



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



**LUIZ OTÁVIO MENDES DE OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM LABORATÓRIO REMOTO PARA  
PRÁTICAS DE CONTROLE DE NÍVEL DE DOIS TANQUES  
ACOPLADOS**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2016**

LUIZ OTÁVIO MENDES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM LABORATÓRIO REMOTO PARA  
PRÁTICAS DE CONTROLE DE NÍVEL DE DOIS TANQUES  
ACOPLADOS**

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: Alan Kardek Rêgo Segundo

Co-orientador: José Alberto Naves Cocota Júnior

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Dezembro/2016

O482d Oliveira, Luiz Otávio Mendes de.  
Desenvolvimento de um laboratório remoto para práticas de controle de nível de dois tanques acoplados [manuscrito] / Luiz Otávio Mendes de Oliveira. - 2017.

78f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

Coorientador: Prof. MSc. José Alberto Naves Cocota Júnior.

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

1. Sistemas de parametros distribuidos. 2. Bancada Didática. 3. Teoria do controle. I. Segundo, Alan Kardek Rêgo. II. Cocota Júnior, José Alberto Naves. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Titulo.

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)

CDU: 681.5

Monografia defendida e aprovada, em 15 de dezembro de 2016, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador



---

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



---

Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de vida. Obrigado aos meus pais Márcio e Adriana, pelo amor e ensinamentos. Ao meu irmão Léo, pelo apoio e amizade. A Rô por todo amor e carinho. À UFOP e Fundação Gorceix pelas oportunidades e conhecimentos. Aos professores Alan Kardek e Cocota Júnior, pelos projetos desenvolvidos e orientação. Aos amigos da Automação, em especial, aos que ajudaram no projeto, o pessoal do CAECA e galera 10.1. Nada disso seria possível sem a ajuda dos meus amigos e professores. Agradeço também toda cachorrada da República Canil pelas grandes amizades e vivência. Por fim e não menos importante à Ouro Preto por se tornar uma segunda casa e tornar tudo isso possível.

## RESUMO

Este trabalho trata-se de um Laboratório Remoto de Dois Tanques Acoplados. Esta é uma bancada didática para realização de práticas de Teoria de Controle que fica localizada em Ouro Preto, no Laboratório de Máquinas Elétricas da Escola de Minas – UFOP. O presente trabalho consiste na elaboração de uma Placa de Circuito Impresso (PCI) que permite o acesso microcontrolado à essa bancada por meio da rede de internet. A PCI tem como principais componentes um PIC 18F4550 que é responsável por controlar a bancada e um módulo ENC28j60 que disponibiliza o acesso da PCI à web. Foi necessário além da PCI, o uso de um computador para a criação de um supervisor, de um banco de dados e um servidor da página web. A PCI e o supervisor se comunicam por meio de uma arquitetura cliente-servidor, ou seja, o computador deve estar conectado na rede internet, assim como a PCI. Após estabelecer essa comunicação o supervisor manda os dados para o banco de dados que fica no próprio computador. Por fim, o servidor que fica hospedado também neste computador, busca as informações no banco de dados e disponibiliza para o usuário uma comunicação direta com a bancada por meio de uma página web.

Palavras-chave: Laboratório Remoto, Bancada Didática, Teoria de Controle

## ABSTRACT

The presented work is about a remote laboratory of two coupled tanks. It counts with a didactic bench for the performance of academic practices in the field of control theory. The bench is located in the laboratory of electrical machines of the Mining School – UFOP. The mentioned work consists in the elaboration of a printed circuit board (PCB) which allows access to the bench through a microcontroller of internet network. The PCB has as main components the PIC 18F4550, which is responsible for controlling the bench and an ENC28j60 module that provides to the PCI access to the web. In addition to the PCB, it was necessary the use of a computer for the creation of a supervisory, a database and a web page server. The PCB and the supervisory communicate through a client-server architecture, therefore the computer must be connected to the internet, as well as the PCI. After the communications is established, the supervisory sends the data to the database that is on the computer itself. Finally, the server that is also hosted on this computer, search the information in the database and provides the user a direct communication with the bench through a web page.

Key words: Remote Laboratory, Didactic Bench, Control Theory

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Bancada de Tanques Acoplados.....	17
Figura 1.2 - Diagrama esquemático do experimento para o processo de dois tanques acoplados .....	18
Figura 2.1 – Adaptado - Elementos básicos de um sistema embutido .....	21
Figura 2.2 - Exemplificando PWM .....	23
Figura 2.3 - Modelo OSI x Modelo TCP/IP .....	25
Figura 2.4 - Sentido dos pacotes pela rede .....	26
Figura 2.5 - Principais protocolos da pilha TCP/IP separados por camadas .....	27
Figura 2.6 - Arquitetura Cliente-Servidor. ....	29
Figura 2.7 - Sistema de Banco de Dados simplificado.....	31
Figura 2.8 - Sensor de pressão com duto imerso no líquido.....	32
Figura 2.9 - Diagrama esquemático do circuito do transdutor de pressão .....	33
Figura 2.10 - Bomba de engrenagens .....	33
Figura 2.11 - Módulo Ethernet ENC28j60 .....	34
Figura 2.12 - Câmera IP redirecionada pelo Roteador .....	35
Figura 2.13 - Controla em malha aberta .....	36
Figura 2.14 - Controle malha fechada .....	36
Figura 2.15 - Ação de Controle Derivativo .....	38
Figura 2.16 - Diagrama de Blocos de um Sistema de Controle Digital .....	39
Figura 2.17 - Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem .....	41
Figura 3.1 - Pinos usado do microcontrolador PIC 18F4550.....	46
Figura 3.2 - Reset do PIC .....	46
Figura 3.3 - Alimentação do PIC.....	47
Figura 3.4 - Circuito de clock do PIC .....	47
Figura 3.5 - Circuito de potência da PCI.....	48
Figura 3.6 - Circuito dos sensores de pressão na PCI .....	49
Figura 3.7 - Ligações dos pinos do ENC28J60 na PCI .....	49
Figura 3.8 (a) PCI no ARES – vista inferior, (b) PCI no ARES – vista superior .....	50
Figura 3.9 - CNC do Laboratório de Máquinas Elétricas.....	51
Figura 3.10 - (a) PCI finalizada vista superior, (b) PCI finalizada vista inferior .....	52
Figura 3.11 - Fluxograma da programação do PIC .....	53
Figura 3.12 - Layout do site .....	56



Figura 3.13 - Esboço da comunicação do sistema.....	60
Figura 3.14 - (a) Equação de calibração do sensor de pressão do tanque 1, (b) Equação de calibração do sensor de pressão do tanque 2 .....	63
Figura 4.1 - Diagrama de blocos segundo sintonia de Ziegler Nichols.....	66
Figura 4.2 - Diagrama de blocos segundo sintonia de Cohen-Coon .....	66
Figura 4.3 - Resposta do controlador com parâmetros de Ziegler Nichols em função do tempo .....	68
Figura 4.4 - Resposta do controlador com parâmetros de Cohen-Coon em função do tempo .	69
Figura 4.5 - Erro ao exportar os arquivos devendo clicar em "sim" para ter acesso aos dados do experimento .....	70
Figura 4.6 - Resposta do formulário se o usuário teve problemas com a webcam .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Parâmetros Gerais da Bancada .....	19
Tabela 2.1 - Sintonia de Ziegler Nichols .....	42
Tabela 2.2 - Sintonia de Cohen Coon.....	42
Tabela 2.3 - Acrônimos para equações da seção 2.11 .....	43
Tabela 3.1 - Componentes para confecção da PCI.....	51
Tabela 3.2 - Tabela calibração.....	57
Tabela 3.3 - Tabela comunicação .....	57
Tabela 3.4 - Tabela output .....	58
Tabela 3.5 - Tabela parâmetros .....	58
Tabela 3.6 - Tabela exportar.....	59
Tabela 3.7 - Tabela paginaweb.....	59

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo Geral .....	15
1.1.2	Objetivos específicos .....	16
1.2	Justificativa do Trabalho .....	16
1.3	Descrição da Bancada Didática de Tanques Acoplados.....	17
1.3.1	Parâmetros Gerais da Bancada .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	Sistemas Embutidos.....	20
2.1.1	Definição .....	20
2.1.2	Principais Elementos de um Sistema Embutido.....	20
2.1.3	Unidade Central de Processamento .....	21
2.1.4	Memória .....	21
2.1.5	Dispositivos de Entrada e Saída (I/O) .....	22
2.1.6	Ciclo de Máquina (Clock) .....	22
2.1.7	Interrupções .....	23
2.1.8	Módulo CCP/PWM .....	23
2.1.9	Conversor Analógico-Digital .....	24
2.2	Rede TCP/IP .....	24
2.2.1	A divisão das Camadas.....	24
2.2.1.1	Camada Aplicação.....	25
2.2.1.2	Camada de Transporte.....	25
2.2.1.3	Camada de Internet (Rede).....	26
2.2.1.4	Camada de Enlace/Física .....	26
2.2.2	Principais Protocolos da Pilha TCP/IP .....	26
2.2.2.1	Protocolos da Camada de Aplicação .....	27
2.2.2.2	Protocolos da Camada de Transporte.....	27
2.2.2.3	Protocolos da Camada de Internet (Rede).....	28
2.2.2.4	Protocolos da Camada de Enlace/Física.....	28
2.2.3	Arquitetura Cliente-Servidor .....	28
2.3	Página Web e <i>Framework</i> .NET.....	29
2.4	Sistemas SCADA .....	30
2.5	Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) .....	30

2.6	Sensor de Pressão MPXM2010GS .....	32
2.7	Bomba.....	33
2.8	Módulo Ethernet ENC28J60 .....	34
2.9	Câmera IP .....	35
2.10	Teoria de Controle .....	35
2.10.1	Controlador Proporcional (P) .....	36
2.10.2	Controlador Proporcional Integral (PI).....	36
2.10.3	Controlador Proporcional Derivativo (PD) .....	37
2.10.4	Controlador Proporcional Integral (PID).....	38
2.10.5	Controle Digital .....	39
2.10.6	Implementando Controlador Digital.....	39
2.10.7	Método da Curva de Reação.....	40
2.11	Modelagem da Bancada de Dois Tanques Acoplados.....	43
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....</b>	<b>45</b>
3.1	Circuito Eletrônico .....	45
3.2	Placa de Circuito Impresso (PCI) .....	50
3.3	<i>Firmware</i> de programação do microcontrolador.....	52
3.4	Sistema supervisor.....	54
3.5	Página Web.....	55
3.6	Banco de Dados .....	57
3.7	Comunicação entre a PCI e a Página Web .....	60
3.8	Calibração dos Sensores .....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>64</b>
4.1	Resultados experimentais .....	64
4.1.1	Projeto do Controlador PI.....	65
4.1.1.1	Função de Transferência em malha aberta.....	65
4.1.1.2	Determinação dos ganhos do controlador pelo método de Ziegler Nichols.....	65
4.1.1.3	Determinação da função de transferência do controlador pelo método de Ziegler Nichols .....	65
4.1.1.4	Determinação dos ganhos do controlador pelo método de Cohen-Coon....	66
4.1.1.5	Determinação da função de transferência do controlador pelo método de Cohen-Coon.....	66
4.1.1.6	Discretização do Controlador PI .....	67
4.1.1.7	Resposta do controlador PI de posição pelos parâmetros de Ziegler Nichols	67

4.1.1.8	Resposta do controlador PI de posição pelos parâmetros de Cohen-Coon .68
4.2	Resultados da avaliação da bancada..... 69
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....72</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....74</b>
<b>7</b>	<b>ANEXO I.....78</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO II.....79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um laboratório remoto ou online é um laboratório onde os alunos podem ter acesso aos experimentos, instrumentos ou outros equipamentos distantes por meio do uso da internet. Um dos pontapés iniciais de laboratórios remotos aconteceu em 1995 durante uma conferência sobre supercomputação, onde Burçin Aktan demonstrou para o público o controle de um braço robótico em tempo real que apertava botões de brinquedo musical de uma criança. Apesar de muitas pessoas acreditarem que se tratava de um vídeo, Aktan os convenceu após mudar os parâmetros de programação do robô para apertar outros botões. (AKTAN, 1996).

Existe ao redor do mundo laboratórios remotos, que auxiliam na educação à distância (ANEXO D). O iLabs é uma instância de laboratórios remotos inicialmente desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) que permite aos alunos realizar experimentos em hardwares em tempo real. A visão iLab é compartilhar experiências de laboratório de forma tão ampla quanto possível no ensino superior. Já a Universidade de *Bordeaux* na França, possui um laboratório remoto de eletrônica básica com uma vasta gama de circuitos eletrônicos com o uso de filtros, amplificadores operacionais, além de circuitos integrados (GONZÁLEZ, 2011).

Outro laboratório importante é da Universidade de Deusto na Espanha, que disponibiliza laboratórios remotos na área de robótica, eletrônica, teoria de controle entre outros. Foi a partir de uma visita institucional às instalações do Weblab-Deusto em 2014, que fomentou o interesse de desenvolver um laboratório remoto na Escola de Minas.

Tendo em vista a importância de bancadas didáticas, algumas bancadas de quatro tanques foram desenvolvidas pelos alunos de graduação da disciplina de Controle Aplicado a Sistemas Térmicos e Fluidomecânicos do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) no período de 2012 a 2014, para proporcionar a realização de aulas práticas de controle de nível. Nesse sentido, o trabalho em questão propõe a montagem de um laboratório remoto, disponibilizando as bancadas supracitadas. Essas bancadas de controle apresentam potencial de utilização, porém se encontram como um recurso com capacidade ociosa. Além disso, no Brasil, são raros os laboratórios remotos que permitem a realização de experimentos à distância. Então, foi desenvolvido um sistema capaz de comunicar por meio da internet com a planta didática de tanques acoplados para viabilizar a realização de experimentos remotos. Para tal finalidade, foi utilizado um microcontrolador para controlar a planta, um sistema supervisório para comunicar com o microcontrolador e uma página web como interface do usuário com o experimento.

De acordo com o Cone do Aprendizado de Edgar Dale, o estudo dos conceitos de engenharia é absorvido e lembrado mais facilmente, quando, se aplicam métodos de aprendizagem ativa. Esses métodos consistem em colocar em prática os conceitos teóricos estudados e faz com que o discente se lembre mais dos conteúdos estudados (DALE, 1969). Entretanto, plataformas didáticas comerciais que possibilitam colocar em prática os estudos teóricos, geralmente possuem alto custo e arquitetura fechada. Além disso, “[...] o método tradicional – apresentar ao estudante não o problema, mas a solução acabada – priva este estudante de toda a excitação, corta o impulso criativo e reduz a aventura da humanidade a um monte empoeirado de teoremas” (DORF e BISHOP, 2001). Nesse sentido, a construção de uma plataforma didática com os discentes possibilita aos alunos desenvolverem características importantes de um profissional de engenharia que é a capacidade de projetar, gerenciar e executar um projeto (COCOTA et al., 2013).

Sendo assim, o atual trabalho foi dividido nas seguintes etapas: (i) desenvolver um módulo de potência para acionamento da bomba e leitura dos sensores; (ii) confecção de uma placa de circuito impresso para controle da bancada; (iii) desenvolvimento da comunicação entre a bancada e a página web por meio do supervisor e banco de dados; (iv) calibração dos sensores de nível e (v) obtenção dos parâmetros do controlador PI. O desenvolvimento entre a bancada e a página web consiste em quatro etapas. A primeira etapa foi o desenvolvimento do *firmware* do microcontrolador PIC, em linguagem C, para suportar a arquitetura cliente-servidor e se conectar na rede internet. A segunda foi o desenvolvimento do sistema supervisor, em linguagem C#, que realiza o acesso ao microcontrolador por meio do protocolo TCP/IP e a terceira foi a criação de um banco de dados. Essa etapa é muito importante, pois, além de salvar os sinais dos sensores e motores, possui papel fundamental de estabelecer a ponte de comunicação entre o supervisor e a página web. A quarta etapa foi o desenvolvimento de uma página web em ASP.NET e C#. Após terminar a comunicação, realizou-se então, a calibração dos sensores, os experimentos para identificação dos parâmetros do controlador e a determinação da função de transferência do sistema com a ajuda do *software* Matlab.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

- Desenvolver um sistema de laboratório remoto para realização de práticas de controle de nível de tanque.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade do microcontrolador PIC18F4550 para aquisição de dados e acionamentos de bombas da bancada de didática;
- Verificar a aplicabilidade do componente ENC28J60;
- Estudar a viabilidade da pilha TCP/IP dedicadas a microcontroladores;
- Desenvolver uma Placa de Circuito Impresso (PCI) capaz de controlar a bancada didática por acesso remoto;
- Desenvolver um sistema que realize a comunicação entre o microcontrolador e a página web, na qual os alunos realizarão os experimentos remotos;
- Implementar o controlador PI de posição no firmware do PIC;
- Estudar teoria de sistemas de controle em malha fechada, com ênfase em métodos empíricos de sintonia de controladores PID, como o método da curva de reação por Ziegler Nichols e Cohen Coon;
- Projetar e sintonizar um controlador PI, com ênfase em métodos empíricos;
- Realizar o experimento para identificação dos parâmetros do controlador;
- Determinar a função de transferência do sistema.

## 1.2 Justificativa do Trabalho

O desenvolvimento de plantas didáticas com monitoramento remoto é de extrema importância. Além de facilitar a didática de ensino, oferece oportunidade ao aluno de realizar os experimentos de maneira rápida e fácil, sem a necessidade de deslocamento para o local onde a planta está instalada. Também é possível estender a bancada a outros públicos contribuindo com o ensino a distância, além de mostrar a qualidade e destacar a Universidade que dispõem dessa tecnologia (WebLab-Deusto, 2016).

Atualmente existem quatro bancadas de tanques acoplados no Laboratório de Máquinas Elétricas (LME), das quais três são controladas por CLP (Controlador Lógico Programável). Esses CLPs possuem custo elevado, o que torna um obstáculo para a construção de novas bancadas. Por meio do desenvolvimento de um circuito eletrônico microcontrolado, pode-se obter um produto capaz de realizar as mesmas funções por um preço mais acessível e, além disso, pode-se disponibilizar os CLPs para as disciplinas relacionadas à área de Automação Industrial do curso de Engenharia de Controle e Automação da UFOP.



### 1.3 Descrição da Bancada Didática de Tanques Acoplados

Desenvolvida por discentes no Laboratório de Máquinas Elétricas da Escola de Minas, a bancada consiste em quatro tanques com dimensões de 4,76 cm de diâmetro interno e 25 cm de altura, que podem ser utilizada na configuração de dois tanques acoplados ou de quatro tanques. Além disso, é composto por um reservatório na parte inferior da bancada, duas moto-bombas com motor de corrente contínua de 12V, quatro sensores de pressão MPXM2010 (alimentado por uma fonte de 24V), mangueiras redutores e divisores de vazão para o sistema hidráulico. Na Figura 1.1 encontra-se uma foto da bancada didática supracitada.



**Figura 1.1 Bancada de Tanques Acoplados**

A planta em questão, possibilita realizar experimentos de controle na configuração SISO (*Single Input, Single Output*) com ou sem acoplamento, bem como na configuração MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) com fase mínima ou não.

No atual trabalho será aplicado o controle SISO (com acoplamento), por isso, será necessário utilizar dois tanques e uma bomba d'água. O fluxograma desta configuração está ilustrado na Figura 1.2.

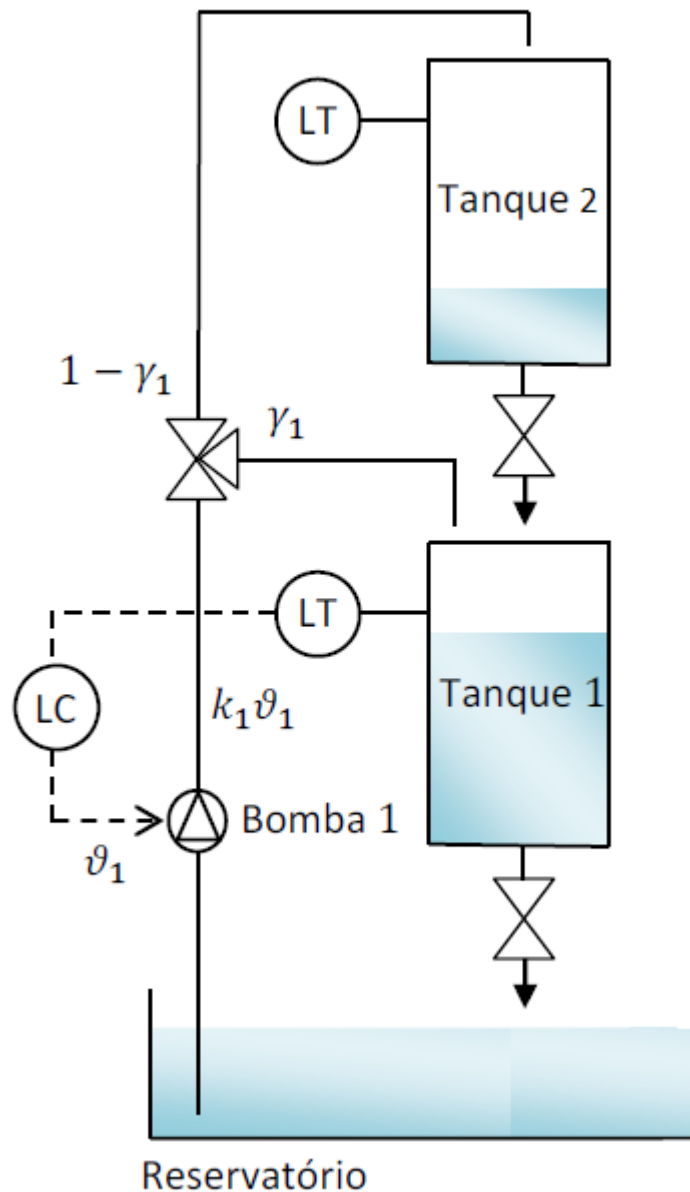


Figura 1.2 - Diagrama esquemático do experimento para o processo de dois tanques acoplados

Fonte: COCOTA JR., 2014.

A bomba, quando ligada, fornece uma parcela da vazão ( $\gamma_1$ ) para o tanque 1 e a outra parcela para o tanque 2 ( $1 - \gamma_1$ ). Vale ressaltar que cada tanque possui na base um dreno, pelo qual a água retorna para o reservatório, configurando assim um circuito fechado. Os níveis do tanque são medidos de forma indireto por meio de sensores de pressão diferencial que estão localizados na parte superior de cada tanque. Os transdutores estão sensores conectados à PCI e enviam os sinais elétricos para entradas analógicas do microcontrolador, possibilitando realizar a leitura de 0 a 5V e, então, determinar a altura da coluna de água por meio de uma conversão.

### 1.3.1 Parâmetros Gerais da Bancada

Os parâmetros relacionados às grandezas físicas e aos ganhos do sistema que não dependem de experimentos para identificação estão presentes na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1 - Parâmetros Gerais da Bancada**

<b>Símbolo</b>	<b>Valor [unid.]</b>	<b>Descrição</b>
$A_1, A_2$	17,795 [ $cm^2$ ]	Área da seção transversal dos tanques
$a_1$	0,075 [ $cm^2$ ]	Área da seção transversal do dreno do tanque 1
$a_2$	0,071 [ $cm^2$ ]	Área da seção transversal do dreno do tanque 2
$d_{1e}$	0,318 [cm]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 1
$d_{2e}$	0,238 [cm]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 2
$g$	978,79 [ $cm/s^2$ ]	Aceleração da gravidade
$k_{c1}$	5/21,7 [ $V/cm$ ]	Ganho do sensor para a amostragem do nível no tanque 1
$k_{c2}$	5/23,5 [ $V/cm$ ]	Ganho do sensor para a amostragem do nível no tanque 2

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Sistemas Embutidos**

#### **2.1.1 Definição**

Os sistemas embutidos (ou embarcados) são dispositivos microcontrolados capazes de processar informações e tarefas pré-estabelecidas. São usados em monitoramento, controle de equipamentos, tais como leitura de sensores e acionamento de motores (AXELSON, 2003).

“[...] Se nós pegarmos qualquer produto de engenharia que necessite de controle, caso esse controle seja executado por métodos computacionais e traduzido em ações por meio de dispositivos de entrada e Saída (I/O), então se tem aí um sistema embutido [...]” (WILMSHURST, 2007, p. 3).

Os sistemas embutidos são encontrados em praticamente todos aparelhos eletrônicos como por exemplos celulares (computadores de mão), roteadores, GPS, calculadores, aparelhos de TV com controle remoto, videogames e etc. Tais dispositivos fazem uso de tecnologias embarcadas para comunicarem entre si trocando informações e/ou controlando algo (NOERGAARD, 2005).

#### **2.1.2 Principais Elementos de um Sistema Embutido**

A tecnologia está cada vez mais presente na rotina das pessoas, o que acaba por influenciar em suas maneiras de viver, pensar e agir. Com os sistemas embarcados pode-se realizar a criação de uma nova tecnologia com alto desempenho computacional e baixo custo. No presente trabalho faremos o uso do microcontrolador PIC 18F4550 da empresa Microchip Technology. Este dispositivo possui uma unidade central de processamento, memórias, conversores analógico-digital (A/D), ciclo de máquina, entre outras funcionalidades integradas neste componente (SOUZA, 2009). Na Figura 2.1, temos um diagrama com esses elementos. Este microcontrolador é um dispositivo de 8 bits dotado de 32 Kbytes de memória de programa, 2.048 bytes de memória RAM e de 256 bytes de memória EEPROM.



Figura 2.1 – Adaptado - Elementos básicos de um sistema embutido

Fonte: NOERGAARD, 2005

### 2.1.3 Unidade Central de Processamento

A CPU é quem executa o conjunto de instruções presente no programa, que fica armazenado na memória do sistema embutido. Este programa é desenvolvido por meio de uma linguagem de programação e após compilado pode ser colocado no *firmware* do microcontrolador. Muitas instruções são operações matemáticas e processadas na ALU (*Arithmetic Logic Unit*), dotada de circuitos lógicos capazes de realizar tais operações (BATES, 2006).

### 2.1.4 Memória

Memória é o elemento de um sistema computacional onde ficam armazenadas os programas e as variáveis que controlam o fluxo das informações dentro do projeto. Os microcontroladores PIC da família 18 apresentam basicamente memórias de programa, de dados e EEPROM (*Electric-Erasable Programmable Read Only Memory*) (MIYADAIRA, 2009).

A memória de programa conhecida também como não-voláteis não perdem seu conteúdo quando a alimentação do sistema é desligada. São mais difíceis de serem modificadas, e são conhecidas como ROM (*Read Only Memory*).

A memória de dados ou voláteis funcionam quando o sistema está energizado e perdem seu conteúdo quando a alimentação é cortada, sendo conhecida como memória RAM (*Random Access Memory*).

A memória EEPROM do PIC é conhecida como memória do tipo Flash que operam em alta velocidade, gastam pouca energia e permitem muitas regravações por meio de sinais elétricos (WILMSHURST, 2007).

### 2.1.5 Dispositivos de Entrada e Saída (I/O)

“Os dispositivos de I/O conectados a uma placa são responsáveis por trocar informações entre o mundo e o sistema embutido [...]” (NOERGAARD, 2005, p. 253). Sem esses dispositivos não seria possível controlar e automatizar nenhum tipo de processo por meio de sistemas embutidos. Por exemplo, teclado e botões são dispositivos de entrada no qual o usuário pode atuar enquanto, monitores e displays são dispositivos de saídas e exibem de forma mais compreensível os estímulos recebidos dos dispositivos de entrada por meio de uma Interface Homem Máquina (IHM) (NOERGAARD, 2005). Sensores e motores são respectivamente dispositivos de entrada e saída.

### 2.1.6 Ciclo de Máquina (Clock)

A velocidade de processamento de um microcontrolador está diretamente relacionada à frequência de seu sinal de CLOCK. Este sinal pode ser gerado internamente pelo microcontrolador através de um circuito RC interno ou por um oscilador externo - cristal de quartzo - podendo aumentar a velocidade até a 40 MHz (GIMENEZ, 2002). O ciclo de máquina do PIC18 é dividido em 4 fases. Se o clock for de 20MHz, o ciclo de máquina é dado por:

$$F_{maq} = \frac{F_{osc}}{4} = \frac{20}{4} = 5 \text{ MHz} \quad (2.1)$$

O PIC 18F4550 é construído com base na arquitetura Harvard com instruções do tipo RISC possuindo tecnologia *Pipeline* o qual resulta no aumento da velocidade de processamento, pois ao mesmo tempo que uma instrução é executada, a próxima instrução é localizada e carregada no registro de instrução (IR) em um único ciclo de máquina.

A cada ciclo de máquina é gasto um tempo de processamento. Com base nesse *clock* é possível calcular o tempo. Os parâmetros podem ser alterados, tornando seu uso programável para uso específico ou geral.

### 2.1.7 Interrupções

Interrupções tem uma função fundamental dentro do programa do microcontrolador pois interrompe o fluxo do programa principal e executa a rotina de interrupção a qual é programada pelo programador (SOUZA, 2005).

A interrupção é realizada pelo hardware de forma muito rápida e quando termina de ser executada, volta para o laço principal no mesmo lugar que tinha sido interrompido (IBRAHIM, 2006).

### 2.1.8 Módulo CCP/PWM

Módulo PWM (*Pulse-Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso), envolve a modulação de sua razão cíclica (*duty cycle*) para controlar a energia e consequentemente a potência entregue à carga em dispositivos que trabalham em sistemas de corrente contínua (MIYADAIRA, 2009). O módulo *Capture*, mede o tempo entre dois eventos enquanto o módulo *Compare*, dispara um determinado evento em um período de tempo pré-estabelecido.

Com o módulo PWM podemos gerar uma tensão analógica a partir da modulação de um sinal digital. Esse módulo gera um ciclo de ondas quadradas e a variação da largura do pulso possibilita que ocorra a variação da tensão média (Figura 2.2).

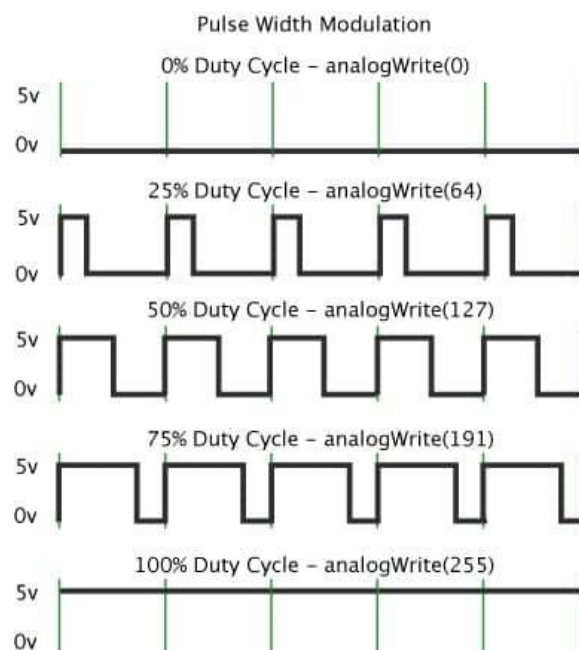


Figura 2.2 - Exemplificando PWM

Fonte: HIRZEL, 2016

Segundo Pereira (2005), a tensão média ( $V_{dc}$ ) pode ser determinada pela Equação 2.2.

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (2.2)$$

Onde  $T$  é o período da forma de onda e  $V(t)$  é a função da tensão no tempo.

### 2.1.9 Conversor Analógico-Digital

Um conversor analógico-digital (A/D) faz a leitura analógica da tensão e converte para digital esses valores, ou seja, para número binário o qual o microcontrolador possa processar essa grandeza (MIYADAIRA, 2009). O PIC 18F4550 possui 13 canais de conversor A/D em que podemos ligar, e.g., sensores com resolução de 8 ou 10 bits.

## 2.2 Rede TCP/IP

Os Protocolos TCP e IP são a base da internet. São apelidados de “pilha TCP/IP” devido a maneira que são implementados. Em 1960, o governo americano financiou uma rede fechada de computadores entre bases militares. A evolução da rede fez surgir a rede mundial de computadores no qual conhecemos hoje (NAUGHE, 1998).

A rede de comunicação é o meio pela qual as informações fluem do *hardware* de controle para os microcomputadores, através de redes *Ethernet*, fibras óticas, linhas dial-up, rádio, etc. Dessa forma, é possível se estabelecer comunicação entre todos os elementos da estrutura de automação através de um meio físico adequado definido para a transmissão de dados, criando um sistema de comunicação em rede em que os elementos podem trocar dados e compartilhar recursos entre si (SILVA, 2009).

### 2.2.1 A divisão das Camadas

Os protocolos presentes na pilha TCP/IP são organizados em camadas, onde cada camada é responsável por parte da comunicação. Essa divisão foi baseada do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) criada pela ISO (*International Standard Organization*) para criação de protocolos de comunicação.

Este modelo utiliza sete camadas e são denominadas como: aplicação, apresentação, sessão, transporte, rede, enlace e física. Porém, apesar do modelo OSI ser um sucesso na literatura sobre redes de computadores, na prática a rede de internet que fez sucesso comercial foi o TCP/IP e assim foi definido a arquitetura dessa rede. Esse modelo é uma simplificação das camadas OSI, conforme podemos ver na Figura 2.3 (CANTÚ, 2003).



## Modelo OSI x Modelo TCP/IP

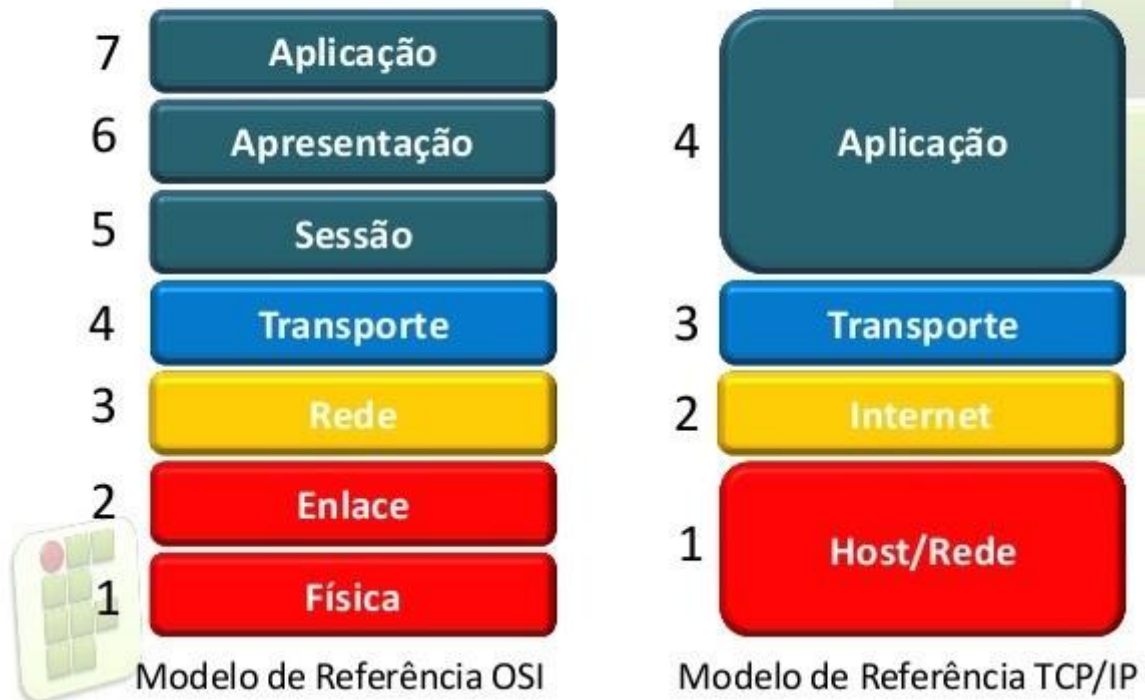


Figura 2.3 - Modelo OSI x Modelo TCP/IP

Fonte: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Currais Novos

### 2.2.1.1 Camada Aplicação

“A camada de aplicação estabelece as regras para troca de mensagens entre as aplicações de uma rede” (CANTÚ, 2003, p. 17). Essa camada que gerencia os serviços de e-mails, data e hora internacional e o conhecido WWW (*World Wide Web*) o qual utiliza o protocolo HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) para coordenar a troca de informações entre os servidores web e navegadores como o Google Chrome e o Mozilla Firefox (CANTÚ, 2003).

### 2.2.1.2 Camada de Transporte

Essa camada é responsável pelo envio e recepção dos dados entre o servidor e o cliente garantindo a entrega a camada superior, a de aplicação. “A camada de transporte estabelece um canal de comunicação lógico para a transferência de mensagens porta a porta entre os processos de aplicação rodando em dois computadores remotos” (CANTÚ, 2003, p. 17).

### 2.2.1.3 Camada de Internet (Rede)

Dentro da internet, os dados são fragmentados em pacotes. Esses pacotes navegam pela rede mundial de computadores por meio de roteadores de forma a interligar o servidor da internet ao cliente que requisitou o serviço. Essa camada é a responsável para definir a rota a ser percorrida pelos pacotes (CANTÚ, 2003).

### 2.2.1.4 Camada de Enlace/Física

O enlace está relacionado ao endereçamento de rede, detecção e correção de erros provenientes do meio físico (CANTÚ, 2003). Essa camada liga um nó da rede até outro nó adjacente e assim denomina uma rota. Essa ligação é no meio físico e podem ser cabo coaxial, fios de cobre, fibra óptica ou ar. As informações são repassadas a cada camada seguindo uma hierarquia garantindo a informação ao próximo nível. Na Figura 2.4, o fluxograma exibe a sucessão de camadas que os pacotes são submetidos para trafegar entre entidades de uma rede.

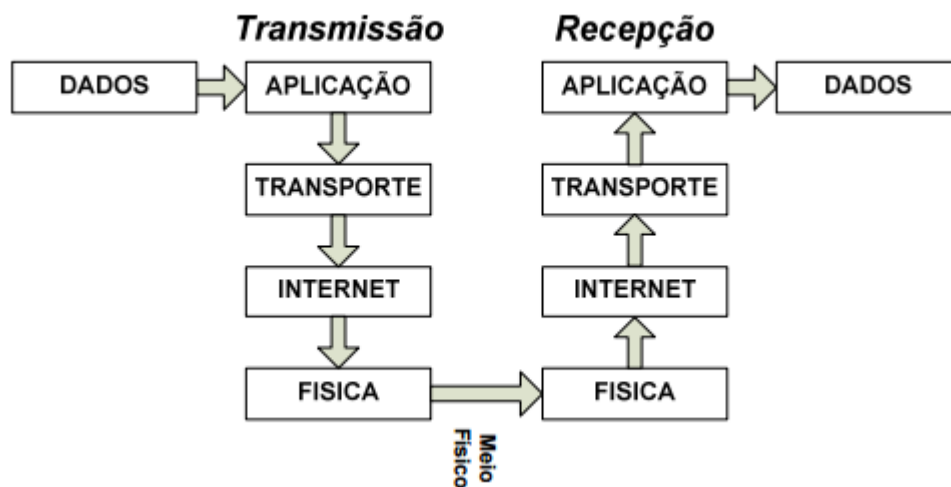


Figura 2.4 - Sentido dos pacotes pela rede

Fonte: adaptado de CANTÚ, 2003

## 2.2.2 Principais Protocolos da Pilha TCP/IP

Foi preciso a criação de alguns protocolos para coordenar as trocas de informações entre equipamentos conectados na rede. Na Figura 2.5 encontram-se os principais protocolos de cada camada.

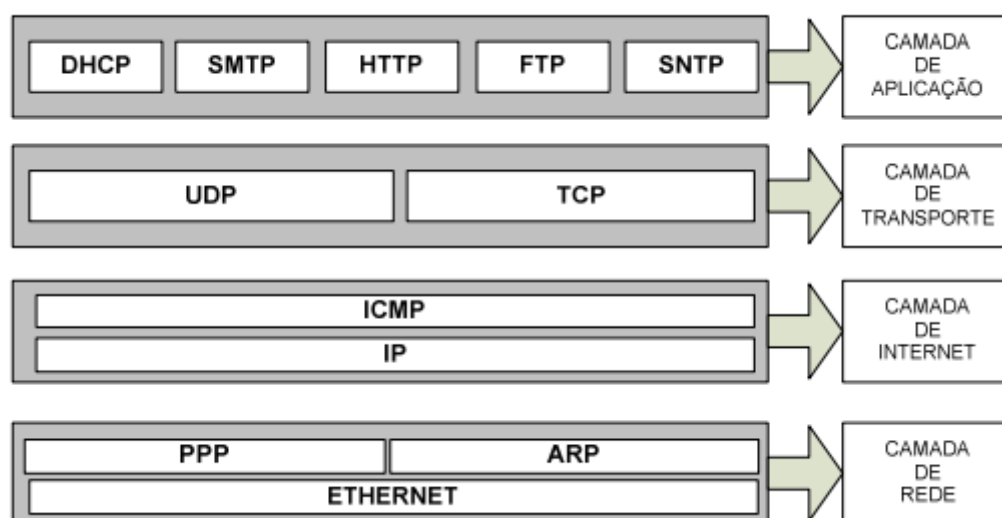


Figura 2.5 - Principais protocolos da pilha TCP/IP separados por camadas.

Fonte: LUVIZOTO, 2000 (adaptado)

### 2.2.2.1 Protocolos da Camada de Aplicação

- DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*): é o protocolo que permite a alocação dinâmica de números IP (KUROSE; ROSS, 2006).
- SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*): é o protocolo padrão para envio de e-mails por meio da internet (KUROSE; ROSS, 2006)
- HTTP (*HyperText Transfer Protocol*): é o protocolo para troca ou transferência de hipertexto funcionando como um protocolo de requisição de resposta no modelo cliente-servidor (KUROSE; ROSS, 2006).
- SNMP (*Simple Network Time Protocol*) ou NTP (*Network Time Protocol*): protocolo para sincronização de relógios dos computadores (KUROSE; ROSS, 2006).

### 2.2.2.2 Protocolos da Camada de Transporte

- UDP (*User Datagram Protocol*): protocolo simples que encapsula os pacotes em datagramas e envia para o destino. Porém não há garantia que o pacote irá chegar ou não, mas esse fato garante maior velocidade na transmissão dos dados (KUROSE; ROSS, 2006).
- TCP (*Transmission Control Protocol*): o TCP é o protocolo principal do conjunto de pilha TCP/IP pois verifica se os dados foram enviados de forma certa, na sequência correta e sem erros, oferecendo total confiabilidade na entrega dos dados (KUROSE; ROSS, 2006).

### 2.2.2.3 Protocolos da Camada de Internet (Rede)

- ICMP (*Internet Control Message Protocol*): é o protocolo utilizado para fornecer relatórios de erros à fonte original.
- IP (*Internet Protocol*): é o protocolo responsável pelo transporte. Cada computador possui um endereço de IP no qual o identifica na rede. Porém somente o protocolo IP não garante a entrega dos pacotes, podendo ser perdido ou duplicado na rede (KUROSE; ROSS, 2006).

### 2.2.2.4 Protocolos da Camada de Enlace/Física

- PPP (*Point-to-Point Protocol*): é um protocolo para interligar a entidade emissora com a entidade receptora dentro da rede de maneira simples e confiável.
- ARP (*Address Resolution Protocol*): é o protocolo usado para encontrar um endereço da camada de ligação de dados a partir do endereço da camada de rede. Ele traduz o endereço de IP para endereço MAC.
- ETHERNET: é uma arquitetura de interconexão para redes locais - Rede de Área Local (LAN) - baseada no envio de pacotes. Ela define cabeamento e sinais elétricos para a camada física, em formato de pacotes e protocolos para a subcamada de controle de acesso ao meio (Media Access Control - MAC) do modelo OSI.

## 2.2.3 Arquitetura Cliente-Servidor

Este tipo de arquitetura, distribui as tarefas e trabalhos entre os fornecedores de um recurso, designados como servidores, e os requerentes do serviço, designados como clientes. São os clientes que iniciam a requisição de comunicação enquanto o servidor fica aguardando a requisição de entrada.

O cliente é a parte que interage com o usuário, possui a interface que o usuário utiliza para requisitar as tarefas ao servidor, sendo chamado de *front-end* da aplicação. Os processos clientes gerenciam as atividades dos usuários e realizam as validações dos dados informados por estes (DELABRIDA, 2015).

O servidor é o processo que responde a uma mensagem solicitado por parte do cliente. O processo servidor é chamado de *back-end*. O processo servidor pode oferecer serviços a muitos clientes, realiza pesquisas, filtragens e atualizações em bancos de dados (DELABRIDA, 2015).

Todo esse processo pode ser representado pela Figura 2.6.



Figura 2.6 - Arquitetura Cliente-Servidor.

Fonte: AMBIENTE CLIENTE SERVIDOR, 2016.

### 2.3 Página Web e *Framework* .NET

Uma página web tem formato HTML (Hyper Text Markup Language) e com ligações de hipertexto que permitem a navegação entre outras páginas. Muitas vezes fornecem gráficos em movimento, interação com o utilizador e som. Além disso, ficam hospedadas em servidores e quando um usuário (cliente) acessa o IP do site, o servidor processa o conteúdo recebido e gera uma mensagem de resposta a esse cliente. Em seguida o computador do cliente interpreta a resposta e exibe a página no navegador conhecido como *browser*.

A plataforma de desenvolvimento Microsoft Visual Studio permite a criação de páginas web com uso dos recursos do *Framework* .NET. O ASP.NET – um dos recursos do *Framework* .NET – é poderoso pelo fato de ser integrado com ferramentas de programação, acesso à dados e segurança. Além disso no ASP.NET todas as páginas são compiladas antes de serem executadas e são mantidas em cache na memória, fazendo com que normalmente precisem ser processadas somente uma vez. É uma plataforma de fácil utilização, alta portabilidade, muito flexível para utilização de plug-ins e uma das mais completas IDEs atualmente.

O *Framework* .NET abrange uma estrutura de objetos, classes e ferramentas que se integram ao sistema operacional para fornecer suporte ao desenvolvimento. Ao instalar o .NET *Framework* em uma máquina não é necessário fazer a distribuição de outros componentes, uma vez que todos já estão instalados. Isto facilita o desenvolvimento e a distribuição de aplicações (SINSIC, 2004).

O ASP.NET é composto por:

- Visual Studio .NET Web Development tools;
- System.Web namespaces;
- Server Controls e HTML Controls

- Microsoft Internet Information Services (IIS)
- Visual Basic.NET, linguagens de programação Jscript e C#;
- *Framework* .NET
- ADO.NET
- Microsoft Application Center Test (ACT);

O ASP.NET é usado para criar aplicações web e web services que rodam sob o *Internet Information Server* (IIS) criada pela Microsoft. A função do IIS no *Windows* é oferecer uma plataforma para a hospedagem de sites, serviços e aplicativos, sendo capaz de integrar as seguintes tecnologias: ASP.NET, FTP, PHP, WCF e o próprio IIS (MICROSOFT, 2016).

## 2.4 Sistemas SCADA

Sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*) são sistemas que utilizam *software* para a supervisão e monitoramento das variáveis e dos dispositivos de controle de processos industriais (MELENDEZ; COLOMER; DE LA ROSA, 2001). Estes sistemas permitem que sejam monitoradas e controladas informações de um determinado processo, coletadas através de equipamentos de aquisição de dados, posteriormente analisadas, manipuladas e armazenadas pelo usuário.

O acesso remoto aos dados fornece, em tempo útil, o estado atual do sistema por meio de gráficos, previsões ou relatórios, viabilizando tomada de decisões pré-programadas ou em tempo real estabelecida pelo operador, facilitando tanto o monitoramento quanto o controle de um determinado processo (EBATA et al., 2000). Ou seja, a visualização dos dados se dá por meio da apresentação de informações por meio de interfaces homem-máquina, que permitem visualizar os dados lidos na fase de aquisição, além de fornecer previsões e tendências do processo produtivo com base nos valores dos dados e valores parametrizados pelo operador, exibindo gráficos e relatórios capazes de simular a evolução dos estados do processo controlado (SOUZA, 2005).

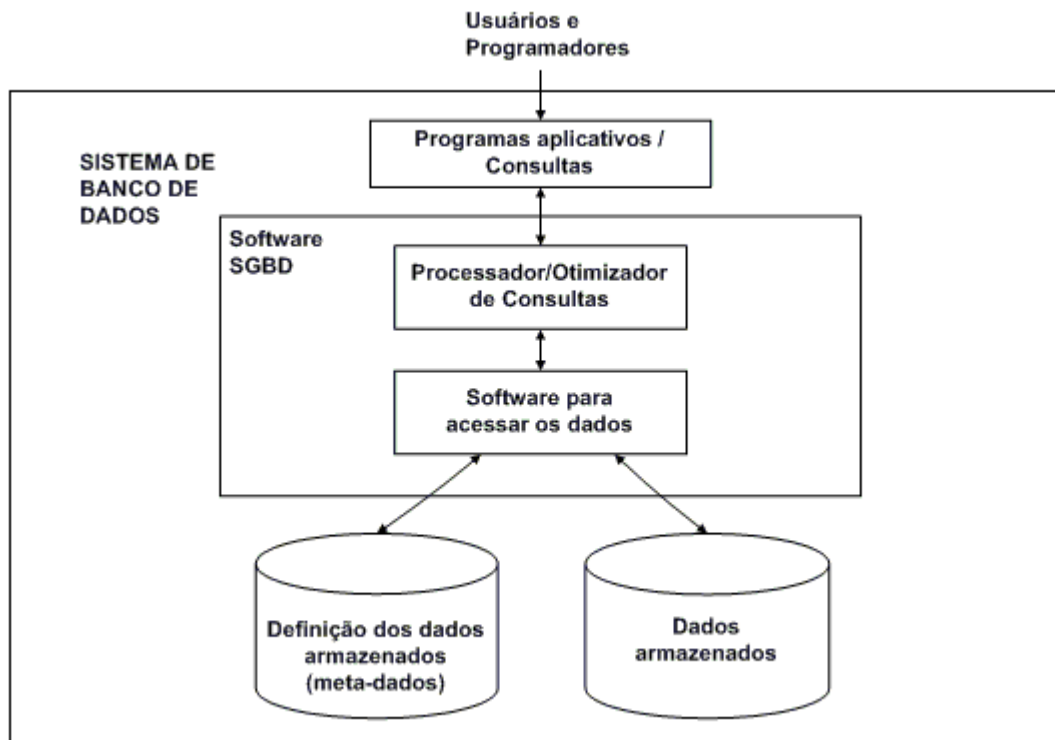
## 2.5 Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD)

Um banco de dados pode ser gerado e mantido manualmente ou pode ser automatizado. No entanto, para se automatizar precisa-se da criação de um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD). Esse sistema é uma coleção de programas que permite criar e manipular um banco de dados (MERSCHMANN, 2014).

O SGBD é um conjunto de softwares de propósito geral que facilita os processos de:

- Definição: especificação dos tipos, estruturas e as restrições para os dados a serem armazenados.
- Construção: processo de armazenar os dados em alguma mídia controlada pelo SGBD;
- Manipulação: inclui funções como pesquisas em banco de dados, atualização do banco e geração de relatórios;
- Compartilhamento: permite aos múltiplos usuários e programas acessar, de forma concorrente, o banco de dados.

Um Sistema de Banco de Dados simplificado pode ser representado pela Figura 2.7.



**Figura 2.7 - Sistema de Banco de Dados simplificado**

A finalidade da criação de um banco de dados é uma coleção lógica e coerente de dados com algum significado inerente. É projetado, construído e povoado por dados para uma finalidade específica.

Algumas das vantagens de usar um banco de dados são:

- Controle de redundância;
- Controle de acesso (segurança);

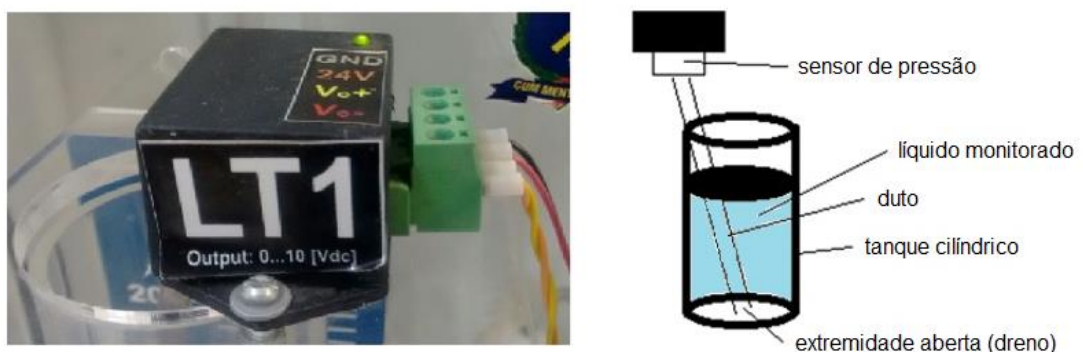
- Existência de múltiplas interfaces para os usuários;
- Representação de relacionamentos complexos entre os dados;
- Estrutura de armazenamento e técnicas de pesquisa para o processamento de consultas;
- Permissão de ações usando regras;

## 2.6 Sensor de Pressão MPXM2010GS

Sensores são dispositivos de entrada que converte uma grandeza física (força, pressão, deslocamento, etc) em sinais elétricos (analógico ou digital). Esses dispositivos são essenciais para se obter um controle em malha fechada, por meio da leitura da variável medida e comparando com o valor de referência obtendo então o sinal de erro a ser utilizado no controlador (IBRAHIM,2006).

[...] A medição de nível dos tanques é aferida pela pressão diferencial através do sensor MPXM2010GS da Motorola. Este sensor é baseado no efeito piezo-resistivo e possui compensação de temperatura. Sua saída é linear em uma faixa de 0 a 10kPa. O sensor possui um encapsulamento DPAK, que permite que um tubo seja conectado ao sensor, isolando o sensor do contato direto com a água (COCOTA, 2014).

Esse sensor possui um circuito de calibração integrado. Conforme a Figura 2.8 temos um duto imerso no líquido com uma das extremidades fechada no próprio sensor. Sendo assim, a pressão do líquido é proporcional ao nível da água no tanque.



**Figura 2.8 - Sensor de pressão com duto imerso no líquido**

A saída do sensor necessita ser amplificada para ser amostrada no canal analógico do PIC. Este condicionador de sinais é baseado no amplificador INA126PA (Figura 2.9).



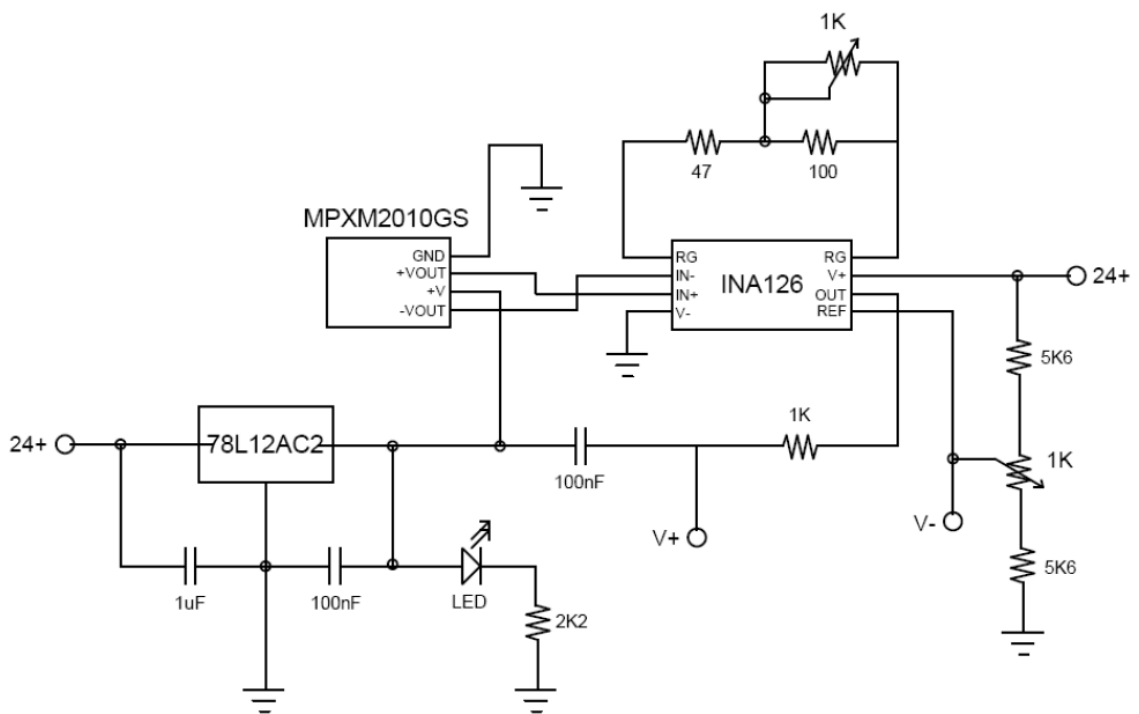


Figura 2.9 - Diagrama esquemático do circuito do transdutor de pressão

Fonte: COCOTA JR., 2009, p. 89

## 2.7 Bomba

O conjunto moto-bomba é composto por um motor de corrente contínua (CC) de 12 V, um dissipador de calor e uma bomba de engrenagens acoplada no eixo do motor. Essa bomba é fabricada pela Jersey Modeler ([www.jerseymodeler.com](http://www.jerseymodeler.com)), uma empresa fabricante de acessórios para aero modelagem em Nova Jersey.

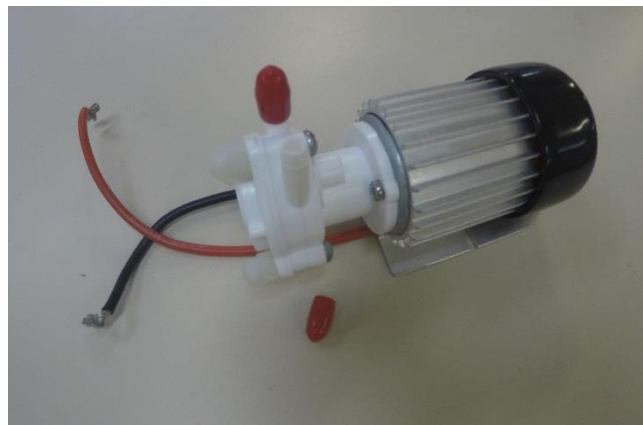


Figura 2.10 - Bomba de engrenagens

Motores CC caracterizam-se por sua versatilidade. Por possuir grande facilidade de controle, estes são muito utilizados em aplicações que se desejam amplo controle de velocidades ou de um controle preciso da saída do motor. Com a tecnologia de estado sólido em ascensão, muitas das aplicações estão substituindo os motores CC por motores CA. Entretanto, devido a sua versatilidade e seu sistema de acionamento simplificado, assegura-se o uso continuado de motores CC em uma ampla variedade de aplicações (TORGA, 2016).

## 2.8 Módulo Ethernet ENC28J60

Ethernet é a tecnologia de rede mais usada por pessoas no mundo. Ela está completamente difundida e a tendência é que, cada vez mais, pessoas utilizem essa ferramenta para compartilhamentos e buscas de informações (KUROSE; ROSS, 2006).

O módulo (Figura 2.11) é formado pelo circuito integrado (CI) ENC28J60 (fabricado pela *Microchip Technology Inc*), uma porta ethernet RJ45, um cristal de 25Mhz e um conector de 10 pinos, que torna prática a ligação desse módulo à diferentes tipos de microcontrolador. Além disso, apresenta baixo custo (pode ser adquirido por cerca de R\$30,00).

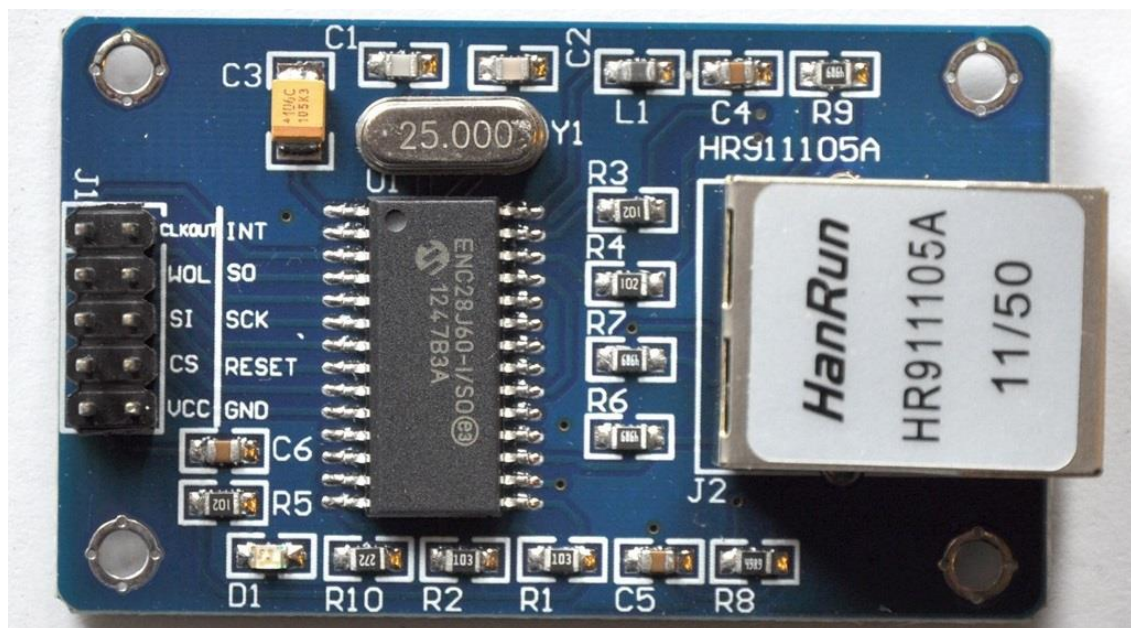


Figura 2.11 - Módulo Ethernet ENC28j60

Fonte: CLUBE DO HARDWARE, 2016

Este CI supracitado apresenta interface serial padrão periférico (SPI) e incorpora uma série de esquemas de filtragem de pacotes para limitar os pacotes de entrada. Os dois led's na porta RJ45 são usados para indicação de atividade de rede. Além disso apresenta um módulo interno DMA (*Direct Memory Access*) para transferência rápida de dados. (MICROCHIP, 2016).

## 2.9 Câmera IP

Câmeras que transmitem imagens por meio da rede internet já são produtos conhecidos no mercado. Nelas, a imagem é transmitida por meio de pacotes IP e são recebidas por qualquer outra máquina conectada na rede. Para visualizar as imagens que a câmera está detectando basta descobrir o seu endereço de IP e digitar em um navegador. Por exemplo, a câmera possui como endereço de rede `http://192.168.0.100:80`. Vale ressaltar que esse é um IP local, fornecida quando se conecta a câmera em um roteador. Ou seja, configurado dessa maneira é possível acessá-la somente por um host que esteja conectado na mesma rede local. Ao se acessar o endereço da câmera é possível configurá-la e assistir as imagens em tempo real.

Entretanto para acesso à câmera pela internet é preciso de um IP Global. Para isso foi necessário configurar o roteador – que recebe IP Global – para que redirecione para a câmera quando esse IP fosse acessado. Ou seja, acessando o IP do roteador ele encaminha para a câmera. Na Figura 2.12 pode ser observada a Câmera IP DCS-930L e o Roteador Wireless Portátil DIR-505 ambos da D-Link usado no atual trabalho juntamente com a configuração de redirecionamento.



Figura 2.12 - Câmera IP redirecionada pelo Roteador

## 2.10 Teoria de Controle

O controle de sistemas encontra aplicações em várias áreas como automobilística, naval, aeronáutica, médica, entre outras. Segundo Dorf e Bishop (2005, p. 2) “[...] enquanto o entendimento das dinâmicas de sistemas de negócios, sociais e políticos crescem, a habilidade de controlar esses sistemas também aumenta”.

De acordo com Ogata (2002), para o avanço da engenharia e ciência o controle automático tem desempenhado um papel vital, sendo um importante integrante dos processos industriais e de manufatura atualmente. Os avanços na teoria e na prática do controle proporciona melhoria nos

sistemas dinâmicos, aumentando a produtividade e aliviando o trabalho enfadonho de muitas operações manuais e repetitivas.

O controle pode ser realimentado ou não conforme desenho a seguir:

- Controle em malha aberta – sistemas que não possuem realimentação, ou seja, se aplica um sinal na entrada do sistema esperando que a saída consiga atingir um valor ou comportamento desejado da variável controlada (Figura 2.13).

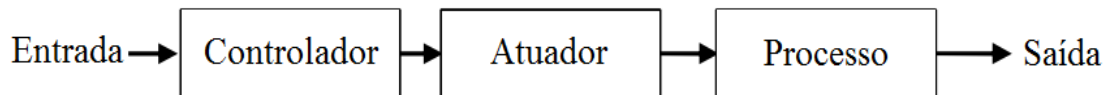


Figura 2.13 - Controle em malha aberta

- Controle em malha fechada - são sistemas realimentados no qual a saída do processo é medida por sensores e comparada com a referência (*setpoint*). Com base na diferença de sinais (erro) o controlador atua compensando esse erro (Figura 2.14).

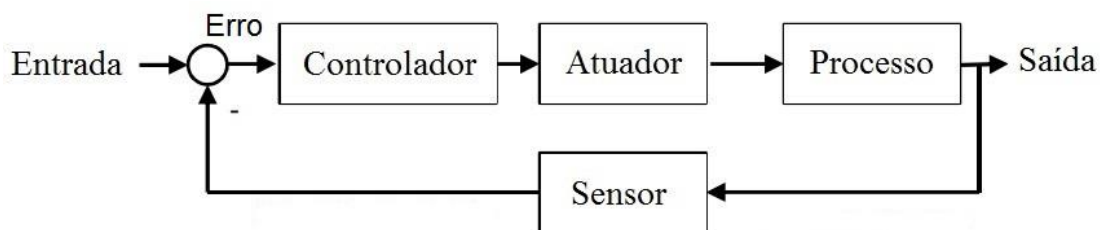


Figura 2.14 - Controle malha fechada

### 2.10.1 Controlador Proporcional (P)

Para um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre o sinal de saída do controlador  $u(t)$  e o sinal de erro atuante  $e(t)$  pode ser definida pela equação 2.3 onde  $K_p$  é denominado ganho proporcional.

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.3)$$

Para  $K_p$  elevado o sistema poderá ficar instável e para ganhos pequenos o sistema poderá ficar distante do ponto de operação ou demore a responder ao erro (IBRAHIM, 2006).

### 2.10.2 Controlador Proporcional Integral (PI)

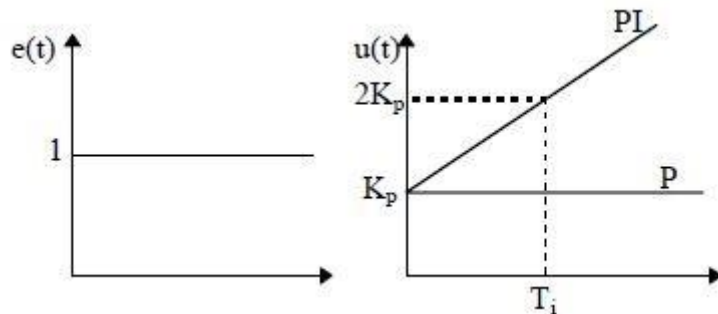
Conforme a equação 2.4, o sinal de controle de um controlador PI se dá em função do erro e da integral do erro (LOURENÇO, 1996).

$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.4)$$

Aplicando a transformada de Laplace para a equação de controle acima temos a seguinte expressão no domínio da variável complexa:

$$U(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (2.5)$$

Onde  $T_i$  representa o tempo integral correspondendo o tempo em que a parcela relativa a parte proporcional da ação de controle é duplicada (Figura 2.15).



**Figura 2.15 - Ação de Controle Proporcional e Integral**

Fonte: LOURENÇO, 1996.

Este controlador tem como característica eliminar o erro em regime permanente, pois se adiciona um polo na origem da função de transferência do controlador (LOURENÇO, 1996).

### 2.10.3 Controlador Proporcional Derivativo (PD)

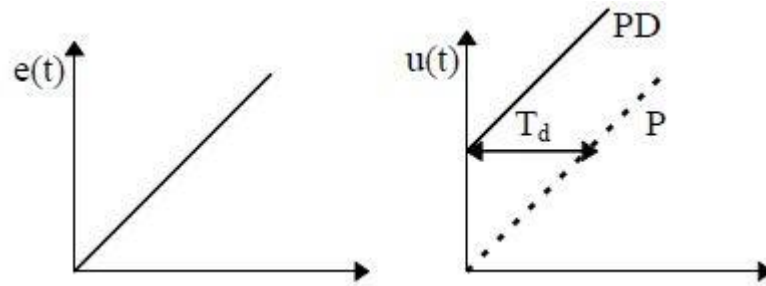
A ação derivativa consiste na aplicação de um sinal de controle proporcional a derivada do sinal de erro (BAZANELLA e SILVA, 2000), sendo a ação do controlador PD expressa no domínio do tempo por:

$$u(t) = K_P \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.6)$$

Aplicando a transformada de Laplace a função de transferência é dada por:

$$U(s) = K_P (1 + T_d s) E(s) \quad (2.7)$$

Em que o termo derivativo ( $T_d$ ) é o período de tempo antecipado pela ação derivativa relativamente à ação proporcional, sendo expresso em unidades de tempo, conforme apresentado na Figura 2.16.



**Figura 2.15 - Ação de Controle Derivativo**

Fonte: LOURENÇO, 1996

Entretanto, a vantagem de ser antecipatória ao erro, a ação de controle derivativa tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruídos e causar um efeito de saturação no atuador (OGATA, 2002).

A utilização da ação de controle derivativa tem por consequência melhoria da estabilidade do sistema, reduzindo o *overshoot* e melhorando a resposta transitória (LOURENÇO, 1996).

Este tipo de função cresce com o aumento da frequência, deixando o sistema sensível a ruídos de alta frequência. Vale ressaltar que a implementação analógica de um derivador puro é fisicamente impossível. Por estes motivos a implementação da ação derivativa dá-se com a introdução de um pólo em alta frequência que tem justamente a finalidade de limitar o ganho em alta frequência (BAZANELLA e SILVA, 2000).

#### 2.10.4 Controlador Proporcional Integral (PID)

Conhecido como controlador de três termos ou controlador PID a saída atuante na variável manipulada se dá em função do erro, integral do erro e a derivada do erro (LOURENÇO, 1996), conforme apresentado na Equação 2.8.

$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.8)$$

Aplicando transformada de Laplace para ação de controle acima temos:

$$U(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (2.9)$$

Na Figura 2.17 temos a representação em diagrama de blocos do controlador PID acadêmico.

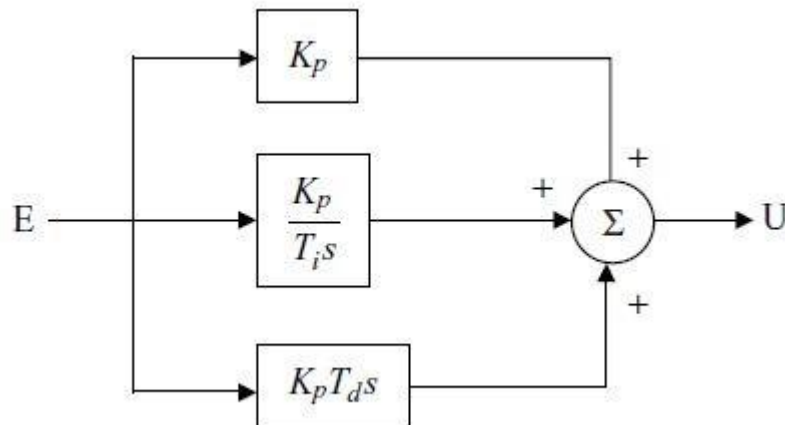


Figura 2.17 - Controlador PID

Fonte: IBRAHIN, 2006

### 2.10.5 Controle Digital

Controladores Digitais exigem blocos adicionais aos do sistema de controle. Na Figura 2.18 temos a representação do diagrama de blocos de um sistema de controle digital. A grande vantagem é a facilidade de se modificar o projeto do controlador, visto que o controlador é um *software* implementados no *firmware* dos microcontroladores.

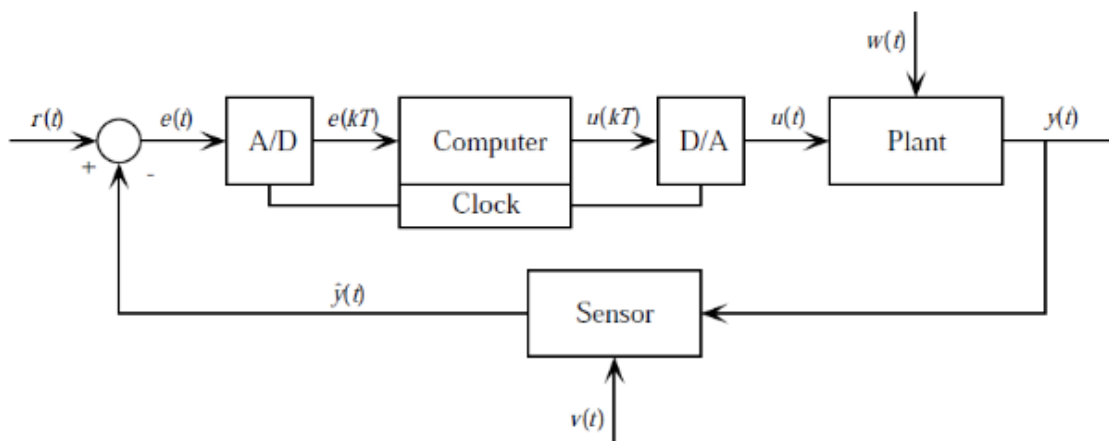


Figura 2.16 - Diagrama de Blocos de um Sistema de Controle Digital

Fonte: STARR, 2006

### 2.10.6 Implementando Controlador Digital

Para implementação do controlador PID contínuo em um computador digital (ou microcontrolador) é preciso representar o tempo contínuo no tempo discreto – da Equação 2.9

- já que os elementos controladores são sistemas microprocessados (IBRAHIM, 2006). Neste trabalho é utilizada aproximação pelo método de Euler para a conversão da derivada, Equação 2.10, e a aproximação trapezoidal para a conversão integral, Equação 2.11.

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(Kh) - e(Kh - h)}{h} \quad (2.10)$$

$$\int_0^t e(t)dt \approx \sum_{K=1}^n he(Kh) \quad (2.11)$$

Onde:

$h$ : é o tempo ou intervalo de amostragem (ou período de amostragem);

$e(Kh)$  : é o valor do erro no instante atual;

$e(Kh - h)$ : é o valor do erro no instante de amostragem anterior ao atual.

Ou seja, a Equação 2.8 passa a ser expressa por:

$$u(Kh) = K_P \left[ e(Kh) + T_d \frac{e(Kh) - e(Kh - h)}{h} + \frac{h}{T_i} \sum_{K=1}^n he(Kh) \right] + u(0) \quad (2.12)$$

Onde:  $u(0)$  é o último sinal de controle.

Esta forma de controlador PID da Equação 2.13 é conhecida como controlador PID posicional e está sob uma forma adequada que pode ser implementado em um computador digital.

### 2.10.7 Método da Curva de Reação

Para sintonia do controlador PID no presente trabalho utiliza-se o Método da Curva de Reação, o qual a partir de um degrau dado ao sistema em malha aberta é possível obter os parâmetros atraso ( $L$ ), constante de tempo ( $T$ ) e ganho direto do sistema ( $K_0$ ) para sintonia empírica do controlador.

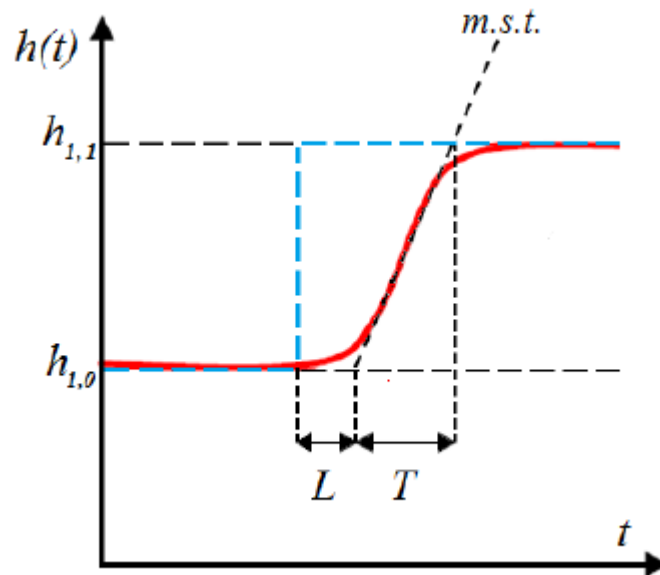
Como no caso do presente trabalho, “muitas plantas, particularmente as decorrentes nas indústrias de processo podem ser satisfatoriamente descritas como um sistema de primeira



ordem” (GOODWIN; GRAEBE e SALGADO, 2000, apud TORGA, 2016) conforme apresentado na Equação 2.13.

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-sL}}{T_s + 1} \quad \text{sendo } T > 0 \quad (2.13)$$

A saída da planta foi colocada em  $h_{1,0}$  (nível do tanque 1 no ponto de operação) de forma manual aplicando uma entrada  $\vartheta_{1,0}$ . Após um intervalo de tempo, aplica-se uma mudança na entrada da planta (degrau), este deve estar em uma faixa de 10 a 20% de seu fundo de escala ( $\vartheta_{1,1}$ ). A resposta transitória da planta a esse degrau foi amostrada, até que se alcançou um novo valor em regime permanente ( $h_{1,1}$ ), associado a nova entrada constante da planta ( $\vartheta_{1,1}$ ). Com este procedimento, os sistemas descritos pela Equação 2.13 irão apresentar uma curva de resposta parecido com a Figura 2.19 que é conhecida como a Curva de Reação do Processo, na qual *m.s.t.* significa a reta tangente no ponto de derivada máxima da curva.



**Figura 2.17 - Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem**

Fonte: adaptado de BRITO, 2014. 69 p

A partir dessa curva, pode-se identificar o ganho direto ( $K_0$ ), o atraso ( $L$ ) e a constante de tempo ( $T$ ) do sistema. O ganho direto é representado pela Equação 2.14:

$$K_0 = \frac{h_{1,1} - h_{1,0}}{\vartheta_{1,1} - \vartheta_{1,0}} \quad (2.14)$$

O método de sintonia por Ziegler Nichols tem como objetivo obter uma reação de 4:1 do primeiro para o segundo pico na resposta do sistema dada uma referência e um degrau. A partir das constantes  $K_0$ ,  $L$  e  $T$ , pode-se determinar os parâmetros do controlador para alcançar este amortecimento particular na resposta em malha fechada do sistema (Tabela 2.1) (BRITO, 2014).

**Tabela 2.1 - Sintonia de Ziegler Nichols**

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{K_0 L}$		
PI	$\frac{0,9T}{K_0 L}$	$3L$	
PID	$\frac{1,2T}{K_0 L}$	$2L$	$0,5L$

**Fonte: GOODWIN, GRAEBE e SALGADO, 2000**

De acordo com Goodwin, Graebe e Salgado (2000, apud TORGA, 2016), “para melhorar esta sintonia Cohen-Coon avançou nos estudos para encontrar as configurações que resultem em uma menor dependência do controlador com relação a razão do atraso e a constante de tempo.”

A proposta de Cohen-Coon de sintonia conforme a Equação 2.13 está apresentada na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Sintonia de Cohen Coon**

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{K_0 L} \left(1 + \frac{L}{3T}\right)$		
PI	$\frac{T}{K_0 L} \left(0,9 + \frac{L}{12T}\right)$	$\frac{L(30T + 3L)}{9T + 20L}$	
PID	$\frac{T}{K_0 L} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T}\right)$	$\frac{L(32T + 6L)}{13T + 8L}$	$\frac{4LT}{11T + 2L}$

**Fonte: GOODWIN, GRAEBE e SALGADO, 2000**

## 2.11 Modelagem da Bancada de Dois Tanques Acoplados

O princípio de Bernoulli, descreve o comportamento do escoamento de um fluido relacionando a velocidade e a pressão de um fluido (WHITE, 2002).

Segundo Libbi (2003, apud BRITO, 2014):

quando um líquido em um tanque é submetido a uma descarga por um orifício de saída com área da seção transversal muito menor que a área da seção transversal do tanque ( $a_i \ll A_i$ ), a hipótese de escoamento do fluido sem atrito e em regime quase permanente pode ser empregada. Essa hipótese possibilita o uso da equação de Bernoulli no centro da superfície do fluido e no centro da seção do dreno. Assim, o modelo não linear, que descreve a dinâmica do nível dos tanques acoplados (Figura 1.2) em função das vazões de entrada e de saída, pode ser obtido a partir da lei de conservação para escoamentos incompressíveis e da lei de Bernoulli, obtemos as equações 2.13 e 2.14 que representam o modelo não linear do sistema.

**Tabela 2.3 - Acrônimos para equações da seção 2.11**

Símbolo	Descrição
$h_{1,0}$	Nível do tanque 1 no ponto de operação
$h_{2,0}$	Nível do tanque 2 no ponto de operação
$\vartheta_{1,0}$	Tensão média aplicada no motor da bomba
$k_1$	Ganho da bomba
$\gamma_1$	Parcela do fluxo de água da bomba para o tanque 1
$kl_i$	Constante de perda de carga do dreno do tanque i

Tanque 1:

$$\frac{dh_1}{dt} = kl_2 \frac{a_2}{A_1} \sqrt{2gh_2} + \frac{\gamma_1 k_1 \vartheta_1}{A_1} - kl_1 \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} \quad (2.15)$$

Tanque 2:

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{(1 - \gamma_1) k_1 \vartheta_1}{A_2} - kl_2 \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} \quad (2.16)$$

Onde os acrônimos das equações 2.15 e 2.16 estão descritos nas tabelas 1.1 e 2.3.

Dessa forma, o modelo linear mostrado nas Equações 2.17 e 2.18 pode ser obtido pela expansão em série de Taylor das equações 2.15 e 2.16, desprezando-se os termos de segunda ordem e superiores, e assumindo-se as variáveis de desvio  $x_i = x_{i,h} - h_{i,0}$  e  $u_i = u_{i,h} - \vartheta_{i,0}$ .

$$\frac{dx_1}{dt} = k_{l2} \frac{a_2}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{2,0}}} x_2 + \frac{\gamma_1 k_1 u_1}{A_1} - k_{l1} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} x_1 \quad (2.17)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{(1 - \gamma_1) k_1 u_1}{A_2} - k_{l2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{2,0}}} x_2 \quad (2.18)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace nas Equações 2.17 e 2.18, encontram-se as funções de transferência de cada tanque, que podem ser expressas por:

$$\frac{X_1(s)}{U_1(s)} = \frac{(\gamma_1 c_1 T_2 s) + c_1}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} \quad (2.19)$$

$$\frac{X_2(s)}{U_1(s)} = \frac{(1 - \gamma_1) c_2}{(T_2 s + 1)} \quad (2.20)$$

Onde  $X_1(s)$  e  $X_2(s)$  são os sinais de saída referentes aos níveis dos tanques 1 e 2 e  $U_1(s)$  é o sinal de entrada no sistema referente à tensão aplicada na bomba,  $c_1 = k_1 k_c T_1 / A_1$  e  $c_2 = k_1 k_c T_2 / A_2$ , sendo as constantes de tempo  $T_i$  dadas por:

$$T_i = \frac{A_i}{k_{li} a_i} \sqrt{\frac{2h_{i,0}}{g}}, i = 1, 2 \quad (2.21)$$

### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este capítulo tem a finalidade de apresentar as etapas realizadas desde a elaboração do circuito eletrônico, programação, calibração dos sensores, até a elaboração da página web.

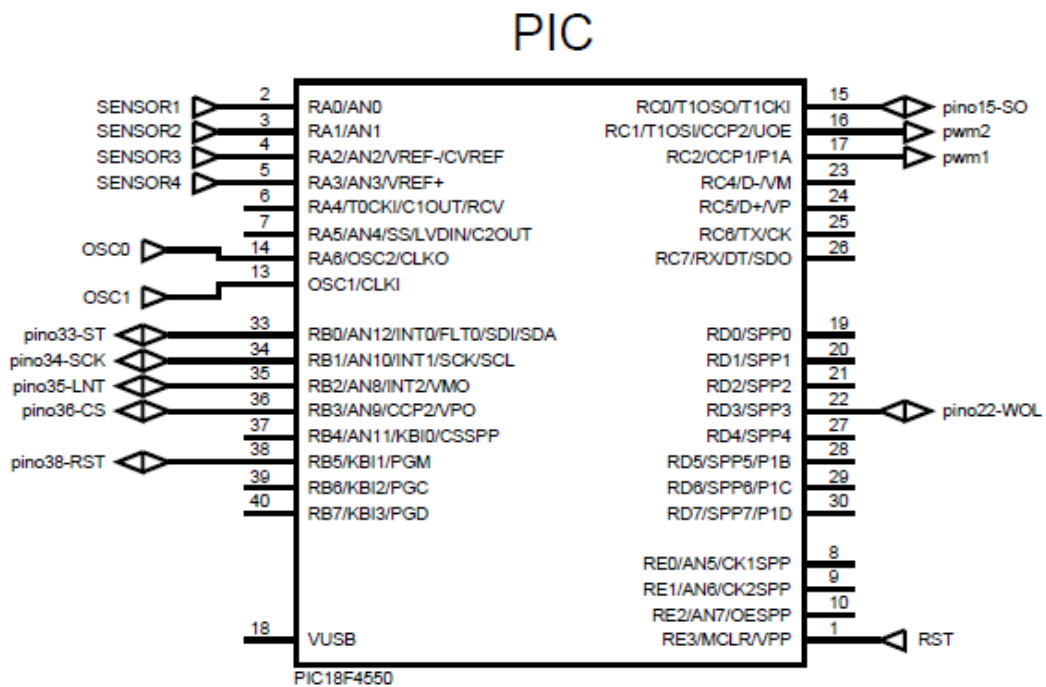
A ordem cronológica do projeto foi a seguinte:

- i. Desenvolvimento do *firmware* do microcontrolador e simulação do sistema no *software* Proteus;
- ii. Desenvolvimento do *hardware* e teste do circuito no *proto-board*;
- iii. Desenvolvimento do programa supervisorio;
- iv. Teste de comunicação entre o programa supervisorio e o circuito montando no *proto-board*;
- v. Desenvolvimento da placa de circuito impresso;
- vi. Desenvolvimento da página web;
- vii. Criação do banco de dados;
- viii. Comunicação e sincronismo entre todas as plataformas (microcontrolador, supervisorio, banco de dados e página web);
- ix. Calibração dos sensores de pressão;
- x. Implementação do controlador digital PI no *firmware* do PIC;
- xi. Testes online na bancada.

#### 3.1 Circuito Eletrônico

Para suporte ao desenvolvimento do circuito eletrônico foi usado o *software* Proteus Design Suite da Labcenter Electronics Ltd. Esse *software* permite o ambiente de simulação de circuitos eletrônicos por meio do Proteus ISIS.

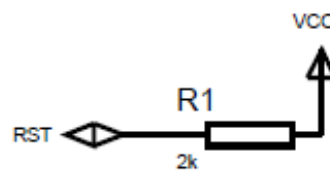
O principal componente do circuito eletrônico é o microcontrolador PIC 18F4550. Esse realiza as leituras dos sensores, assim como, aciona os motores moto-bombas. Na Figura 3.1 temos um diagrama com as E/S utilizadas no PIC.



**Figura 3.1 - Pinos usado do microcontrolador PIC 18F4550**

O pino 1 do PIC é responsável pelo reset. O PIC possui internamente circuito Power-on reset. Sempre que um circuito é ligado com o PIC, ele aguardará até que a tensão se estabilize para iniciar qualquer processamento. Necessita-se de um resistor entre 560R e 2k2 para realizar o reset do microcontrolador como pode ser observado na Figura 3.2 – no caso um resistor de 1k (KARDEK, 2015).

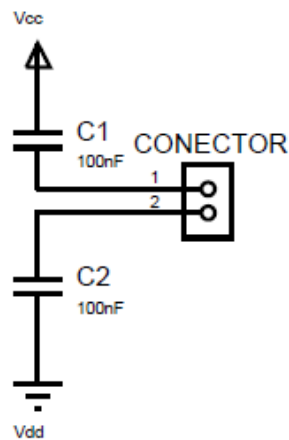
## RESET DO PIC



**Figura 3.2 - Reset do PIC**

A alimentação do PIC é feita, geralmente, com uma tensão de 5V. Os pinos 12 e 13 são responsáveis pela tensão de alimentação positiva e negativa respectivamente. Recomenda-se o uso de dois capacitores de desacoplamento para evitar ruídos e interferência da rede elétrica. Na Figura 3.3 se observa o circuito de alimentação do PIC.

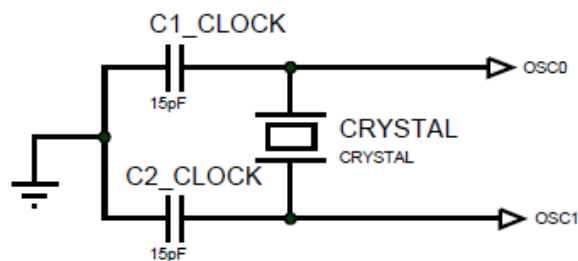
## ALIMENTAÇÃO DO PIC



**Figura 3.3 - Alimentação do PIC**

Os pinos 13 e 14 são responsáveis pelo circuito de clock, que determinará a velocidade de operação do microcontrolador. Nesse trabalho, foi usado o cristal de 20 MHz. A Figura 3.4 mostra esse circuito.

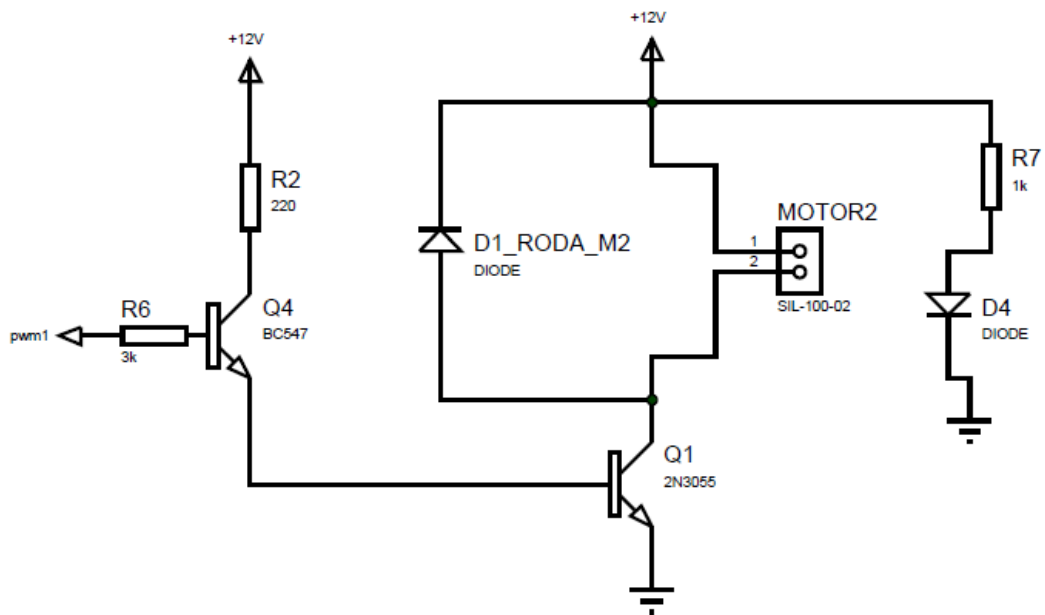
## CIRCUITO DE CLOCK



**Figura 3.4 - Circuito de clock do PIC**

Os pinos 16 e 17 são conectados ao circuito de módulo de potência responsável pelos acionamentos das bombas por PWM. Na Figura 3.5, tem-se o circuito do módulo de potência desenvolvido.

## MÓDULO DE POTÊNCIA



**Figura 3.5 - Circuito de potência da PCI**

Vale ressaltar que a PCI usa duas portas PWM do PIC. Ou seja, existe na placa outro circuito idêntico ao apresentado na Figura 3.5 para o acionamento de uma segunda bomba. Esse foi um requisito do projeto, para operação futura da bancada na configuração de quatro tanques.

Os pinos 2, 3, 4 e 5 são usados como portas A/D para leitura dos sensores de pressão MPXM2010. Como os circuitos transdutores de pressão apresentam em suas saídas tensões de 0 a 10Vcc, necessitou-se inserir um circuito divisor de tensão, para a amostragem desse sinal analógico na faixa de 0 a 5Vcc (Figura 3.6).



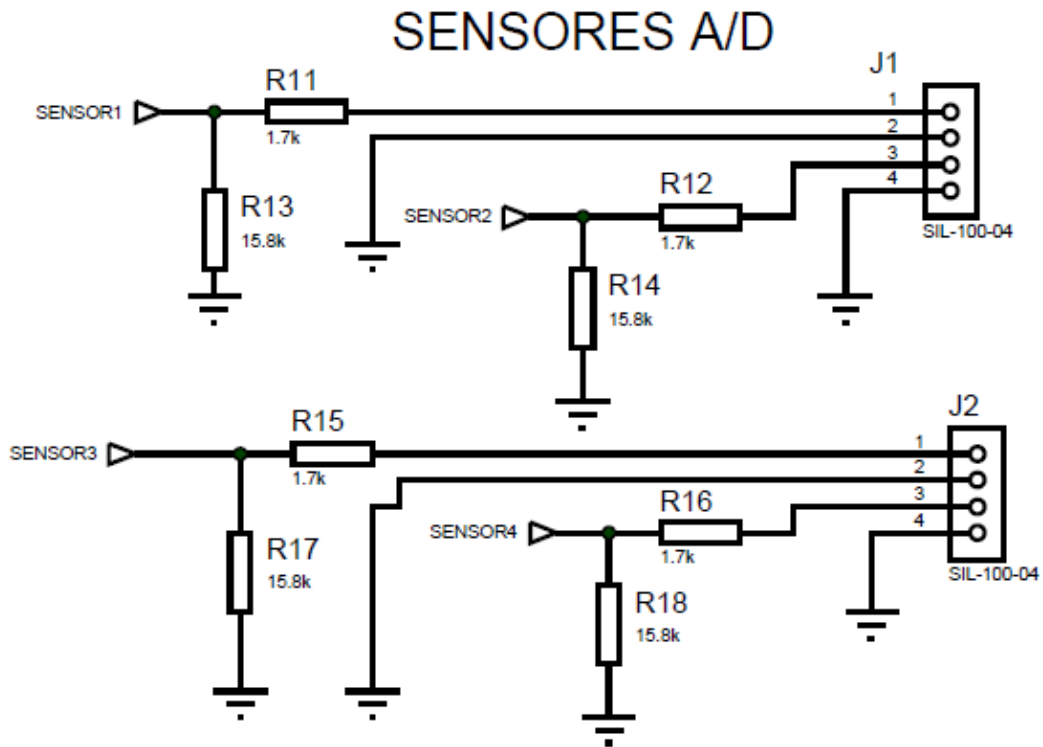


Figura 3.6 - Circuito dos sensores de pressão na PCI

Os pinos 15, 22, 33, 34, 35, 36 e 38 do PIC são conectados respectivamente nos pinos WOL, SO, ST, SCK, LNT e CS do módulo ENC28J60. O diagrama eletrônico pode ser observado pela Figura 3.7.

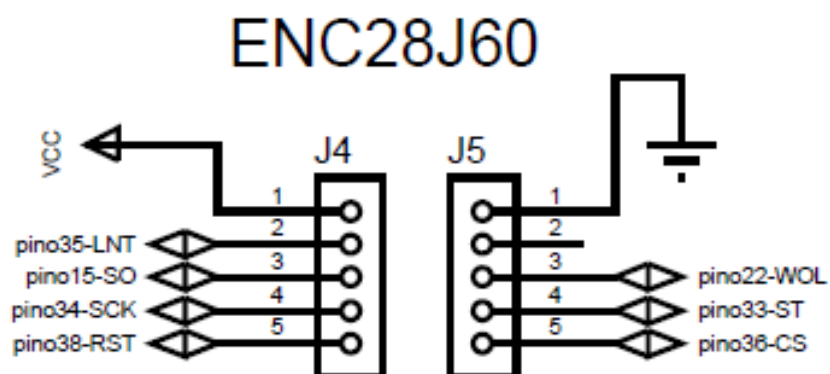


Figura 3.7 - Ligações dos pinos do ENC28J60 na PCI

O módulo ENC28J60 é responsável pela conversão serial TCP/IP, fazendo com que o PIC possa comunicar por meio dessa pilha.

### 3.2 Placa de Circuito Impresso (PCI)

Após projetar e simular o circuito por meio do diagrama esquemático, usou-se o Proteus ARES, para desenvolver o *layout* do circuito impresso (Figura 3.8).

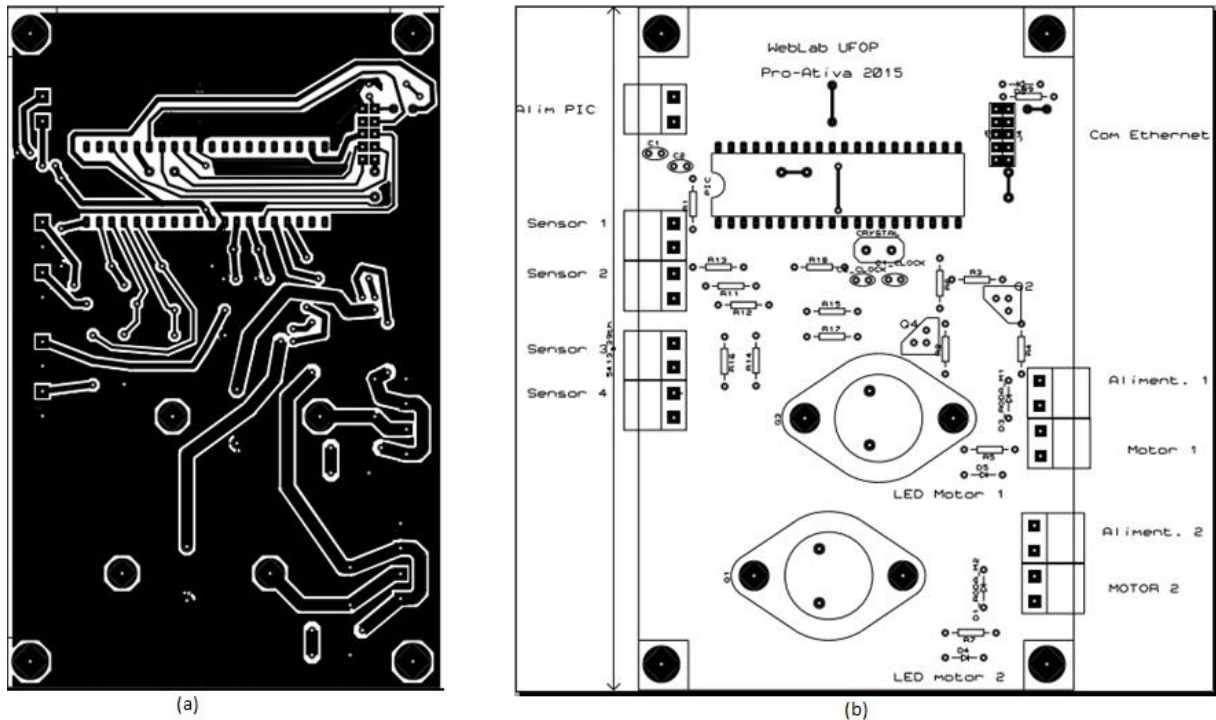


Figura 3.8 (a) PCI no ARES – vista inferior, (b) PCI no ARES – vista superior

Para a confecção da PCI foram realizadas as seguintes etapas: (1), foi exportado do ARES um bitmap do circuito eletrônico para, então, mapear o circuito no *software* ArtCam (esse software interpreta a imagem no formato bitmap e cria as trilhas e furações do circuito); (2) em seguida, ele converte para linguagem G - linguagem de programação que comanda máquinas operatrizes de Controle Numérico Computadorizado, no caso uma CNC fresadora – no formato “Mach2.inch(\*.cnc)”; (3) por fim, foi confeccionada a PCI conforme apresentado na Figura 3.9.



**Figura 3.9 - CNC do Laboratório de Máquinas Elétricas**

Os materiais utilizados para a construção da PCI são expostos na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Componentes para confecção da PCI**

<b>Quantidade</b>	<b>Componentes</b>
1	Microcontrolador PIC 18F4550
1	Fonte de 5V
3	Leds
15	Resistores
2	Diodo 2N3055
2	Transistores BC547
6	Conectores PCI Borne
3	Capacitores
1	Cristal de 20 MHz
1	Módulo ENC28J60
1	Placa de fenolite 14cm x 10cm

Na Figura 3.10 têm-se o circuito finalizado.

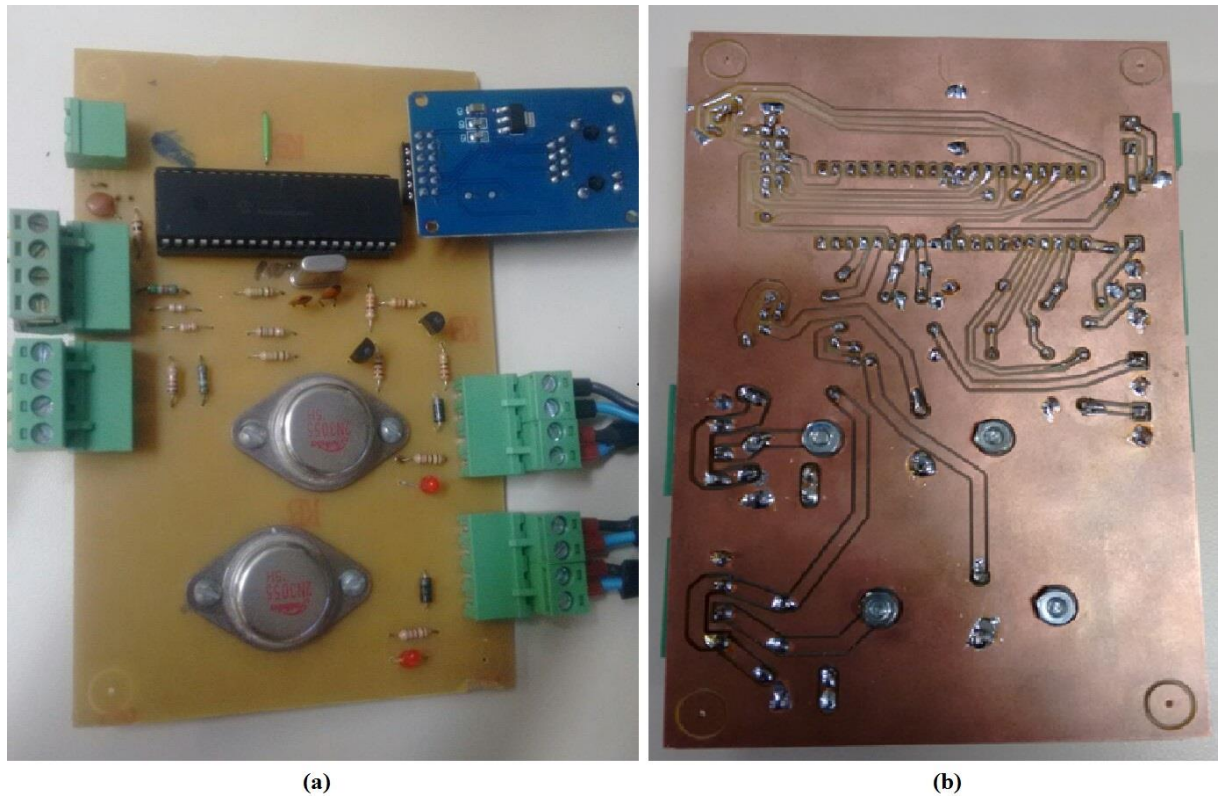


Figura 3.10 - (a) PCI finalizada vista superior, (b) PCI finalizada vista inferior

### 3.3 *Firmware* de programação do microcontrolador

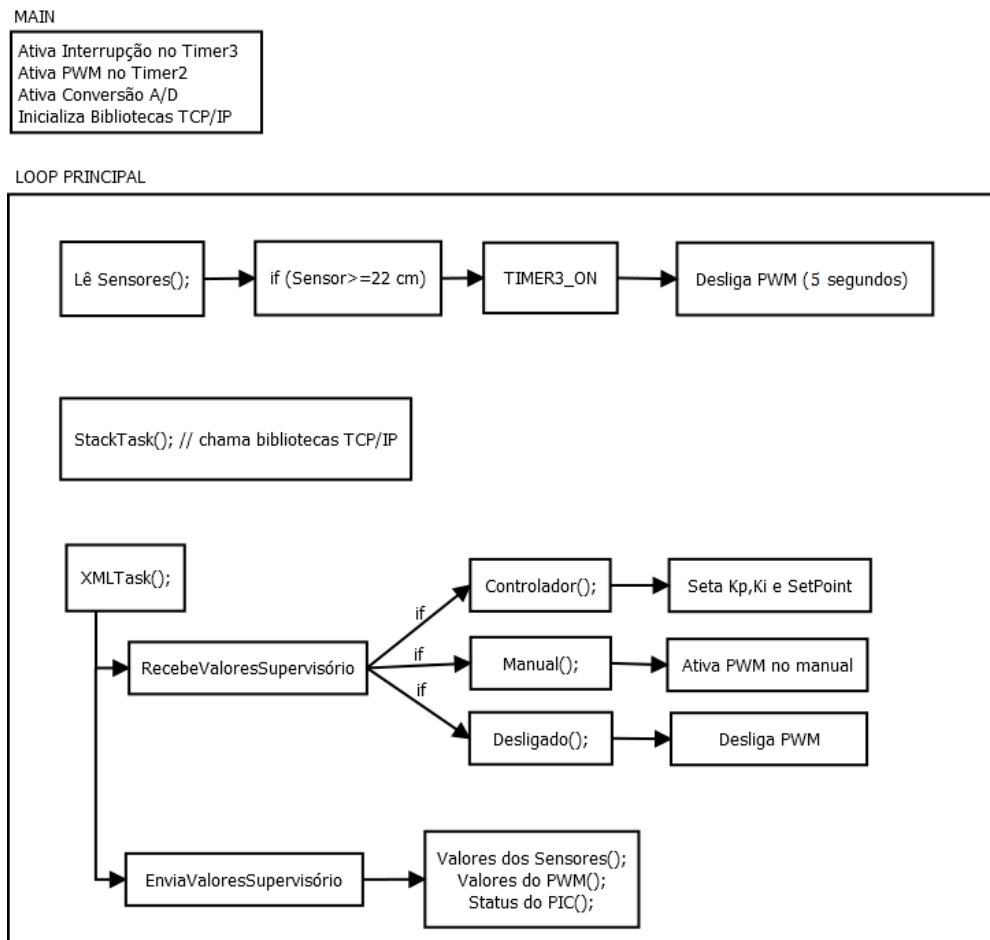
O *firmware* de programação foi desenvolvido em linguagem de programação C, utilizando o compilador CCS-PCWHD. Compiladores CCS são fáceis de usar e rápido de aprender. É um compilador altamente otimizado e rico em funcionalidades ANSI C para Microchip PIC<sup>®</sup> MCUs (CUSTOM COMPUTER SERVICES, 2016).

Para a gravação do código no PIC usou-se o PICKIT<sup>™</sup> 2 - ferramenta de programação de baixo custo para desenvolvimento com uma interface fácil de usar para programação e depuração de famílias da Microchip flash de microcontroladores. Ele é capaz de programar a maioria dos microcontroladores e memórias seriais EEPROM da Microchip.

Para se comunicar com o PIC 18F4550 por meio da rede Ethernet foi preciso usar o módulo ENC28J60 juntamente com a biblioteca da pilha TCP/IP da Microchip. Porém, essa é uma biblioteca bastante extensa e complexa, além de possuir pouco material na internet com acesso livre. Contudo, o uso dessa biblioteca é relativamente simples, quando se tem um código base. Nesse sentido, o ANEXO II explica onde encontrar a biblioteca da pilha TCP/IP juntamente com o código fonte do PIC usado neste projeto.

Como o PIC, nesse caso, é um servidor, ele tem um endereço de IP e fica à espera de um cliente. Porém, não foi possível com a pilha TCP/IP da Microchip abrir uma comunicação cliente-servidor de modo a mantê-la permanentemente pela própria maneira como foi implementada a biblioteca. A cada vez que o cliente faz uma aquisição com o servidor (o PIC), ele responde a chamada do cliente e depois fecha a comunicação. Isso tem que se levar em conta no supervisório, pois ele sempre precisa abrir uma nova aquisição cliente para poder enviar e receber as informações do microcontrolador.

A programação do PIC se resume em: esperar uma aquisição cliente, ler dados do supervisório, ler sensores, atuar nas bombas (quando for mandado pelo supervisório) e enviar resposta para o supervisório. O fluxograma da Figura 3.11 mostra o funcionamento do programa principal do PIC.



**Figura 3.11 - Fluxograma da programação do PIC**

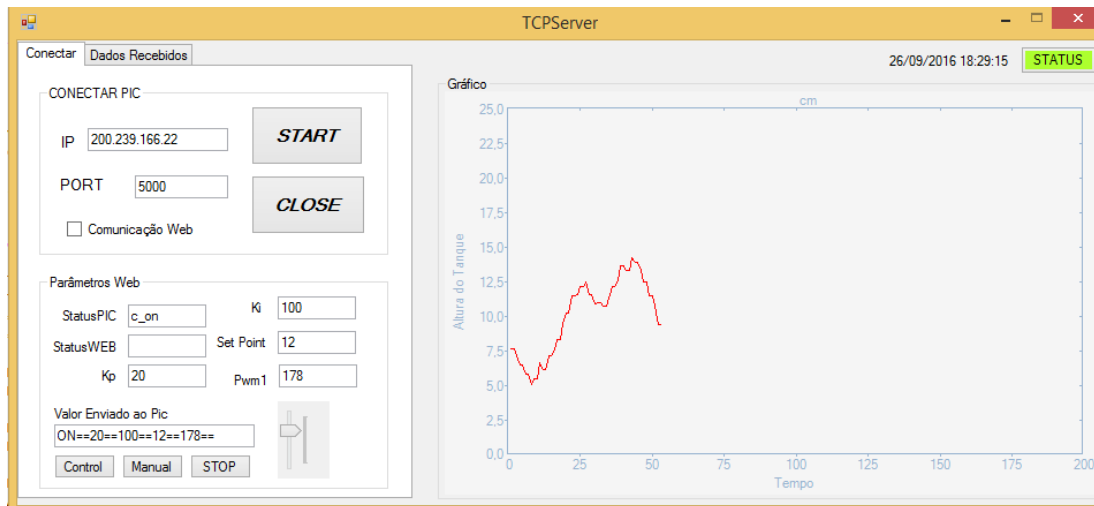
Quando a leitura do sensor registra uma altura igual ou superior a vinte e dois centímetros, o Timer3 é ativado e desliga a bomba por cerca de cinco segundos. Isso é feito, para não transbordar água nos tanques. Conforme o comando feito pelo supervisório, o PIC pode ficar

no modo desligado, no modo manual ou no modo controlador. Finalmente, o PIC responde ao supervisor enviando os valores da altura dos tanques conforme a leitura dos sensores, o valor do PWM da bomba (em volt) e o status do acionamento do sistema (Controlador, Manual ou Desligado).

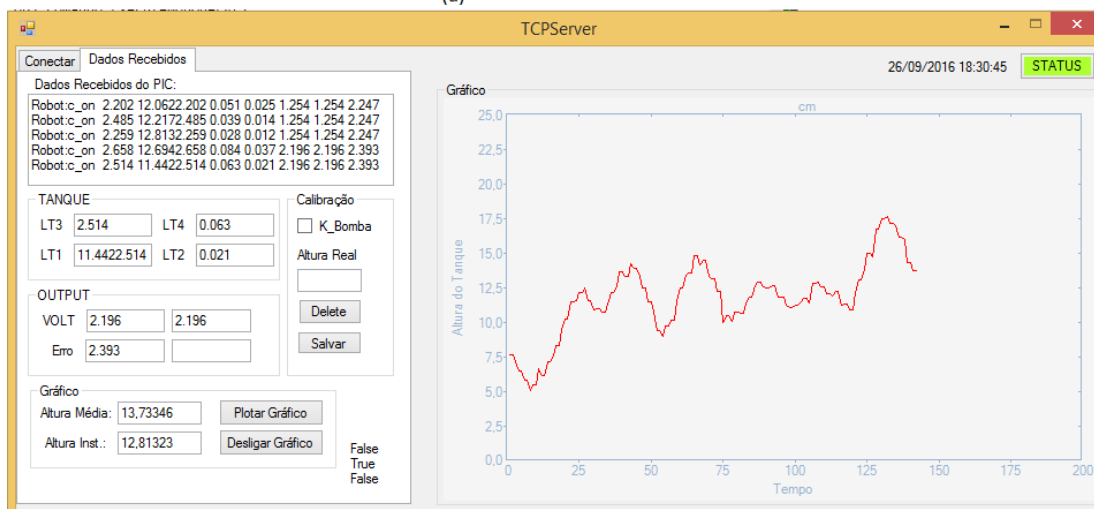
### 3.4 Sistema supervisorio

Neste trabalho, foi desenvolvido um Sistema Supervisorio na linguagem de programação C# utilizando o ambiente de desenvolvimento Visual Studio Community – plataforma aberta do *Windows* – a fim de acessar o PIC por meio de Interface Gráfica do Usuário (GUI - *Graphical User Interface*) e analisar o comportamento do sistema por meio de gráficos.

Para realizar a comunicação entre o supervisorio e o microcontrolador o supervisorio cria um cliente e acessa o IP do servidor e assim forma a arquitetura cliente-servidor. Como o PIC sempre fecha a comunicação após receber uma aquisição cliente, o supervisorio foi programado para que, a cada 0,5 segundo (em média), ele crie uma nova aquisição cliente e acesse o IP do PIC, para receber e enviar as informações. Foi desenvolvido, então, um protocolo de linguagem comum entre eles, para que possam se comunicar. Dessa forma, o supervisorio é capaz de acionar as bombas no modo manual, assim como ligar o controlador no modo automático, escolhendo os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e a *Referência* do controlador PI. Ao receber os dados do microcontrolador o supervisorio é responsável também por salvar esses dados no banco de dados. Na Figura 3.13 pode ver a layout do supervisorio.



(a)



(b)

**Figura 3.12 - (a) Layout de dados enviados, (b) Layout de dados recebidos**

Como se pode observar pela Figura 3.12 (a), é possível analisar a altura do tanque por meio do gráfico no supervisório. Além disso, há a possibilidade de salvar os dados para a calibração dos sensores – Figura 3.12 (b). Ao escolher uma altura fixa no tanque cilíndrico, o programa calcula a média das leituras durante cinco segundos e salva no banco de dados.

O supervisório se resume em criar uma *Thread* para se conectar ao PIC enviando e recebendo valores no formato de strings. Ao receber os valores do microcontrolador, eles são salvos no banco de dados, a cada segundo.

### 3.5 Página Web

A página web será onde os alunos poderão fazer os experimentos online por qualquer computador que tenha acesso a internet. A medida que o trabalho foi desenvolvido criou-se uma página web também pelo *software* Visual Studio Community em ASP.NET e C#. Por essa



página, o aluno pode acionar as bombas no modo manual e acompanhar o nível do tanque por meio do gráfico “Altura do tanque 1”. Como também, observar, em tempo real, a bancada por meio de uma câmera IP. Pode-se também, fechar a malha de controle, definindo os parâmetros do controlador e acompanhar por meio dos gráficos a resposta do sistema, analisando a altura do tanque 1, a tensão de saída na bomba e o erro em relação à altura de referência escolhido. Na Figura 3.13, pode se observar o *layout* da página.

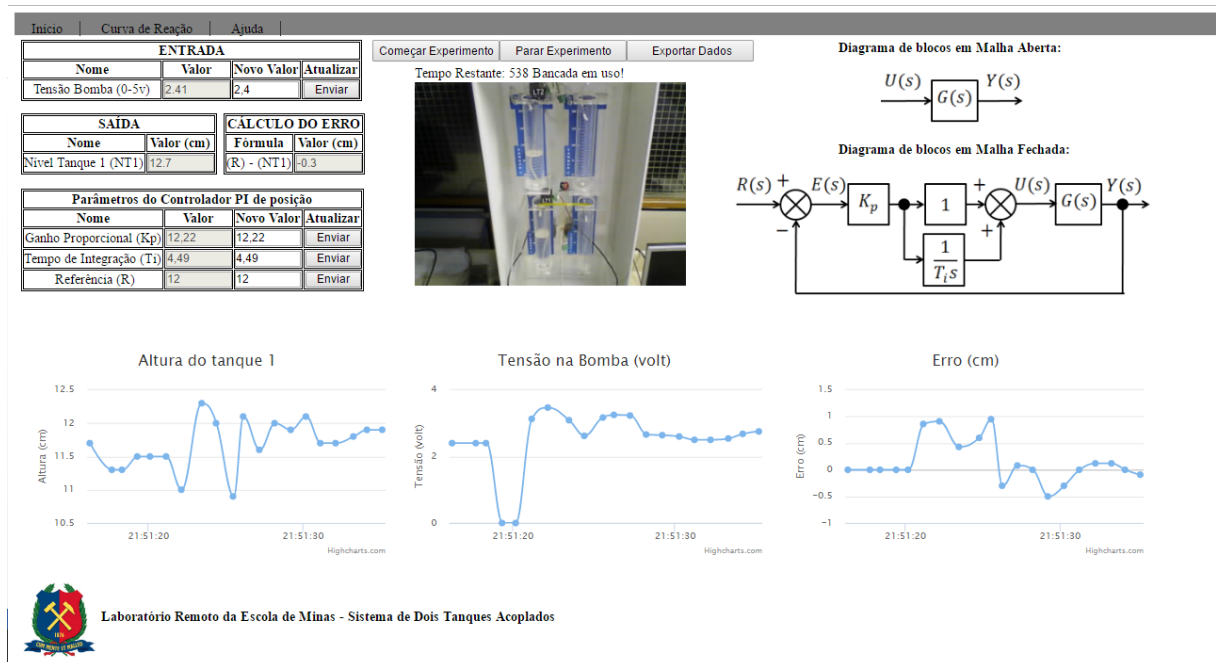


Figura 3.12 - *Layout* do site

O servidor do site é realizado pelo IIS, que fica no computador do Laboratório de Máquinas Elétricas (LME). Este servidor, a cada segundo, busca no banco de dados os valores vindos do PIC e atualiza na página web.

O site explica resumidamente o que é o Método da Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem, na aba “Curva de Reação”. Explica-se também, como calcular os parâmetros de um controlador PID pelo método citado, usando as técnicas de Ziegler Nichols e Cohen Coon. Encontra-se também, um tutorial em vídeo, de como fazer o experimento completo e projetar o controlador com a ajuda do *software* Matlab. Na aba “Ajuda”, tem-se resumidamente o Sistema de Dois Tanques Acoplados, mostrando o diagrama do fluxo da água, os sensores e a PCI utilizada e a modelagem do sistema. Além disso, possui a Tabela 1.1 com os parâmetros que não precisam de experimento. No final dessa aba possui outro vídeo explicando como funciona o site.



### 3.6 Banco de Dados

O Sistema de Banco de Dados (SGBD) usado neste trabalho foi o MySQL, juntamente com o WampServer, versão 2.5. Este trata-se de um ambiente de desenvolvimento web para Windows. Ele permite criar aplicações web com Apache2, PHP e um banco de dados MySQL. É uma ferramenta de fácil utilização, permite a criação de um banco de dados de forma relativamente simples e foi instalado no mesmo computador que o supervisor e o servidor da página web.

Neste trabalho, o Wamp tem uma finalidade fundamental, pois realiza a interface entre a página web e o sistema supervisor. Sua base de dados é composta por seis tabelas no banco de dados.

A Tabela 3.2 possui os atributos *altura*, *valor1* e *valor2*. Eles são utilizados para a calibração dos sensores.

**Tabela 3.2 - Tabela calibração**

<b>Coluna</b>	<b>Tipo</b>
altura	varchar(6)
valor1	varchar(6)
valor2	varchar(6)

A Tabela 3.3 possui apenas o atributo de *status*. Esse atributo pode receber três valores diferentes: *ON* (controlador ligado), *OFF* (modo manual) ou *STOP* (PWM desligado).

**Tabela 3.3 - Tabela comunicação**

<b>Coluna</b>	<b>Tipo</b>
status	varchar(4)

A Tabela 3.4 possui os parâmetros *id*, *data\_hora*, *s1*, *s2*, *pid*, *var*, *bomba1*, *erro1* e *tempoExperimento*. O *id* é a chave primária da tabela que se autoincrementa. Em *Data\_hora* é armazenado a data e a hora que foi gravado os dados na tabela. *S1* e *s2* são os valores dos sensores em centímetros, informando o nível do tanque. *Pid*, é o valor do PWM quando o controlador está ligado. *Var* é um campo que não está sendo usado e foi criado para um possível novo parâmetro. *Bomba1* é a tensão aplicada na bomba 1 quando ligado no modo manual. *Erro1* é o valor do erro quando o controlador está ligado, que significa o valor de referência menos a altura do tanque 1. Quando não está em malha fechada esse valor é zero. E o *tempoExperimento*

é o tempo em segundos incrementado pelo PIC para amarrar as alturas do tanque em relação ao momento que foi lido na porta A/D do microcontrolador.

**Tabela 3.4 - Tabela output**

<b>Coluna</b>	<b>Tipo</b>
id	int(11)
data_hora	varchar(20)
s1	varchar(4)
s2	varchar(4)
pid1	varchar(4)
pid2	varchar(4)
var	varchar(4)
bomba1	varchar(4)
erro1	varchar(4)
tempoExperimento	varchar(4)

A Tabela 3.5 possui os atributos, *kp*, *ki*, *setpoint* e *pump1*. Os três primeiros valores são os parâmetros para se ligar o controlador. E *pump1* é o parâmetro de acionar a bomba no modo manual.

**Tabela 3.5 - Tabela parâmetros**

<b>Coluna</b>	<b>Tipo</b>
id	int(11)
kp	varchar(8)
ki	varchar(8)
Setpoint	varchar(8)

Pump1	varchar(8)
-------	------------

A Tabela 3.6 possui os dados de todo o experimento para o aluno poder achar os parâmetros do controlador pelos métodos de sintonia de Ziegler Nichols e Cohen Coon.

**Tabela 3.6 - Tabela exportar**

Coluna	Tipo
tempoExperimento	varchar(6)
alturaTanque1	varchar(4)
alturaTanque2	varchar(4)
tensaoBomba	varchar(4)
erro	varchar(4)

A Tabela 3.7 é usada para controle interno da página web. *Timeout* é o valor (em segundos) que o usuário tem para acessar a bancada. Após esgotar esse tempo, os botões serão desabilitados, não sendo possível enviar novos valores para a bancada, a não ser, que comece outro experimento. Após esse tempo, também é possível exportar os dados do experimento – conforme a tabela *exportar* - em um arquivo .xlsx (Excel). Ao começar um novo experimento, os valores da tabela *exportar* serão apagados.

**Tabela 3.7 - Tabela paginaweb**

Coluna	Tipo
timeout	varchar(1)
botoes	varchar(1)
segundos	varchar(3)

### 3.7 Comunicação entre a PCI e a Página Web

A comunicação do sistema é uma das partes mais importante deste trabalho, pois ela que permite o sincronismo entre as plataformas, dando movimento ao sistema quando uma ação é realizada (por exemplo: o clique de um botão para acionar o controlador pela página web).

O PIC foi programado para receber três comandos do supervisor: *ON* (controlador ligado), *OFF* (modo manual) ou *STOP* (PWM desligado), que são de fato os valores do atributo *status* da tabela *comunicação* do banco de dados. Pela página web é possível enviar os parâmetros para o banco de dados, no qual o supervisor tem acesso e manda para o PIC. Também é possível receber na página web, os valores do PIC (tensão da bomba, dos sensores, do erro e do tempo do experimento), passando pelo supervisor e banco de dados.

Na Figura 3.15 pode se observar um esquema da comunicação.

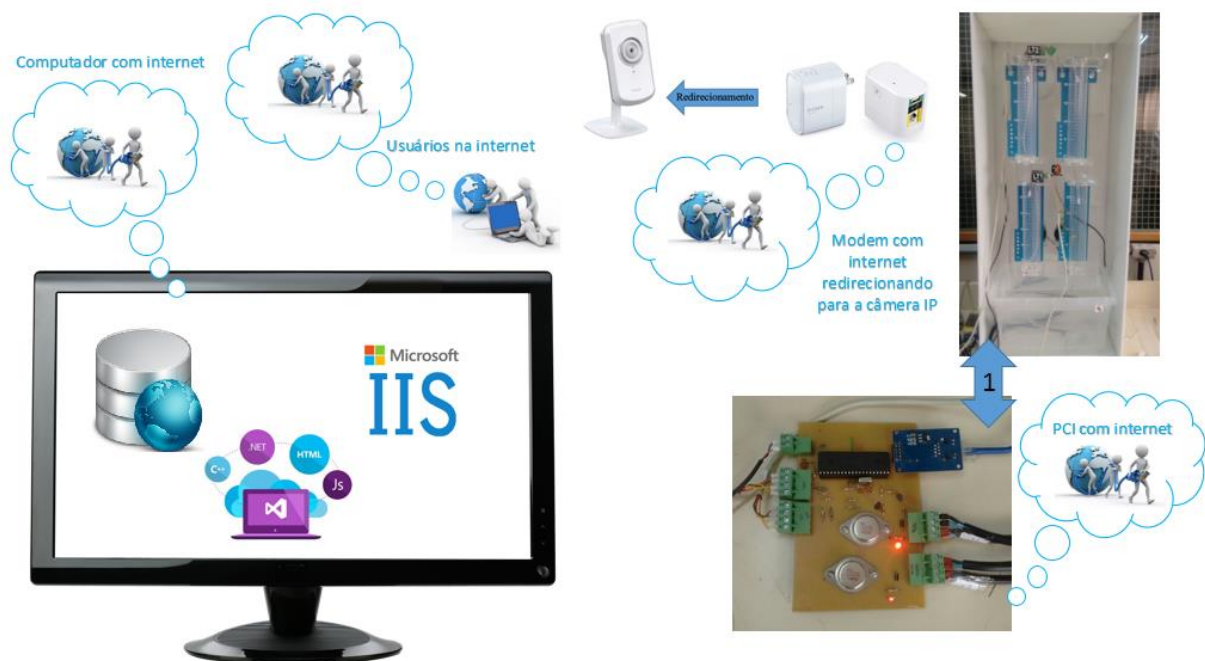


Figura 3.13 - Esboço da comunicação do sistema

O supervisor criado no Visual Studio, o banco de dados criado pelo Wamp e o servidor da página web realizado pelo IIS estão no mesmo computador. Portanto, o computador precisa ficar sempre ligado e conectado na rede internet para acessar o PIC, que também está conectada na rede web. Na Figura 3.15 a seta indicada em “1” representa a PCI conectada na bancada. A comunicação entre a PCI e supervisor acontece via internet. O usuário por meio de um dispositivo com acesso à internet acessa a página web ao qual o computador é o servidor.

O modo como foi arquitetada a comunicação, torna necessário, o uso de um computador. Vale ressaltar que esse computador não precisaria ficar perto da PCI. Basta tê-lo conectado na rede para acessar a PCI, o que pode ser uma vantagem em determinados projetos. Se o computador fosse ligado com a PCI por uma conexão USB, isso não seria possível. Entretanto, a conexão USB seria mais rápida entre o supervisor e a PCI e não perderia dados caso a conexão da rede esteja *off-line*.

A velocidade entre o supervisor e a PCI pode variar de acordo com o desempenho da própria rede de internet da UFOP. Considere que uma linha de dados, refere-se a uma linha com os valores dos atributos da tabela 3.6 *exportar*, e sabendo que para cada segundo do experimento é possível salvar apenas uma vez no banco de dados. Se a rede da UFOP estiver excelente, o supervisor faz em média uma leitura de 500 linhas de dados para um tempo de experimento de 600 segundos. Entretanto, o ideal seria 1 linha de dados para cada segundo do experimento (em um experimento de 600 segundos obter 600 linhas de dados). Vale ressaltar que a comunicação entre o supervisor e a PCI é assíncrona, ou seja, pode acontecer de ambos fazerem duas comunicações por segundos, mas de repente ficar três segundos sem comunicar. Foi observado em alguns experimentos, que o supervisor e a PCI podem ficar até dez segundos sem comunicação. Esse fato prejudica bastante o experimento, pois atrapalha o Matlab a obter bons parâmetros do controlador e ser necessário a realização de outro experimento.

A comunicação entre o supervisor e o a PCI é feito por envios de “frases”. O protocolo usado para enviar informações do supervisor ao PIC possui este formato: `ON==12.4==14.55==14==255`. Na frase, “==” é responsável por separar cada campo. O primeiro campo significa o status do PIC (*ON*, *OFF* ou *STOP*). O segundo campo representa o *Kp*, o terceiro o *Ki*, o quarto a *referência* (altura do tanque 1) e último campo é o *PWM* para selecionar o modo manual. Os valores de *Kp*, *Ki* e *referência* são convertidos para *float* enquanto o *PWM* é convertido para inteiro. Se fosse enviado `OFF==12.4==14.55==14==255`, os parâmetros do controlador não seriam usados, mas somente o último parâmetro para ligar o PWM – `set_pwm1_duty(255)`. Se fosse enviado `STOP==12.4==14.55==14==255`, o PIC receberia o primeiro parâmetro (*STOP*) e desligaria o PWM - `set_pwm1_duty(0)`. Enquanto o PIC recebe esses valores, o supervisor recebe do PIC os dados conforme essa estrutura: `STATUS==ALTURA1==ALTURA2==PID1==0==PUMP1==ERRO==TEMPO`. O campo *STATUS* pode ser *ON*, *OFF* ou *STOP*; *ALTURA1* é altura do tanque 1; *ALTURA2* é altura do tanque 2; e *PID1* é a tensão na bomba quando o controlador está ligado. “0” representa o campo

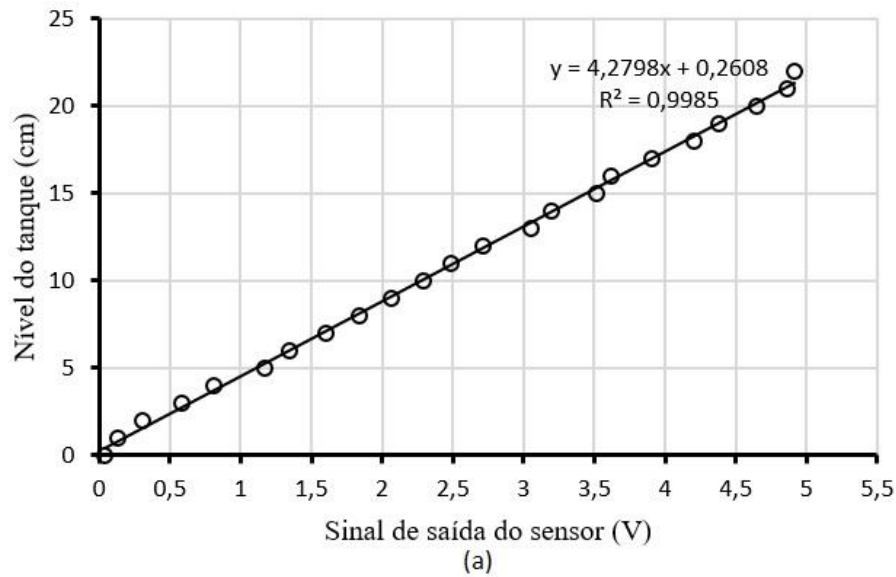
*var* da tabela *output* o qual atualmente não tem nenhuma finalidade. PUMP1 é o valor da tensão no modo manual, ERRO é o erro quando o controlador está ligado e o TEMPO é o tempo do experimento. Vale ressaltar, que toda vez que o PIC recebe STOP o tempo é zerado.

### 3.8 Calibração dos Sensores

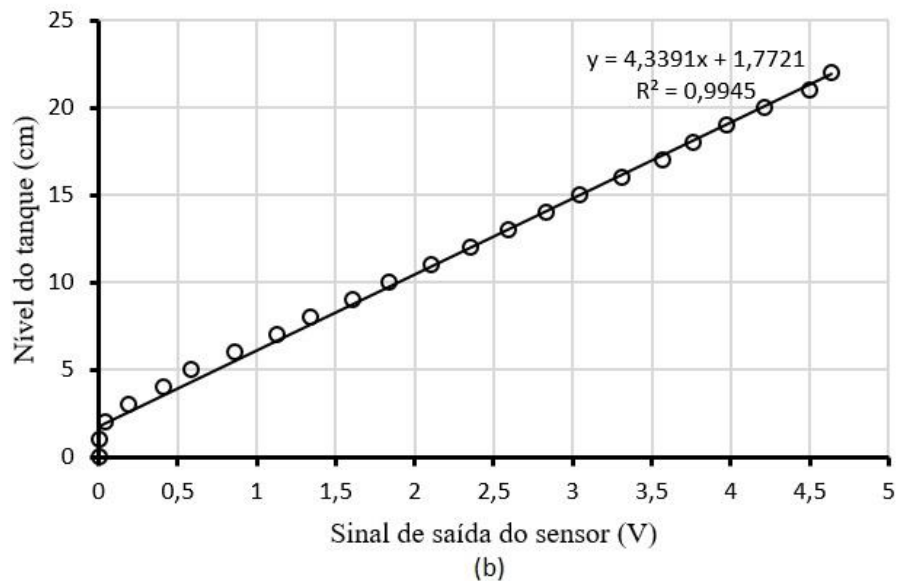
Praticamente todos os processos de medição estão sujeitos a variações conhecidas como “erros”, seja qual for o instrumento utilizado. Variações na qualidade dos materiais utilizados, processo de fabricação, condições ambientais, desgaste físico de componentes mecânicos ou eletrônicos, e a até mesmo a interpretação do usuário, poderão introduzir algumas variações nos resultados medidos. Dessa forma é importante avaliar periodicamente a qualidade das medições produzidas por estes equipamentos, e aplicar os devidos ajustes (ROCHA, 2013).

Nesse sentido, os sensores de níveis de pressão precisam ser calibrados periodicamente ou sempre que a bancada é alterada de lugar ou movimentada de alguma forma. O supervisor possui um botão específico para calibração dos sensores. Esse botão possui a função de realizar dez leituras e retornar a média dos valores medidos e salvá-los no banco de dados da tabela *calibração*. Para fazer essa calibração, deve-se escolher a altura do nível do tanque, e tampar o orifício da parte inferior, de modo que não tenha vazão no tanque cilíndrico. Em seguida, deve-se enchê-lo até o nível a ser calibrado. Após esse procedimento, digita-se no supervisor a altura escolhida e, então, pressiona-se o botão de calibração. O supervisor calculará a média e salvará na tabela *calibração* os valores medidos dos tanques 1 e 2. Recomenda-se selecionar um ponto de calibração a cada centímetro, ao longo de toda a faixa de medição do tanque. Nas Figura 3.16(a) e 3.16(b) pode-se observar a última calibração dos sensores dos tanques 1 e 2, respectivamente.

### Calibração Sensor Tanque 1



### Calibração Sensor Tanque 2



**Figura 3.14 - (a) Equação de calibração do sensor de pressão do tanque 1, (b) Equação de calibração do sensor de pressão do tanque 2**

Após encontrar a reta de calibração de cada sensor, programou-se o *firmware* do PIC para que os valores lidos pela porta A/D fossem ajustados conforme o modelo de calibração de cada sensor. Porém, o erro máximo do sensor variava cerca de  $\pm 3,45$  cm. Esse erro foi calculado escolhendo cinco alturas fixa de água no tanque e salvando cinquenta valores para cada altura fixa, com o botão de calibração do supervisor. Após esse procedimento, foram encontrados o erro máximo e o erro mínimo.

Após a calibração dos sensores foi elaborado no *firmware* do PIC um algoritmo de filtro estatístico. De acordo com o Critério de Chauvenet, que permite determinar se um valor amostral (resultante de uma medida) é discrepante em relação aos demais valores restantes da amostra, supondo-se que esta amostra é retirada de uma distribuição normal (ALFAIATE 1997). Dessa forma, foi possível reduzir o erro máximo de medição para  $\pm 1,5$  cm. Além do Critério de Chauvenet, aplicou-se também, uma técnica simples com o objetivo de melhorar a leitura do sinal. Essa técnica salva todas as leituras A/D ocorridas num período de 0.1 segundo em uma variável. Após esse período de tempo, tira-se a média da altura do tanque e em seguida o PIC envia o valor da altura do tanque para o supervisor. Sendo assim gerou-se uma melhoria na leitura da altura do tanque, obtendo um erro máximo de  $\pm 0,3$  cm.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados experimentais

Na Tabela 4.1 encontram-se os parâmetros identificados após feito o experimento da curva de reação, conforme explicado no vídeo no final da aba “Curva de Reação” na página web.

**Tabela 4.1 - Parâmetros identificados da bancada pelo experimento da curva de reação com ajuda do Matlab**

Símbolo	Valor [unid.]	Descrição
$h_{1,0}$	12,69 [cm]	Nível do tanque 1 no ponto de operação antes do degrau
$h_{1,1}$	17,517 [cm]	Nível do tanque 1 no ponto de operação após o degrau
$\vartheta_{1,0}$	2,5 [V]	Tensão de entrada aplicada antes do degrau
$\vartheta_{1,1}$	3,0 [V]	Tensão de entrada aplicada depois do degrau
T	12 [s]	Constante de tempo do sistema
L	2,74 [s]	Atraso do sistema
$K_0$	2,257	Ganho direto do sistema



As variáveis  $L$ ,  $T$  e  $K_0$  são responsáveis por achar os parâmetros  $Kp$  e  $Ti$  do controlador de Ziegler Nichols e Cohen-Coon conforme as tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente.

#### 4.1.1 Projeto do Controlador PI

##### 4.1.1.1 Função de Transferência em malha aberta

Após adquirir os parâmetros da Tabela 3.2, por meio do experimento, e aplicar o método da curva de reação, visto na seção 2.10.7, pode-se obter os parâmetros: ganho direto ( $K_0 = 2,2568$ ), atraso ( $L = 2,7431$ ) e constante de tempo ( $T = 12$ ) do sistema. Com isso, pode-se montar a função de transferência em malha aberta conforme a Equação 2.14:

$$G(s) = \frac{2,25e^{-2,7431s}}{12s + 1} \quad (4.1)$$

##### 4.1.1.2 Determinação dos ganhos do controlador pelo método de Ziegler Nichols

Pelo método de Ziegler Nichols o ganho  $Kp$  e o tempo integrativo  $Ti$  do controlador foram determinados a partir da Tabela 2.1.

$$Kp = \frac{0,9T}{K_0L} = 1,7446 \text{ e } Ti = 3L = 8,2293 \quad (4.2)$$

##### 4.1.1.3 Determinação da função de transferência do controlador pelo método de Ziegler Nichols

Por meio da Equação 2.5 determinou-se a função de transferência do controlador.

$$U(s) = 1,7446 \left( 1 + \frac{1}{8,2293s} \right) = \left( \frac{14,3684s + 1,7446}{8,2293s} \right) \quad (4.3)$$

Na Figura 4.1 tem-se o diagrama de blocos do sistema em malha fechada com o controlador PI.

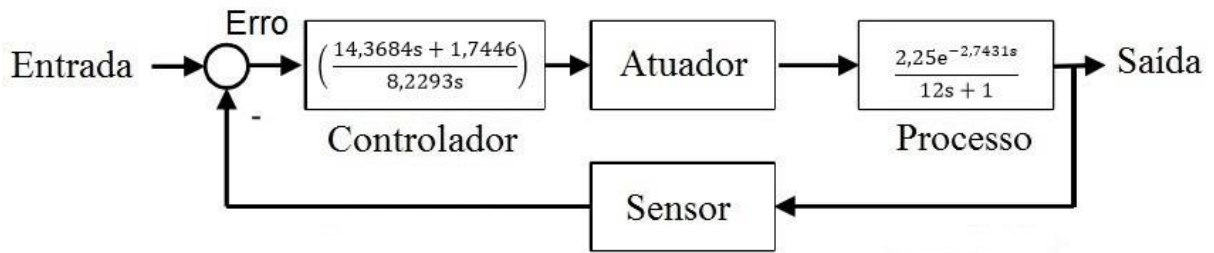


Figura 4.1 - Diagrama de blocos segundo sintonia de Ziegler Nichols

#### 4.1.1.4 Determinação dos ganhos do controlador pelo método de Cohen-Coon

Pelo método de Cohen-Coon o ganho  $K_p$  e o tempo integrativo  $\tau_i$  do controlador foram determinados a partir da Tabela 2.2.

$$K_p = \frac{T}{K_0 L} \left( 0,9 + \frac{L}{12T} \right) = 1,7815 \text{ e } \tau_i = \frac{L(30T + 3L)}{9T + 20L} = 6,2021 \quad (4.4)$$

#### 4.1.1.5 Determinação da função de transferência do controlador pelo método de Cohen-Coon

Por meio da Equação 2.5 determinou-se a função de transferência do controlador.

$$U(s) = 1,7815 \left( 1 + \frac{1}{6,2021s} \right) = \left( \frac{11,0490s + 1,7815}{6,2021s} \right) \quad (4.5)$$

Na Figura 4.2 tem-se o diagrama de blocos do sistema em malha fechada com o controlador PI.

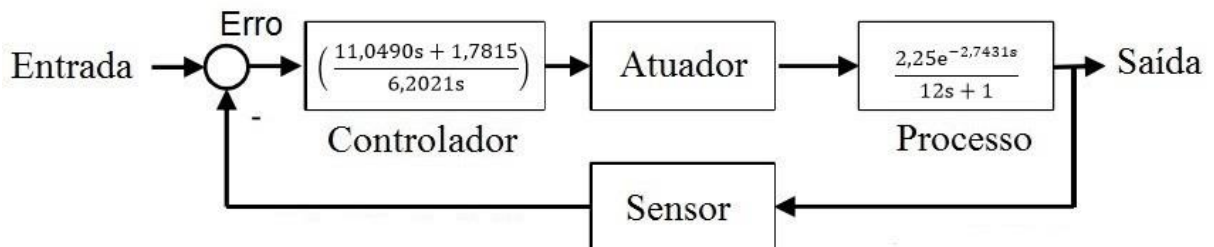


Figura 4.2 - Diagrama de blocos segundo sintonia de Cohen-Coon

#### 4.1.1.6 Discretização do Controlador PI

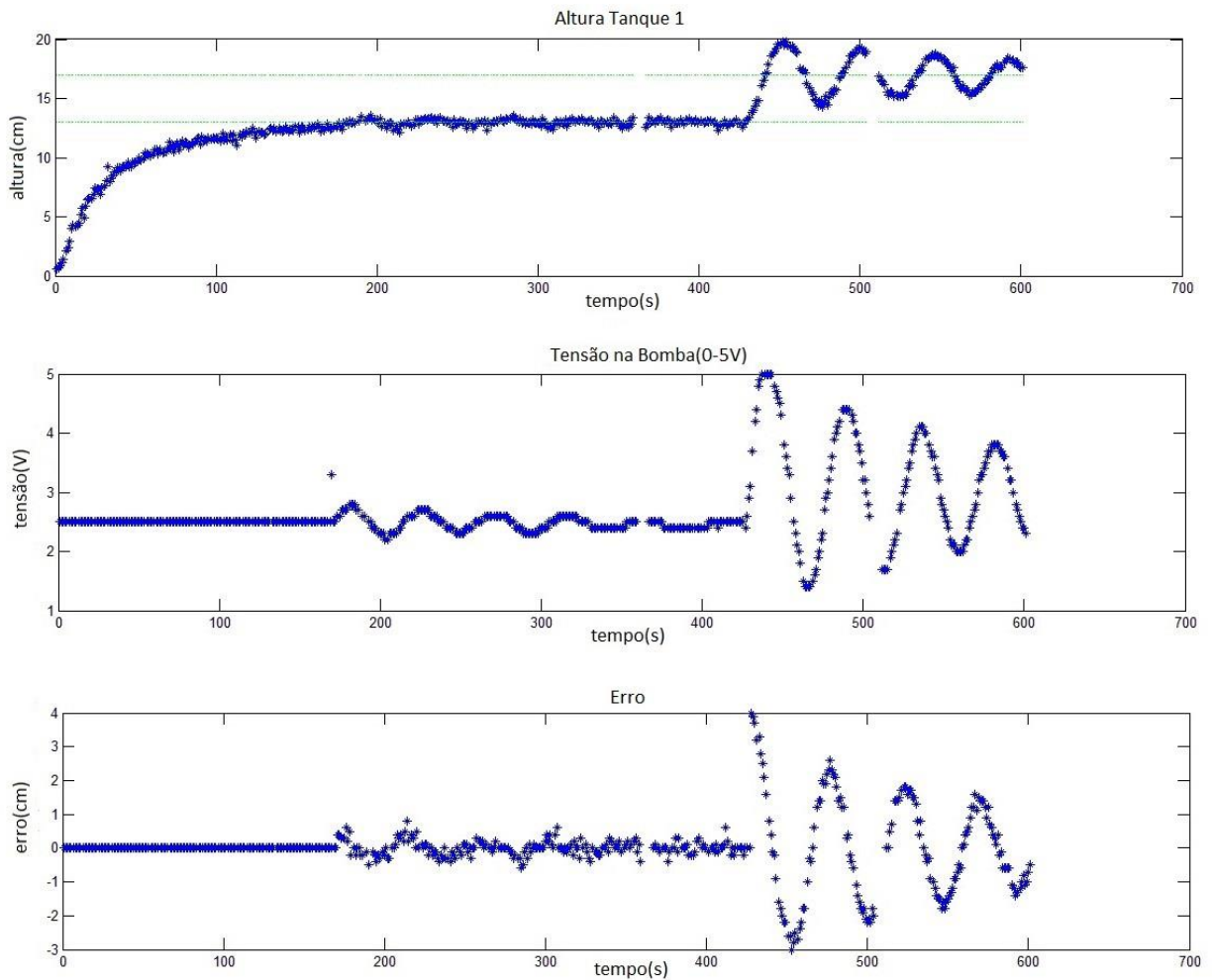
Para implementação do controlador PI de posição no *firmware* do PIC, foi utilizada a Equação 2.12. A ação de controle executada pelo PIC ocorre a cada 100 ms ( $T = 0,1$ ), sendo o intervalo de amostragem utilizado no cálculo do ganho  $K_i$ .

Os ganhos do controlador PI por Ziegler-Nichols discretizado ( $K_p = 1,7446$  e  $K_i = 0,0212$ ) foram determinados por meio da Equação 2.13.

De modo similar, realiza-se o cálculo da discretização do controlador PI segundo sintonia de Cohen-Coon, obtendo ( $K_p = 1,7815$  e  $K_i = 0,0287$ ).

#### 4.1.1.7 Resposta do controlador PI de posição pelos parâmetros de Ziegler Nichols

Após encontrar os parâmetros do controlador PI, fechou-se a malha no tempo de 170 segundos (pois o sistema já se encontrava em regime permanente) em torno do ponto de operação escolhido de 13 cm. A resposta do controlador para essa referência teve um ótimo resultado. Porém, quando se mudou a referência para uma altura de 17 cm no tempo de 428 segundos, o controlador não respondeu tão rápido quanto na referência de 13 cm, pois o controlador projetado corresponde ao ponto de operação de 13 cm. Na figura 4.3 pode-se observar a resposta do controlador analisando a altura do tanque, a tensão na bomba e o erro.



**Figura 4.3 - Resposta do controlador com parâmetros de Ziegler Nichols em função do tempo**

#### **4.1.1.8 Resposta do controlador PI de posição pelos parâmetros de Cohen-Coon**

Na Figura 4.4 se tem a resposta do controlador com os parâmetros encontrados pela técnica de Cohen-Coon. A malha foi fechada no tempo de 230 segundos para a referência de 13 cm. No tempo de 470 segundos foi alterado a referência para 17 cm. A resposta do controlador de Cohen-Coon foi muito parecida à resposta de Ziegler Nichols, sendo controlado muito bem na altura de 13 cm. Entretanto, para a altura de 17 cm a resposta do controlador foi mais lenta, pois ficou distante do ponto de operação para o qual o controlador foi projetado.

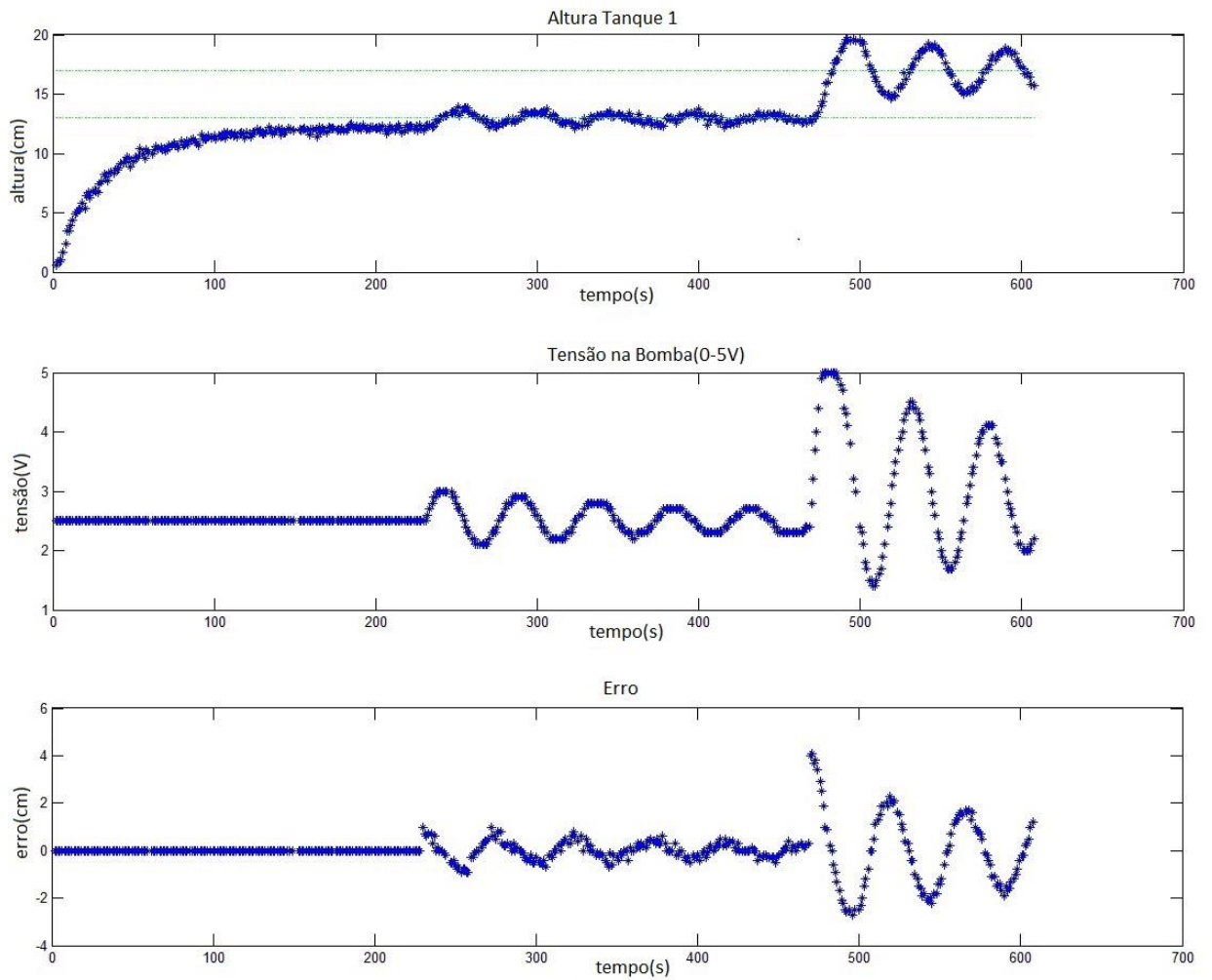


Figura 4.4 - Resposta do controlador com parâmetros de Cohen-Coon em função do tempo

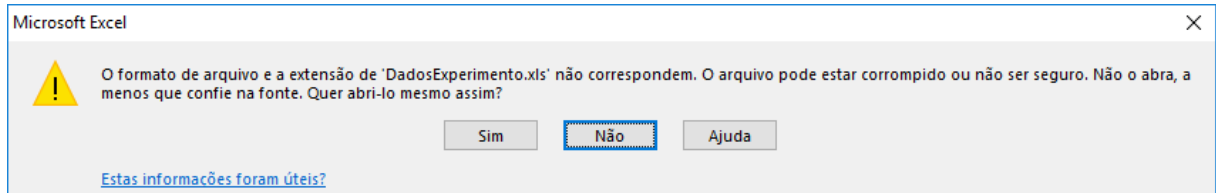
## 4.2 Resultados da avaliação da bancada

Entre o período de 15 de novembro de 2016 a 24 de novembro de 2016, foi feito um questionário para que as pessoas que realizassem o experimento online avaliassem o desempenho do sistema. Esse questionário permitiu que professores renomados, tanto na área de laboratórios remotos quanto na área de controle avaliassem o sistema.

Martin Kalúz, autor de vários trabalhos relacionados a área de pesquisa de laboratórios remotos (KALÚZ, M., 2015; KALUZ, M., 2012; KALUZ, M., 2011), foi um dos professores colaboradores do laboratório remoto da Universidade de Deusto. O seu *feedback* em relação ao trabalho atual foi bastante positivo, alertando somente que o arquivo .xls (Excel) exportado apresenta um formato inválido: “The lab looks nice and its usage is quite simple. I really like

the provided documentation. The data export seems to return a nonvalid xls format. I opened the file in plain text view and noticed that it contains an HTML structure (table)”.

Este erro acontece quando se abre o arquivo e precisa clicar em “sim” para ter acesso aos dados, como pode-se observar na Figura 4.5.



**Figura 4.5 - Erro ao exportar os arquivos devendo clicar em "sim" para ter acesso aos dados do experimento**

Rodrigo Augusto Ricco, professor de Engenharia Elétrica e autor de um projeto relacionado a uma planta didática de nível (PAULA, M. V. ; VERLY, A. ; RICCO, R. A., 2016), teve problemas de visualização ao assistir o experimento pelo site.

Outro *feedback* importante relatado por alguns dos usuários foi a melhoria no controle de acesso à bancada, pois enquanto realizava o experimento uma outra pessoa que acessou o site o atrapalhou, apertando o botão “Parar Experimento”.

Vale ressaltar que durante o período de 18 a 20 de novembro de 2016 houve problemas na rede da UFOP, impossibilitando o uso da bancada.

O feedback dos usuários sobre o uso do webcam pode ser observado pela Figura 4.6.

Você teve problemas com a webcam? (18 respostas)



Figura 4.6 - Resposta do formulário se o usuário teve problemas com a webcam

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com o estudo sobre a pilha TCP/IP, aplicado em microcontroladores, foi possível construir uma PCI capaz de comunicar remotamente com a Bancada de Dois Tanques Acoplados, localizada no Laboratório de Máquinas Elétricas da Escola de Minas. Além disso, foi necessário um árduo estudo na comunicação cliente-servidor do supervisório, do PIC, como também da criação de sites na plataforma do Visual Studio.

A comunicação entre a página web e o microcontrolador apesar de usar como ponte, um sistema de banco de dados e um sistema supervisório, mostrou-se rápida. A resposta do sistema pode variar dependendo do horário a se realizar o experimento. Como a bancada encontra-se dentro da UFOP, vários alunos, técnicos e professores usam do mesmo servidor de internet, fazendo com que em horários de pico (muitas pessoas conectadas), a comunicação entre a PCI e o supervisório se torne um pouco mais lenta. Entretanto, de modo geral, a comunicação com o microcontrolador teve um desempenho razoável, conseguindo em média 500 amostras em um experimento de 600 segundos. Dessa forma foi possível o experimento online e a obtenção dos parâmetros do controlador com a ajuda do Matlab. Em comparação com o antigo sistema, que utilizava um CLP (Controlador Lógico Programável) e um computador, era possível fazer as leituras dos sensores uma vez por segundo (600 amostras em 600 segundos). Entretanto, o custo-benefício do PIC mostrou-se muito satisfatório em relação ao CLP, por ser muito mais barato, além de ser possível acessá-lo remotamente.

As sintonias de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon obtidas por meio do método da curva de reação se mostraram satisfatórias. O controlador PI de posição discretizado implementado no *firmware* do PIC18F4550 foi eficaz, permitindo o controle da bancada em malha fechada.

Dados os resultados de controle e a resposta do sistema em tempo real, a plataforma apresentou-se como uma ferramenta útil para consolidação das disciplinas relacionadas à Teoria de Controle. Sendo assim, os discentes podem fazer experimentos online em tempo real, aplicando a teoria aprendida em sala de aula para entender a importância da sintonia de um controlador PI.

Para os trabalhos futuros, sugere-se o gerenciamento de acesso à bancada, pois atualmente não existe esse processo. A ausência do gerenciamento possibilita que múltiplos usuários acessem o experimento ao mesmo tempo, podendo torná-lo desconfortável, caso alguém acesse e pare o experimento de outra pessoa, como já foi citado anteriormente.



Também, sugere-se uma câmera IP nova, pois uma grande parte dos usuários tiveram problemas ao assistir o experimento. Isso ocorre, pois, as vezes a câmera trava e precisa ser reinicializada para voltar com as imagens em tempo real. Vale ressaltar que todas as vezes que a câmera parou, o roteador responsável pelo redirecionamento da mesma estava na rede (possível dar ping no roteador). Esse fato aumenta as chances do problema ser a câmera. Precisa-se então de fazer testes com uma câmera nova para descobrir o problema. Uma outra sugestão é usar um IP global para a câmera e assim não precisaria de um roteador para o direcionamento.

Outra sugestão seria a construção de outra PCI afim de comunicar com o supervisor por meio da porta USB. Assim, não dependeria da conexão de internet entre a PCI e o supervisor e assim obteríamos 600 dados para um experimento de 600 segundos (1 dado por segundo). Além disso, seria possível com essa nova PCI usar o lado da bancada que no momento não é utilizada. Dessa forma, seria possível na mesma bancada realizar dois experimentos diferentes, um usando a PCI com o módulo ENC28J60, e o outro usando a PCI com conexão USB.

É possível também reformular o sistema afim de realizar experimentos MIMO com bancada de quatro tanques. A PCI seria a mesma, sendo preciso mudar alguns códigos no PIC, supervisor, banco de dados e página web.

Por fim, o uso de um sistema embarcado mais potente, pode ser capaz de gerenciar tanto a bancada, quanto o servidor da página web. Dessa maneira, seria possível retirar o computador, o qual tem-se o supervisor, o banco de dados e o servidor da página web.

Caso haja interesse por parte do leitor em conferir o site, o sistema pode ser acessado pelo endereço <http://200.239.166.71:8085>. E ainda, conferir também, a planta termal do laboratório da Universidade de Deusto que serviu como inspiração para este trabalho de final de curso por meio do link a seguir:

<http://weblab.chtf.stuba.sk/weblab/login?next=http%3A%2F%2Fweblab.chtf.stuba.sk%2Fweblab%2Flabs%2FControl+labs%2Fthermal-plant-udaq28lt%2F> .

## 6 REFERÊNCIAS

AKTAN, B.; **Distance Learning Applied to Control Engineering Education**. MS Thesis, Oregon State University, February 9, 1996.

ALFAIATE, John R. **Uma introdução à análise do erro**. à edição. Sausalito, Califórnia: Ciência Livro Da Universidade, 1997.

AMBIENTE CLIENTE SERVIDOR. Disponível em <<http://br.ccm.net/contents/150-ambiente-cliente-servidor>>. Acessado em 18 de setembro de 2016.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. 2<sup>a</sup> Ed. Carolina do Norte: Instrument Society of America, 1995.

AXELSON, J. **Embedded Ethernet and Internet Complete**. 1st Edition. Lakeview Research LLC, Madison - USA, 2003.

BATES, M. **Interfacing PIC Microcontrollers – Embedded Design by Interactive Simulation**. 1st Edition. Elsevier, Burlington, 2006

BAZANELLA, S. A., SILVA, J. M. G. **Ajuste de Controladores PID**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Extensão, s.d.

BRITO, R. P. **Análise de desempenho de um neurocontrolador para o controle de um sistema de dois tanques acoplados**. 2014. 82 p. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

CANTÚ, E. **Redes de Computadores e Internet**. CEFET/SC São José, Praia Comprida: Santa Catarina, 2003.

COCOTA JUNIOR, J. A. N. **Análise de diferentes controladores para o processo de dois tanques acoplados**. In: COBENGE MÚLTIPLO SABERES E ATUAÇÕES, 42, Juiz de Fora, 2014. Anais... Juiz de Fora: UFOP, 2014. 12 p

COCOTA JUNIOR, J. A. N. **Elementos de Robótica**. Universidade Federal de Ouro Preto. Notas de aula. Ouro Preto, 2015.

COCOTA, J. A. N. J.; ABRÃO, D. C.; LOPES, A. G.; MEDEIROS, M. R. O.; LOPES, E. S. **S. Development of Tangible Experiments for Motivating Undergraduate Students**. IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). Berlin: [s.n.]. 13 - 15 Março 2013. p. 497-506.

CLUBE DO HARDWARE. Disponível em <<http://forum.clubedohardware.com.br/topic/1030749-resolvido-modulo-enc28j60-como-usar-pic-na-ethernet/>>. Acessado em 20 de setembro de 2016.

CUSTOM COMPUTER SERVICES, INC. Disponível em: <[http://www.ccsinfo.com/product\\_info.php?products\\_id=PCWHD\\_full](http://www.ccsinfo.com/product_info.php?products_id=PCWHD_full)>. Acesso em: 25 de jul. 2016.

DALE, E. **3<sup>rd</sup> Edition of Audio-visual methods in teaching**. Dryden, New York, 1969.

DELABRIDA, S. . **Redes de Computadores I**, novembro de 2015. 150 f. Notas de Aula.

DORF, R.C.; BISHOP, R. H. **Modern Control Systems**. 10<sup>a</sup> Ed, 2005 New York: Prentice Hall, 2005. 881 p.

EBATA, Y.; HAYASHI, H.; HSEGAWA, Y.; KOMATSU, S.; SUZUKI, K. **Development of the Intranet-based SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System) for Power System**. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 3, p. 1656-1661, Jan. 2000.

GIMENEZ, S.P **Microcontroladores 8051**. 1<sup>a</sup> Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2002.

HIRZEL, T. Disponível em <<http://arduino.cc/en/Tutorial/PWM>>. Acessado em 19 de setembro de 2016.

IBRAHIM, D. **Microcontroller Based Applied Digital Control**. [S.l.]: Jonh Wiley & Sons,LTD, 2006. ISBN ISBN:0-470-86335-8.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Currais Novos. Disponível em <<http://pt.slideshare.net/bacelar97/modelo-tcpip-27133245>>. Acessado em 18 de setembro de 2016.

Kalúz, M. – García-Zubía, J. – Fikar, M. – Čirka, L.: **A Flexible and Configurable Architecture for Automatic Control Remote Laboratories**. IEEE Transactions on Learning Technologies, no. 3, vol. 8, pp. 299–310, 2015.

Kalúz, M. – Čirka, L. – Fikar, M.: **Virtual and Remote Laboratories in Process of Control Education**. International Journal of Online Engineering, no. 1, vol. 8, pp. 8–13, 2012.

Kalúz, M. – Čirka, L. – Fikar, M.: **Remote Experiment in Control Education**. AT&P Journal Plus, no. 2, pp. 50–54, 2011.

KARDEK, Alan Rego Segundo. **Microcontroladores**, maio de 2015. Notas de Aula.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down**, São Paulo: Editora Pearson Education, 2006.

WebLab-Deusto. Disponível em <<http://weblab.deusto.es/website/>>. Acessado em 01 de abril de 2016.

LOURENÇO, J. **Sintonia De Controladores P.I.D.** Janeiro 1996.

MELLENDEZ, J.; COLOMER, J.; DE LA ROSA, J. **Expert supervision based on cases**. 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 1, p. 431-440, Out. 2001.

MERSCHMANN, Luiz Henrique de Campos. **Banco de Dados I**, abril de 2015. 20 f. Notas de Aula.

MICROCHIP. Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en022889>>. Acessado em: 14 de jun. 2016.

MICROSOFT. Disponível em: <[https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/hh831725\(v=ws.11\).aspx](https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/hh831725(v=ws.11).aspx)>. Acessado em: 02 de dez. 2016.

MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores PIC18: Aprenda e Programe em Linguagem C**. São Paulo: Érica, 2009. 400p.

NAUGHE, M. G. **Illustrated TCP/IP**. New York: Wiley Computer, 1998.

NOERGAARD, T. **Embedded Systems Architecture – A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers**. 1st Edition. Elsevier, Burlington, 2005.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2002.

PAULA, M. V. ; VERLY, A. ; RICCO, R. A. . **Identificação de Sistemas: Uma Abordagem Didática por meio das Possibilidades de Experimentação de uma Planta de Nível de Três Tanques Acoplados**. In: XLIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE, 2016, Natal, RN. XLIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE, 2016.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. 1º Ed. São Paulo: Érica, 2005.

SILVA, D. L. **Controle de Fator de Potência no Secundário (Lado da Carga) de um Transformador Trifásico**. 2009. 57 p. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SINSIC, M. **Orientação a Objetos com C#**. São Paulo, SP: Politec S/A, 2004.

SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC: Baseado no PIC16F84**. 4ª Ed. São Paulo: Érica, 2009. 200p.

SOUZA, J. D. **Desbravando o PIC Ampliado e Atualizado para PIC16F628A**. 8ª Edição. ed. São Paulo: Érica, 2005.

STARR, Gregory P. - **Introduction to Applied Digital Control** - 2006.

ROCHA, A.J. **Instrumentação**, maio de 2013. Notas de Aulas

TORGA, D. S. **Desenvolvimento de uma plataforma didática para práticas de controle de velocidade de motor de corrente contínua**. 2016. 74 p. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

WHITE, F.M.; **Mecânica dos Fluidos**, 4ª Edição, McGraw-Hill, Rio de Janeiro, 2002.

WILMSHURST, T. **Designing Embedded Systems With Pic Microcontrollers – Principles and Applications**. 1st Edition. Elsevier, Burlington, 2007.

## 7 ANEXO I

<http://weblab.deusto.es/website/>

<http://netlab.unisa.edu.au/>

<http://formacio.citcea.upc.edu/index.php?action=Login&module=Users>

<http://relle.ufsc.br/labs>

## **8 ANEXO II**

O código fonte usado neste projeto é o arquivo servidor.c. Dentro da pasta tcpip encontra-se as bibliotecas necessárias para compilar o código. O arquivo para download encontra-se em: <https://drive.google.com/file/d/0B5w23JYKiGRwSnUzYzNDcC1UTGc/view?usp=sharing>