



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

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



**HIGOR PEREIRA LOPES**

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE PARA BANCADA**  
**DIDÁTICA REMOTA DE QUATRO TANQUES**

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

**Ouro Preto, 2018**

HIGOR PEREIRA LOPES

DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE PARA BANCADA  
DIDÁTICA REMOTA DE QUATRO TANQUES

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: Prof. Dr. Alan  
Kardek Rêgo Segundo

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP  
Abril/2018

L864d

Lopes, Higor Pereira.

Desenvolvimento de hardware para bancada didática remota de quatro tanques [manuscrito] / Higor Pereira Lopes. - 2018.

70f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

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

1. Laboratório Remoto. 2. Bancada Didática. 3. Teoria de Controle. I. Segundo, Alan Kardek Rêgo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

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

Monografia defendida e aprovada, em 26 de abril de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador



---

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior – Professor Convidado



---

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado saúde e força para enfrentar desafios e superar dificuldades durante minha trajetória. Aos meus queridos pais Otacilio e Sandra por todo amor, carinho e incentivo para que meu sonho se tornasse realidade. Às minhas queridas irmãs Leidi e Lilian pelo apoio e carinho. Aos meus professores, em especial Alan Kardek e Cocota Júnior, pelas oportunidades concedidas, apoio e orientação. Aos meus amigos que sempre depositaram confiança em mim, além de me incentivar nos momentos em que as dificuldades eram muitas. Aos meus amigos e irmãos da República Olympo pela amizade e companheirismo. A todos que de certa forma estiveram comigo nesses anos de Ouro Preto e contribuíram para que eu me tornasse uma pessoa melhor.

## **RESUMO**

Neste trabalho foi desenvolvido um dispositivo físico capaz de integrar a Bancada de Quatro Tanques Acoplados do Laboratório de Controle e Automação Multiusuário da Escola de Minas a uma plataforma Web de forma a possibilitar o acesso remoto e a realização de práticas de Teoria de Controle. O trabalho consiste no desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso (PCI), que permite o acesso à Bancada por meio do microcontrolador PIC18F4550, utilizando-se a Internet. Também foi desenvolvido neste trabalho um sistema de controle Liga-Desliga de iluminação da Bancada com a utilização de um sensor LDR e um circuito de acionamento utilizando-se relé. Há também um sistema de controle de umidade do tipo Liga-Desliga com histerese, utilizando o PIC12F675, a fim de manter os equipamentos em condições adequadas de operação. Utilizou-se um sensor DHT11 para medir a umidade e dois coolers 12V CC para realizar a ventilação mecânica. Além disso, foi desenvolvido uma caixa de acondicionamento para a Bancada com o intuito de evitar interferência externa no dispositivo e, conseqüentemente, comprometer os experimentos.

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

## **ABSTRACT**

In this work a physical device was developed capable of integrating the Four Coupled Tanks Bench of the Multiuser Control and Automation Laboratory from the Escola de Minas to a web platform in order to allow remote access and the execution of Control Theory practices. The work is the development of a Printed Circuit Board (PCB) in order to allow access to the Bench through the PIC18F4550 microcontroller using the internet. It was also developed an on-off control system for the lighting of the Bench with the use of an LDR sensor and drive circuit using relay. There is also a hysteresis-type on-off humidity control system using the PIC12F675 to keep the equipment in proper operating condition. A DHT11 sensor was used to measure humidity and two 12V DC coolers to perform mechanical ventilation. In addition, a packaging box was developed for the Workbench in order to avoid external interference in the device and, consequently, compromise the experiments.

**Keywords:** Remote Laboratory, Didactic Bench, Control Theory.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Lista de componentes utilizados para confecção da placa do PIC18F4550. . 57

Tabela 2 - Lista de componentes utilizados para confecção da placa do PIC12F675 .... 57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Bancada remota de tanques acoplados, (b) Diagrama da configuração do experimento. ....	17
Figura 2 - Microcontrolador PIC18F4550 .....	22
Figura 3 - Microcontrolador PIC12F675 .....	22
Figura 4 - PWM .....	25
Figura 5 - Sensor de Pressão com Mangueira Imersa .....	27
Figura 6 - Diagrama do Circuito do Transdutor de Pressão .....	27
Figura 7 - Sensor de Umidade e Temperatura DHT11 .....	28
Figura 8 - Bomba de Engrenagens.....	29
Figura 9 - Módulo Ethernet ENC28J60 .....	30
Figura 10 - Relé Miniatura CTK 1C 5V CC .....	31
Figura 11 - Transistor NPN BC546 .....	32
Figura 12 - Diodo 1N4007 .....	32
Figura 13 - Resistor de Carbono.....	33
Figura 14 - Capacitor de Cerâmica de 100 nF.....	34
Figura 15 - Oscilador a Cristal de Quartzo .....	35
Figura 16 - Cooler Microventilador CC 12V .....	35
Figura 17 - Diodo Emissor de Luz (LED).....	36
Figura 18 - Foto-Resistor LDR.....	37

Figura 19 - Diagrama de Blocos de um Controlador Liga-Desliga.....	38
Figura 20 - Curva de Histerese .....	39
Figura 21 - Ação de Controle Proporcional e Integral.....	40
Figura 22 – (a) Versão da Bancada do trabalho de Oliveira (2017) e (b) versão do presente trabalho .....	41
Figura 23 - Projeto da Caixa de Acondicionamento da Bancada .....	42
Figura 24 - Alimentação Interna da Bancada .....	43
Figura 25 - <i>Layout</i> da Placa de Circuito Impresso do PIC18F4550 .....	44
Figura 26 - <i>Layout</i> da Placa de Circuito Impresso do PIC12F675 .....	45
Figura 27 - Pinos Utilizados do PIC18F4550.....	45
Figura 28 - Circuito de Alimentação do PIC18F4550 .....	46
Figura 29 - Circuito de Reset do PIC18F4550 .....	46
Figura 30 - Circuito de <i>Clock</i> do PIC18F4550.....	47
Figura 31 - Circuito de Aquisição do Nível dos Tanques pelos Sensores .....	48
Figura 32 - Circuito de Acionamento das Bombas .....	48
Figura 33 - Circuito de Comunicação Ethernet .....	49
Figura 34 - Circuito de Aquisição do Sensor de Luminosidade LDR .....	50
Figura 35 - Circuito de Acionamento da Iluminação.....	51
Figura 36 - Pinos Utilizados no PIC12F675 .....	51
Figura 37 - Circuito de Alimentação do PIC12F675 .....	52
Figura 38 - Circuito de <i>Clock</i> do PIC12F675.....	52

Figura 39 - Circuito do Sensor DHT11.....	53
Figura 40 - Bancada com Alta Concentração de Umidade Condensada .....	54
Figura 41 - Circuito de Acionamento da Ventilação Mecânica .....	55
Figura 42 - Processo de Fabricação da Placa do PIC18F4550.....	56
Figura 43 – Aspecto Final da Bancada .....	59
Figura 44 - Placa de Circuito Impresso do PIC18F4550 (Figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 35) .....	60
Figura 45 - Placa de Circuito Impresso do PIC12F675 (Figuras 36, 37, 38, 39 e 41)....	61
Figura 46 - Teste de Acionamento dos Motores e Leitura dos Sensores.....	62
Figura 47 - Amostragem da Umidade Relativa no Display LCD.....	63

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Bancada para Controle de Nível de Tanque .....	16
1.1.1	Breve Histórico.....	16
1.1.2	Descrição da Planta .....	17
1.2	Objetivos do Trabalho .....	18
1.2.1	Objetivos Específicos .....	18
1.3	Justificativa do Trabalho .....	18
1.4	Estrutura do Trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	Sistemas Embutidos .....	20
2.1.1	Definição.....	20
2.1.2	Elementos Principais .....	20
2.1.3	Microcontroladores PIC.....	21
2.1.4	Unidade Central de Processamento .....	23
2.1.5	Memória.....	23
2.1.6	Dispositivos de Entrada e Saída .....	23
2.1.7	Ciclo de Máquina ( <i>Clock</i> ).....	24
2.1.8	Interrupções.....	24
2.1.9	Módulo CCP/PWM .....	25

2.1.10	Conversor Analógico-Digital .....	26
2.2	Sensor de Pressão MPXM2010GS.....	26
2.3	Sensor de Umidade e Temperatura DHT11.....	28
2.4	Bomba.....	28
2.5	Módulo Ethernet ENC28J60.....	29
2.6	Relé.....	30
2.7	Transistor .....	31
2.8	Diodo.....	32
2.9	Resistor.....	33
2.10	Capacitores .....	33
2.11	Oscilador a Cristal .....	34
2.12	Cooler.....	35
2.13	LED.....	36
2.14	Foto-Resistor (LDR).....	37
2.15	Sistemas de Controle .....	37
2.15.1	Controlador Liga-Desliga .....	38
2.15.2	Controlador Proporcional Integral de Posição (PI) .....	39
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>41</b>
3.1	A Bancada de Tanques Acoplados.....	41
3.2	Projeto da Caixa de Acondicionamento da Bancada .....	41

3.3	Alimentação da Bancada .....	43
3.4	Projeto do Hardware.....	43
3.4.1	Pinos Utilizados no PIC18F4550 .....	45
3.4.2	Alimentação do PIC18F4550.....	46
3.4.3	Reset do PIC18F4550 .....	46
3.4.4	Circuito de <i>Clock</i> do PIC18F4550 .....	47
3.4.5	Circuito de Aquisição do Nível do Tanque.....	47
3.4.6	Circuito de Acionamento das Bombas .....	48
3.4.7	Circuito de Ligação do Módulo ENC28J60 ao PIC18F4550 .....	49
3.4.8	Circuito do Sensor LDR.....	49
3.4.9	Circuito de Acionamento da Iluminação de LED .....	50
3.4.10	Pinos Utilizados do PIC12F675 .....	51
3.4.11	Alimentação do PIC12F675 .....	51
3.4.12	Circuito de <i>Clock</i> do PIC12F675 .....	52
3.4.13	Circuito do Sensor DHT11.....	53
3.4.14	Acionamento da Ventilação Mecânica .....	53
3.5	Placas de Circuito Impresso (PCI) .....	55
3.6	Teste de Acionamento dos Motores e Leitura dos Sensores de Nível ..	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
4.1	A Caixa de Acondicionamento da Bancada .....	59

4.2	As Placas de Circuito Impresso .....	60
4.3	Funcionamento do Acionamento dos Motores e Leitura dos Sensores	61
4.4	Funcionamento do Sistema de Iluminação da Bancada .....	62
4.5	Funcionamento do Sistema de Ventilação Mecânica da Bancada .....	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O controle de sistemas desempenha um papel muito importante no desenvolvimento da Engenharia e da ciência, por meio da sua utilização nos modernos processos industriais e de produção. Consiste de subsistemas e processos agrupados com o propósito de obter uma saída desejada com um desempenho desejado dada uma entrada específica (OGATA, 2002).

O primeiro dispositivo de controle com realimentação conhecido foi o Regulador Watt, criado com o intuito de realizar o controle de velocidade de máquinas a vapor e foi inventado por James Watt em 1788 (ROSA, 2008).

Posteriormente, já na segunda metade do século XIX, observou-se a queda de performance do regulador nas máquinas a vapor, o que despertou o interesse no estudo sobre a dinâmica do sistema (ROSA, 2008).

O precursor no estudo das condições de estabilidade do sistema regulador de Watt por meio de análise matemática foi Maxwell (1868), considerado o marco de referência do nascimento da Teoria de Controle Automático. Posteriormente, Vyshnegradskii (1876) adaptou a análise para engenharia (ROSA, 2008).

Aulas práticas desenvolvidas em laboratórios são fundamentais para a formação acadêmica dos alunos de engenharia, pois consolidam conceitos teóricos, facilitam aprendizado e promovem o desenvolvimento de habilidades de cunho técnico, fato não possível de alcançar, em plenitude, apenas com aulas teóricas.

Um laboratório remoto consiste numa plataforma de hardware e software que permite ao aluno acessar remotamente um equipamento real localizado na universidade. Dessa forma, os estudantes utilizam o equipamento como se estivessem realizando uma aula prática presencial no laboratório (ZUBÍA e ALVES, 2011; GARCÍA-GUZMÁN *et al.*, 2012; HERCOG *et al.*, 2007; CANDELAS *et al.*, 2011; FABREGAS *et al.*, 2011). Diante do exposto, a instalação do laboratório remoto pode contornar várias dificuldades recorrentes nas universidades brasileiras além de atualizar e modernizar o ensino em todos seus níveis. Desta forma, esse projeto surge como ferramenta que oferece flexibilidade com múltiplas possibilidades de aplicação.

O projeto de um laboratório remoto em uma faculdade de Engenharia pode proporcionar os seguintes benefícios (ZUBÍA e ALVES, 2011):

- Disponibilizar equipamentos aos alunos 24 horas por dia ao longo do ano;
- Melhorar a organização dos laboratórios, pois não é necessário mantê-los abertos durante todo o tempo, apenas é necessário mantê-los em operação;
- Facilitar o processo de aprendizagem, uma vez que desperta o interesse do estudante em manipular um equipamento real de maneira remota;
- Tornar flexível o horário de execução das aulas práticas;
- Proporcionar a criação de cursos a distância em Engenharia;
- Quebrar a limitação geográfica de acesso aos laboratórios, não havendo necessidade de transportar estudantes e equipamentos;
- Reduzir ou eliminar acidentes;
- Reduzir a necessidade de equipamentos e espaços dos laboratórios;
- Reduzir custos com manutenção, operação e aquisição de equipamentos;
- Reduzir custos com o investimento em infraestrutura laboratorial para cursos de uma mesma área da mesma instituição (ou de instituições parceiras) situados em campos distintos.

Em função desses benefícios, uma série de laboratórios remotos de controle foram desenvolvidos em várias Universidades. Na Universidade Técnica Eslovaca (STU), por exemplo, desenvolveram uma aplicação cliente e servidor em Java para práticas de controle em um dispositivo termo-óptico, com o uso do MATLAB como software de controle (BISTÁK e BERÁNEK, 2006). Com base nessa aplicação, foi desenvolvido um sistema hidráulico para o controle de nível de tanque (ŽILKA, BISTÁK e KURCIK, 2008). Hercog *et al.*, (2007) propôs o desenvolvimento de um laboratório remoto para práticas de DSP (*Digital Signal Processor*) baseado no MATLAB como software de controle e a aplicação cliente desenvolvida por meio do LabVIEW. Na Espanha, o Ministério de Educação e Ciência fomentou o projeto AutomatL@bs (ZUBÍA e ALVES, 2011), que consistia em uma rede de nove laboratórios virtuais e remotos para o ensino de engenharia de controle desenvolvidos por sete universidades. Dentre essas, a Universidade Miguel Hernández disponibilizou práticas remotas para controle de motor de corrente contínua e de cilindro pneumático (PUERTO, JIMÉNEZ e REINOSO, 2010).

No Brasil, na área de laboratórios remotos, destaca-se o Laboratório de Experimentação Remota (RexLab), desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que possibilita a realização de práticas de física, de eletrônica e de sistemas embutidos (REXLAB, 2018)

O Laboratório de Controle e Automação Multiusuário (LABCAM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) possui algumas bancadas didáticas que possibilitam a realização de práticas de controle em malha fechada de nível de tanques de água.

Com o objetivo de maior disponibilização das bancadas didáticas do LABCAM, fez-se necessário a criação de um hardware capaz de comunicar via Ethernet à planta de Controle de Dois Tanques Acoplados por meio de um sistema supervisor com interface web criado anteriormente no projeto “Desenvolvimento de um Laboratório Remoto para Práticas de Controle de Nível dos Tanques Acoplados” (OLIVEIRA, 2017).

## **1.1 Bancada para Controle de Nível de Tanque**

### **1.1.1 Breve Histórico**

Aström e Östberg (1986) desenvolveram a primeira bancada de dois tanques acoplados para o ensino de controle. De acordo com esses autores, a bancada era de baixo custo e apresentava dinâmica mais interessante do que as bancadas comerciais existentes. A bancada permitia a realização de práticas de controle de nível para as configurações de um tanque ou de dois tanques acoplados, com ou sem a presença de distúrbio, efetuado por meio de um dreno adicional.

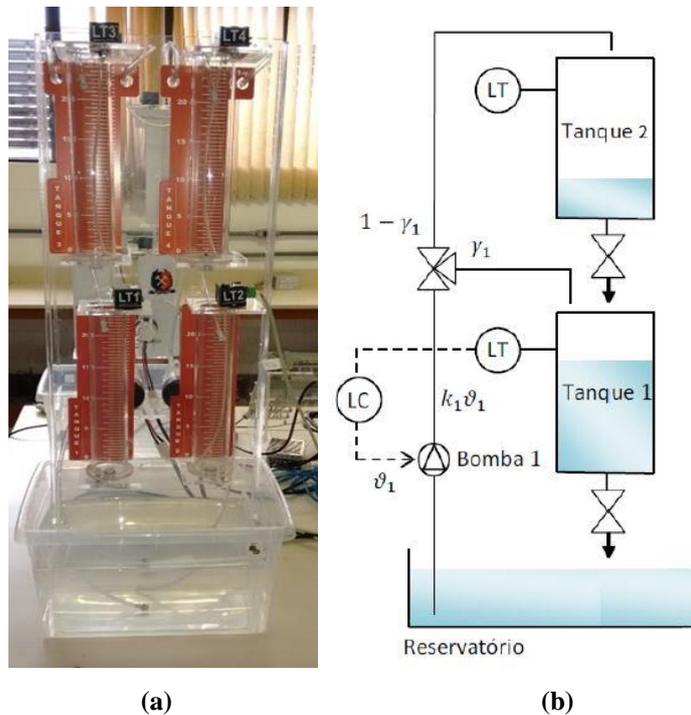
Posteriormente, Johansson (2000) propôs um sistema de quatro tanques acoplados, que possibilitou a realização de práticas de controle para as configurações de fase mínima e não mínima do processo. Com base nesse trabalho, a Quanser (2018) passou a comercializar bancadas de dois tanques acoplados, que possibilita o uso de duas bancadas como um sistema de quatro tanques acoplados.

Embora o sistema proposto por Johansson (2000) seja um versátil recurso no ensino de engenharia de controle, não há no mercado bancada desse processo para práticas remotas de controle. Em contrapartida, a Universidade do Tenessi de Chattanooga (UTC) foi pioneira no

desenvolvimento de bancada remota do sistema de dois tanques acoplados (HENRY e SCHAEDEL, 2005). Por fim, essa bancada foi expandida para permitir práticas de controle de sistema multivariável (GUERRERO, 2010).

### 1.1.2 Descrição da Planta

A bancada experimental descrita nessa seção é baseada no sistema de dois tanques acoplados (COCOTA, MONTEIRO, *et al.*, 2014). Trata-se de um sistema monovariável que possibilita realizar experimentos remotos, em tempo real, de controle de nível na configuração SISO (Single Input, Single Output) com ou sem acoplamento. Na Figura 1, pode ser vista a bancada citada (a) – composta por dois sistemas de tanques acoplados – e o diagrama da configuração do experimento (b).



**Figura 1 - (a) Bancada remota de tanques acoplados, (b) Diagrama da configuração do experimento.**

Fabricada em acrílico, o sistema é constituído por tanques com dimensões de 4,76 cm de diâmetro interno e 25 cm de altura. Uma motobomba com motor de CC de 12V distribui a vazão de água para os tanques conforme apresentado na Figura 1 (b). Por motivo de segurança, a fim de evitar o transbordo de água, os atuadores são automaticamente desligados quando o nível de líquido dos tanques superiores ultrapassa um determinado valor máximo.

Esses tanques são dispostos de forma que o fluxo de saída do tanque superior flui para o tanque inferior e por fim, flui para o reservatório localizado abaixo dos tanques, configurando assim um circuito fechado (Figura 1).

A planta é controlada por uma entrada analógica que é a tensão da bomba e possui dois estados que são o nível do tanque superior e do tanque inferior, sendo o último utilizado como saída da planta. O intuito do controle é a regulagem do nível do tanque inferior da planta. O nível do tanque é medido por um sensor de pressão diferencial com amplificação de sinal, que é transmitido por um condicionador que Cocota (2009) desenvolveu em seu trabalho.

## **1.2 Objetivos do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é desenvolver o hardware para a Bancada de Práticas Remotas de Controle de Nível de Tanques Acoplados a fim de contribuir na qualidade do ensino de engenharia de controle, bem como assistir o discente no desenvolvimento de competências transversais.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são os seguintes:

1. Aprimorar a Placa de Circuito Impresso (PCI) capaz de controlar a Bancada de Quatro Tanques desenvolvida no trabalho “WebLab - Laboratório Remoto (Hardware) ” (LOPES e CASTRO, 2015);
2. Desenvolver um sistema de condicionamento da Bancada;
3. Desenvolver um sistema automático de iluminação a LED para a Bancada, que possibilite a realização de práticas noturnas;
4. Desenvolver um sistema de ventilação mecânica para a Bancada com controle Liga-Desliga.

## **1.3 Justificativa do Trabalho**

A razão motivadora para o desenvolvimento deste trabalho se deve ao fato de não existirem bancadas educacionais comerciais da área de Engenharia de Controle e Automação que possibilite o acesso remoto para a realização das práticas. O projeto de maior relevância na

grande área de Engenharia Elétrica, que se encontra em uma fase próxima à comercialização, é o *Virtual Systems in Reality* (VISIR), desenvolvido pelo *Blekinge Institute of Technology* em parceria com a *National Instruments* e *Axiom EduTech*, que permite realizar práticas remotas de eletrônica básica (ZUTIN *et al.*, 2010; TAWFIK *et al.*, 2013).

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho em questão foi organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta uma abordagem introdutória do trabalho, de forma a apresentar os objetivos e a justificativa para elaboração. O capítulo 2 contém o referencial teórico do trabalho, de forma a abordar conceitos e características de todos os componentes utilizados. O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na elaboração do projeto, com foco no desenvolvimento do hardware, montagem da estrutura para a Bancada de Quatro Tanques e funcionamento. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na confecção da estrutura de hardware e por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões, e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados diversos conceitos fundamentais sobre os microcontroladores PIC e algumas aplicações de uso, além de abordar também conceitos e aplicações dos diversos componentes utilizados no projeto.

### 2.1 Sistemas Embutidos

Neste subcapítulo serão abordados alguns conceitos sobre sistemas embutidos, como o surgimento, funcionalidades e aplicações.

#### 2.1.1 Definição

Um sistema embutido pode ser definido como um dispositivo microprocessado, logo programável, cuja proposta é utilizar o seu poder computacional para uma aplicação específica (WOLF, 2012). Alguns exemplos de aplicações são em aparelhos de DVD, *chips* de telefones celulares, decodificadores de TV a cabo, dentre outros. Esses sistemas possuem características específicas, tais como:

- Baixo custo de fabricação;
- Algoritmos complexos;
- Suporte a tempo real;
- Interface com o usuário específicas;
- Monitoração e controle do consumo de energia;
- Simultaneidade de tarefas executadas com velocidades diferentes.

#### 2.1.2 Elementos Principais

Na década de 70, a indústria começou a utilizar microprocessadores em computadores, sendo o microprocessador Intel um dos percursos. A partir daí, houve uma preocupação em melhorar cada vez mais o processamento de dados por meio desses componentes. Baseado na arquitetura de um microprocessador, foi criado um componente capaz de suportar um sistema equivalente a um microprocessador e seus periféricos, surgindo assim o microcontrolador (MARTINS, 2005).

O microcontrolador é composto por pelo menos um microprocessador, memória de dados, memória de programa, além de dispositivos de entrada e saída. Há ainda alguns componentes adicionais que podem ser encontrados nos microcontroladores, como contadores, temporizadores e conversores analógico-digital (IBRAHIM, 2006).

Com os avanços da tecnologia, os microcontroladores tornaram-se uma das melhores relações custo/benefício quando se trata de soluções que demandam processamento, baixo custo de hardware e pequena necessidade de espaço físico.

No trabalho em questão, serão utilizados os microcontroladores PIC18F4550 e PIC12F675.

### **2.1.3 Microcontroladores PIC**

Nesta seção serão abordados conceitos sobre microcontroladores PIC, como as principais características e suas funcionalidades.

#### **2.1.3.1 PIC18F4550**

O microcontrolador PIC18F4550, dispositivo de 8 bits, fabricado pela Microchip Technology Inc., conta com uma CPU (*Central Processing Unit* – Unidade Central de Processamento), encapsulamento PDIP – 40 pinos, 32 Kbytes de memória Flash de programa, 2048 bytes de memória RAM, 256 bytes de memória EEPROM interna, Conversores Analógico-Digital (A/D), *Timers*, entre outras funcionalidades (MARTINS, 2005). Na Figura 2, pode-se observar a pinagem do microcontrolador PIC18F4550.

## 40-Pin PDIP

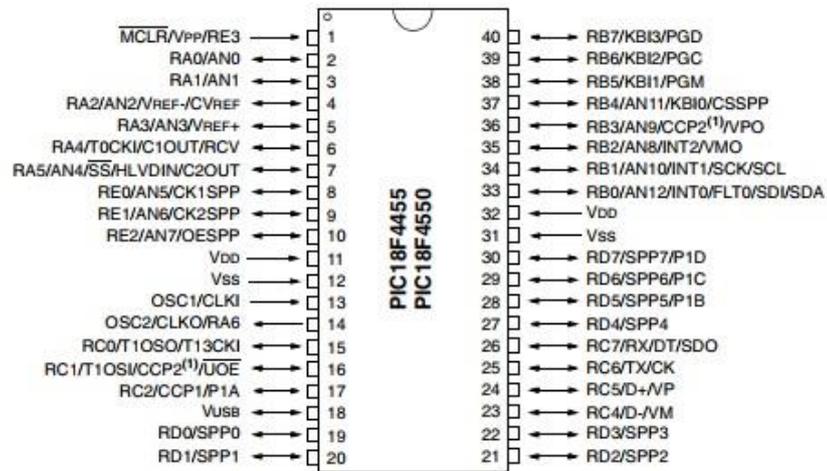


Figura 2 - Microcontrolador PIC18F4550

Fonte: SANTOS, 2011.

### 2.1.3.2 PIC12F675

O microcontrolador PIC12F675 é um dispositivo de 8 bits - MCU, fabricado pela Microchip Technology Inc., encapsulamento PDIP – 8 pinos, 1,75 Kbytes de memória Flash de programa, 64 bytes de memória RAM, 128 bytes de memória EEPROM interna, Conversores Analógico-Digital (A/D), *Timers*, entre outras funcionalidades (SILVA, 2013). Na Figura 3 pode-se observar o PIC12F675.

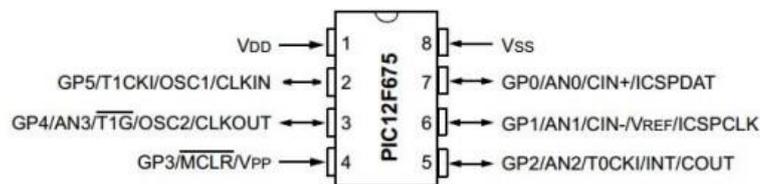


Figura 3 - Microcontrolador PIC12F675

Fonte: SILVA, 2013, p.21

#### **2.1.4 Unidade Central de Processamento**

A unidade central de processamento (CPU) é responsável pela execução do programa, que é o conjunto de instruções armazenadas na memória do sistema embutido. O programa é criado por meio de uma linguagem de programação e em seguida gravado no microcontrolador, a fim de realizar a função desejada. Pelo fato de diversas instruções se tratarem de operações matemáticas, estas são processadas na ALU (*Arithmetic Logic Unit* – Unidade Lógica Aritmética), onde os circuitos lógicos presentes são capazes de solucionar tais operações (BATES, 2006).

#### **2.1.5 Memória**

Memória pode ser definida como o componente computacional responsável por armazenar dados, programas e as variáveis que controlam o fluxo de informações. Os microcontroladores PIC18 apresentam memórias de programas, memória de dados e memória EEPROM (*Electric-Erasable Programmable Read Only Memory* – Memória Programável Apagável Somente de Leitura) (MIYADAIRA, 2009).

A memória de dados, definida como memória RAM (*Random Access Memory* – Memória de Acesso Aleatório), é do tipo volátil e é responsável por armazenar as variáveis e constantes do sistema. Como os dados constantes nesta memória são perdidos em caso de desligamento da alimentação do circuito, os valores das variáveis de sistema devem ser carregados sempre que o sistema for iniciado (IDOETA e CAPUANO, 2000).

A memória EEPROM do PIC é um tipo de memória não volátil, armazena dados que devem ser conservados mesmo com a ausência de energização. Pode também ser lida ou escrita em tempo de execução do programa por meio de registradores.

A memória de programa do PIC é do tipo Flash, desenvolvida a partir da memória EEPROM e é utilizada para o armazenamento do programa (*firmware*).

#### **2.1.6 Dispositivos de Entrada e Saída**

Os dispositivos de entrada e saída, denominados I/O (*Input – Output*) são pinos dedicados a comunicação do microcontrolador com o mundo externo. O sentido do fluxo de

dados nestes pinos é definido como entrada (I) ou saída (O). Os pinos de saída são utilizados para o controle de periféricos do sistema e os pinos de entrada serão responsáveis por receber os sinais vindos dos periféricos para que o microcontrolador possa tomar as decisões atribuídas a aquela situação (GIMENEZ, 2002).

### 2.1.7 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 por meio de um circuito RC interno (porém sem grande precisão) ou por um oscilador externo, a cristal de quartzo, com alta precisão (GIMENEZ, 2002). Como o ciclo de máquina do PIC18 é dividido em quatro fases, é possível calcular a frequência de máquina dividindo a frequência de oscilação por quatro, como pode ser observado na Equação 1.

$$F_{maq} = \frac{F_{osc}}{4}, \quad (1)$$

em que:  $F_{maq}$  é a frequência de máquina e  $F_{osc}$  a frequência do oscilador.

### 2.1.8 Interrupções

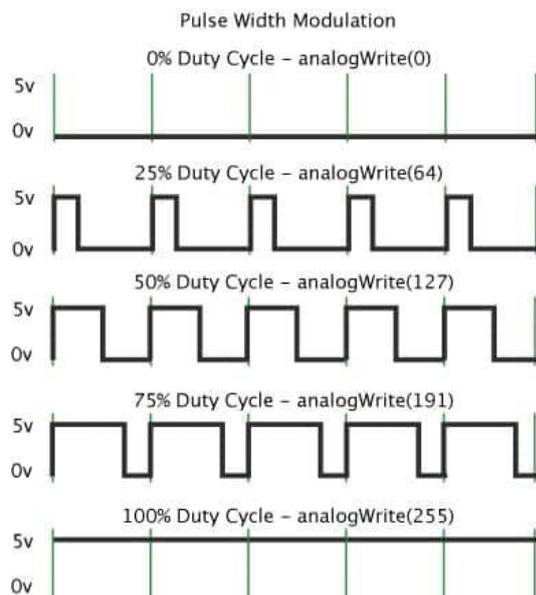
Um aspecto muito importante na utilização de um microcontrolador é o tratamento das interrupções, que podem ser tanto internas quanto externas. Pode-se descrever interrupções como sendo desvios condicionais efetuados pelo programa em função da ocorrência de um fenômeno prioritário ocorrido em um determinado instante. As interrupções são muito importantes, pois elas permitem o processamento adequado em resposta a eventos internos ou externos, aumentando a possibilidade de interação com o meio (BORGES, BO, *et al.*, 2006).

Um outro fato importante é a existência de prioridades na execução das interrupções, ou seja, caso a prioridade de uma interrupção seja maior que a de outra, o seu endereço é colocado no vetor geral de interrupção como prioritária e, conseqüentemente, será processada primeiro em caso dos eventos ocorrerem simultaneamente (BORGES, BO, *et al.*, 2006).

### 2.1.9 Módulo CCP/PWM

Há também a presença do módulo PWM (*Pulse-Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso), que envolve a modulação de sua razão cíclica (*duty cycle*) para transportar qualquer informação sobre um canal de comunicação ou controlar o valor da alimentação entregue à carga (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 (OLIVEIRA, 2017).

Com o módulo PWM pode-se aplicar uma tensão analógica a partir de um sinal digital podendo variar o valor da potência entregue a uma carga. Esse módulo gera um ciclo de ondas quadradas e a variação da largura do pulso possibilita que ocorra a variação da tensão média, permitindo o controle do sistema (OLIVEIRA, 2017). Na Figura 4 pode-se observar o funcionamento.



**Figura 4 - PWM**

**Fonte: HIRZEL, 2016**

Segundo Pereira (2005), a tensão média  $V_{DC}$  é uma tensão dada pela Equação 2.

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt, \quad (2)$$

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

### **2.1.10 Conversor Analógico-Digital**

Diversos sistemas que possuem microcontroladores utilizam da medição de variáveis de natureza analógica. Alguns exemplos são a temperatura medida por um termômetro, a posição angular medida por um potenciômetro, entre outros. Neste contexto, para que essas informações possam ser utilizadas pelo microcontrolador, há a necessidade de se converter tais sinais para seus correspondentes digitais, ou seja, para número binário, para que o microcontrolador possa processar essa grandeza. O dispositivo utilizado para esta operação é o conversor analógico-digital, ou conversor A/D (BORGES, BO, *et al.*, 2006). O PIC18F4550 possui 13 canais de conversor A/D, o qual pode-se ligar por exemplo sensores (pressão, temperatura, luminosidade, etc.) com resolução de 8 ou 10 bits e 256 a 1024 os níveis de quantização (OLIVEIRA, 2017).

## **2.2 Sensor de Pressão MPXM2010GS**

Um sensor é um dispositivo capaz de detectar/captar ações ou estímulos externos e responder em consequência. Estes aparelhos podem transformar as grandezas físicas ou químicas em grandezas elétricas. Por exemplo, um sensor discreto sinaliza a presença de um objeto ou material. Um sensor analógico pode medir grandezas como distância, tamanho e cor, entre outras. As informações oriundas dos sensores são a base para o movimento e o controle da maioria dos processos industriais (DOEBELIN e MANIK, 2007). 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 indireta, sendo aferida pela pressão diferencial por meio do sensor MPXM2010GS da Motorola. Este sensor é baseado no efeito piezo-resistivo e possui compensação de temperatura e sua saída é linear em uma faixa de 0 a 10 [kPa]. O sensor possui um encapsulamento MPAK, que permite que um tubo lhe seja conectado, isolando-o do contato direto com a água (COCOTA, MONTEIRO, *et al.*, 2014).

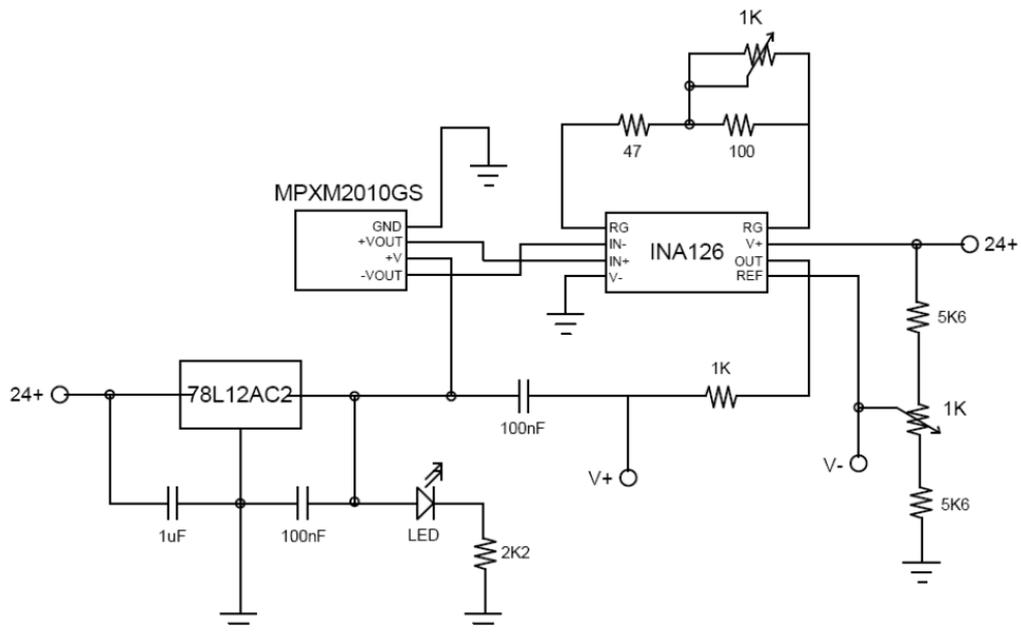
O sensor MPXM2010GS possui um circuito de calibração integrado além de ter um sistema robusto e simples. Conforme a Figura 5, há um tubo imerso no líquido com uma das

extremidades conectada no sensor. Sendo assim, a pressão do líquido é proporcional ao nível da coluna de água no tanque, ou seja, é diretamente proporcional à pressão da coluna de ar dentro do tubo (OLIVEIRA, 2017).



**Figura 5 - Sensor de Pressão com Mangueira Imersa**

Há necessidade de amplificação do sinal de saída do sensor para a leitura no canal analógico do PIC. Dessa forma, utilizou-se o amplificador INA126P no circuito condicionador, como pode ser visto por meio da Figura 6.



**Figura 6 - Diagrama do Circuito do Transdutor de Pressão**

Fonte: COCOTA JR., 2009, p. 89

### 2.3 Sensor de Umidade e Temperatura DHT11

O sensor DHT11, possui internamente um microcontrolador de 8 bits que permite uma comunicação simplificada com outro microcontrolador (no caso, com o PIC12F675). O DHT11 determina duas variáveis por meio de sensores internos, um sensor resistivo que mede umidade relativa do ar e um sensor de tipo NTC que mede temperatura. O sensor DHT11 possui uma faixa que vai de 0°C a 50°C com erro de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . A captação de umidade relativa do ar do DHT11 está na faixa de 20% a 90% e erro de  $\pm 5\%$ . O sensor DHT11 requer um resistor de *pullup* de 4,7 k $\Omega$  (TORRES, MONTEIRO, *et al.*, 2015). Pode-se observar o sensor DHT11 por meio da Figura 7.

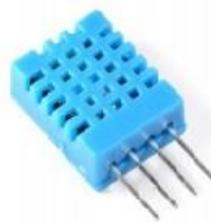


Figura 7 - Sensor de Umidade e Temperatura DHT11

Fonte: LIMA; TAVARES e SENA, 2017.

### 2.4 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, conforme a Figura 8. 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, EUA.



**Figura 8 - Bomba de Engrenagens**

**Fonte: OLIVEIRA, 2017, p. 33**

Pode-se definir motores elétricos como dispositivos com capacidade de realizar a conversão da energia elétrica em energia mecânica.

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 (FITZGERALD, CHARLES e UMANS, 2006).

## **2.5 Módulo Ethernet ENC28J60**

A tecnologia Ethernet é a tecnologia LAN mais amplamente utilizada e pode ser trazida para o nível do dispositivo usando-se a mais moderna tecnologia de sistemas embarcados (RAJAN, THOMAS e MATHEW, 2012). Ela está completamente difundida e a tendência é que, cada vez mais, pessoas utilizem essa ferramenta para compartilhamentos e buscas de informações (KUROSE e ROSS, 2006).

O módulo utilizado no projeto tem como componentes principais um chip controlador ENC28J60 (produzido pela Microchip Technology Inc), uma porta Ethernet RJ45, um cristal de 25Mhz e um conector de 10 pinos, a fim de facilitar a ligação desse módulo à diferentes

tipos de microcontroladores. O módulo Ethernet ENC28J60 pode ser observado por meio da Figura 9.



**Figura 9 - Módulo Ethernet ENC28J60**

Este controlador apresenta Interface Serial padrão periférico (SPI) e incorpora uma série de esquemas de filtragem de pacotes para limitar os pacotes de entrada. Além disso, apresenta um módulo interno DMA (*Direct Memory Access* - Acesso Direto à Memória) para transferência rápida de dados. A comunicação é implementada por meio de um pino de interrupção, um do SPI e dois pinos usados para LEDs de indicação de *link* e atividade de rede (MICROCHIP, 2016).

## **2.6 Relé**

O relé é um dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando alcançadas determinadas condições no circuito de entrada que controla o dispositivo. Assim, o relé não possui a função de interromper o circuito principal, mas sim de fazer atuar o seu sistema de manobra (CUNHA, 2009).

Este equipamento, quando ligado a uma instalação, tem como função permitir o funcionamento de outros aparelhos conectados ao mesmo ou em outro circuito elétrico que estejam ligados ao relé, por meio de uma alteração nas condições do equipamento pela passagem da corrente elétrica. Funciona como uma chave automática comutadora que atua pela alteração de algumas variáveis predeterminadas como temperatura, corrente elétrica, ar e campo magnético (CUNHA, 2009).

Os relés eletromecânicos, como o usado no projeto, são baseados no princípio eletromagnético, são compostos, de modo geral, por um eletroímã, em forma de bobina, uma armadura metálica, que possa ser atraída pelo campo magnético criado pelo eletroímã, uma mola e um conjunto de contatos elétricos, que serão abertos, fechados ou comutados, conforme a configuração de cada relé. Quando a corrente elétrica percorre a bobina e dá origem a um campo magnético, a armadura é atraída por essa força que altera a posição dos contatos, abrindo, fechando ou comutando, dependendo da posição e do tipo de relé, fazendo o dispositivo atuar. Quando a corrente da bobina é interrompida, o campo magnético se anula e os contatos, pela ação da mola, retornam à posição original (CUNHA, 2009).

No projeto, foram utilizados relés miniaturas da Cromatek CTK 1C 5V CC, cuja capacidade é de 12A 28V CC. Este relé possui como vantagens o baixo consumo na bobina, uma longa vida útil e baixo custo, além de possuir terminais para montagem em PCI, o que viabilizou a utilização no projeto da placa de circuito impresso. O modelo de relé utilizado no projeto pode ser observado por meio da Figura 10.



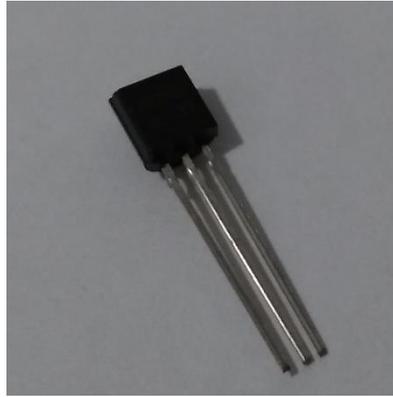
**Figura 10 - Relé Miniatura CTK 1C 5V CC**

## **2.7 Transistor**

Um dos maiores avanços tecnológicos do século XX foi a invenção do transistor, uma vez que foi decisivo para a evolução da eletrônica. Antes de tal invenção, até meados da década de 1950, utilizava-se a válvula tríodo como dispositivo de controle eletrônico (REZENDE, 2004).

O transistor é um dispositivo eletrônico de três terminais usados para controlar sinais elétricos. O uso mais comum desse dispositivo é o controle de amplificação e de chaveamento. No uso de amplificação, o sinal de saída é igual ao de entrada, mas com maior amplitude, devido

à potência fornecida pela fonte de alimentação de corrente contínua (CC). Devido a essa capacidade de converter energia de uma fonte CC em energia de um sinal controlado, o transistor é chamado de dispositivo ativo (REZENDE, 2004). Por meio da Figura 11 pode-se observar o exemplo de um dos transistores utilizados no projeto, o BC546.



**Figura 11 - Transistor NPN BC546**

## **2.8 Diodo**

Os diodos são componentes semicondutores que conduzem a corrente num único sentido. Esses componentes podem ser especificados pela tensão e correntes máximas de trabalho ou ainda por um símbolo formado por letras e números dado pelo fabricante como 1N4002, 1N4148, BA315, etc. Os diodos possuem uma faixa em seu invólucro que permite identificar seu catodo (BRAGA, 2005). O diodo utilizado no projeto, 1N4007, pode ser observado por meio da Figura 12.



**Figura 12 - Diodo 1N4007**

## 2.9 Resistor

Os resistores têm por finalidade apresentar uma resistência elétrica, ou seja, uma oposição à passagem de uma corrente. A medida da resistência é feita numa unidade denominada ohms ( $\Omega$ ). Os resistores mais comuns são os de carbono e os de fio de nicromo ou simplesmente “de fio” cujo aspecto pode ser observado por meio da Figura 13.



**Figura 13 - Resistor de Carbono**

O tamanho do resistor está diretamente relacionado com sua capacidade de dissipar calor, ou seja, quanto mais intensa for a corrente num resistor mais calor ele gera e este calor precisa ser transferido ao meio ambiente. Os resistores comuns podem ser encontrados com valores de resistência desde fração de ohm até mais de 20 milhões de ohms e com dissipações de 1/8 W a mais de 100 W.

## 2.10 Capacitores

A finalidade do capacitor é armazenar uma carga elétrica. Neste processo o capacitor apresenta algumas propriedades importantes que são aproveitadas em circuitos eletrônicos. Os capacitores são usados como filtros, como espécie de reservatório de energia ou como “amortecedores” evitando que ocorram variações grandes de tensão num circuito.

Os capacitores são especificados pela sua capacitância (ou capacidade) que é medida em farads (F). O farad é uma unidade muito grande assim encontramos na maioria dos casos especificações em submúltiplos como o microfarad (mF) que equivale à milionésima parte do farad ou 0,000 001 F; o nanofarad (nF) que equivale à bilionésima parte do farad ou 0,000 000 001 F e o picofarad (pF) que equivale a trilionésima parte do farad ou 0,000 000 000 001 F (BRAGA, 2005).

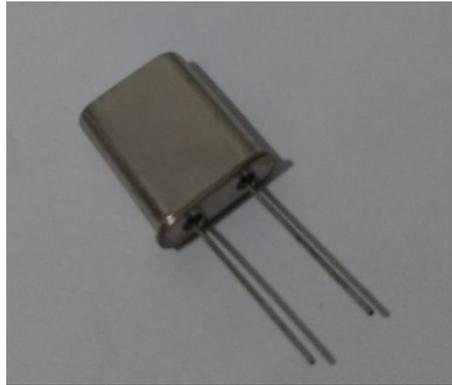
Os capacitores são formados por duas placas de metal tendo entre elas um material isolante (dielétrico) que lhes dá nome. Na Figura 14 pode ser observado um capacitor de cerâmica, encontrado no circuito eletrônico do projeto. Os tipos mais comuns são os cerâmicos, poliéster e eletrolíticos. Os eletrolíticos são polarizados, ou seja, é preciso observar o polo positivo e negativo no momento do uso. Uma outra especificação dos capacitores é a tensão máxima que podem suportar ou tensão de trabalho que é medida em volts e que varia entre 3 V e 1200 V tipicamente (BRAGA, 2005).



**Figura 14 - Capacitor de Cerâmica de 100 nF**

## **2.11 Oscilador a Cristal**

O oscilador a cristal é um dispositivo que utiliza a vibração de um material piezoeletrônico para criar um sinal elétrico em uma frequência bastante precisa que, normalmente, é utilizada para medir precisamente o tempo. Comumente são usados cristais piezoeletrônicos de quartzo. Ao ser submetido a tensão elétrica, o cristal contrai e essa contração ocorre de acordo com a construção do cristal. Ao chegar a determinado ponto de contração, o circuito libera a tensão e o cristal relaxa, de forma a ficar pronto para uma nova contração. Dessa forma, os tempos de contração e relaxamento do ciclo determinam a frequência de operação, bem mais estável que os circuitos que utilizam capacitores (SHINODA e SANTOS, 2011). Por meio da Figura 15 pode ser observado um oscilador a cristal similar ao utilizado no projeto.

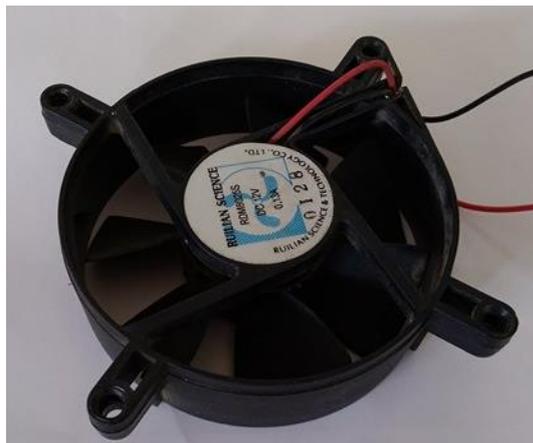


**Figura 15 - Oscilador a Cristal de Quartzo**

## **2.12 Cooler**

O cooler é um dispositivo de arrefecimento muito utilizado em diversos hardwares a fim de retirar o excesso de calor dos componentes, de forma a contribuir para o bom funcionamento da aplicação.

No projeto, o cooler foi utilizado com a finalidade de efetuar a ventilação mecânica para retirar o vapor d'água em excesso na caixa de acondicionamento, a fim de evitar que a umidade prejudique o funcionamento do circuito eletroeletrônico. Na Figura 16 pode-se observar o modelo de cooler utilizado no projeto.



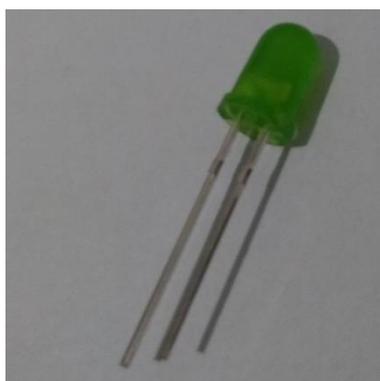
**Figura 16 - Cooler Microventilador CC 12V**

### 2.13 LED

No início dos anos 60, surgiram os Diodos Emissores de Luz (*Light Emitting Diode*, LED). O LED é um dispositivo semicondutor que tem como princípio de funcionamento a eletroluminescência, emitindo luz por meio da combinação de elétrons e lacunas em um material sólido (SÁ JÚNIOR, 2007). Emitem luz em uma faixa específica do espectro visível. Há também LEDs que operam na faixa de ultravioleta e infravermelho.

No início, os LEDs eram utilizados em iluminações indicativas (indicando o estado de um equipamento, se ligado ou desligado), mas o desenvolvimento de LEDs mais potentes, tornou possível a utilização em outras aplicações, como semáforos, lanternas, iluminação residencial e iluminação de emergência (BULLOUGH, 2003). Atualmente, estes dispositivos apresentam maior eficácia luminosa agregada à longa vida útil comparados às lâmpadas fluorescentes.

Os LEDs, no entanto, não podem ser ligados diretamente à rede elétrica, pois operam com níveis de tensão diferentes dos sinais fornecidos pela rede. Dessa forma, é necessário desenvolver um circuito de alimentação adequado para estes dispositivos. A alimentação é feita com corrente contínua, possuem tensão de condução baixa e não necessitam de ignição, diferente das lâmpadas fluorescentes (PINTO, 2008). Por meio da Figura 17 pode-se observar um modelo de LED encontrado no mercado, similar ao utilizado no projeto.



**Figura 17 - Diodo Emissor de Luz (LED)**

## 2.14 Foto-Resistor (LDR)

O foto-resistor, também conhecido como sensor LDR é um tipo de resistor dependente de luz (*Light Dependent Resistor*) que funciona da seguinte forma: ao aumentar a incidência de luz sobre o sensor, há uma redução em sua resistência, uma relação inversamente proporcional. A aquisição do sinal do LDR pelo microcontrolador é feita utilizando-se um circuito divisor de tensão, com um resistor em série com o sensor (TORRES, MONTEIRO, *et al.*, 2015). Na Figura 18 pode-se observar um sensor LDR similar ao utilizado no projeto.



**Figura 18 - Foto-Resistor LDR**

**Fonte: WENDLING, 2010.**

## 2.15 Sistemas de Controle

Um sistema de controle tem por objetivo alcançar resultados desejados, a partir de uma combinação de componentes que atuam em conjunto. Um sistema de pode ser definido como um bloco que recebe entradas e produz saídas com respostas a estas entradas. Nestes sistemas com relação entrada-saída, dois sistemas de controle são conhecidos (OGATA, 2002):

- Sistemas de controle em malha aberta – aqueles cuja saída não exerce nenhuma influência na ação de controle. Não há retroalimentação do sinal para comparação com a entrada.
- Sistemas de controle em malha fechada – aqueles cuja saída exerce um efeito direto na ação de controle. Há retroalimentação, que tem o objetivo de obter um erro entre a entrada e a saída, e utilizar este erro para alimentar o controlador a fim de reduzi-lo, atuando na variável manipulada.

### 2.15.1 Controlador Liga-Desliga

Em sistemas básicos, o controle pode ser realizado de forma simples, utilizando-se até mesmo uma lógica Liga-Desliga, de acordo com a variável analisada, como temperatura, umidade e luminosidade.

Nesse tipo de sistema, o sinal de referência e o sinal de saída são comparados pelo controlador. Caso a saída supere a referência, o atuador é desligado; se a saída for menor que o sinal de referência, o atuador é ligado.

Um exemplo de controlador Liga-Desliga presente do cotidiano é aplicado em refrigeradores. Um termostato, que é um controlador Liga-Desliga bimetálico, é responsável por controlar um compressor. Se a temperatura estiver abaixo de um determinado valor, um dos metais se dilata e, ao curvar-se, perde o contato com o segundo metal e assim o compressor desliga. À medida em que a temperatura volta ao normal, o metal dilatado anteriormente volta ao normal, o que provoca o fechamento do contato e conseqüentemente ocorre a ligação do compressor (BAYER e ARAÚJO, 2011).

Geralmente, o controlador nesse caso é modelado por um relé, como pode-se observar na Figura 19.

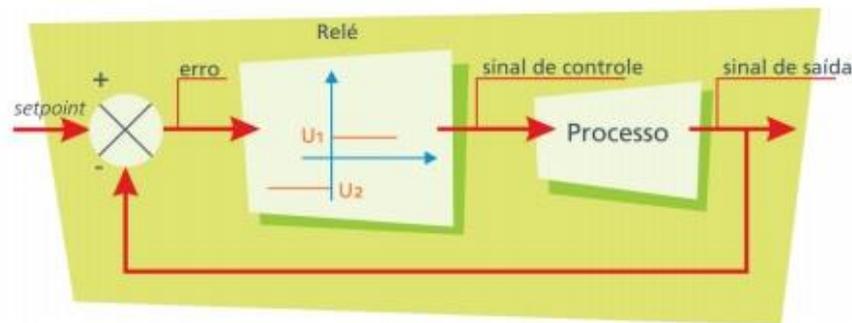
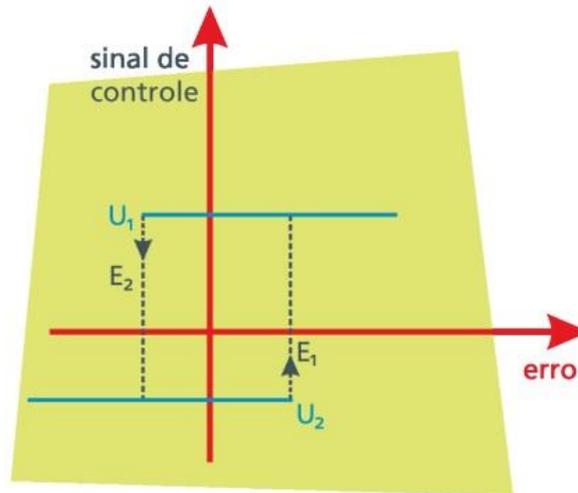


Figura 19 - Diagrama de Blocos de um Controlador Liga-Desliga

Fonte: BAYER e ARAÚJO, 2011

Na Figura 20 pode ser observado o funcionamento do controlador. Para que ocorra um chaveamento de U1 para U2, faz-se necessário que o erro fique abaixo de E2. De forma análoga, para que haja um acionamento para U1, o erro deve ultrapassar E1 (BAYER e ARAÚJO, 2011).



**Figura 20 - Curva de Histerese**

**Fonte: BAYER; ARAÚJO, 2011**

A instabilidade, que pode ocorrer pela ausência de uma realimentação negativa, consiste na grande oscilação da saída entre os limites de atuação do controlador conhecida como histerese. A oscilação ocasionada por uma má definição da histerese pode acarretar em desgaste do atuador pelo excesso de acionamentos. A vantagem deste tipo de controlador consiste na simplicidade e o baixo custo de implementação.

No trabalho em questão, o controlador com histerese foi utilizado para o acionamento do sistema de ventilação mecânica. Com a utilização de um sensor de umidade DHT11, a umidade da parte interna da caixa de condicionamento da Bancada é aferida constantemente e à medida em que a umidade ultrapassa o valor preestabelecido, o sistema de ventilação é acionado a fim de diminuir a umidade. Há também a utilização do controlador com histerese no sistema de iluminação, em que o sistema é acionado no início do experimento e desligado ao fim do experimento.

### **2.15.2 Controlador Proporcional Integral de Posição (PI)**

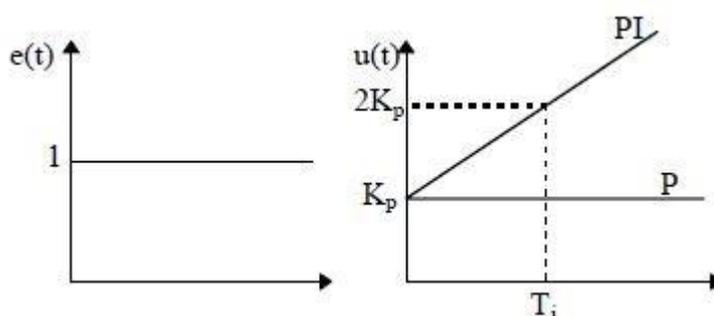
Segundo Lourenço (1997), o sinal de controle de um controlador PI é função do erro e da integral do erro, o que pode ser observado na Equação 3.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3)$$

Ao aplicar a transformada de Laplace para a Equação 3, obtém-se a Equação 4, no domínio da variável complexa.

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (4)$$

em que:  $T_i$  é o tempo integral correspondendo o tempo em que a parcela relativa a parte proporcional da ação de controle é duplicada – Figura 21.



**Figura 21 - Ação de Controle Proporcional e Integral**

**Fonte: LOURENÇO, 1996.**

O controlador PI tem como característica eliminar o erro em regime permanente, pois há a inserção de um polo na origem da função de transferência do controlador (LOURENÇO, 1997).

No trabalho de Oliveira (2017), foi desenvolvido um controlador PI de posição discretizado que permite a realização de práticas de controle em malha fechada utilizando a bancada de tanques acoplados. Este controlador foi implementado no *firmware* do PIC18F4550.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 A Bancada de Tanques Acoplados

A Bancada utilizada foi desenvolvida em um projeto anterior, no trabalho intitulado “Desenvolvimento de um Laboratório Remoto para Práticas de Controle de Nível dos Tanques Acoplados” (OLIVEIRA, 2017). A estrutura da Bancada foi projetada com a utilização do software AutoCad e fabricada em acrílico e cortada à laser. As duas versões da Bancada utilizada podem ser observadas na Figura 22.

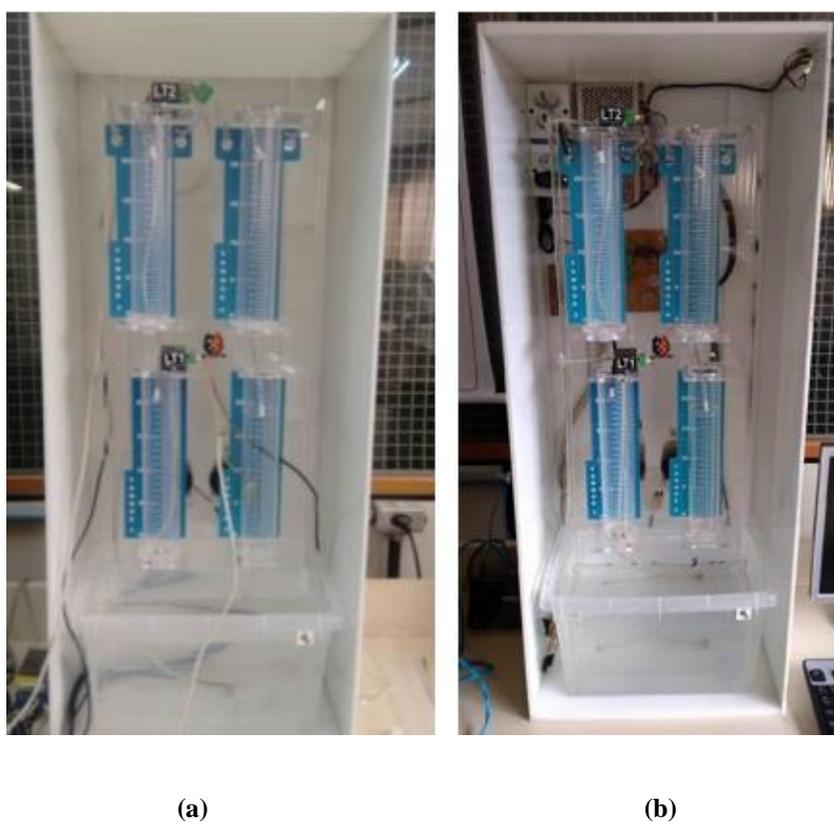


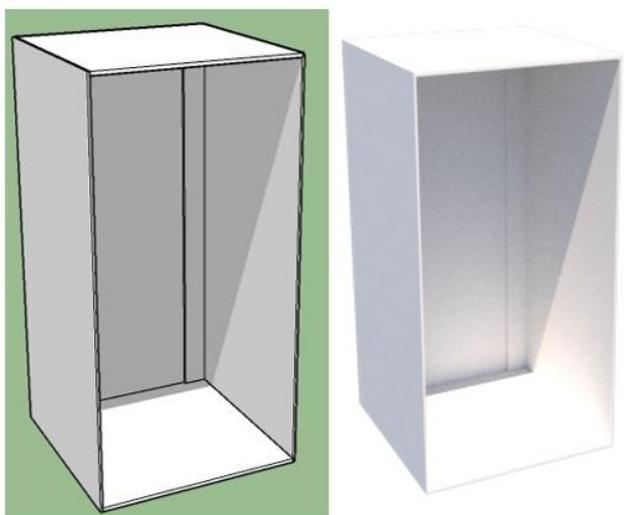
Figura 22 – (a) Versão da Bancada do trabalho de Oliveira (2017) e (b) versão do presente trabalho

#### 3.2 Projeto da Caixa de Acondicionamento da Bancada

O projeto do Laboratório Remoto Utilizando-se a Bancada de Quatro Tanques tem como finalidade a realização de experimentos à distância, via internet. Dessa forma, surgiu a necessidade de criação de uma caixa de acondicionamento para evitar a interferência externa no dispositivo por qualquer pessoa que frequente o LABCAM e causar possíveis alterações

indevidas nos experimentos, bem como eliminar a proliferação de insetos na água. Devido à essa demanda, deu-se início ao projeto da caixa de acondicionamento da Bancada.

Utilizou-se o software SketchUp 2016 (versão gratuita para estudante) para criar um projeto em três dimensões da caixa de acondicionamento, de forma a avaliar a viabilidade do *layout* escolhido e analisar quais materiais deveriam ser utilizados para a confecção. O desenho da caixa de acondicionamento da Bancada pode ser observado por meio da Figura 23.



**Figura 23 - Projeto da Caixa de Acondicionamento da Bancada**

Como o LABCAM dispunha de placas de polipropileno e PVC para consumo, foram utilizadas essas placas. O material foi levado a uma serraria da região, onde foram realizados os cortes de acordo com as medidas do projeto.

Com as placas já cortadas, foram feitas roscas nos materiais utilizando cocinetes, a fim de facilitar que as placas fossem fixadas umas às outras com a utilização de parafusos.

Após feitas as roscas, as placas foram fixadas manualmente com parafusos, utilizando-se uma chave de fenda comum.

Após a estrutura principal da caixa estar finalizada, deu-se início à fabricação da peça de fechamento frontal. O projeto da peça frontal foi desenvolvido utilizando-se o software AutoCad (versão gratuita para estudante). Com o projeto pronto, o corte do acrílico utilizado foi realizado à *laser* em uma empresa especializada.

A peça em acrílico foi fixada à caixa após todos os procedimentos de teste, utilizando-se parafusos.

### 3.3 Alimentação da Bancada

A Bancada possui internamente quatro tomadas de 127V CA (10A) para que sejam ligados os dispositivos operantes.

O circuito do microcontrolador PIC18F4550 e o circuito do microcontrolador PIC12F675 são alimentados por uma fonte de 5V CC. Além do PICs, também são alimentados pela mesma fonte o Módulo Ethernet ENC28J60 e os LEDs indicadores do circuito.

As bombas do projeto são alimentadas por uma fonte externa de 12V CC, que também é ligada à uma das tomadas internas da caixa.

Há também uma fonte de 24V CC, responsável por alimentar os sensores de pressão utilizados para aferir o nível de água dos tanques. Pode-se observar a alimentação interna da estrutura da Bancada por meio da Figura 24.



Figura 24 - Alimentação Interna da Bancada

### 3.4 Projeto do Hardware

O circuito do hardware foi desenvolvido utilizando-se o software Proteus/Isis como ambiente de desenvolvimento e simulação do circuito eletrônico, pelo fato de possuir uma extensa biblioteca de componentes e *packages*, permitindo ao próprio desenvolvedor criar e configurar novos itens da biblioteca, satisfazendo a necessidade do projeto. O software

Proteus/Ares possibilita visualizar o projeto em 3D, de forma a facilitar ao usuário analisar a disposição dos componentes no hardware.

O *layout* da placa de circuito impresso que utiliza o PIC18F4550 pode ser observado na Figura 25.

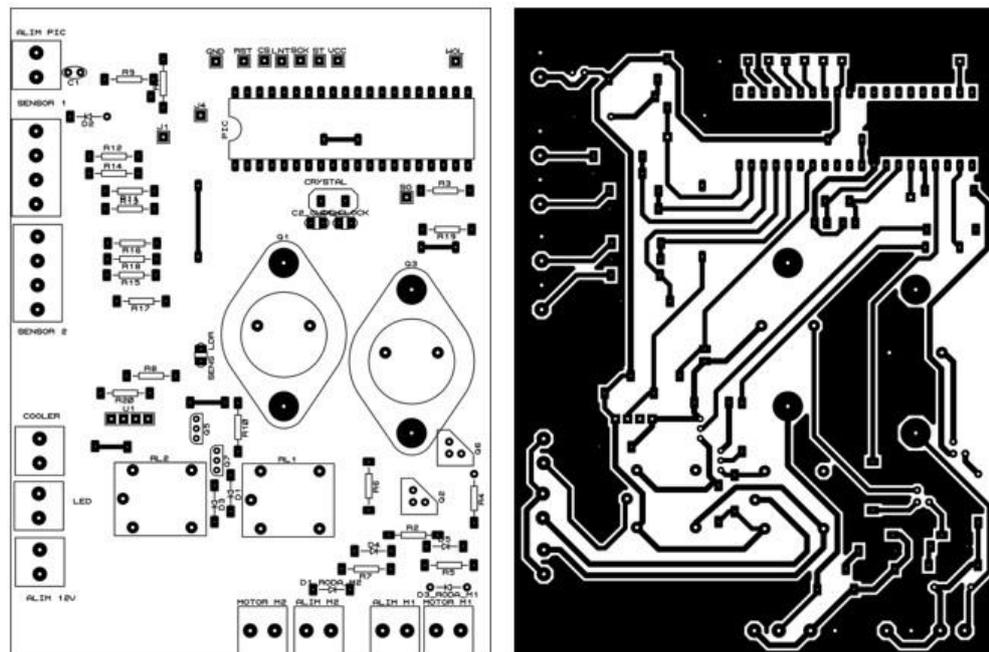


Figura 25 - *Layout* da Placa de Circuito Impresso do PIC18F4550

Também foi necessário a criação de uma nova placa para aferição da umidade interna da caixa de acondicionamento da Bancada com um sistema acionamento da ventilação para o controle da umidade interna, uma vez que a memória do PIC18F4550 não foi suficiente para que este recurso estivesse incluso na placa principal do projeto. O *layout* da placa criada para tal fim, utilizando-se o PIC12F675, pode ser observado na Figura 26.

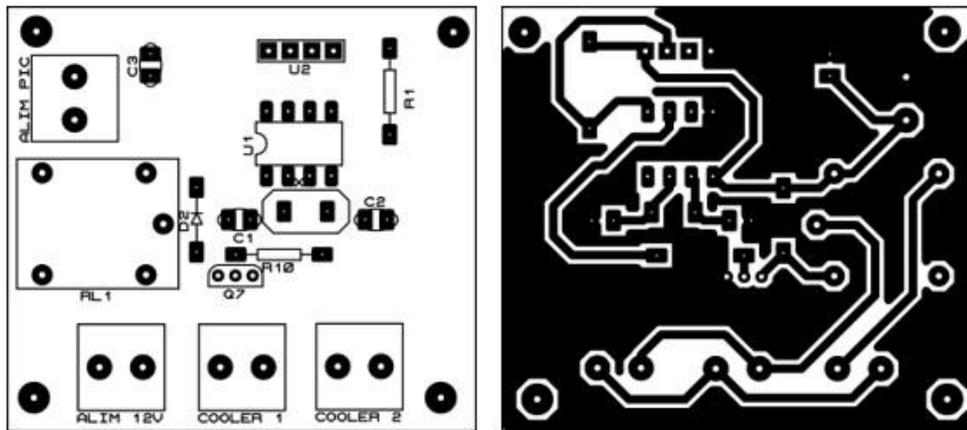


Figura 26 - Layout da Placa de Circuito Impresso do PIC12F675

### 3.4.1 Pinos Utilizados no PIC18F4550

O componente principal do circuito eletrônico é o microcontrolador PIC18F4550. É por meio desse componente que são feitas as aquisições de sinais dos sensores, bem como o acionamento das bombas do sistema. Os detalhes dos pinos do PIC18F4550 utilizados no projeto podem ser observados por meio da Figura 27.

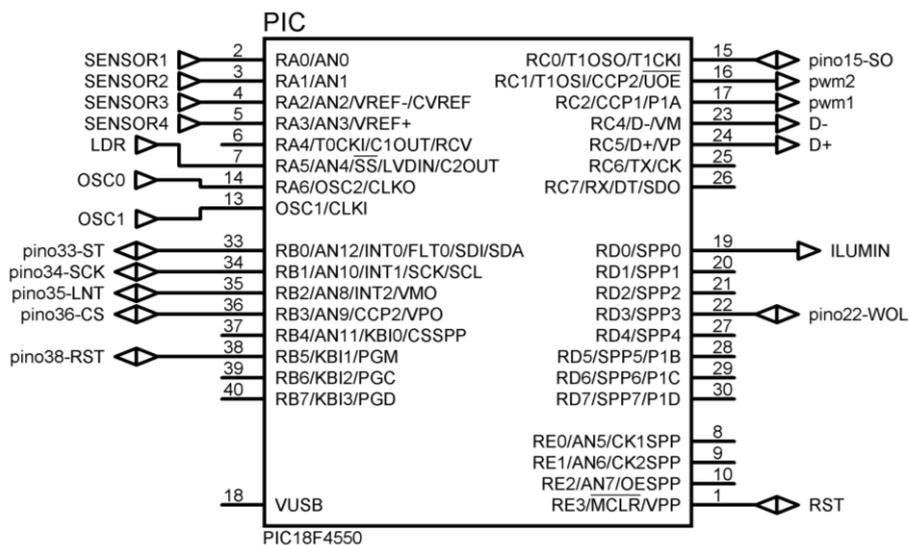


Figura 27 - Pinos Utilizados do PIC18F4550

### 3.4.2 Alimentação do PIC18F4550

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 um capacitor de desacoplamento para evitar ruídos e interferência da rede elétrica. O circuito de alimentação do PIC18F4550 pode ser observado por meio da Figura 28.

## Alimentação do PIC

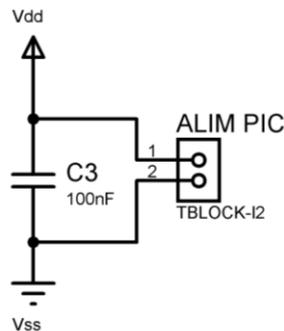


Figura 28 - Circuito de Alimentação do PIC18F4550

### 3.4.3 Reset do PIC18F4550

O pino 1 do PIC é responsável pelo reset. O pino fica alimentado constantemente com uma tensão de 5V e em caso de travamento, o botão reset pode ser acionado. Dessa forma, durante o acionamento, o pino recebe a tensão de 0 V e o microcontrolador reinicia sua operação após o botão ser solto. Necessita-se de um resistor para realizar o reset do microcontrolador como pode ser observado na Figura 29 – no caso um resistor de 10 k $\Omega$ .

## Reset do PIC

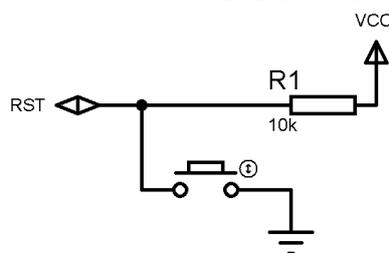


Figura 29 - Circuito de Reset do PIC18F4550

### 3.4.4 Circuito de *Clock* do PIC18F4550

O circuito de *clock* do microcontrolador foi criado utilizando-se um oscilador cristal de quartzo de 20 MHz e dois capacitores de cerâmica para desacoplamento de 15 pF. Apesar de o microcontrolador possuir *clock* interno, optou-se por utilizar o oscilador controlado por cristal de quartzo para *clock* externo a fim de manter um sinal de frequência fixa, estável e preciso. O esquema de ligação do circuito de *clock* pode ser observado na Figura 30.

## CIRCUITO DE CLOCK

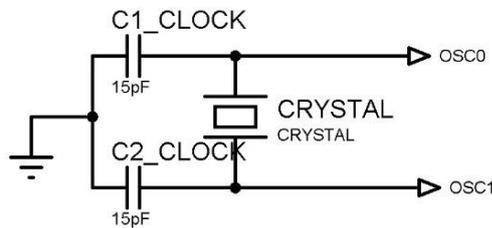


Figura 30 - Circuito de *Clock* do PIC18F4550

### 3.4.5 Circuito de Aquisição do Nível do Tanque

Na Figura 31 pode-se observar o circuito associado à aquisição dos dados provenientes do sensor de pressão. As informações do sensor chegam até o microcontrolador por meio de um circuito divisor de tensão utilizando-se um resistor de 2,2K e um resistor de 16K, além de uma ligação de referência no *ground*. O circuito divisor de tensão foi necessário pelo fato de os sensores MPXM2010 serem alimentados por uma fonte de 24V e o PIC ter a capacidade de realizar leituras A/D de 0 a 5V. Foram utilizados na leitura os pinos 2, 3, 4 e 5 como portas A/D.

## SENSORES A/D

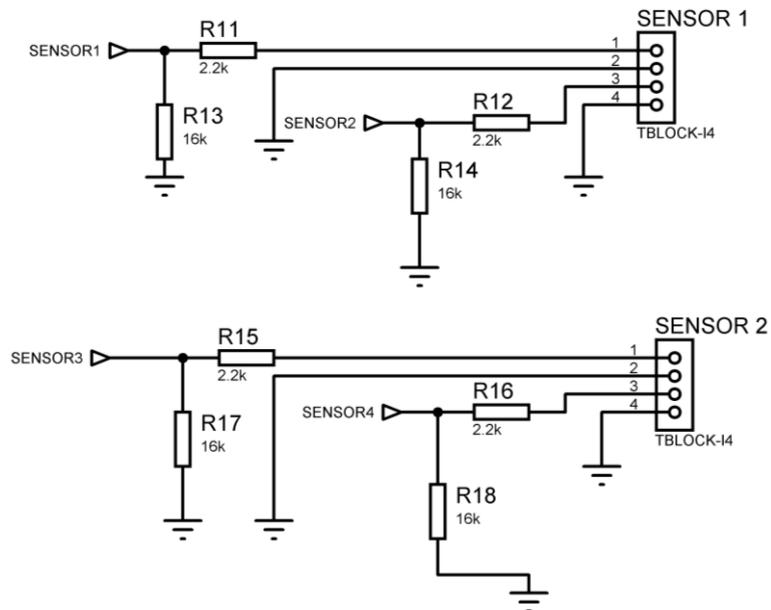


Figura 31 - Circuito de Aquisição do Nível dos Tanques pelos Sensores

### 3.4.6 Circuito de Acionamento das Bombas

O acionamento das bombas é feito por PWM, por meio dos pinos 16 e 17, ligados ao módulo de potência. O circuito de potência pode ser observado por meio da Figura 32.

## Circuito de Acionamento das Bombas

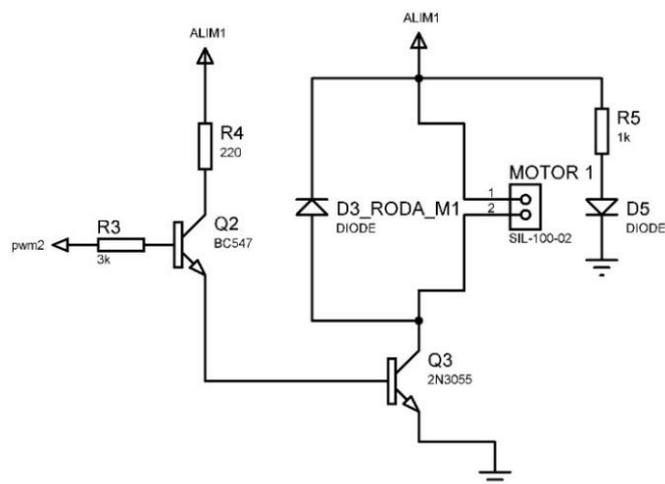


Figura 32 - Circuito de Acionamento das Bombas

### 3.4.7 Circuito de Ligação do Módulo ENC28J60 ao PIC18F4550

O módulo ENC28J60 foi utilizado para comunicação TCP/IP do projeto, de forma que o microcontrolador PIC possa ser acessado via internet por meio de um endereço de IP. Este módulo comunica-se com o PIC por meio do padrão Ethernet, tecnologia de rede mais utilizada no mundo (KUROSE e ROSS, 2006). Os pinos utilizados no PIC foram 15, 22, 33, 34, 35, 36 e 38, os quais foram conectados respectivamente nos seguintes pinos do módulo: WOL, SO, ST, SCK, LNT E CS. O circuito pode ser observado por meio da Figura 33.

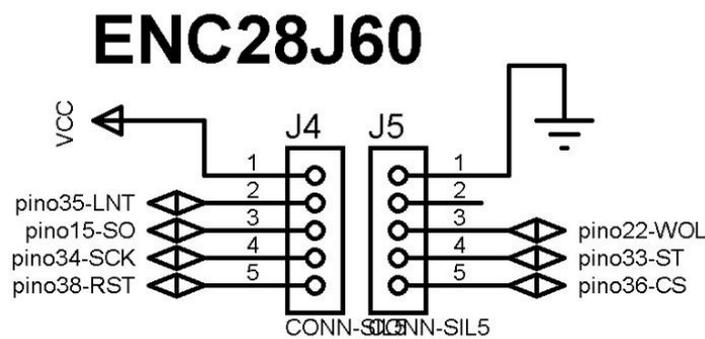


Figura 33 - Circuito de Comunicação Ethernet

### 3.4.8 Circuito do Sensor LDR

A estrutura de acondicionamento da Bancada conta com um sistema de iluminação que utiliza uma fita de LEDs a fim de possibilitar a utilização para experimentos até mesmo em horários em que a iluminação do laboratório esteja desativada. Dessa forma, a fim de economizar energia, foi criado um sistema de verificação da luminosidade do ambiente para propiciar o acionamento da iluminação somente quando for realmente necessário.

A aquisição da luminosidade do ambiente pelo PIC se dá por meio da utilização do sensor LDR, que envia os dados para o microcontrolador tratá-los no código de programação. Entre a alimentação do circuito e o sensor, há um resistor a fim de diminuir a corrente, como forma de proteção. A aquisição do sinal ocorre entre o sensor LDR e o resistor. O pino 7 do PIC foi utilizado para aquisição dos dados do sensor. O esquema de ligação pode ser observado na Figura 34.

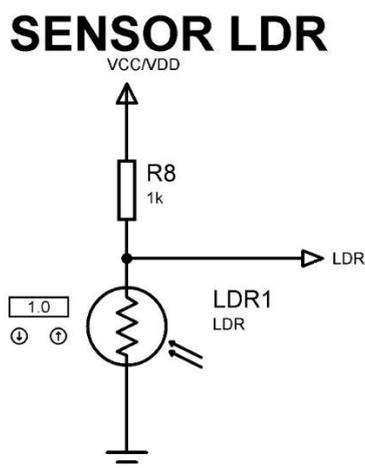


Figura 34 - Circuito de Aquisição do Sensor de Luminosidade LDR

### 3.4.9 Circuito de Acionamento da Iluminação de LED

O sistema de iluminação utilizando a fita de LEDs fez-se necessário para possibilitar a visualização do processo em horário noturno.

Os testes de verificação da iluminação ideal para a realização da prática foram feitos no laboratório em horários em que a iluminação estava escassa. Foram realizadas diversas leituras do sensor LDR com resolução de 10 bits (contagem de 0 a 1023) no conversor A/D e mostradas em um display LCD somente para teste. Após diversos testes, chegou-se à conclusão de que o sistema de iluminação deveria ser acionado quando a leitura no conversor A/D ultrapassasse o limite de 900. Há também um outro fator considerado no acionamento da iluminação, o fato de o usuário iniciar o experimento. Dessa forma, mesmo que o ambiente esteja com iluminação baixa, o sistema só é acionado caso algum experimento esteja em vigor. Após acionado, o sistema só é desligado após o fim do experimento.

O acionamento da iluminação de LED inicia-se com o degrau (nível lógico alto) na porta definida como saída digital do microcontrolador, pino 19 do PIC, que passa por um resistor de  $10K\Omega$  e em seguida aciona a base do transistor BC546. Com o acionamento da base do transistor, este permite que a corrente tenha fluxo entre o coletor e o emissor do transistor, conseqüentemente, a corrente passa pela bobina do relé utilizado e faz com que o circuito interno do relé seja fechado. Com o relé acionado, a fonte de 12 V utilizada aciona a fita de

LED conectada em paralelo. Vale ressaltar que há a utilização de um diodo de roda livre (1N4007). Pode-se observar o circuito de acionamento da iluminação por meio da Figura 35.

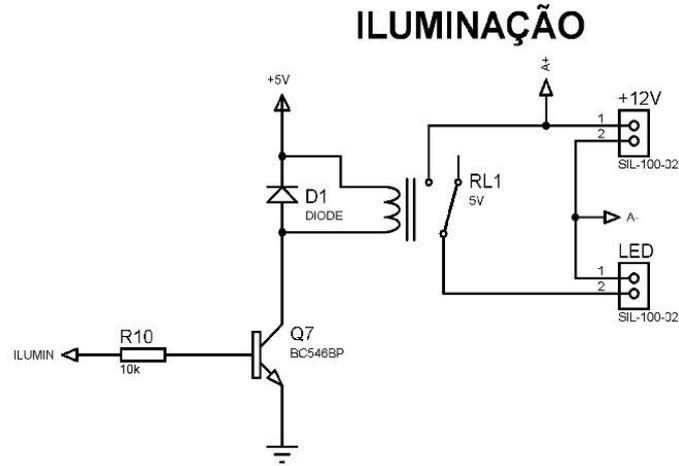


Figura 35 - Circuito de Acionamento da Iluminação

### 3.4.10 Pinos Utilizados do PIC12F675

O componente principal da placa para controle da umidade relativa é o microcontrolador PIC12F675. É o responsável pela aquisição do sinal do sensor, além de ser responsável também pelo sinal de saída para acionamento do sistema de ventilação. Os detalhes dos pinos do PIC12F675 utilizados no projeto podem ser observados por meio da Figura 36.

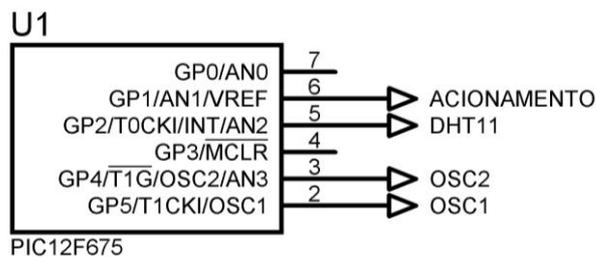


Figura 36 - Pinos Utilizados no PIC12F675

### 3.4.11 Alimentação do PIC12F675

A alimentação do PIC é feita, geralmente, com uma tensão de 5V. Os pinos 1 e 8 são responsáveis pela tensão de alimentação positiva e negativa respectivamente. Recomenda-se o

uso de um capacitor de desacoplamento para evitar ruídos e interferência da rede elétrica. Na Figura 37 observa-se o circuito de alimentação do PIC12F675.

## Alimentação do PIC

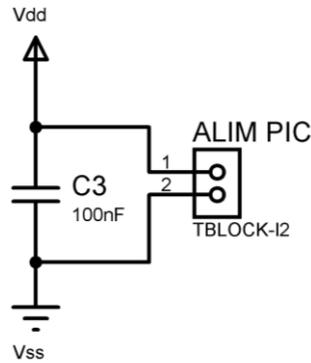


Figura 37 - Circuito de Alimentação do PIC12F675

### 3.4.12 Circuito de *Clock* do PIC12F675

O circuito de *clock* do PIC12F675 foi criado utilizando-se um oscilador cristal de quartzo de 16 MHz e dois capacitores de cerâmica de 15 pF. Apesar de o microcontrolador possuir *clock* interno, optou-se por utilizar o oscilador controlado por cristal de quartzo para *clock* externo, a fim de manter um sinal de frequência fixa, estável e precisa. O esquema de ligação do circuito de *clock* pode ser observado na Figura 38.

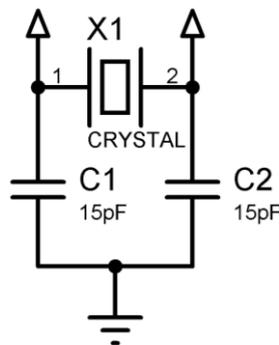


Figura 38 - Circuito de *Clock* do PIC12F675

### 3.4.13 Circuito do Sensor DHT11

O sensor de temperatura e umidade DHT11 é alimentado com uma tensão de 5V CC em seu pino 1. O pino 2, responsável pela transmissão dos dados necessita de um resistor de *pullup* de 4,7 k $\Omega$ . O pino 3 do sensor não é utilizado no circuito, já o pino 4 é ligado à referência (*ground*) do circuito. Pode-se observar o esquema de ligação do sensor DHT11 por meio da Figura 39.

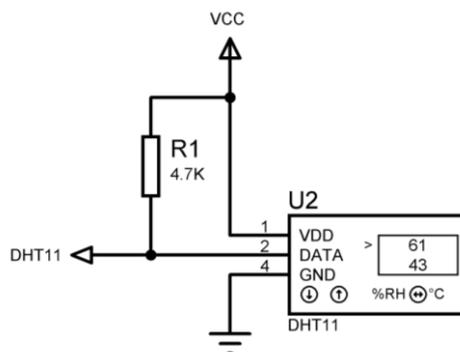


Figura 39 - Circuito do Sensor DHT11

### 3.4.14 Acionamento da Ventilação Mecânica

O desenvolvimento do circuito para controle da umidade relativa (UR) foi necessário, uma vez que nos testes iniciais da bancada observou-se ocorrências de saturação da umidade que resultaram na interrupção da operação do microcontrolador PIC18F4550. A grande concentração de umidade condensada pode ser observada na Figura 40:



**Figura 40 - Bancada com Alta Concentração de Umidade Condensada**

Após a realização de consultas sobre a umidade recomendada de operação de componentes eletrônicos, chegou-se à conclusão de que a faixa ideal de trabalho está entre 5-95% (sem condensação) de acordo com o Manual do Controlador Lógico Programável Micrologix 1100, fabricado pela empresa Allen-Bradley.

Como o sensor DHT11 possui uma faixa de medição de umidade relativa de 20-90%, optou-se por explorar o limite máximo de medição e acionar o sistema de ventilação quando a umidade relativa no interior da caixa de acondicionamento superasse 89% de umidade relativa. Para que o sistema não apresentasse um grande número chaveamentos e consequentemente causar algum dano na placa, foi definido um valor de histerese de 5%. Dessa forma, o sistema seria acionado todas as vezes em que a umidade ultrapassasse 89% e desligado automaticamente ao atingir 84% de umidade relativa.

Para realizar o teste de acionamento da ventilação mecânica do sistema, foi inserida a placa contendo o sensor de umidade e temperatura DHT11 e o circuito de acionamento acoplado dentro da estrutura da Bancada e realizado o fechamento da mesma com a placa de acrílico na parte frontal em um dia com umidade relativa elevada na cidade de Ouro Preto. Em seguida,

foi observado o sistema e após a umidade interna atingir o valor predeterminado na programação, de acordo com umidade normal de trabalho de componentes eletrônicos, o sistema de ventilação mecânica iniciou o trabalho de retirada da umidade interna a fim de proteger os circuitos eletrônicos e os demais equipamentos.

O acionamento da ventilação mecânica inicia-se com o degraú (nível lógico alto) na porta definida como saída digital do microcontrolador, pino 6 do PIC12F675, que passa por um resistor de 10 K $\Omega$  e em seguida aciona a base do transistor BC546. Com o acionamento da base do transistor, este permite que a corrente tenha fluxo entre o coletor e o emissor do transistor, conseqüentemente, a corrente passa pela bobina do relé utilizado e faz com que o circuito interno do relé seja fechado. Com o relé acionado, a fonte de 12V utilizada aciona os coolers da ventilação mecânica conectados em paralelo. Vale ressaltar também a utilização de um diodo de roda livre (1N4007). O circuito de acionamento dos coolers de ventilação mecânica pode ser observado na Figura 41.

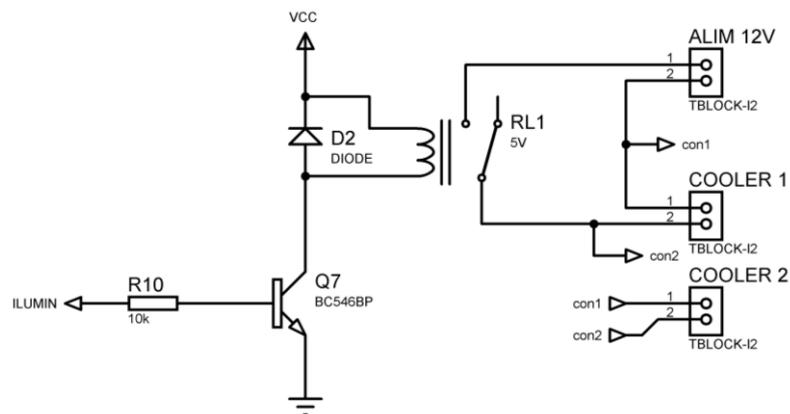
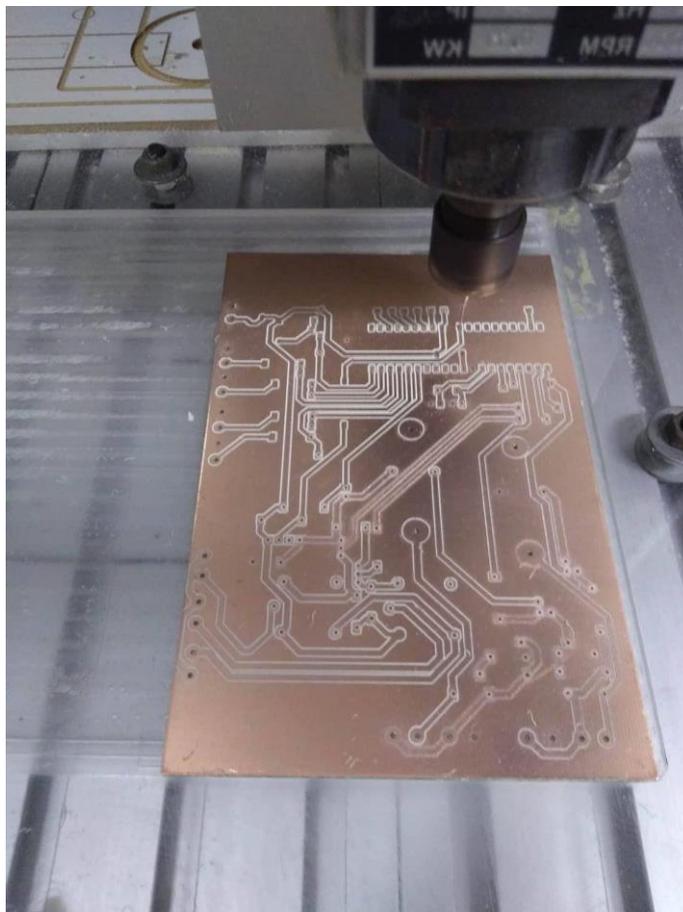


Figura 41 - Circuito de Acionamento da Ventilação Mecânica

### 3.5 Placas de Circuito Impresso (PCI)

Após diversos testes e com os *layouts* das placas prontos no Proteus, como mostrado anteriormente, utilizou-se o software Artcam para a realização dos mapeamentos dos circuitos das duas placas. O software Artcam é responsável por interpretar o *bitmap* da placa criada no software Proteus/Ares e mapear trilhas e furos a partir do *bitmap*. Em seguida, há a conversão para o código G, que é a linguagem de programação padrão de máquinas operatrizes de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Por fim, foi iniciado processo de fabricação das placas na

CNC presente no LABCAM. O processo de fabricação de uma das placas, a placa do PIC18F4550, pode ser observado por meio da Figura 42.



**Figura 42 - Processo de Fabricação da Placa do PIC18F4550**

Para a confecção das placas de circuito impresso foram utilizados os componentes listados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Lista de componentes utilizados para confecção da placa do PIC18F4550.

COMPONENTE	QUANTIDADE
Placa de Fenolite 20x10cm	1
Microcontrolador PIC18F4550	1
Soquete Torneado 40 pinos	1
Capacitor de Cerâmica 100nF	1
Capacitor de Cerâmica 15pF	2
Resistor de 10 K $\Omega$	3
Resistor de 220 $\Omega$	2
Resistor de 3 K $\Omega$	2
Resistor de 1 K $\Omega$	3
Resistor de 550 $\Omega$	1
Resistor de 2,2 K $\Omega$	4
Resistor de 16 K $\Omega$	4
Resistor de 5 K $\Omega$	1
Transistor 2N3055	2
Transistor BC547	2
Transistor BC546	2
Diodo 1N4007	4
LED Vermelho	2
LED Amarelo	1
Cristal de Quartzo 20 MHz	1
Sensor LDR	1
Relé CTK 1C 5V	2
Conector CONN-SIL1	8
Conector do tipo Borne TBLOCK-I2	8
Conector do tipo Borne TBLOCK-I4	2

Tabela 2 - Lista de componentes utilizados para confecção da placa do PIC12F675

COMPONENTE	QUANTIDADE
Placa de Fenolite 10x10cm	1
Microcontrolador PIC12F675	1
Soquete Torneado 8 pinos	1
Capacitor de Cerâmica 100nF	1
Capacitor de Cerâmica 15pF	2
Resistor de 10 K $\Omega$	1
Resistor de 4,7 K $\Omega$	1
Sensor de Umidade e Temperatura DHT11	1
Transistor BC546	1
Diodo 1N4007	1
Cristal de Quartzo 16 MHz	1
Relé CTK 1C 5V	1
Conector do tipo Borne TBLOCK-I2	4

### **3.6 Teste de Acionamento dos Motores e Leitura dos Sensores de Nível**

Para testar o funcionamento do circuito de acionamento dos motores foram realizadas diversas práticas de controle, tanto em malha aberta quanto em malha fechada. Foram enviados diferentes valores de tensão inicial para que o acionamento das bombas fosse observado. Além dos valores de tensão inicial, também foram inseridos diferentes valores como parâmetros do controlador e como referência para o controle. O teste da leitura dos sensores foi feito em conjunto com o teste de acionamento dos motores, uma vez que ao aplicar a tensão nos motores, o nível de água nos tanques sofria alteração. As mudanças eram observadas por meio dos gráficos em tempo real presentes na interface, além de serem comparadas com o nível observado nos tanques por meio da imagem da câmera acoplada à planta.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos no projeto, de acordo com os objetivos propostos inicialmente.

### 4.1 A Caixa de Acondicionamento da Bancada

Após projetada em software, a caixa de acondicionamento da Bancada foi montada e todos os componentes do projeto foram inseridos. É possível observar que alguns dos equipamentos foram inseridos em posições estratégicas de acordo com a funcionalidade, como é o caso dos coolers de ventilação mecânica presos nas laterais superiores da caixa.

Os locais onde foram fixadas as placas também foram escolhidos visando uma melhor performance dos sensores, além da proximidade com as fontes de alimentação. O aspecto final da Bancada pode ser observado na Figura 43.



**Figura 43 – Aspecto Final da Bancada**

## 4.2 As Placas de Circuito Impresso

Com o término dos projetos das placas de circuito impresso, os componentes foram inseridos, em seguida, soldados em laboratório. Os projetos tiveram como prioridade a separação dos circuitos de potência dos circuitos analógicos do projeto, a fim de minimizar possíveis interferências nas medições de nível, umidade relativa e luminosidade. O resultado final da placa do PIC18F4550, bem como a disposição dos componentes, pode ser observado na Figura 44.



**Figura 44 - Placa de Circuito Impresso do PIC18F4550 (Figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 35)**

A placa de circuito impresso do PIC12F675 contendo o circuito do sensor de umidade relativa e temperatura DHT11 e o circuito de acionamento do sistema de ventilação pode ser observada na Figura 45.

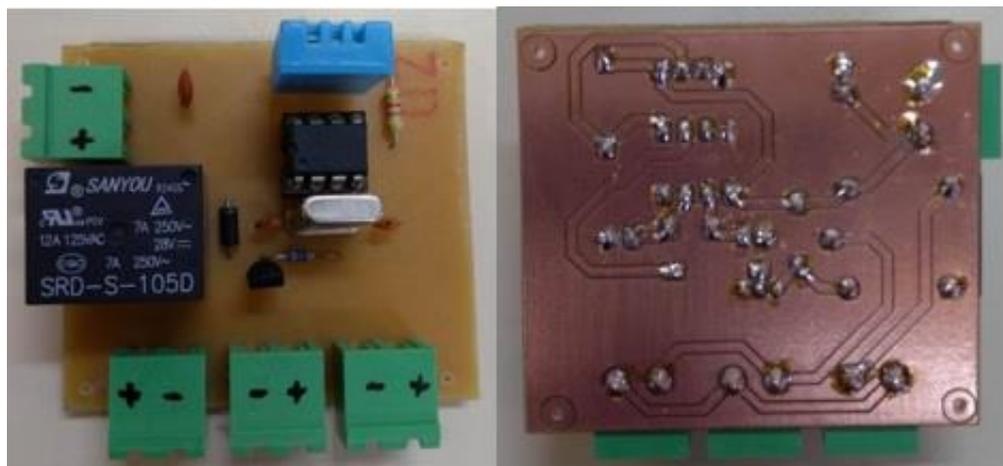


Figura 45 - Placa de Circuito Impresso do PIC12F675 (Figuras 36, 37, 38, 39 e 41)

### 4.3 Funcionamento do Acionamento dos Motores e Leitura dos Sensores

Após a instalação do sistema, foram realizados diversos testes de acionamento dos motores e leitura dos sensores. Um dos testes pode ser observado na Figura 46, em que foi inserido, inicialmente, um valor de tensão para a bomba e observado o valor dessa tensão no gráfico. Também pode ser observado o nível do tanque por meio do gráfico e comparado com o nível mostrado pela câmera acoplada. Em seguida, foram inseridos arbitrariamente parâmetros de controle e observado o comportamento do sistema para os valores escolhidos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, de forma a mostrar o funcionamento adequado do hardware proposto.

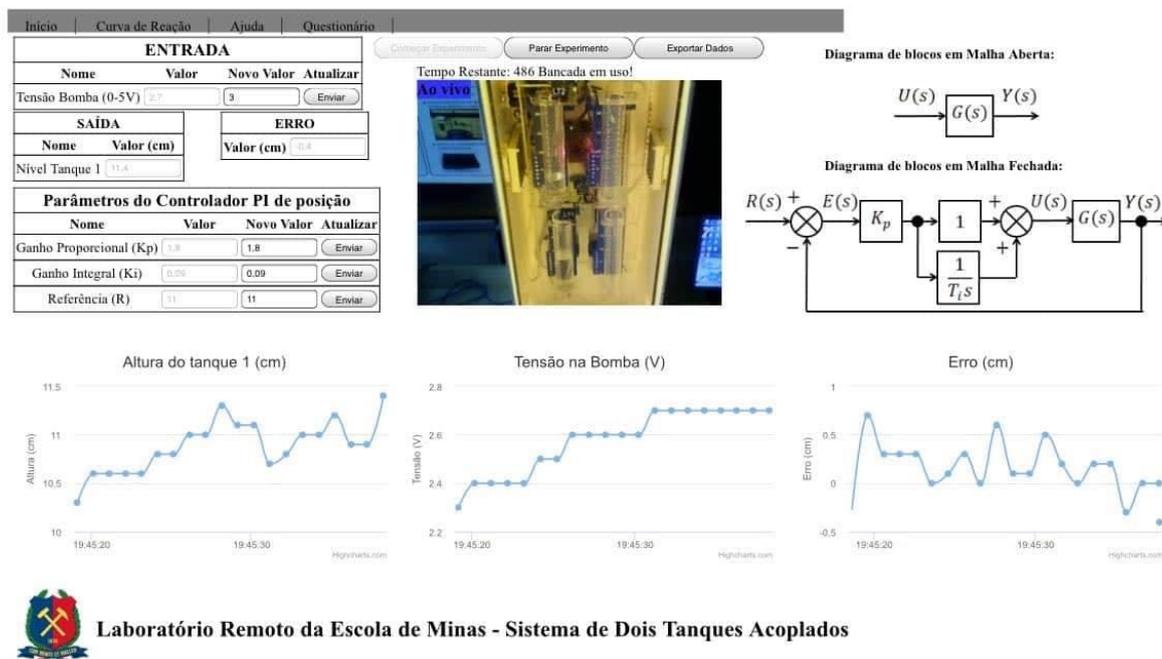


Figura 46 - Teste de Acionamento dos Motores e Leitura dos Sensores

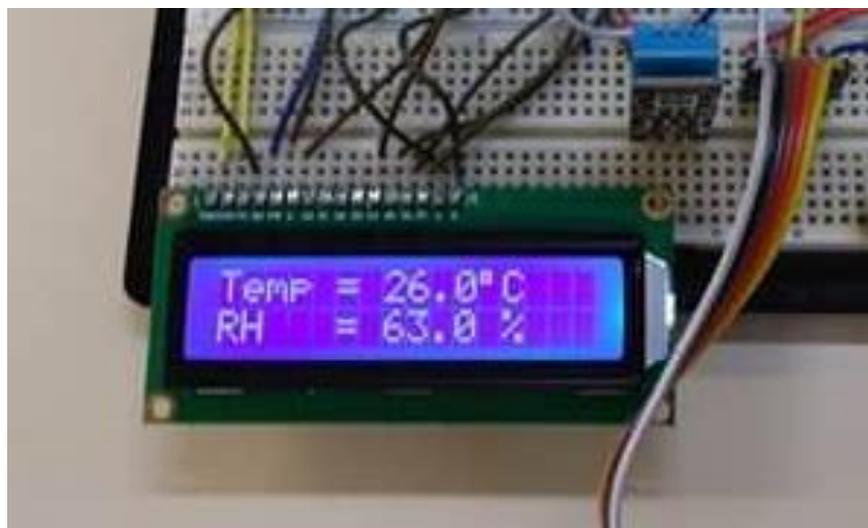
#### 4.4 Funcionamento do Sistema de Iluminação da Bancada

Para testar o funcionamento do sistema de iluminação da estrutura da Bancada, foram realizados testes em horários diferentes, de forma que a luminosidade do ambiente fosse totalmente diferente. Após diversos testes, inclusive alterando a luminosidade do ambiente de forma forçada, ao apagar as luzes do laboratório, o sistema mostrou funcionamento adequado, de forma a atender às necessidades do projeto.

#### 4.5 Funcionamento do Sistema de Ventilação Mecânica da Bancada

Para testar o sistema de ventilação mecânica, foi realizado o acionamento da bomba em tensão máxima de trabalho durante um período de dez minutos, de forma a aumentar a umidade relativa dentro da caixa de condicionamento. Após um período de aproximadamente cinco minutos do acionamento, o sistema de ventilação foi ligado automaticamente quando a umidade relativa atingiu o valor de 89% e permaneceu ligado até que a umidade tivesse uma baixa e atingisse o limite inferior de histerese estabelecido, de 84% de umidade relativa. Vale ressaltar que o teste foi feito utilizando-se um display LCD montado em *proto board* para a visualização da umidade relativa, uma vez que a placa desenvolvida não conta com um display integrado.

Por meio da Figura 47 é possível observar o display LCD utilizado na amostragem da umidade relativa durante os testes.



**Figura 47 - Amostragem da Umidade Relativa no Display LCD**

## 5 CONCLUSÃO

O hardware desenvolvido possibilita a comunicação da Bancada à interface web de forma a proporcionar aos discentes a realização de experiências de controle como forma de auxílio ao aprendizado adquirido em sala de aula. Além disso, o sistema não possui restrição de acesso devido à falta de iluminação em determinados horários, pois conta com um sistema próprio de iluminação. Há também um sistema de redução da umidade relativa do ar interna, para que os componentes não tenham o funcionamento interrompido por consequência do acúmulo de umidade no interior da caixa de acondicionamento.

A realização de práticas de controle como teste do sistema de acionamento dos motores se mostrou satisfatória, assim como a leitura do nível do tanque pelo sensor de pressão também apresentou resultados satisfatórios, comparando as medidas ao nível observado no tanque pela câmera acoplada.

O sistema de iluminação criado apresentou grande utilidade quando testado em ocasiões de baixa luminosidade, sendo eficiente para a visualização de práticas noturnas.

O sistema de ventilação mecânica desenvolvido apresentou excelente resultado durante os vários dias de testes a que foi submetido. O desenvolvimento deste sistema solucionou o problema de condensação antes observado dentro da caixa, o que gerava problemas técnicos e também incômodo visual durante os experimentos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de um microcontrolador com memória superior à memória do PIC18F4550 para que o projeto faça uso efetivo dos quatro tanques da Bancada, além de poder integrar todas as funcionalidades do projeto de hardware criado em apenas uma placa de circuito impresso.

Há também a possibilidade de desenvolver o sistema utilizando outra plataforma, por meio da placa microcontrolada Arduino Ethernet Rev.3, que conta com módulo Ethernet incluso.

Outra sugestão é a utilização de um sensor de umidade de maior precisão, uma vez que o sensor DHT11 é capaz de captar a umidade relativa do ar somente entre 20% e 90%. Um sensor capaz de substituir é o HIH-4000, fabricado pela Honeywell, capaz de captar umidade

relativa de 0% a 100%. Outro sensor que também pode ser utilizado é o DHT22, fabricado pela empresa chinesa Aosong Eletronics.

## 6 REFERÊNCIAS

ASTRÖM, K. J.; ÖSTBERG, A.-B. A teaching laboratory for process control. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 6, n. 5, p. 37-42, 1986.

BATES, M. **Interfacing PIC microcontrollers: Embedded design by interactive simulation**. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2006.

BAYER, F. M.; ARAÚJO, O. C. B. D. Controle Automático de Processos. **Escola técnica aberta do Brasil–e tec Brasil**, Rio grande do Sul, p. 21, 2011.

BISTÁK, P.; BERÁNEK, M. Java client server applications for remote laboratory based on Matlab and COM. **In 7th Int. Conference Virtual University**, Bratislava, p. 135–139, 2006.

BORGES, G. A. et al. **Desenvolvimento com microcontroladores Atmel AVR**. [S.l.]: [s.n.], 2006.

BRAGA, N. C. **Eletrônica básica para mecatrônica**. [S.l.]: Saber, 2005.

BULLOUGH, J. D. Lighting answers: LED lighting systems. **National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center**, v. 7, n. 3, 2003.

CANDELAS, F. A. et al. Hands-on experiences of undergraduate students in Automatics and Robotics using a virtual and remote laboratory. **Computers & Education**, v. 57, p. 2451-2461, 2011.

COCOTA, J. A. N. J. **Modelagem e Controle de Nível de um Sistema de Quatro Tanques**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica na área de Controle, Automação e Robótica - COPPE - UFRJ. [S.l.]. 2009.

COCOTA, J. A. N. J. et al. Análise de diferentes controladores para o processo de dois tanques acoplados. **COBENGE**, Juiz de Fora, p. 12, 2014.

CUNHA, L. Relê e contadores. **O setor elétrico**, v. 45, 2009.

DOEBELIN, E. O.; MANIK, D. N. **Measurement systems: application and design.** [S.l.]: [s.n.], 2007.

FABREGAS, E. et al. Developing a remote laboratory for engineering education. **Computers & Education**, v. 57, p. 1686-1697, 2011.

FITZGERALD, A. E.; CHARLES, K. J.; UMANS, S. D. **Máquinas Eléctricas.** 6. ed. São Paulo: [s.n.], 2006.

GARCÍA-GUZMÁN, J. et al. **Virtual environment for remote access and automation of an AC motor in a web-based laboratory.** [S.l.]: Procedia Technology, v. 3, 2012. 224-234 p.

GIMENEZ, S. P. **Microcontroladores 8051: Teoria do Hardware e do Software / Aplicações em Controle Digital / Laboratório e Simulação.** 1. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2002.

GUERRERO, J. A. G. **Uso de Internet para Realizar Experimentos de Arranque Perturbación de dos Tanques no Interactuantes. y Modelamiento Matemático de la Repuesta del Equipo.** Tese de Doutorado - Universidad de Zacatecas, Mexico. Tesis. 2010.

HENRY, J.; SCHAEDEL, H. M. International co-operation in control engineering education using online experiments. **European Journal of Engineering Education**, v. 30, n. 2, p. 265-274, 2005.

HERCOG, D. et al. A DSP-Based Remote Control Laboratory. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, p. 3057-3068, 2007.

HIRZEL, T. **Arduino**, 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>>. Acesso em: 17 Dezembro 2017.

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

IDOETA, I. V.; CAPUANO, F. G. **Elementos de eletrônica digital.** [S.l.]: Érica, 2000.

JOHANSSON, K. H. The Quadruple-Tank Process: A Multivariable. **IEEE Transactions on control systems technology**, v. 8, n. 3, p. 456-465, 2000.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem TopDown**. São Paulo: Pearson Education, 2006.

LIMA, I. A.; TAVARES, J. L. C.; SENA, A. J. C. Estação Meteorológica Microcontrolada de Baixo Custo. **INOVA TEC**, v. 1, 2017.

LOPES, H. P.; CASTRO, J. C. V. D. WebLab - Laboratório Remoto (Hardware). **In: Encontro de Saberes - Mostra Pró-Ativa**, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <[http://www.encontrodesaberes.ufop.br/gerar\\_pdf.php?id=8146](http://www.encontrodesaberes.ufop.br/gerar_pdf.php?id=8146)>. Acesso em: Abril 2018.

LOURENÇO, J. Sintonia de controladores PID. **Escola superior de tecnologia**, 1997.

MARTINS, N. A. **Sistemas microcontrolados: uma Abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2005.

MAXWELL, J. C. On governors. **Proceedings of the Royal Society**, v. 16, p. 270-283, 1868.

MICROCHIP, 2016. Disponível em: <<http://www.microchip.com/>>. Acesso em: 02 Outubro 2017.

MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores PIC18, Aprenda e Programe em Linguagem C**. [S.l.]: Érica, 2009.

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

OLIVEIRA, L. O. M. D. **Desenvolvimento de um laboratório remoto para controle de nível dois tanques acoplados**. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, UFOP. Ouro Preto, p. 79. 2017.

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

PINTO, R. A. **Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDs)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria. 2008.

PUERTO, R.; JIMÉNEZ, L. M.; REINOSO, O. Remote control laboratory via Internet using Matlab and Simulink. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 18, n. 4, p. 694-702, 2010.

QUANSER. Quanser Consulting Inc. **Mechatronics Controls Collection**, 2018. Disponível em: <[www.quanser.com](http://www.quanser.com)>. Acesso em: 02 Abril 2018.

RAJAN, A.; THOMAS, A. K.; MATHEW, R. A comparative performance analysis. **International Journal of Computer Applications (0975–8887)**, 2012.

REXLAB. **Laboratório de Experimentação Remota-RexLab**, 2018. Disponível em: <<http://rexlab.ufsc.br/pt/>>. Acesso em: 13 Abril 2018.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. [S.l.]: Livraria da Física, 2004.

ROSA, M. A. **Estudo das Bifurcações de Hopf no Sistema Regulador de Watt**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Física e Matemática Aplicada) - UNIFEI. Itajubá-MG, p. 165. 2008.

SÁ JÚNIOR, E. M. **Estudo de novas estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

SANTOS, A. M. M. **Controlo por computador de um sistema de levitação magnética**. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto. 2011.

SHINODA, A. V.; SANTOS, L. T. M. D. **Implementação de nó móvel**. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. [S.l.]. 2011.

SILVA, C. D. H. **Controle de caixa d'água computadorizado**. Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Computação) - Centro Universitário de Brasília. Brasília - DF, p. 42. 2013.

TAWFIK, M. et al. Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, v. 6, n. 1, p. 60-71, 2013.

TORRES, J. D. et al. Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 2015.

VYSHNEGRADSKII, I. A. Sur la théorie générale des régulateurs. **CR Acad. Sci. Paris**, v. 83, p. 318-321, 1876.

WENDLING, M. Sensores. **Universidade Estadual Paulista**, São Paulo, p. 20, 2010.

WOLF, M. **Computers as components: principles of embedded computing system design**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

ŽILKA, V.; BISTÁK, P.; KURCIK, P. Hydraulic Plant Remote Laboratory. **International Journal of Online Engineering**, v. 4, p. 69–73, 2008.

ZUBÍA, J. G.; ALVES, G. R. **Using Remote Labs**. Bilbao: University of Deusto, 2011.

ZUTIN, D. G.; AUER, M. E.; GUSTAVSSON, I. A VISIR lab server for the iLab Shared Architecture. **In: IEEE EDUCON 2010**, Jordan, 2010.