmo de controle PID

<http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/a/12fbdcae1638.gif>

A componente integral soma o termo de erro multiplicado ao período de amostragem ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente. A resposta integral irá aumentando ao longo do tempo a menos que o erro seja zero, portanto, o efeito é o de conduzir o erro regime permanente para zero. O erro em regime permanente (*Steady-State Error*) é a diferença final entre as variáveis do processo e a referência. Um fenômeno chamado *windup* integral ocorre quando a ação integral satura um controlador, sem que o controlador ajuste o sinal de erro para zero (DORF, R.C., BISHOP, R.H, 2005).

A componente derivativa faz com que a saída do sinal de controle diminua se a variável de processo está aumentando rapidamente. A ação derivativa é proporcional à taxa de variação da variável de processo. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (T_d) fará com que o sistema de controle reaja mais fortemente às mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utilizam o tempo derivativo (T_d) muito pequeno, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de feedback do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a derivada de resposta pode tornar o sistema de controle instável (DORF, R.C., BISHOP, R.H, 2005).

2.3.2 PID Tunning

Como o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento da bancada didática para que os alunos possam desenvolver controlares teóricos e testá-los na prática, não será discutido

aqui os diversos métodos para projeto de controlador PID além do método de Ziegler Nichols e alguns truques para melhorar o desempenho da bancada.

Os ganhos de um controlador PID, além dos métodos teóricos, podem ser obtidos ou melhorados também pelo método de tentativa e erro. Uma vez que um engenheiro entende o significado de cada parâmetro de ganho, este método torna-se relativamente fácil e bastante interessante na fixação dos estudos durante o curso.

Neste método, os termos K_i e K_d são definidos para zero e o ganho proporcional é aumentado até a saída do loop começar a oscilar. Quando se aumenta o ganho proporcional, o sistema torna-se mais rápido, mas deve-se tomar cuidado para não torná-lo instável. Uma vez que K_p foi definido para obter uma resposta rápida desejada, o termo integral é aumentado a fim de parar as oscilações. O termo integral reduz o erro de estado estacionário, mas aumenta o Sobresinal (*Overshoot*). Um certo valor de Sobresinal (*Overshoot*) é sempre necessário para um sistema rápido de modo que possa responder às mudanças imediatamente. O termo integral é novamente ajustado para atingir um mínimo erro de regime permanente. Uma vez que o K_p e K_i foram definidos para que o sistema de controle seja rápido com o regime permanente mínimo e constante, o termo derivativo é aumentado até que o loop seja aceitavelmente rápido em relação ao seu ponto de referência. Aumentar o termo derivativo diminui o Sobresinal (*Overshoot*), aumentando o ganho, mantendo a estabilidade e ainda fazendo com que o sistema seja altamente sensível ao ruído (Figura 2.6). Muitas vezes, os projetistas têm a necessidade de fazer a compensação de uma característica de um sistema de controle para melhorar outro, e assim atender às suas necessidades (BISHOP, ROBERT H, 2009).

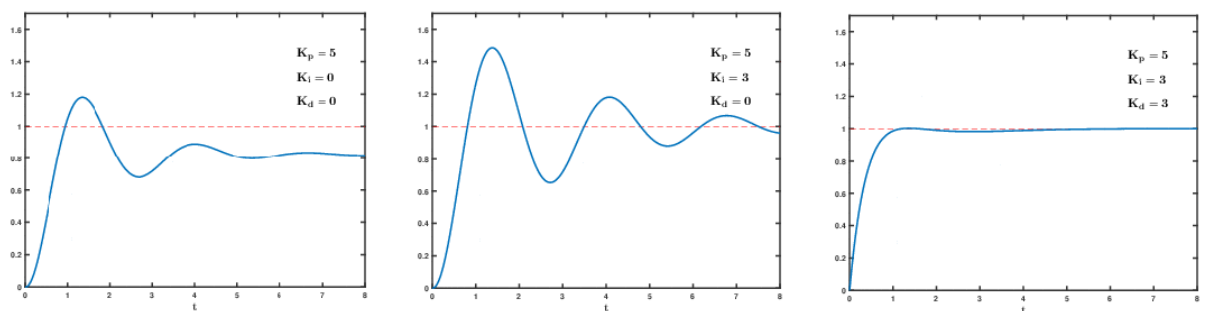


Figura 2.6: Representação gráfica da função de cada ganho no controlador PID

O método empírico de resposta ao salto de Ziegler Nichols, será explicado no capítulo 3.3 (Projeto do controlador PID).

2.4 Dispositivo de aquisição de dados NIUSB6009

A placa NIUSB6009 (Figura 2.7) foi desenvolvida pela National Instruments com o intuito de oferecer uma solução simples, barata e de fácil comunicação para aquisição de dados reais Analógico e Digital. Esta placa possui comunicação USB, utilizada para se comunicar com a plataforma virtual LabVIEW no computador. O LabVIEW comunica com o dispositivo através do *toolkit DataFX*, que foi desenvolvido pela National Instruments para solução de comunicação e desempenho de diversos produtos (KING, ROBERT H, 2011). Com esse conjunto, placa de aquisição de dados mais computador com o software LabVIEW, é possível receber e enviar sinais de controle para qualquer tipo de ambiente que se deseje controlar. Em nosso caso vamos utilizar este conjunto para receber dados dos sensores e enviar dados para as motobombas que irão controlar o nível de água dos tanques.



Figura 2.7: Placa de aquisição de dados NIUSB6009

A placa possui 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s), 2 saídas analógicas (12 bits, 150 S/s), 12 E/S digitais e contadores de 32 bits. A alimentação é feita por barramento para maior mobilidade e conectividade de sinais integrados. Podemos visualizar melhor a pinagem da placa NIUSB6009 na Figura 2.8.

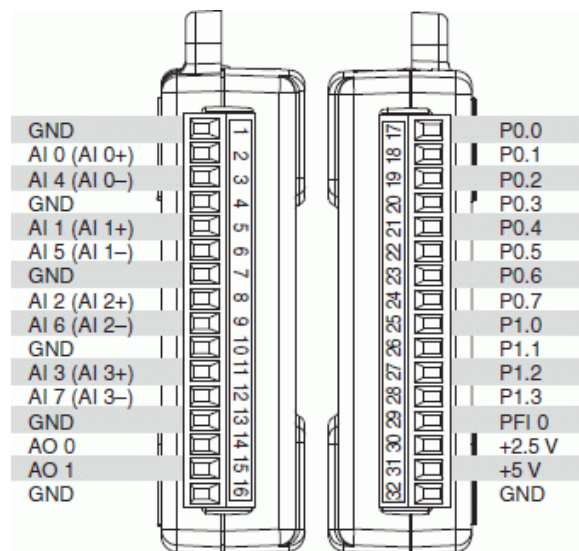


Figura 2.8: Informações técnicas da placa NIUSB6009

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Descrição da bancada didática

O processo de laboratório de quatro tanques que foi desenvolvido (Figura 3.1), possibilita a operação na configuração de dois tanques (SISO) ou de quatro tanques (MIMO), ilustrados nos diagramas esquemáticos da Figura 3.2 e figura 3.3, respectivamente. A planta consiste em duas motobombas que utilizam um único reservatório de água, além de quatro tanques com secções transversais constantes. Os quatro tanques, que foram montados na parte frontal de um painel de acrílico, encontram-se configurados de modo que o fluxo de água a partir do tanque superior possa fluir para dentro do tanque inferior. O nível da água em cada tanque é medido utilizando-se um sensor de pressão piezoresistivo situado na parte superior do tanque, (Figura 3.4). Cada bomba alimenta um par de tanques utilizando um divisor de fluxo. Os tanques podem ser configurados com diferentes diâmetros dos drenos, permitindo assim a alteração da dinâmica de cada tanque em práticas com diferentes grupos de alunos. Outros parâmetros que podem ser alterados nas práticas com os discentes, são as parcelas de fluxo direto das bombas para os tanques inferiores, resultantes dos estrangulamentos localizados nos divisores de fluxo.



Figura 3.1: Processo de quatro tanques

Os tanques foram confeccionados com tubos de PVC com diâmetro interno de 47,6mm e altura de 250mm. Na parte inferior de cada reservatório foi fixado um capcom um anel de vedação. Dessa forma, os caps poderiam ser trocados, permitindo assim a alteração dos drenos dos tanques.

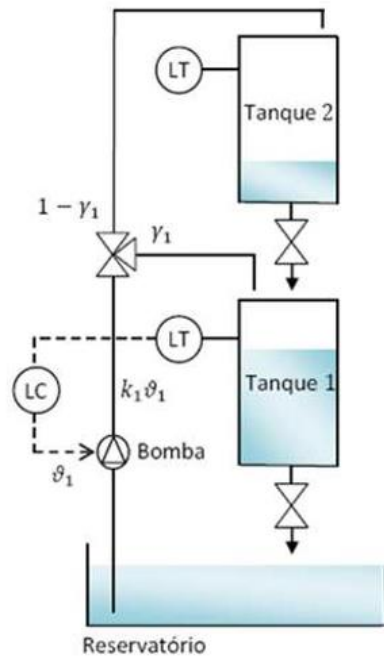


Figura 3.2: Configuração adotada para sistema de dois tanques

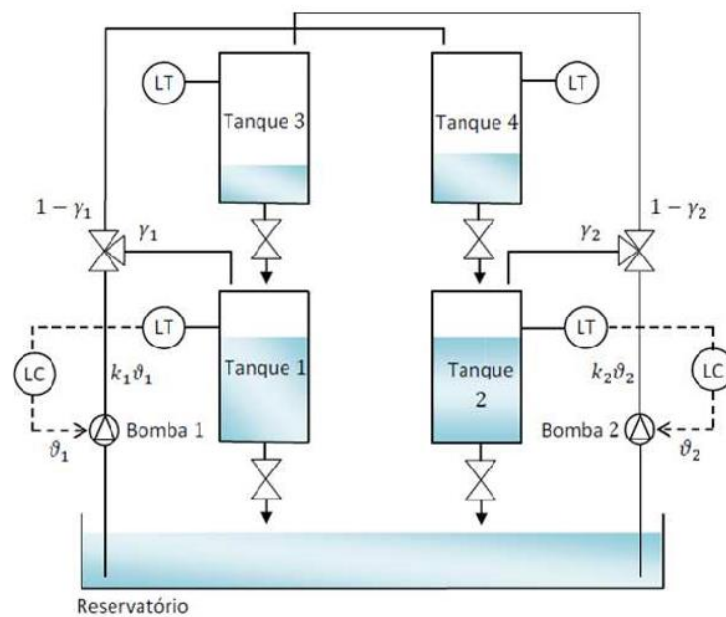


Figura 3.3: Configuração adotada para sistema de quatro tanques

Para o controle do processo, foi utilizado um computador e uma placa de aquisição de dados NIUSB6009 da National Instruments, que ficou responsável pelo envio dos sinais de controle para a planta. Esses sinais são amostrados por um módulo de potência (Figura 3.5), que aciona as bombas através de um sinal modulado por largura de pulsos (PWM).



Figura 3.4: Sensor de pressão piezoresistivo

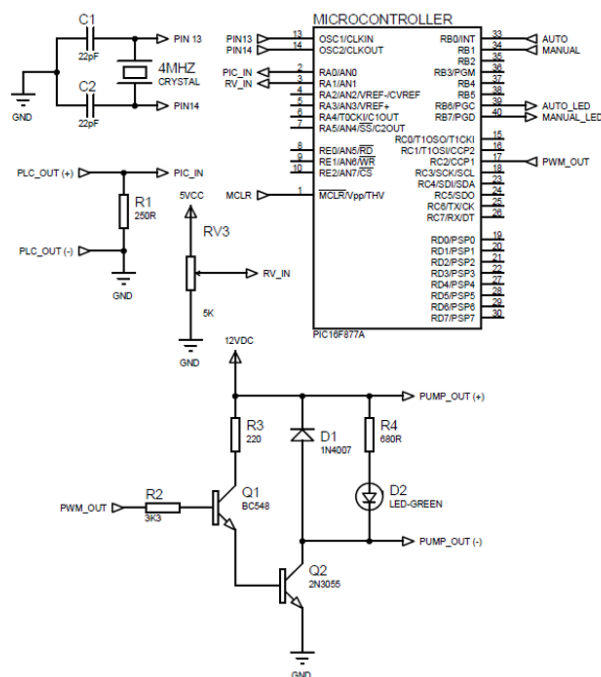


Figura 3.5: Diagrama esquemático do módulo de potência

3.1.1 Possíveis configurações da bancada didática

Existem 3 configurações possíveis para utilização dos tanques nas experiências utilizando esta bancada.

A primeira configuração consiste em um sistema de 1 entrada e 1 saída, neste caso a bomba irá alimentar apenas o tanque superior e o tanque inferior não será utilizado.

A segunda configuração consiste em um sistema de estado acoplado, onde a bomba alimenta apenas o tanque superior que por sua vez alimenta o tanque inferior através de um orifício configurável. Desta maneira este sistema terá 2 entradas e 1 saída.

A terceira configuração consiste em um sistema de estado acoplado e entrada acoplada, neste caso a motobomba irá alimentar o tanque superior e o tanque inferior, além do tanque superior também alimentar o tanque inferior através do orifício. Este sistema também possui 2 entradas e 1 saída.

Com o acréscimo de mais um par de tanques existe a possibilidade de utilizar a bancada para estudos de sistemas MIMO, neste caso seriam 4 entradas e 2 saídas disponíveis, possibilitando diversas configurações extras.

3.2 Interface com usuário – Supervisório

Conforme dito anteriormente, foi utilizado o LabVIEW 2013 para todo o desenvolvimento da plataforma, tanto para o supervisório quanto para a programação por trás da interface com o usuário. O LabVIEW permite programação utilizando os recursos gráficos através do *Express VI* e linguagem *scripts* (LARSEN, RONALD. 2009). Este capítulo apresenta os procedimentos para o desenvolvimento do supervisório utilizado na bancada.

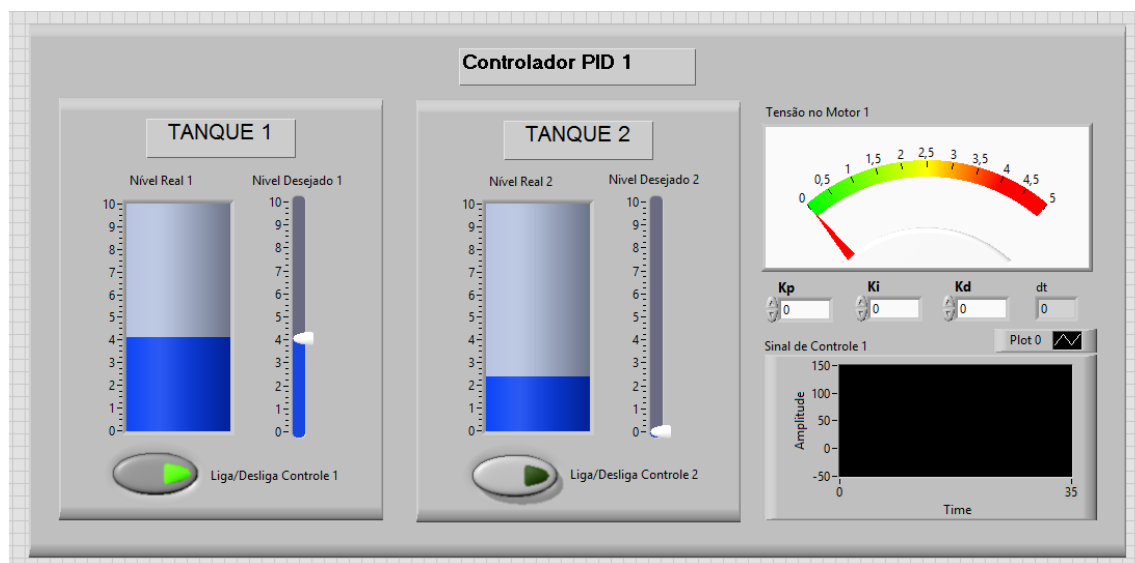


Figura 3.6: Supervisório com controle PID desenvolvido

Foi desenvolvido o supervisório do controlador PID para controle de um ou dois tanques (Figura 3.6). O “Nível Real 1” indica o nível real do tanque 1, utilizando um sensor de nível analógico instalado na bancada, este sinal foi processado pela placa de aquisição de dados NIUSB6009 e enviado para o LabVIEW, onde é tratado e mostrado em tempo real no supervisório, o mesmo acontece para o tanque 2. As linhas de programação por trás deste supervisório serão mostradas nos próximos capítulos.

O “Nível desejado”, conforme o próprio nome sugere, consiste no valor indicado pelo usuário do nível desejado de fluido no tanque, que por trás das cortinas, seria a referência (*setpoint*) do sistema de controle, o usuário pode modificar este valor enquanto o programa roda em tempo real.

Foi desenvolvido também, neste supervisório, um botão de Liga/Desliga, para o tanque 1 e para o tanque 2. Estes botões são interessantes pois possibilitam diferentes projetos utilizando a bancada didática. Vale a pena ressaltar que durante o projeto e testes na bancada, é preciso observar se o sistema é controlável ou não controlável. Em algumas situações, por exemplo, se o aluno ligar apenas o controle do tanque 2 (superior), com nível desejado de 9 e o orifício de vazão para o tanque 1 for maior do que a entrada de água do tanque 2, certamente ao chegar no nível desejado do tanque 2, o tanque 1 já terá transbordado. Aconselhamos que o padrão seja apenas controlar o tanque 1, sendo que a motobomba irá alimentar os 2 tanques, e o tanque 2 irá fluir para o tanque 1 através de um orifício configurável, esta é a configuração 3 de um sistema SISO, citada com melhores detalhes na seção 3.1.1. Outras configurações se tornam possíveis com os botões de liga e

desliga do controle de cada tanque e de acordo com as configurações das mangueiras na bancada, conforme descrito melhor no capítulo 2.

No supervisório (figura 3.6) os itens “Tensão no motor 1” e “Sinal de controle” são bem parecidos: eles demonstram a saída do sistema que está sendo aplicada diretamente ao motor. No item “Tensão no motor 1” temos uma interface mais simples onde é mostrado a tensão no motor apenas no atual instante de tempo, já no item “Sinal de controle” temos um gráfico com plano X configurável, possibilitando ver um histórico das tensões no motor durante o tempo.

Os ganhos do controlador PID podem ser configurados pelo usuário diretamente no supervisório (Figura 3.6), através dos campos “Kp”, “Ki” e “Kd”. A outra caixa de diálogo mostra o período de amostragem “dt”, que é interessante principalmente para alguém que esteja trabalhando nos códigos por trás da interface com o usuário, ou seja, no projeto do controlador.

3.3 Projeto do controlador PID

Foi utilizado neste trabalho o método empírico da resposta ao salto de Ziegler Nichols para projeto do controlador PID. Este método é baseado na resposta ao degrau do sistema em malha aberta (OGATA, KATSUHIKO, 2011). No intuito de otimizar os resultados, ao invés de obter a resposta ao degrau do modelo matemático do sistema, foi obtido a resposta ao degrau do modelo real do sistema. Para isso foi feito um pequeno programa no LabVIEW, conforme pode-se observar na Figura 3.7

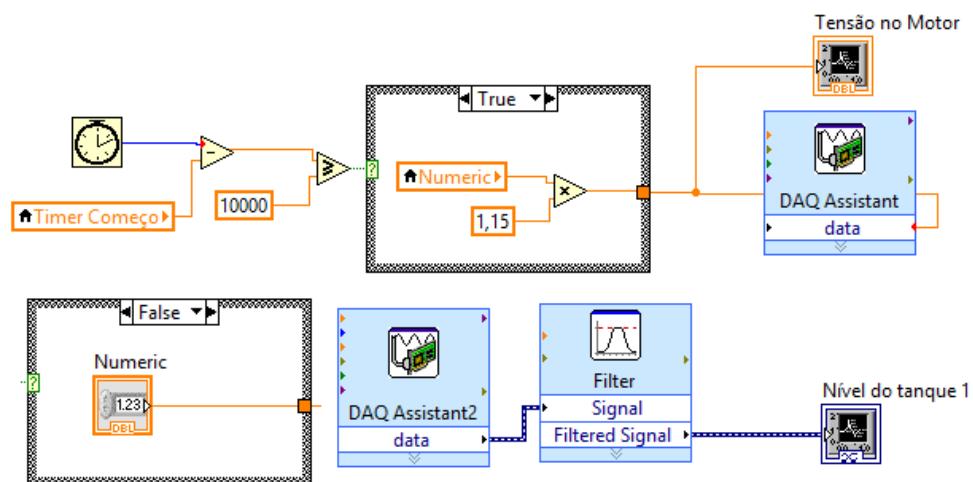


Figura 3.7: Código em daigram bloco para resposta ao degrau do sistema real

Antes de rodar o programa, é configurado o valor “*Numeric*” que será a tensão no motor até que o sistema se estabilize, este valor foi configurado para “3”. Este pequeno programa configura um tempo de 10 segundos após a estabilidade do sistema para aplicar um degrau positivo de amplitude 15% na atual tensão no motor. Além disso o programa envia as informações necessárias para o motor e verifica de 1 em 1 segundo o atual nível do tanque, que será o nosso gráfico utilizado na resposta ao degrau.

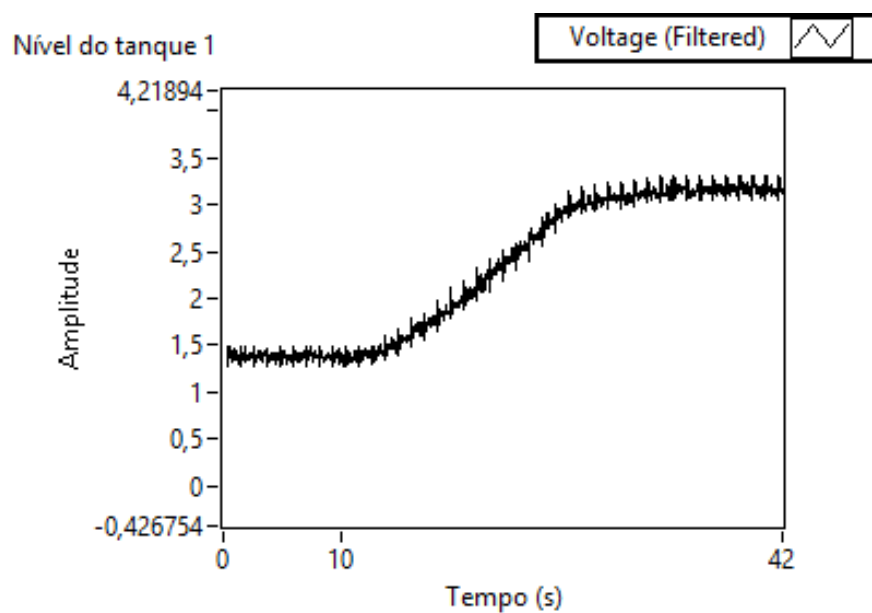


Figura 3.8: Resposta ao degrau do sistema real

A Figura 3.8 apresenta a resposta ao degrau de 15% aplicado na tensão da motobomba, logo após o sistema ter atingido regime permanente no nível do tanque de 1,4 (Figura 3.8). O método de resposta ao salto de Ziegler Nichols para obtenção dos ganhos do controlador PID, está baseado em desenhar uma reta tangente ao ponto de declividade da curva de resposta ao degrau, se esta apresentar formato de “S”, conforme representado na Figura 3.8.

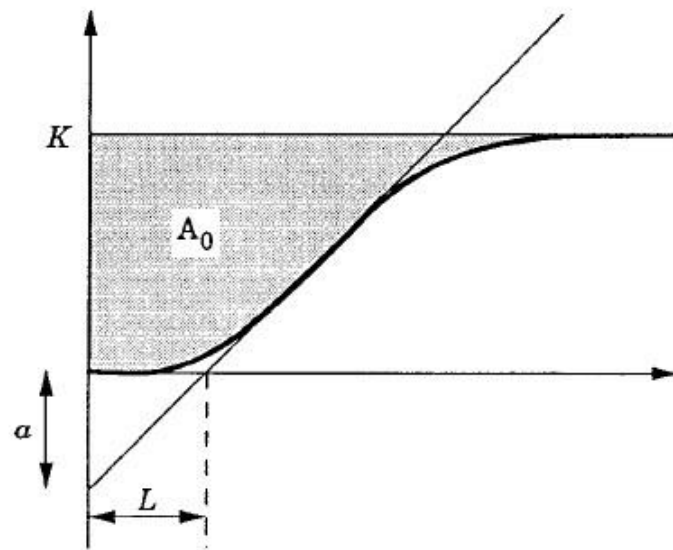


Figura 3.9: Reta tangente ao ponto de declividade

Foi utilizado portanto a resposta ao degrau unitário do sistema, simulado no LabVIEW (Figura 3.8), para desenhar a reta tangente ao ponto de declividade da curva para a obtenção dos valores de “ a ” e “ L ”, conforme representado na Figura 3.9.

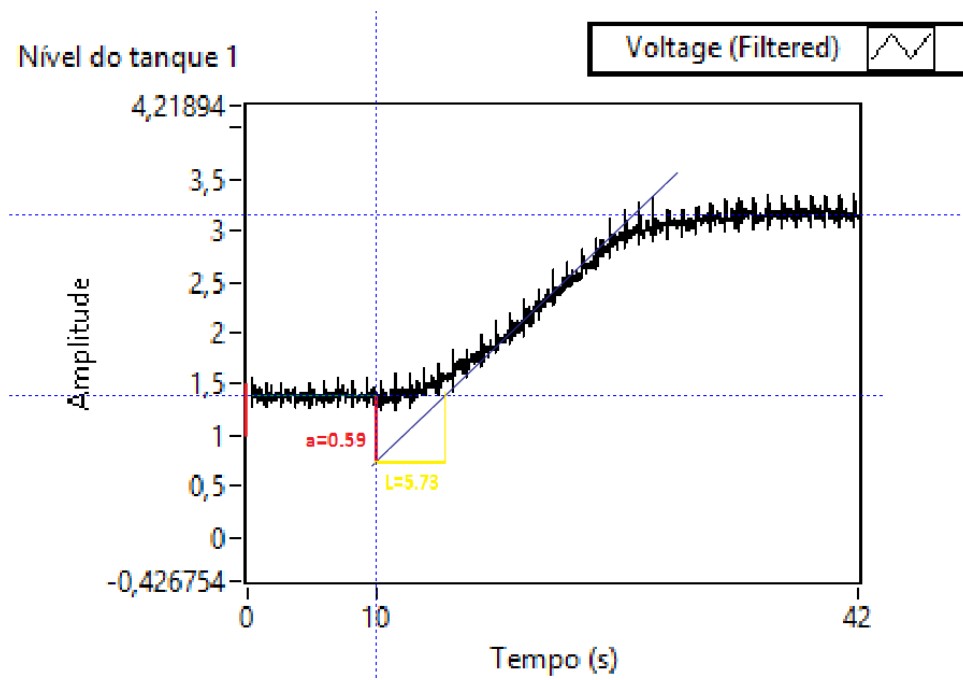


Figura 3.10: Reta tangente ao ponto de declividade no sistema real

Enfim, depois de conhecidos os valores de “a” e “L”, podem ser obtidos os ganhos do controlador PID através da tabela proposta por Ziegler Nichols (Figura 3.11)

Controlador	K	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0,9/a$	$3L$	
PID	$1,2/a$	$2L$	$L/2$

Figura 3.11: Tabela PID Ziegler Nichols

$$a = 0,59; L = 5,73$$

$$K = 1,2/a = 1,2/0,59 = 2,03$$

$$T_i = 2*L = 2*5,73 = 11,46$$

$$T_d = L/2 = 5,73/2 = 2,86$$

$$\mathbf{K_p = K = 2,03}$$

$$\mathbf{K_i = K/T_i = 2,03/11,46 = 0,177}$$

$$\mathbf{K_d = K*T_d = 2,03*2,86 = 5,80}$$

3.4 Implementação do controlador – Ambiente de projeto

Por trás de todo supervisor, existe um código de programação, que pode ser em diversas linguagens. Neste trabalho foi utilizado o terminal padrão do LabVIEW, que faz uso do conceito de *instrumentos virtuais* para o desenvolvimento da lógica que faz o sistema funcionar.

O primeiro passo para o desenvolvimento do programa foi testar e desenvolver um código que foi capaz de medir o nível do tanque utilizando o sensor instalado na bancada e a placa de aquisição de dados NIUSB6009, que por sua vez está conectada a um computador. Esta placa possui interações com o *toolkit* desenvolvido pela própria *National Instruments* que facilita a comunicação com os sensores. O *toolkit* instalado foi o NI-DAQmx, que pode ser encontrado para download grátis no site da empresa.

Depois de instalado o *toolkit*, foi utilizada a VI presente neste pacote, que está nomeada como “*Daq Assistant*”. Esta VI já possui parâmetros pré-instalados que facilita a comunicação com os sensores, basta configurá-los corretamente (KING, ROBERT H, 2012) (Figura 3.12). Foram configuradas para a leitura dos sensores de nível as entradas analógicas a0 e a1, para os tanques 1 e 2 respectivamente. Essas entradas estão configuradas para a leitura de tensão em uma margem de -10 a 10 volts. A frequência de leitura das amostras foi ajustada para 1khz e o modo de aquisição de dados foi de “N samples” (Figura 3.12).

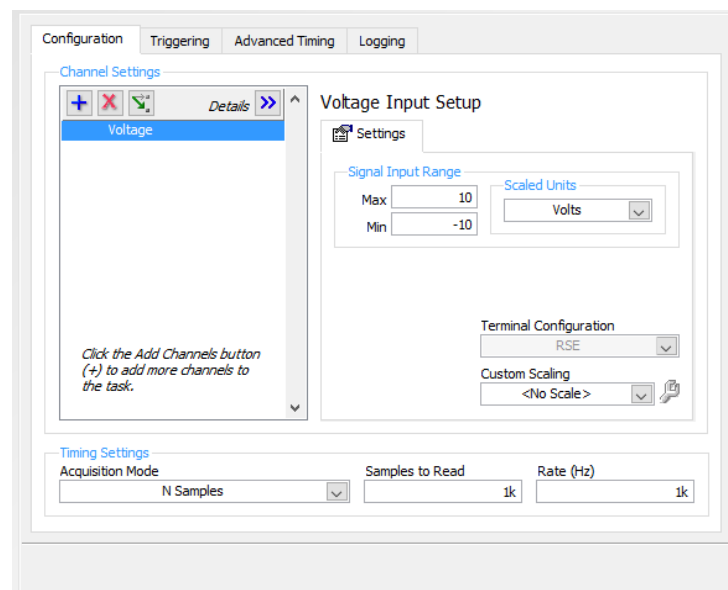


Figura 3.12: Configuração da VI “Daq Assistant”

O resultado do sinal amostrado pelo “*Daq Assistant*”, que se refere ao nível atual do tanque, foi tratado por um filtro passa baixa para evitar futuros ruídos no sistema. Para isso foi utilizado uma VI já presente na instalação padrão do LabVIEW: “Filter”, que foi configurado de acordo com a (Figura 3.13).

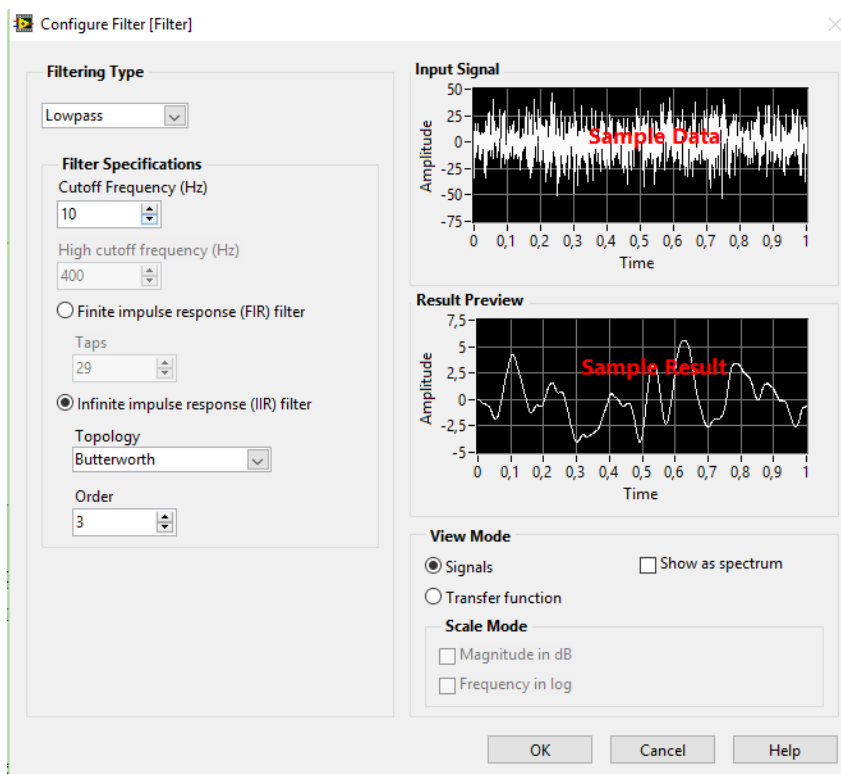


Figura 3.13: Configuração do filtro passa baixa no LabVIEW

O resultado do sinal filtrado será sempre enviado para um registrador “Nível Real” que indicará o atual valor do nível do tanque 1 no caso do primeiro sensor utilizado, ou do tanque 2 no caso do segundo sensor utilizado (Figura 3.14). Este valor “Nível Real” será uma variável do sistema e será sempre indicado em tempo real no supervisão para que o usuário possa acompanhar todo o processo.

Os semáforos utilizados (Figura 3.14), foram necessários pelo fato de a placa NIUSB6009 não suportar múltiplas leituras em suas entradas analógicas no mesmo instante de tempo. Para configuração dos semáforos também foi utilizada uma VI já previamente instalada na versão padrão do LabVIEW “Semaphore”. A configuração desses semáforos foram feitas de acordo com a (Figura 3.14). Basicamente quando a leitura de uma entrada é finalizada, o semáforo atual é fechado para que o próximo semáforo seja aberto permitindo a passagem do código.

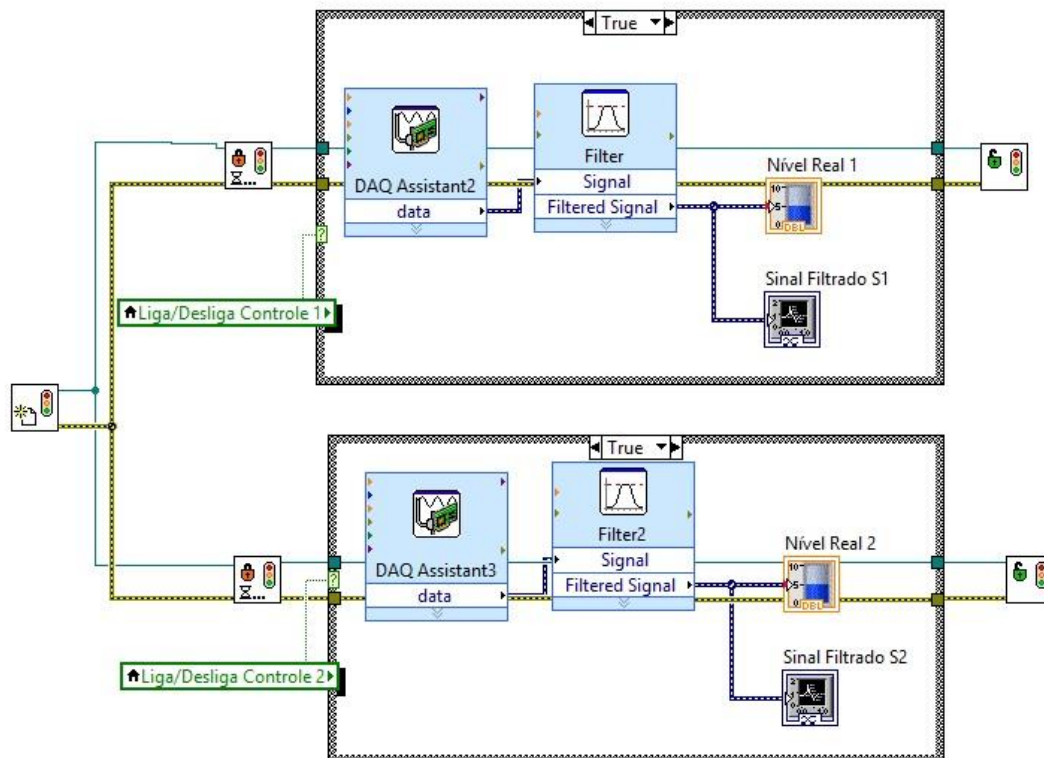


Figura 3.14: Leitura dos níveis reais, tratamento e semáforos no LabVIEW

Após configurados os sensores corretamente, o próximo passo foi o desenvolvimento do supervisor de um controlador PID. Poderia ter sido utilizado um bloco de controlador PID já pronto do LabVIEW, o que facilitaria a programação, mas este *toolkit* de controle é muito caro e por enquanto ainda não foi disponibilizado para utilização pela UFOP. Nada impede que façamos este controlador em blocos sem a utilização dos *toolkits* prontos oferecidos pela NI.

Este modelo de controlador PID, foi discretizado aproximando o termo derivativo pela diferença entre dois pontos e o termo integrativo pelo método de integração de Euler (LARSEN, RONALD, 2009).

Para facilitar o entendimento do leitor, a seguinte lógica foi utilizada abaixo:

```

erro_anterior = 0
integral = 0
start:
    erro = nivel_desejado - nivel_real
    integral = integral + erro*dt
    derivativo = (erro - erro_anterior)/dt
    saida = Kp*erro + Ki*integral + Kd*derivativo
    erro_anterior = erro
    wait(dt)
    goto start

```

Este algoritmo foi feito apenas para facilitar a visualização do leitor, pois na verdade ela foi programada em diagrama de blocos no LabVIEW de acordo com a (Figura 3.15).

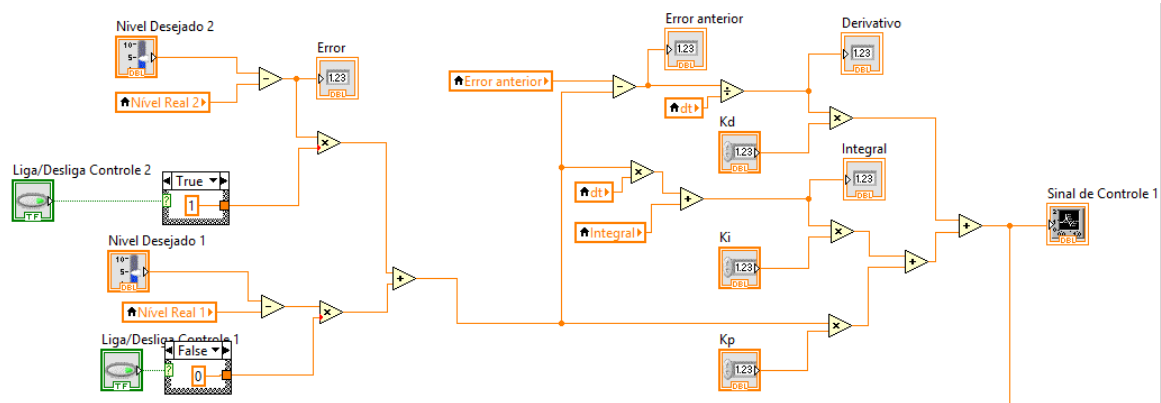


Figura 3.15: Diagrama de blocos do controlador PID desenvolvido

Neste programa o erro é calculado subtraindo o “Nível Desejado” pelo “Nível Real” medido pelo sensor. Depois disso são calculados os valores “Integral” e “Derivativo”. Esses dois, juntamente com o erro são multiplicados por três valores de ganhos previamente configurados pelo usuário: o ganho proporcional, o ganho integral e o ganho derivativo. No mundo real este sinal será convertido de digital para analógico e passado para o processo como as variáveis manipuladas. O erro atual é armazenado para a próxima diferenciação, então o programa espera até que “dt” segundos se passaram desde que iniciou e começa o loop novamente, lendo os novos valores do nível do tanque e dos valores de nível desejado, calculando um novo erro.

O período de amostragem “dt” é calculado facilmente colocando um registrador de tempo no começo do programa e um no final do programa. O período de amostragem será o registrador do final subtraído pelo registrador do começo (Figura 3.16).

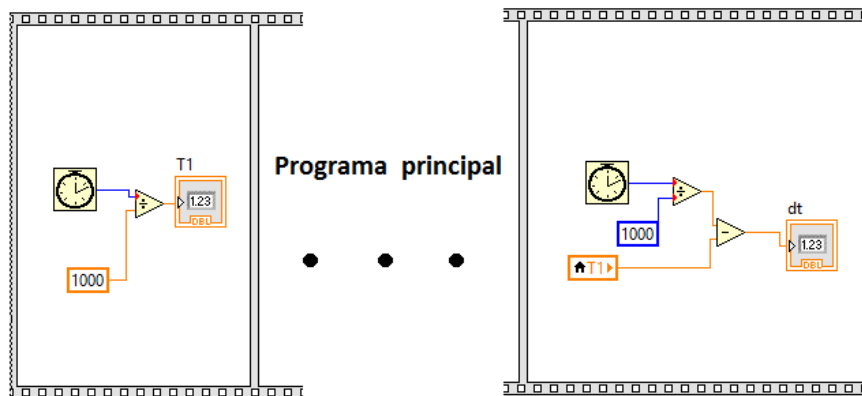


Figura 3.16: Período de amostragem “dt”

Assim que é obtido o sinal de controle, ainda é preciso fazer um tratamento para que ele nunca exceda o limite máximo de tensão no motor que é de 5V. Portanto foi feito um código onde o sinal de controle que será enviado para o motor tem que estar sempre entre 0 e 5. Neste caso, o sinal foi enviado apenas para uma serie de comparações. Se este sinal for menor do que 0, ele precisa ser igualado a 0 antes de ser enviado para o motor. Se este sinal estiver entre 0 e 5, ele será apenas enviado para o motor. Se este sinal for maior do que 5, ele precisa ser igualado a 5 antes de ser enviado para o motor. A Figura 3.17 ilustra como este efeito de saturação é implementado no programa.

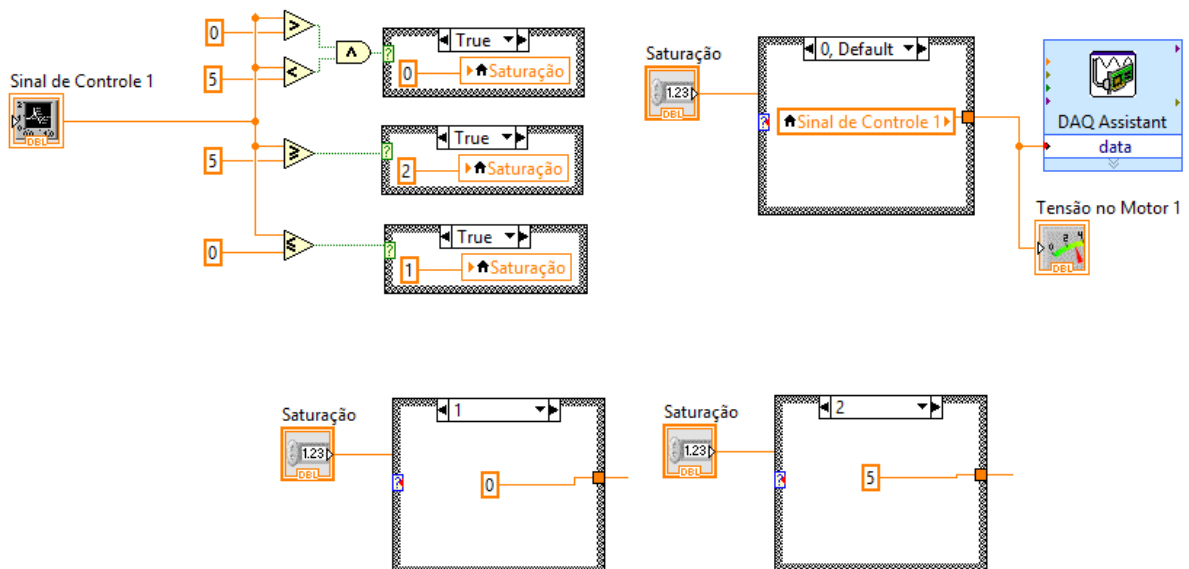


Figura 3.17: Tratamento do limite para a tensão no motor

4 RESULTADOS

No intuito de testar a bancada, foram feitos alguns procedimentos no laboratório conforme será descrito neste capítulo. Primeiramente manipulamos as mangueiras do motor, conforme descrito na seção 3.1.1, para realizar a terceira configuração. Esta configuração consiste em um sistema SISO de estado acoplado e entrada acoplada. Neste caso a bomba irá alimentar o tanque superior e o tanque inferior, além do tanque superior também alimentar o tanque inferior através de um orifício. Este sistema possui 2 entradas e 1 saída.

Para controle deste sistema será utilizado um controlador PID. Foi utilizado o método empírico de Ziegler Nichols para obtenção dos ganhos deste PID, todos os detalhes deste procedimento foram discutidos no capítulo 3.3. Os ganhos utilizados para teste da bancada foram: $K_p=2,03$; $K_i=0,177$; e $K_d=5,8$.

Depois de inseridos os ganhos no sistema supervisorio desenvolvido, a barra do “Nível Desejado 1” foi configurada para “5”, o que significa que desejamos que o tanque 1 fique sempre na metade de sua capacidade de água, sendo este, portanto, o objetivo final do controle. O último passo é ligar o controle do tanque 1 clicando no botão “Liga/Desliga Controle 1” e clicando em “Run”.

Assim que o sistema começa a funcionar, o que se espera é que “Nível Real 1” se estabilize em “5”, mas antes disso o gráfico desta variável deve se comportar como um sistema subamortecido.

Quando o programa começou a rodar, logo de início, foi percebido que o sistema estava muito sensível ao ruído e o sensor utilizado na bancada realmente apresentava um pequeno problema de ruído. Este problema foi diminuído no filtro passa baixa programado no LabVIEW, mas ainda assim não foi completamente resolvido. O ganho do controlador PID que mais influencia na sensibilidade ao ruído do processo é o ganho K_d e este ganho é responsável por diminuir o *overshoot* e aumentar a estabilidade do sistema, conforme explicado na seção 2.3.2. Sabendo disso, foi testado o controlador apenas com os ganhos K_p e K_i obtidos no projeto, que funcionou bem, mas conforme esperado apresentou um *overshoot* superior ao desejado. Portanto para resolver o problema do *overshoot* é preciso encontrar o ganho ideal K_d . Porém o ganho obtido pelo método Ziegler Nichols estava muito alto levando em consideração que o sensor de nível estava com um pequeno problema de ruído. Percebeu-se, portanto, que o ganho de 5,8 teria que ser diminuído

bruscamente para que o *overshoot* tivesse o seu valor dentro da faixa desejada e que não fosse tão sensível ao ruído. Através de testes e observações das respostas, o ganho encontrado foi de $K_d=0,1$.

Com os novos valores dos ganhos do controlador PID ($K_p=2,03$; $K_i=1,177$ e $K_d=0,1$) foram plotados os gráficos dos níveis dos tanques 1, tanque 2, saída do motor, sinal de controle, sinal K_p , sinal K_i e sinal K_d . Vejamos os resultados nas figuras abaixo:

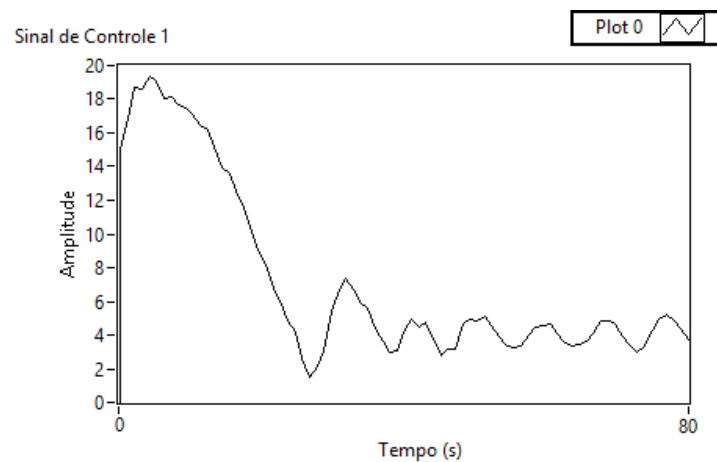


Figura 4.1: Sinal de controle

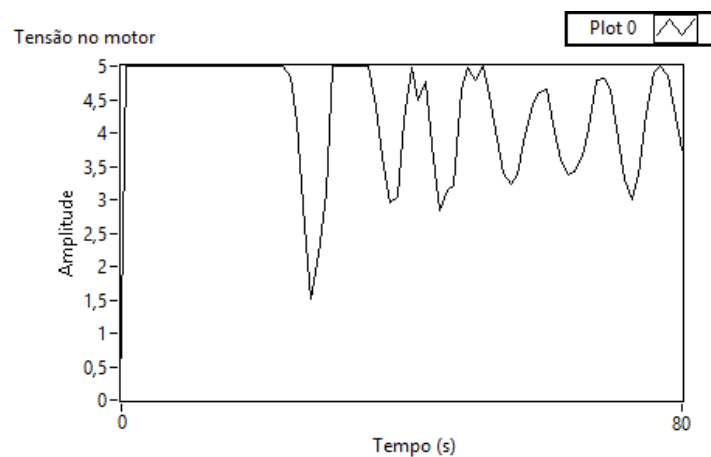


Figura 4.2: Tensão no motor

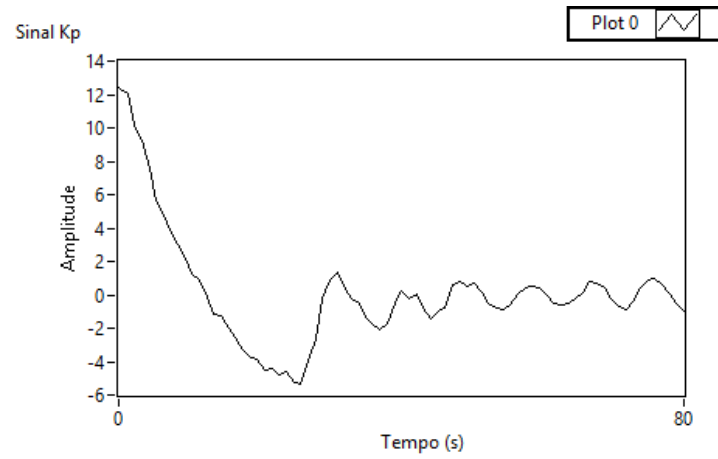


Figura 4.3: Sinal do ganho proporcional

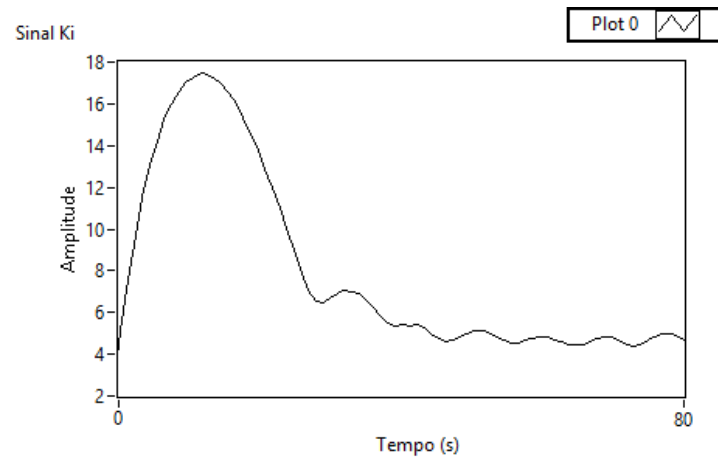


Figura 4.4: Sinal do ganho integral

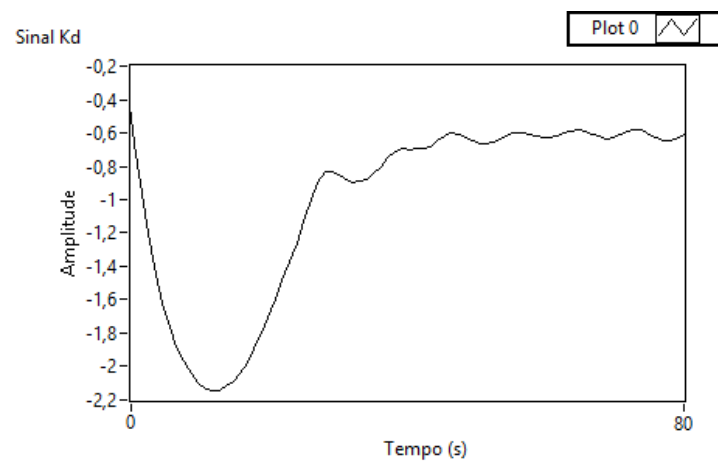


Figura 4.5: Sinal do ganho derivativo

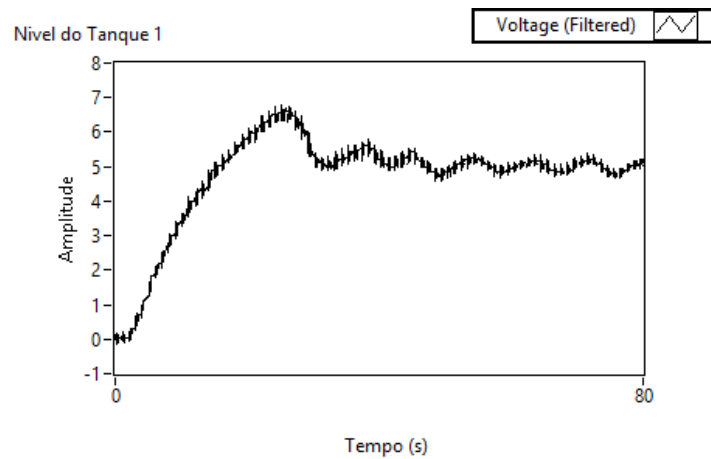


Figura 4.6: Nível medido do tanque 1

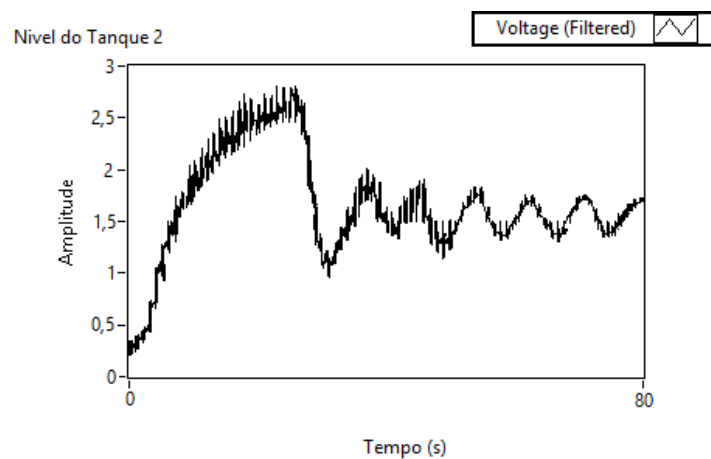


Figura 4.7: Nível medido do tanque 2

Conforme podemos perceber o sistema se comportou como deveria. A tensão no motor obedeceu ao ponto de saturação de 5V que foi previamente programado e mostrado no capítulo 3.4 (Figura 4.2). O “Nível do Tanque 1”, que era a variável de processo, permaneceu próximo do nível desejado “5”. Além disso, o tempo de subida e o tempo de acomodação foram satisfatórios, uma vez que este sistema é de natureza lenta (Figura 4.6). O sobressalto também não foi muito alto, cerca de 15%, um valor satisfatório para um sistema que foi controlado partindo do 0, sem nenhum nível inicial do tanque previamente manipulado.

5 CONCLUSÕES FINAIS

A bancada didática desenvolvida neste trabalho, atendeu os objetivos propostos. Além disso, se mostrou uma poderosa ferramenta no aprendizado de diversas disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação e até mesmo outros cursos da área de exatas.

Os ganhos K_p , K_i e K_d são muito importantes para entender melhor como cada componente do controlador PID age sobre o sistema, manipulando-os em tempo real e visualizando os resultados na bancada didática, fazem com que o aprendizado das disciplinas envolvidas sejam mais interessante, e ao mesmo tempo, desafiadores.

O sistema supervisor, faz com que a bancada possa ser utilizada por qualquer pessoa, até mesmo por um iniciante na área. Por outro lado, a programação por trás dela pode ser bastante interessante, quando estudada por um aluno de Engenharia de Controle e Automação.

A placa de aquisição de dados NIUSB6009 mostrou não ser ideal para este processo, pois consegue ler apenas um dado por instante, o que dificulta a leitura de múltiplos sensores, tornando o sistema de controle um pouco mais lento.

O LabVIEW mostrou ser uma ferramenta altamente poderosa para o desenvolvimento deste trabalho, facilitou a aquisição de dados e a construção do sistema supervisor. Mesmo o laboratório da UFOP não possuindo os *toolkits* mais complexos do LabVIEW, foi construído um bloco de controlador PID, apenas com as ferramentas do pacote básico oferecido pelo programa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Education, 5ª edição, 2011.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *The future of PID Control*. Control Engineering Practice, v. 9, n. 11. 2001

QUANSER. *Coupled Water Tank Experiments*, Quanser, EUA. 2004

DORF, R.C., BISHOP, R.H, *Modern Control Systems*, Pearson Prentice Hall, 2005

BISHOP, ROBERT H. *LabVIEW 2009 Student Edition*. National Instruments Inc, Second edition, 2009.

KING, ROBERT H. *Introduction to Data Acquisition with labview*. Mcgraw-Hill Professi, Second Edition, 2012.

ALI, FADHIL A. *Lecture Notes in LabVIEW and Data Acquisition*. Createspace, 2014

J. A. N. J. Cocota, P. M. B. Monteiro, L. M. Viana e L. V. Meireles. *O Sistema de Controle de Nível de Tanques no Ensino de Graduação*. UFOP, Ouro Preto, 2014

BITTER, NAWROCKI, MOHIUDDIN. *LabVIEW Advanced Programming Techniques*. Crc Press, 2006

LARSEN, RONALD. *LabVIEW for Engineers*. Prentice Hall, 2009

BISHOP, ROBERT H. *LabVIEW 7.0 express with 7.1 update*. National Instruments Inc, 2005.

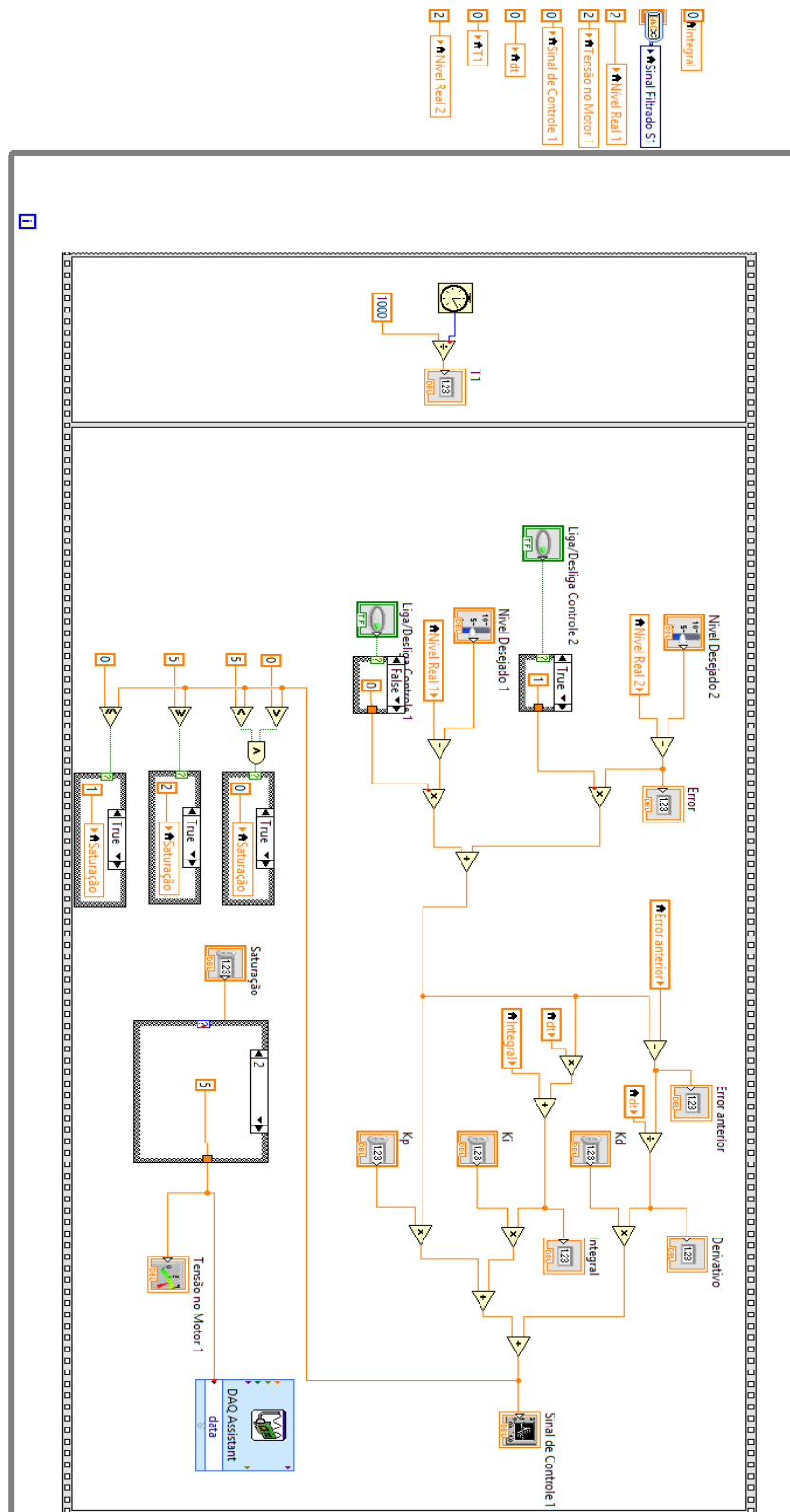
BEGA, EGIDIO ALBERTO. *Instrurumentação Industrial*. Interciencia, 3ª edição, 2011.

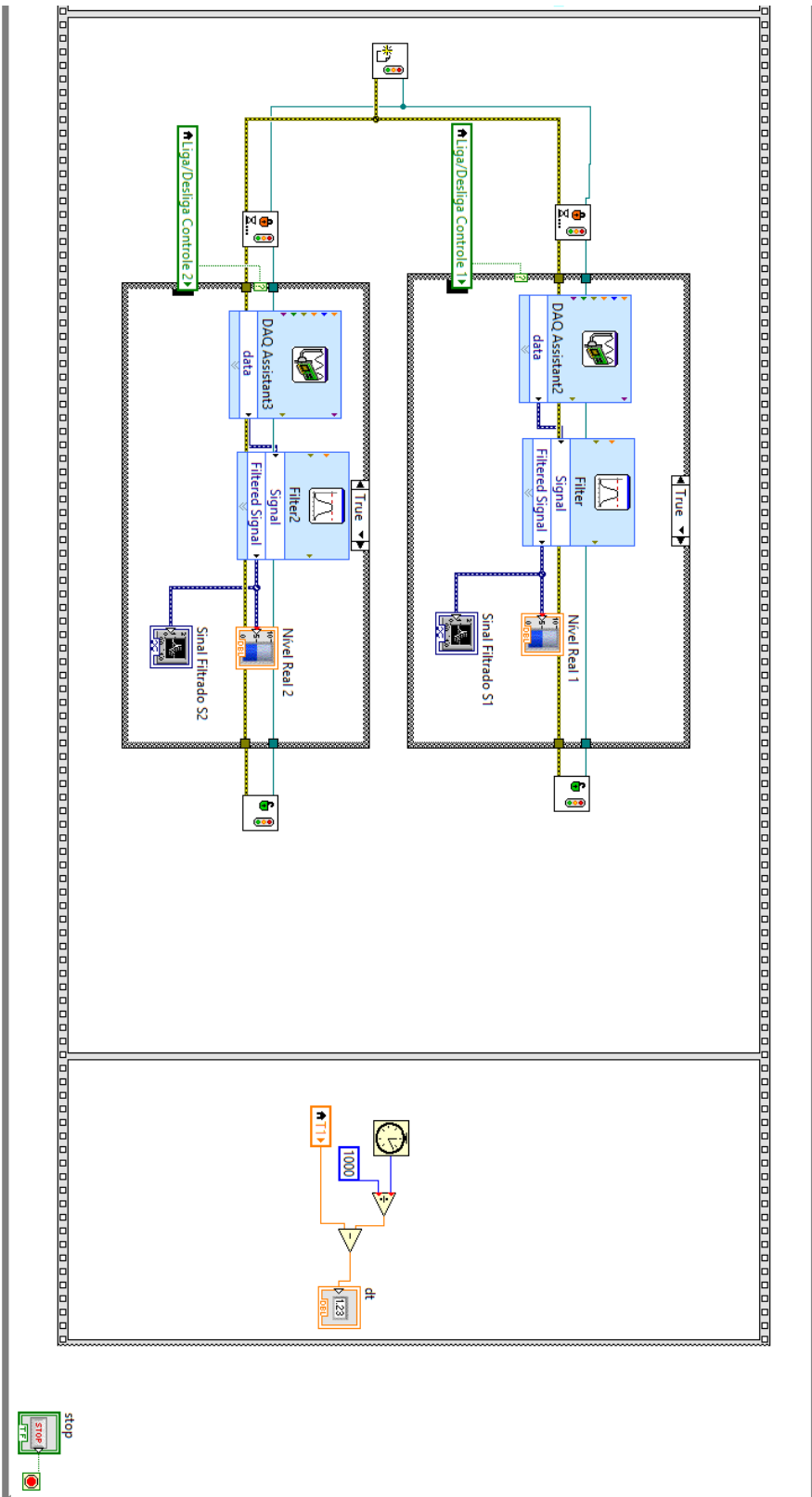
BALBINOT, BRUSAMARELLO. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*, v.1. Ltc, 2ª Edição, 2010.

THOMAZINI, ALBUQUERQUE. *Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações*. Erica, 8ª Edição, 2011.

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

Programa desenvolvido no terminal LabVIEW:





APÊNDICE B

Supervisório desenvolvido:

