

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**LEONARDO MARASCHIN GUTTERRES**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**  
**CONTROLADOR DE AQUECEDOR DE PASSAGEM COM**  
**CHAMA DISCRETA**

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONTROLADOR DE AQUECEDOR DE PASSAGEM COM  
CHAMA DISCRETA  
CONTROLGÁS**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Renato Ventura Bayan Henriques

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO MARASCHIN GUTTERRES

**CONTROLADOR DE AQUECEDOR DE PASSAGEM DE  
ÁGUA COM CHAMA DISCRETA  
CONTROLGÁS**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela UFMG – Belo Horizonte, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira, UFRGS

Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Brasil.

Prof. Dr. Eduardo Andre Perondi, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Porto Alegre, Novembro de 2011.

## RESUMO

Este documento descreve o trabalho desenvolvido durante a realização do projeto de conclusão do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Foi dada continuidade ao “Projeto Controlgás” com a reelaboração de seus circuitos, de sua programação e ainda a criação de uma fonte de alimentação dedicada. O projeto consiste em controlador para aquecedor de passagem de água a gás. A estratégia para controlar a temperatura de saída de água baseia-se em um controle proporcional aplicado a um conjunto de queimadores individuais, utilizando o conceito de chama modulante. Foram feitos testes e ensaios cujos resultados são apresentados ao longo do texto.

**Palavras-chave:** Aquecedor de Passagem. Chama Modulante. Controle de combustão.

## **ABSTRACT**

This document describes the work done during the development of the graduation project for the Electrical Engineering course of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). The “Controlgas Project” was continued with the redevelopment of its circuits, firmware and also with the creation of its power supply. The project consists of a controller for a gas tankless water heater. The strategy to control the output temperature of water is based on a proportional control applied to a set of individual burners, using the concept of modulating flame. The results of the tests are presented throughout the text.

**Keywords: Tankless Water Heater. Modulating Flame. Combustion Control.**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>CONTEXTO DO PROJETO.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Apresentação do Projeto Controlgás .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Versão anterior .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS.....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Microprocessador ATMEGA16 .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>Circuito de gravação.....</b>	<b>17</b>
<b>4.3</b>	<b>Botões para Seleção de Temperatura .....</b>	<b>18</b>
<b>4.4</b>	<b>Sensor de Passagem de Água .....</b>	<b>19</b>
<b>4.5</b>	<b>Válvula Mecânica de Gás.....</b>	<b>19</b>
<b>4.6</b>	<b>Solenóides .....</b>	<b>20</b>
<b>4.7</b>	<b>Sensor de Temperatura .....</b>	<b>22</b>
<b>4.8</b>	<b>Centelhador .....</b>	<b>27</b>
<b>4.9</b>	<b>Sensor de Chama .....</b>	<b>29</b>
<b>4.10</b>	<b>Fonte de Alimentação .....</b>	<b>30</b>
<b>4.11</b>	<b>Placa do Microprocessador.....</b>	<b>32</b>
<b>4.12</b>	<b>Circuito de Acionamento dos Solenóides.....</b>	<b>34</b>
<b>4.13</b>	<b>Firmware .....</b>	<b>35</b>
<b>4.13.1</b>	<b>Algoritmo.....</b>	<b>36</b>
<b>4.13.2</b>	<b>Controle .....</b>	<b>39</b>
<b>4.13.3</b>	<b>Regulagem .....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS ALCANÇADOS .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Comparação: sistema comercial típico e sistema proposto.....	10
Figura 2.2: Bancada em 2008 e em 2010 .....	13
Figura 3.1: Esquema elétrico de um canal do Circuito integrado ULN2004 .....	14
Figura 3.2: Conexões das bobinas com o UDN2981 .....	15
Figura 3.3: Conexões das bobinas com o ULN2004 .....	16
Figura 4.1: Circuito gravador via porta serial.....	18
Figura 4.2: Botões para ajuste de temperatura .....	18
Figura 4.3: Diagrama da válvula de gás, acionada pela passagem de água .....	20
Figura 4.4: Vista em corte do conjunto de solenóides.....	21
Figura 4.5: Comportamento do Pt-100 de 0 a 100 °C .....	22
Figura 4.6: Ponte de Wheatstone .....	23
Figura 4.7: Circuito elétrico do sensor de temperatura .....	25
Figura 4.8: PCI do sensor de temperatura .....	25
Figura 4.9: Pt-100 utilizado .....	25
Figura 4.10: Comportamento do sensor de temperatura projetado com proteção.....	26
Figura 4.11: Execução do teste do sensor de temperatura com termômetro de mercúrio.....	26
Figura 4.12: Circuito do centelhador .....	27
Figura 4.13: Centelhador .....	28
Figura 4.14: Ponteiras do centelhador e sensor de chama.....	28
Figura 4.15: Comportamento elétrico do fogo .....	29
Figura 4.16: Esquema elétrico do sensor de chama.....	30
Figura 4.17: Diagrama esquemático da fonte montada para o projeto.....	31
Figura 4.18: Layout da fonte e aparência após concluída .....	31
Figura 4.19: Conectores na caixa da fonte de alimentação .....	32
Figura 4.20: Placa controladora desenvolvida.....	33
Figura 4.21: <i>Layout</i> da placa do controlador.....	33
Figura 4.22: Diagrama de blocos dos <i>drivers</i> dos solenóides com tensões indicadas .....	35
Figura 4.23: Fotografia do controlador em operação .....	38
Figura 4.24: Relação do número de queimadores com incremento de temperatura.....	42
Figura 5.1: Ensaio para referência a 40 °C.....	43
Figura 5.2: Ensaio para referência a 45 °C.....	44
Figura 5.3: Ensaio para referência a 50 °C.....	44
Figura 5.4: Ensaio para referência a 55 °C.....	45
Figura 5.5: Comparação da resposta para diferentes <i>Kp</i> .....	45
Figura 5.6: Efeito da regulagem .....	46
Figura 5.7: Circuito conversor de tensão para leitura ON/OFF das bobinas.....	47
Figura 5.8: Aparência física do circuito da Figura 5.7 .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição da bancada Controlgás em 2010.....	12
Tabela 4.1: Valores padronizados para Pt-100.....	22
Tabela 4.2: Relação do número de queimadores com incremento de temperatura .....	41
Tabela 4.3: Regulagem para $Kp = 1$ .....	42



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

A/D: Analógico-digital

CI: Circuito integrado

CMOS: Complementary metal-oxide-semiconductor (do inglês)

DEMEC: Departamento de Engenharia Mecânica

DMUX: Demultiplexador

LAMECC: Laboratório de Mecatrônica e Controle

PCI: Placa de Circuito Impresso

RTD: Termoresistor, do inglês: Resistance Temperature Detector

TTL: Transistor-Transistor Logic (do inglês)

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## 1 INTRODUÇÃO

Aquecedores de passagem são equipamentos utilizados para aquecimento de água. Essa água quente pode ser usada para proporcionar conforto, como em um simples lavar de mãos ou banhos em dias mais frios. Por outro lado, esses aquecedores podem ser usados em aplicações mais específicas, como a manutenção de temperatura em aquários ou aquecimento de água para determinados processos de produção na indústria.

Esses aquecedores funcionam com a circulação de água por um trocador de calor (serpentina e aletas) aquecido geralmente pela queima de gás. Alguns aparelhos mantêm acesa uma pequena chama denominada “piloto” utilizada para acender a chama principal nos bicos queimadores, no momento em que a água quente é demandada.

A regulagem da temperatura da água é realizada por meio de um ajuste da vazão de gás através de uma válvula. Os equipamentos comerciais modernos possuem um sistema automático que controla essa válvula. Alguns ainda dispõem de um centelhador eletrônico para a ignição da chama.

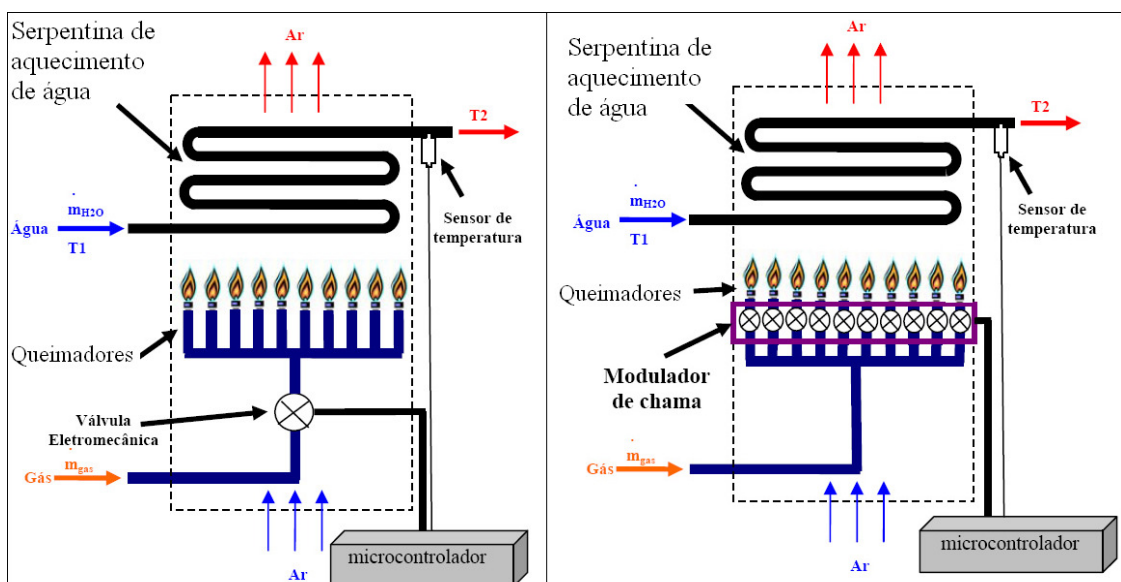
A proposta deste projeto é desenvolver uma versão mais moderna e completa de um sistema capaz de controlar o acionamento individual dos bicos queimadores por meio de válvulas de bloqueio de vazão acionadas por um conjunto de solenóides. As principais características decorrentes desta configuração são descritas no Capítulo 2.

## 2 CONTEXTO DO PROJETO

### 2.1 APRESENTAÇÃO DO PROJETO CONTROLGÁS

O projeto “Controlgás” vem sendo desenvolvido desde 2006, no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC), coordenado pelo professor Eduardo André Perondi. O LAMECC situa-se no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFRGS.

Trata-se de um projeto de aquecedor de passagem de água, que se diferencia dos aquecedores comerciais típicos, por possuir um controle individual para cada queimador. Assim, a temperatura de saída da água baseia-se no número de queimadores acionados ao invés da quantidade de gás liberado pela válvula geral de gás, como ocorre na maioria dos aquecedores comerciais. A Figura 2.1 ilustra essa diferença entre aquecedores comuns e o Controlgás.



**Figura 2.1:** Comparação entre sistema comercial típico (esquerda) e sistema proposto (direita)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fonte: Site do LAMECC, disponível em: < [http://www.mecanica.ufrgs.br/lamecc/projeto\\_aquecedor.html](http://www.mecanica.ufrgs.br/lamecc/projeto_aquecedor.html)>, acessado em 2011.

Estudos realizados no LAMECC concluíram que a “chama digital” (ou modulada), resolve o problema de aquecimento excessivo quando operando em baixas vazões presente em aquecedores comuns. Para isto, basta acionar um pequeno número de queimadores, suficiente para elevar a temperatura nas proximidades da temperatura desejada. Pode-se chegar até 33% na redução do consumo de gás nas potências intermediárias e baixas. Esta economia é resultado da possibilidade de abrir apenas o número necessário de bicos, o que é impossível com sistemas tradicionais, os quais, mesmo operando na menor vazão, em dias quentes necessitam do aumento de mistura com água não aquecida para regular a temperatura da água de saída em valores aceitáveis.

Com um controle adequado, torna-se dispensável o emprego de misturador de água quente com fria, visto que o sistema pode manter a temperatura aproximadamente constante, e se auto-ajustar caso seja variada a vazão de água demandada ou alguma perturbação modificar, por exemplo, a temperatura da água de entrada.

Quanto à emissão de poluentes, concluiu-se que em ambos os casos a mistura é pobre, ou seja, com excesso de ar na combustão, a concentração de CO<sub>2</sub> emitida não variou significativamente. Porém, devido à redução de gás que se pode alcançar com a chama digital, observa-se uma redução na emissão total de poluentes, proporcional a essa economia.

Desde o início desses estudos, o projeto passou por significativas modificações tanto mecânicas quanto eletrônicas. Foram comparados desempenhos de aquecedores de marcas diferentes e pesquisas de mercado foram realizadas a fim de se criar um produto de baixo custo capaz de substituir controladores importados.

## **2.2 VERSÃO ANTERIOR**

Em 2010, a bancada do Controlgás era composta por um circuito de controle, um circuito centelhador, sensores, um conjunto de solenóides, e o corpo do aquecedor de passagem em si. Esses componentes estão detalhados na Tabela 2.1 enquanto que a Figura 2.2 apresenta fotos das bancadas nas versões de 2008 e 2010:

**Tabela 2.1: Composição da bancada Controlgás em 2010**

<b>Circuito de Controle:</b>	
<b>Lista de Componentes:</b>	<b>Descrição:</b>
Microprocessador	Programável, gerencia o acionamento das válvulas
Drivers dos Solenóides	Fornecer energia para acionar as válvulas, comandados pelo microprocessador
Display LCD (2x16)	Permite a visualização da temperatura medida, a desejada e demais mensagens
Sensores	Sensor de temperatura, de passagem de água e de presença de chama
Botões	RESET, Incrementar temperatura, Decrementar temperatura
Condicionador do sensor de temperatura	Condicionador comercial programável, ligação a 3 fios

<b>Centelhador:</b>	
<b>Lista de Componentes:</b>	<b>Descrição:</b>
Sensor de Chamas	A chama se comporta como um resistor. Sua ausência é um circuito aberto.
Circuito gerador de faíscas	Gera uma onda que é amplificada por um transformador, cuja saída tem tensão suficiente para criar chispas no ar.

<b>Aquecedor de passagem:</b>	
<b>Lista de Componentes:</b>	<b>Descrição:</b>
Sensor de água:	Acionado pelo deslocamento de um embolo, provocado pela passagem de água
Sensor de temperatura:	Termoresistor de platina (Pt-100) instalado em um duto de água
Conjunto de solenóides:	Permitem ou restringem a vazão de gás por cada queimador
Solenóide geral:	Se desativado, bloqueia a passagem de gás do aquecedor
Válvula geral de gás:	Regula a vazão de gás que alimenta os queimadores
Mecanismo de segurança 1:	Apenas libera a passagem do gás com a circulação de água
Serpentina e aletas	Dispositivos de troca de calor
Chaminé e defletor de exaustão	Conduzem os gases para fora do sistema
Conjunto de doze queimadores	Dois (centrais) funcionam como "piloto" e o restante possui solenóides instalados

Foram propostas alterações no projeto para a versão 2011, as quais serão descritas ao longo deste documento. A principal consiste na elaboração de uma nova placa de circuito impresso para o circuito de controle. As melhorias introduzidas através desta placa serão apresentadas e discutidas ao longo do texto.

Outra melhoria introduzida refere-se à metodologia de desenvolvimento do algoritmo de controle programado em microcontrolador (ATMEGA16) em bancada na placa de controle. Até então, a programação do controlador era realizada externamente, ou seja, havia a necessidade de se retirar o microcontrolador do circuito. Este quadro é inconveniente quando se está desenvolvendo um projeto. Assim, instalação de um circuito gravador para o controlador também foi previsto.



**Figura 2.2: Bancada em 2008 (esquerda) e em 2010 (direita)**

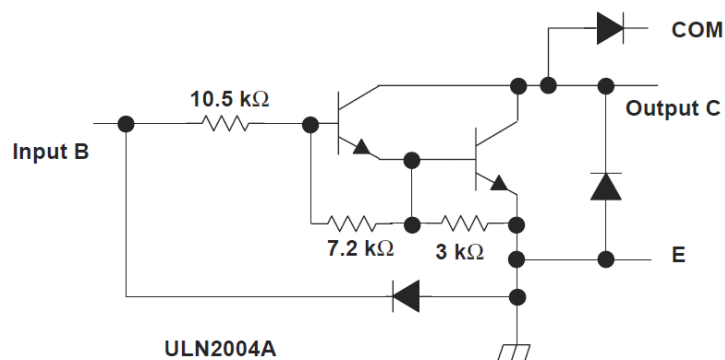
Outra questão abordada foi a ausência de uma fonte dedicada para alimentação dos circuitos. Logo, o projeto de tal fonte também foi abordado neste trabalho.

### 3 ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS

O Projeto Controlgás, como já foi visto, consiste no desenvolvimento de um controlador para aquecedores a gás de passagem. O sistema desenvolvido deverá ser capaz de substituir os importados a um custo inferior e com desempenho mais eficiente. Além disso, diferentemente dos modelos convencionais, o projeto faz uso do conceito de “chama digital”.

A nova versão do projeto teve como ponto de partida a elaboração de uma nova placa de circuito impressa mais compacta, com melhor disposição dos conectores para entradas e saídas dos sinais e adição de um circuito de gravação para o microprocessador. O novo *layout* eliminou a necessidade da utilização de cabos para o acionamento do *display*.

O circuito de acionamento dos solenóides de cada bico queimador e do solenóide geral de gás foi alterado. Na versão anterior do Controlgás, eram utilizados vinte transistores modelo BC327. Na nova versão, utilizou-se o circuito integrado modelo ULN2004, que contém sete canais com a configuração de transistores tipo *Darlington* ilustrada abaixo:



Fonte: Texas Instruments

**Figura 3.1: Esquema elétrico de um canal do Circuito integrado ULN2004**

Este componente dispensa resistores de polarização, possui diodos internos de proteção e reduz o espaço necessário na placa. A desvantagem é que esse “vetor de transistores” tem um limite máximo de corrente inferior ao de um transistor individual. Ainda assim, é suficiente para acionar os solenóides deste projeto.

Os solenóides operam em dois estágios: um de maior e outro de menor corrente. O primeiro é um pulso com força suficiente para vencer a inércia do êmbolo e permitir a passagem do gás. O segundo estágio garante uma força necessária para manter o êmbolo do solenóide recolhido com um menor consumo de corrente.

Outra alternativa para fazer o acionamento dos solenóides seria a utilização do componente UDN2981, com oito canais de transistores *Darlington* no qual a corrente sai de seus pinos (sentido convencional) ao contrário do ULN2004. O sentido da corrente nesses componentes define a forma com que são conectadas as bobinas para que operem com dois estágios. Nas Figuras 3.2 e 3.3 estão representadas as formas de ligação das bobinas de ambas as alternativas.

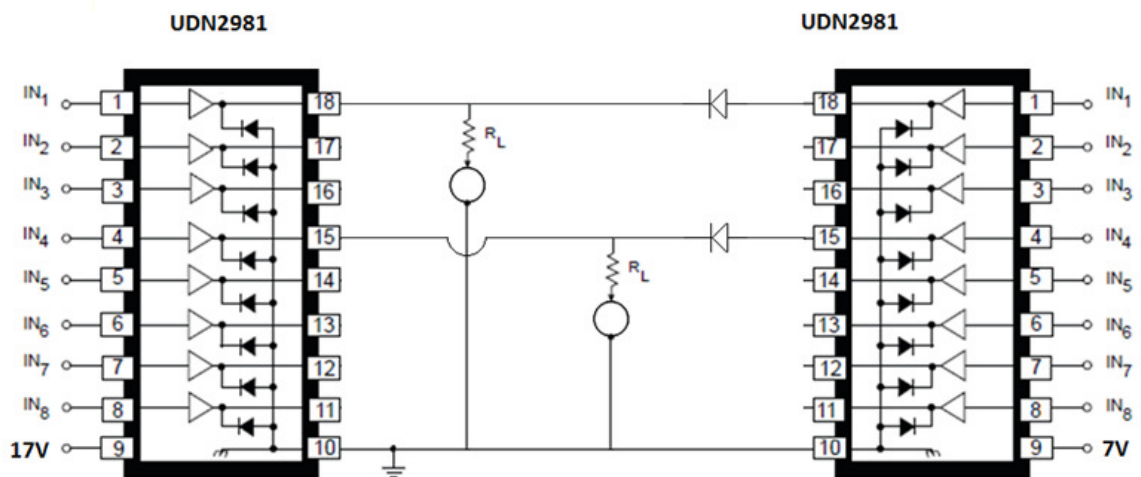
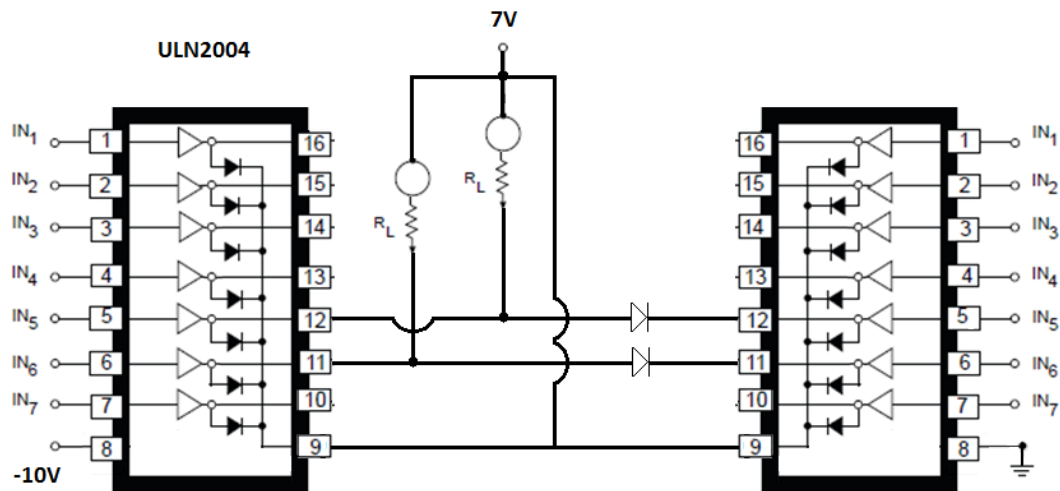


Figura 3.2: Conexões das bobinas com o UDN2981





**Figura 3.3: Conexões das bobinas com o ULN2004**

Percebe-se que há diferentes níveis de tensões. Considerando o projeto completo, optou-se pela utilização da configuração do ULN2004 que necessita de alimentação negativa que pode ser compartilhada com os amplificadores operacionais do sensor de temperatura. Os integrados UDN2981, em que a corrente entra (sentido convencional) no pino, também são mais baratos e mais facilmente encontrados.

Na escolha do novo sensor de temperatura, duas opções se destacaram: o uso do LM35 ou de um Pt100. Apesar de o primeiro ter custo inferior e ser de simples implementação, optou-se pelo uso do Pt100 devido à sua maior precisão e ao fato de o componente já estar instalado na bancada. Bastou, portanto, projetar um novo condicionador que substituísse o anterior.

Para o desenvolvedor ou usuário acompanhar visualmente o gerenciamento das válvulas de gás, foram adicionados LEDs que ligam quando sua respectiva bobina é ativada, indicando sua condição. Este tópico é discutido na Seção 4.13.1.

## 4 MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS

### 4.1 MICROPROCESSADOR ATMEGA16

Este componente é responsável por todo o gerenciamento lógico e controle do sistema. O modelo Escolhido do foi o ATMEGA16 e sua referência de tempo é dada externamente por um cristal oscilador de 8 MHz. O microprocessador envia os comandos de acionamento dos solenóides, faz a leitura dos sensores e apresenta o estado de sua rotina de controle em uma tela de cristal líquido de 2x16 caracteres.

Possui ainda oito pinos que podem ser usados como conversores AD de 10 *bits*, sendo que um deles faz a leitura do sinal do sensor de temperatura. A frequência de amostragem utilizada neste projeto foi de 125 kHz.

### 4.2 CIRCUITO DE GRAVAÇÃO

O *software* utilizado para fazer a compilação do programa em linguagem C foi o CodeVisionAVR e para gravar o programa na memória *flash* do componente utilizou-se o PonyProg.

A Figura 4.1 mostra um circuito simples que permite a gravação do microprocessador e dispensa o uso do circuito integrado MAX232, comumente empregado na comunicação com o computador pela porta serial.

Esse circuito foi inserido na placa principal e permite que ajustes no *firmware* sejam feitos a qualquer momento sem a necessidade da retirada do processador.

### AVR Programmer electronics-diy.com

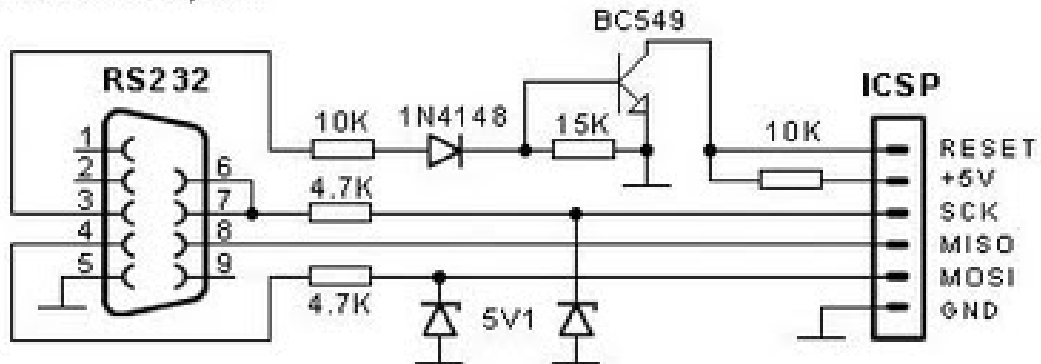


Figura 4.1: Circuito gravador via porta serial<sup>1</sup>

### 4.3 BOTÕES PARA SELEÇÃO DE TEMPERATURA

São botões do tipo *push-button* com a configuração da Figura 4.2. O operador ajusta a temperatura desejada por meio destes. Quando pressionados, enviam um sinal aos pinos de interrupção do microprocessador e o *software* de controle incrementa ou decrementa imediatamente o valor da variável de temperatura desejada em um grau Celsius.

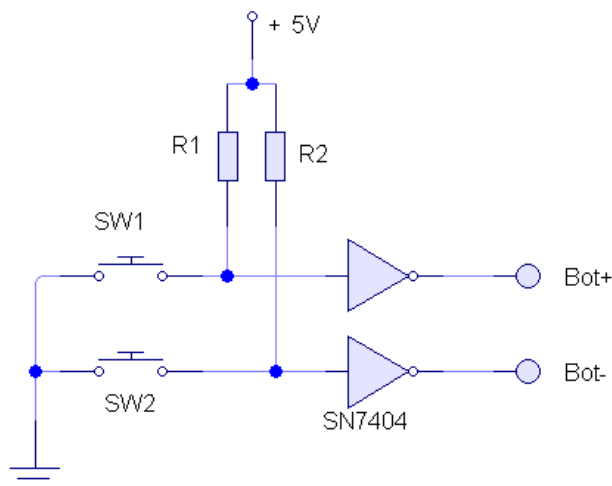


Figura 4.2: Botões para ajuste de temperatura

<sup>1</sup> Disponível em: <[http://electronics-diy.com/avr\\_programmer.php](http://electronics-diy.com/avr_programmer.php)>, acessado em 2011.

#### 4.4 SENSOR DE PASSAGEM DE ÁGUA

A circulação de água por uma válvula mecânica provoca, por efeito Venturi, o deslocamento de um êmbolo que está acoplado a uma chave elétrica. Semelhante a um chuveiro elétrico convencional, esta chave abre ou fecha o contato de acordo com a vazão de água em circulação.

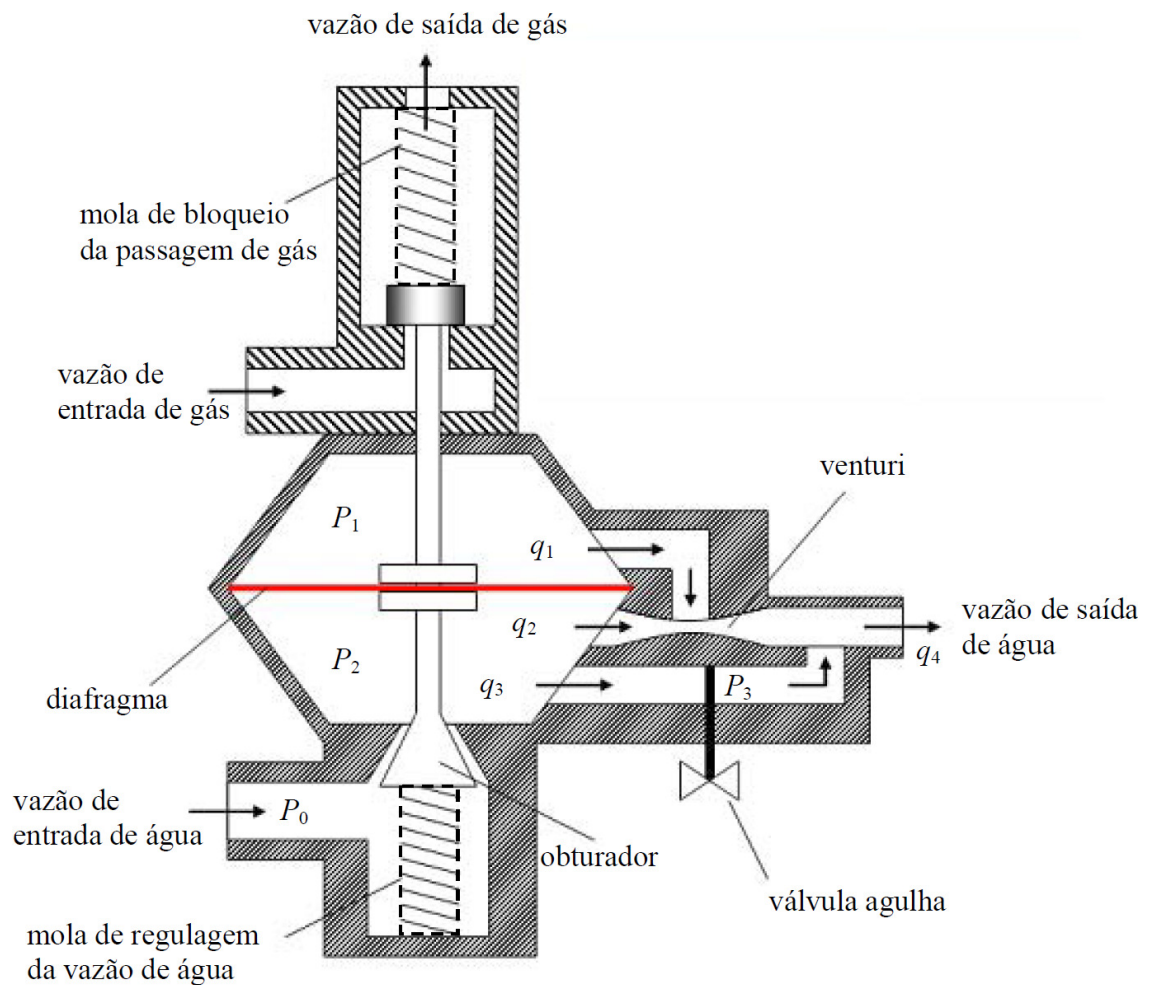
O sinal desta chave segue para o mesmo circuito integrado que os botões e o sensor de chama e sua configuração é semelhante ao da Figura 4.2.

#### 4.5 VÁLVULA MECÂNICA DE GÁS

O modelo da válvula é apresentado na Figura 4.3. A parte inferior é preenchida por água. No momento em que a água é demandada, a vazão representada por  $q_2$  faz com que a pressão no venturi fique menor que  $P_1$ , ocasionando a vazão  $q_1$ , provocando a diminuição da pressão  $P_1$ . A diferença entre  $P_1$  e  $P_2$  é a responsável pela deformação do diafragma. Quanto maior a vazão  $q_2$ , maior a deformação do diafragma, e, conseqüentemente, o deslocamento do êmbolo.

Esse êmbolo é o mesmo que aciona o sensor de água e ainda funciona como válvula de gás. Quando atinge certo deslocamento, há liberação de gás para os queimadores. Esta válvula mecânica serve como proteção, sendo a vazão de gás cortada caso haja falta de água no sistema. Isso evita a ocorrência de um possível sobreaquecimento do aquecedor.

A válvula agulha mostrada no modelo permite regular a vazão  $q_3$ . Quanto mais aberta estiver a válvula agulha, maior será a vazão  $q_3$  e menor será  $q_2$ , logo, menor o deslocamento do êmbolo. Esse ajuste permite definir um limite mínimo da vazão de água que cause o acionamento do sensor de água e ainda a liberação do gás para os solenóides, instalados na sequência.

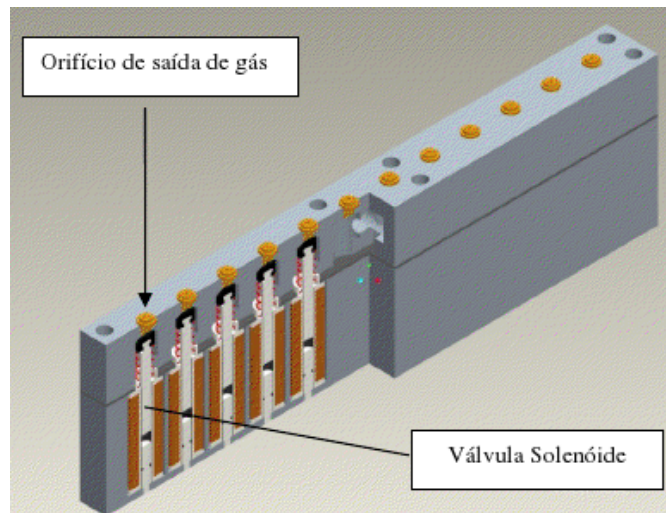


**Figura 4.3: Diagrama da válvula de gás, acionada pela passagem de água**

(Fonte: OLIVEIRA, 2007)

## 4.6 SOLENÓIDES

O conjunto de queimadores produzido no LAMECC, representado na Figura 4.4, é constituído por doze bicos de saída de gás, estando os dois bicos centrais sempre abertos e o restante, controlado por solenóides. Para que o gás chegue até este conjunto de bicos, é necessário que a válvula mecânica esteja aberta (por circulação de água) e ainda que uma válvula solenóide geral tenha sido acionada.



**Figura 4.4: Vista em corte do conjunto de solenóides (fonte: OLIVEIRA, 2007)**

Para ativar os bicos individualmente, é primeiramente aplicado um pulso de 16,3 V em seus terminais. Uma corrente de 490 mA passa pela bobina e produz um campo magnético capaz de mover o pistão de sua posição inicial, liberando a passagem de gás no respectivo bico. Após 50 ms, a tensão aplicada é reduzida para 6,3 V e a corrente passa a ser de 190 mA, consumindo energia elétrica suficiente para que a válvula mantenha-se aberta. Esses dois estágios foram denominados “Pulso” e “Regime”.

A válvula geral está instalada entre a válvula mecânica (mencionada na Seção 4.5) e o conjunto de válvulas solenóides (*manifold*). Todo fluxo de gás usado pelo aquecedor passa pela válvula geral. Diferente dos demais, este componente é acionado por duas bobinas internas operando com 5 V.

Para abrir a válvula geral, a primeira bobina é acionada também com um pulso maior de corrente<sup>2</sup>, enquanto a segunda, de menor valor de corrente<sup>3</sup>, a mantém aberta durante todo o período de funcionamento do aquecedor.

---

<sup>2</sup> Maior corrente da válvula geral (Pulso) 570 mA

<sup>3</sup> Menor corrente da válvula geral (Regime) 8,2 mA

#### 4.7 SENSOR DE TEMPERATURA

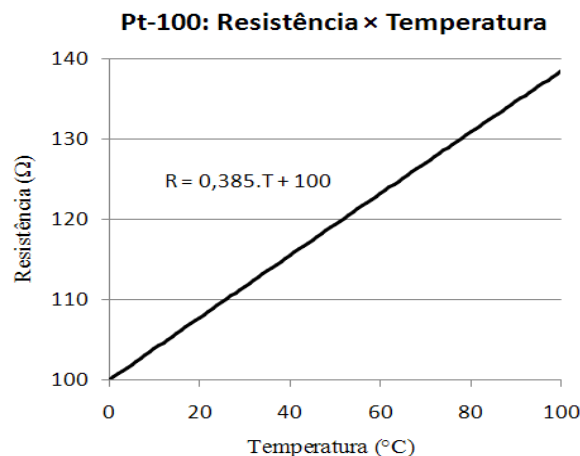
O sensor de temperatura projetado utiliza um termoresistor do tipo Pt-100. Esta sigla indica que o componente é feito de platina e sua resistência é igual a 100  $\Omega$  a 0  $^{\circ}\text{C}$ . A resistência do Pt-100 cresce linearmente com o aumento da temperatura. A norma internacional DIN-IEC 751/1985 padroniza os valores de resistência do Pt-100 em função da temperatura. Esses valores são apresentados na Tabela 4.1

**Tabela 4.1: Valores padronizados para Pt-100 – Fonte: Thermocouple Instruments Ltd**

$^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$^{\circ}\text{C}$
0.00	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0.00
10.00	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10.00
20.00	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20.00
30.00	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30.00
40.00	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40.00
50.00	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50.00
60.00	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	60.00
70.00	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	70.00
80.00	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	80.00
90.00	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	90.00
100.00	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	100.00

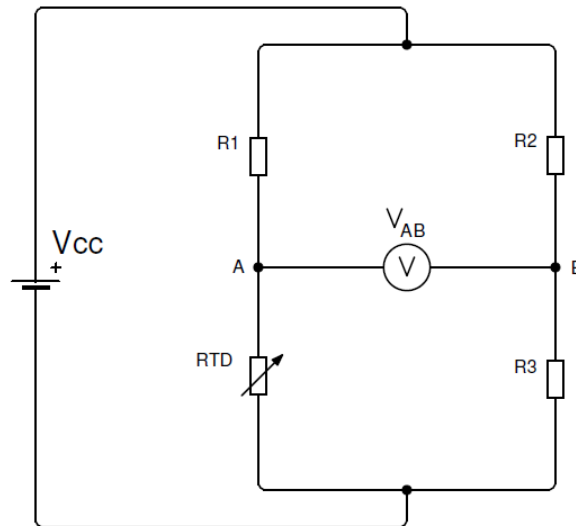
A partir dos dados da Tabela 4.1, foi traçado o gráfico da Figura 4.5 e obteve-se a Equação 4.1, que relaciona a resistência elétrica do Pt-100 com a temperatura em graus Celsius:

$$R_{\text{Pt100}} = 0,385T + 100 \quad (4.1)$$



**Figura 4.5: Comportamento do Pt-100 de 0 a 100  $^{\circ}\text{C}$**

Para realizar a medição de temperatura, o termoresistor foi empregado em uma Ponte de Wheatstone, como mostrado na Figura 4.6.



**Figura 4.6: Ponte de Wheatstone**

As tensões nos nós A e B da figura são dadas respectivamente pelas Equações 4.2 e 4.3, enquanto que a diferença de potencial de interesse  $V_{AB}$  é mostrado na Equação 4.4:

$$V_A = \frac{V_{cc} R_{RTD}}{R_1 + R_{RTD}} \quad (4.2)$$

$$V_B = \frac{V_{cc} R_3}{R_2 + R_3} \quad (4.3)$$

$$V_{AB} = V_{CC} \left( \frac{R_{RTD}}{R_1 + R_{RTD}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \quad (4.4)$$

Considerando os valores de  $R_1$  e  $R_2$  iguais e supondo que a resistência do RTD seja igual à de  $R_3$ , a ponte estará em equilíbrio, ou seja, as tensões nos pontos A e B serão iguais. Neste caso, a diferença de tensão  $V_{AB}$  será nula e, à medida que a resistência do termoresistor cresce, a diferença de tensão  $V_{AB}$  também aumenta.

Conhecendo-se o comportamento do RTD (Equação 4.1) e medindo essa diferença de tensão, é possível determinar a temperatura do termoresistor através da Equação 4.5:



$$V_{AB} = V_{CC} \left( \frac{0,385T + 100}{R_1 + 0,385T + 100} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \quad (4.5)$$

A tensão de referência da ponte é de 3,5 V, o valor de R3 escolhido é de 100  $\Omega$  e os valores de R1 e R2 são de 1100  $\Omega$ . Desta forma, a ponte entra em equilíbrio a 0 °C e a máxima corrente que circula pelo termoresistor não ultrapassa 3 mA, limite recomendado<sup>4</sup> para evitar o auto-aquecimento do sensor. Com esses valores, a Equação 4.5 pode ser simplificada em:

$$V_{AB} = 3,5 \left( \frac{0,385T + 100}{1100 + 0,385T + 100} - \frac{100}{1100 + 100} \right) \approx \frac{3,208T}{3117 + T} \quad (4.6)$$

A resistência dos fios que ligam a o PT-100 ao circuito podem interferir no resultado da medição nos casos onde o RTD encontra-se distante. Para esses casos, configurações a três ou a quatro fios são empregadas para minimizar esse efeito. Porém, no caso deste trabalho, o comprimento dos fios não ultrapassa um metro e sua resistência foi desprezada.

O circuito final do sensor de temperatura é apresentado na Figura 4.7. A diferença de potencial da Ponte de Wheatstone é amplificada com um ganho de 59,274 vezes, dado pela relação entre os resistores de precisão (1%) de 14,7 k $\Omega$  e 248  $\Omega$ .

Um diodo Zener limita o sinal de saída do sensor em 4,96 V para não causar danos no conversor A/D do microprocessador, que admite até 5 V. No circuito do sensor de temperatura há ainda um sinal de proteção que reinicia o microprocessador caso a temperatura do RTD atinja 76°C. Quando o sinal da temperatura ultrapassa a tensão de referência 4,56 V no comparador, o sinal de proteção entra em ação e reinicia o microprocessador, desligando todas as válvulas de gás.

---

<sup>4</sup> A potência máxima recomendada pela norma DIN-IEC 751/85 para evitar o auto-aquecimento do Pt-100 é de 1 mW, que para um resistor de 100  $\Omega$  resulta em uma corrente máxima de 3 mA.

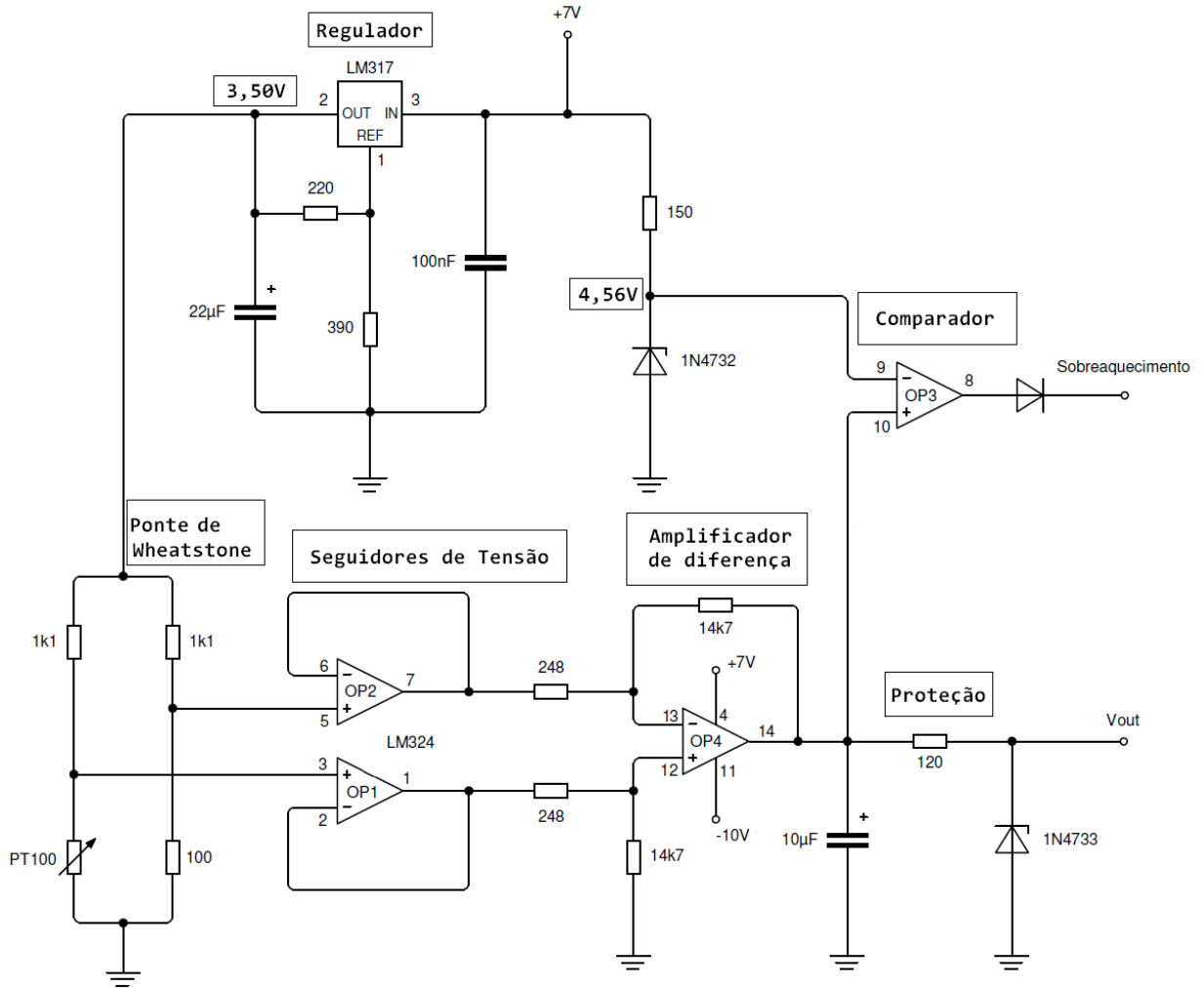


Figura 4.7: Circuito elétrico do sensor de temperatura

Abaixo está apresentado o *layout* da placa projetada para o sensor de temperatura e uma fotografia do termoresistor instalado na saída de água do aquecedor.

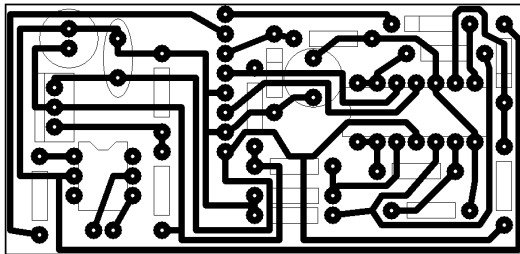
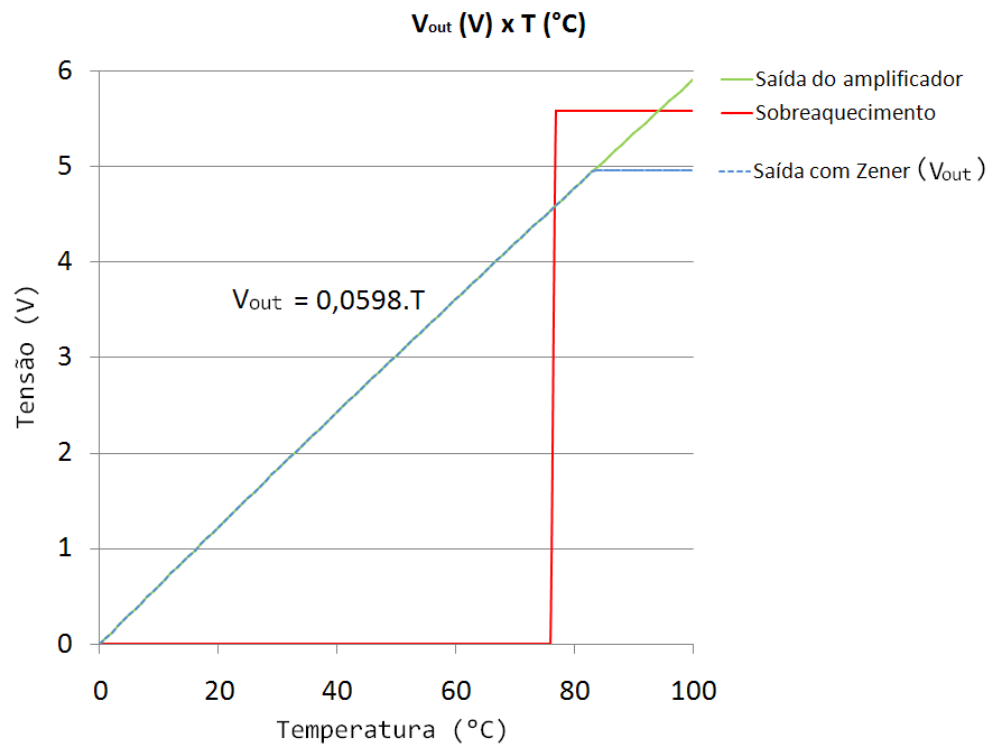


Figura 4.8: PCI do sensor de temperatura



Figura 4.9: Pt-100 utilizado

O comportamento do sensor de temperatura é mostrado através do gráfico da Figura 4.10. Depois de amplificado, o resultado da Equação 4.6 pode ser aproximado pela equação da reta mostrada no gráfico.



**Figura 4.10: Comportamento do sensor de temperatura projetado com proteção**

O amplificador foi testado com um potenciômetro no lugar do Pt-100. Também foram feitas medições com um termômetro de mercúrio e água (Figura 4.11).



**Figura 4.11: Execução do teste do sensor de temperatura com termômetro de mercúrio**

## 4.8 CENTELHADOR

O centelhador é o dispositivo que provoca as descargas elétricas responsáveis pela ignição do gás nos queimadores. Uma ponteira energizada com uma onda de alta tensão gera centelhas na saída de gás de um dos queimadores (piloto).

Originalmente, o circuito continha um microprocessador de oito pinos capaz de gerenciar um solenóide de dois estágios, como os citados anteriormente, um circuito de centelhador, além dos sensores de chama e de passagem de água. A operacionalidade era limitada por apresentar apenas estas funções básicas de acendimento de chama em aquecedores convencionais. Quando se deu início às pesquisas com a chama modulada, esse circuito foi desativado, porém o projeto original do módulo centelhador foi mantido nas versões subsequentes.

A Figura 4.12 contém o diagrama elétrico do módulo centelhador utilizado nesta versão do projeto. Uma nova PCI foi projetada para acomodar somente o centelhador e seu aspecto físico e *layout* são apresentados nas Figuras 4.13.a e 4.13.b.

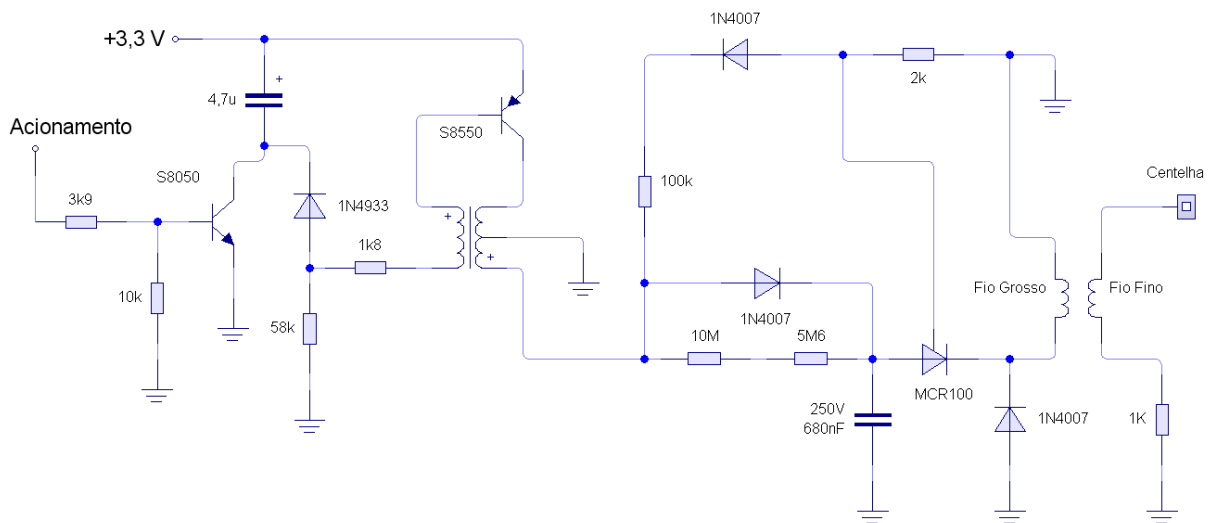
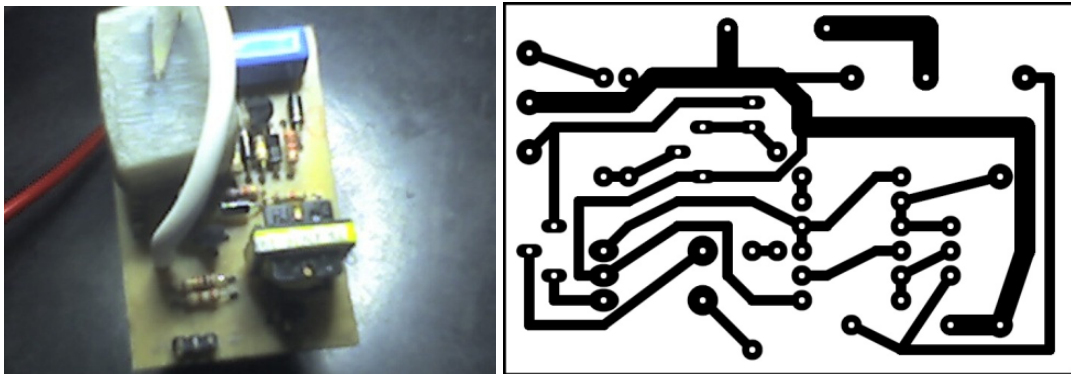


Figura 4.12: Circuito do centelhador

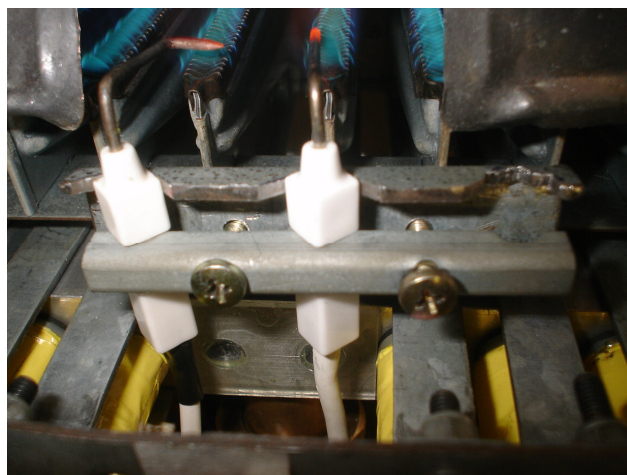


(a) Fotografia do centelhador

(b) *Layout* da placa do centelhador**Figura 4.13: Centelhador**

Quando um sinal constante de tensão é enviado ao circuito, uma onda é produzida no auto-oscilador, formado por transistores e pelo transformador pequeno. O sinal oscilante carrega o capacitor na saída em um semiciclo e, no outro, dispara o tiristor, que descarrega o capacitor no transformador da saída. Este transformador é revestido com resina para evitar descargas na própria placa, sua tensão de secundário é elevada e segue para a ponteira de descarga que está instalada em um dos queimadores.

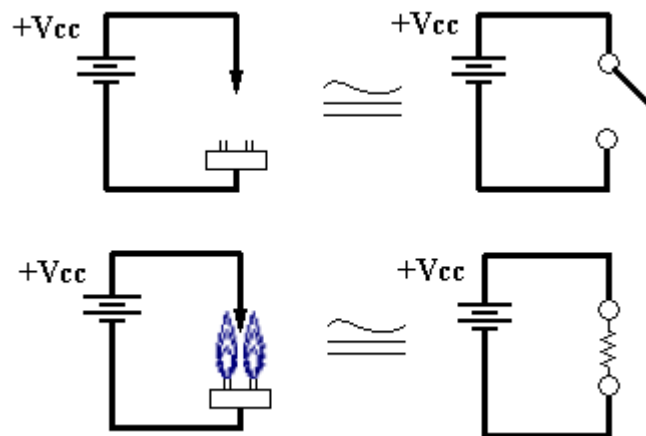
A Figura 4.14 mostra a ponteira do centelhador (à direita) que provoca a ignição do gás. Na parte esquerda da imagem está o sensor de chamas.

**Figura 4.14: Ponteiras do centelhador e sensor de chama**

## 4.9 SENSOR DE CHAMA

Neste projeto, é importante que o controlador tenha como detectar a presença de fogo nos queimadores. Um sensor capaz de detectar se o gás está sendo queimado não só ajuda na tomada de decisões do controlador, como é um quesito importante de segurança. Caso o fogo venha a apagar indevidamente (por falta de gás, por exemplo), o sistema identifica essa situação e fecha a passagem de gás, evitando riscos de vazamento.

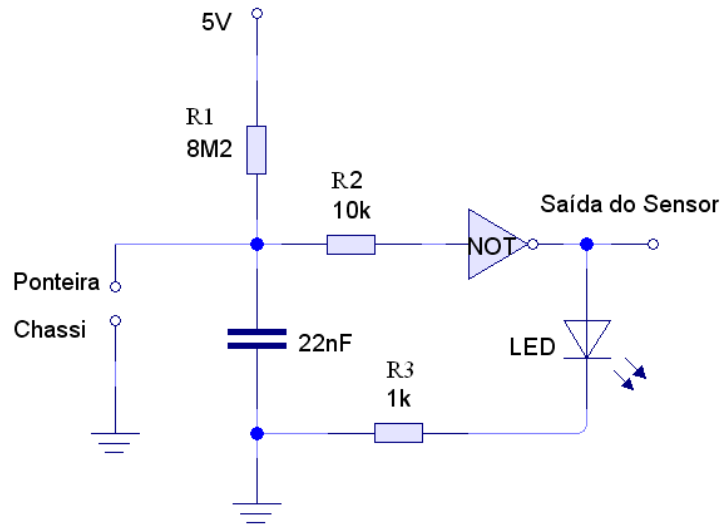
O princípio de funcionamento baseia-se no fato de que o fogo é composto por partículas ionizadas que conduzem eletricidade na presença de um campo elétrico. Aplicando-se uma tensão em um condutor localizado na região da chama, o fogo se comporta como um resistor e uma corrente passa a circular entre o condutor e o chassi, que está conectado à fonte de tensão (Figura 4.15).



**Figura 4.15: Comportamento elétrico do fogo**

O sensor que detecta a presença de chama possui uma ponteira energizada como mostrado na Figura 4.14. Quando o fogo é aceso ele passa a conduzir corrente para o chassi, comportando-se como um resistor. A tensão na ponteira, anteriormente de 5 V, assume um

valor próximo a zero devido ao elevado valor do resistor  $R1 = 8M\Omega$ , que age como um divisor de tensão (ver Figura 4.16).



**Figura 4.16: Esquema elétrico do sensor de chama**

O inversor lógico do circuito (modelo 74LS04) não apenas faz com que o sinal de saída tenha nível alto, mas também fixa valores em 0 V ou 5 V em sua saída, que não pode ser garantido apenas com o uso dos resistores, pois o fogo apresenta resistência oscilante. O inversor fornece níveis de tensão adequados para a leitura no pino do microprocessador e o desacopla da parte analógica.

#### 4.10 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

O circuito projetado utiliza diferentes valores de tensão: 7V, 5V, 3.3V, GND e -10V. A tensão de 3.3V se destina ao circuito do centelhador. As tensões de 7V e -10V alimentam o sensor de temperatura e acionam os solenóides. Por fim, a tensão de 5V alimenta o microcontrolador e o restante dos sensores.

O diagrama esquemático da fonte é apresentado na Figura 4.17, enquanto que seu respectivo *layout* é apresentado na Figura 4.18. O uso do formato em “L” é intencional e

serve para acomodar o transformador e a placa em um espaço de 10x10 cm, que está de acordo com o tamanho da caixa escolhida para acomodar a fonte.

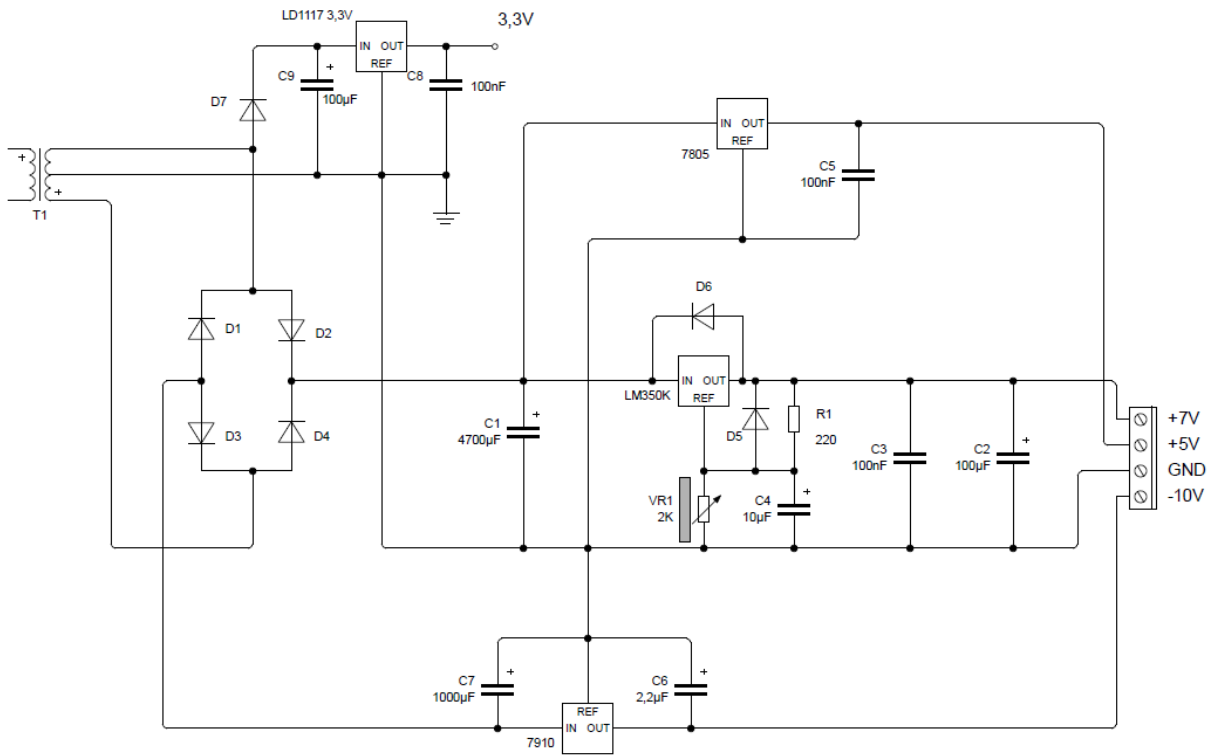


Figura 4.17: Diagrama esquemático da fonte montada para o projeto

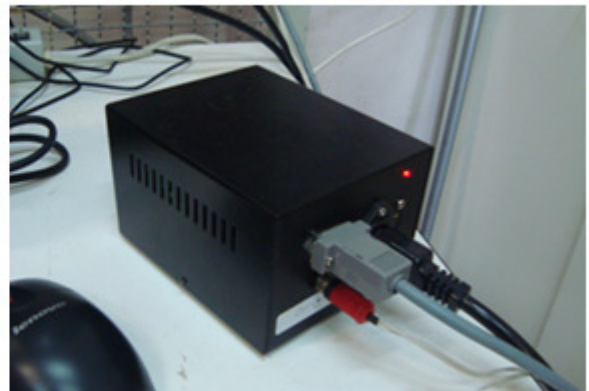
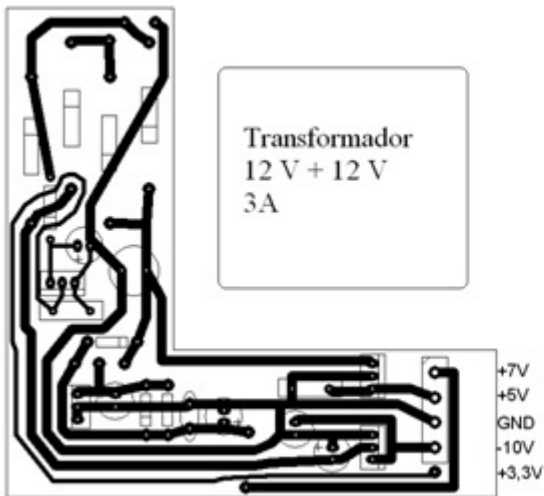
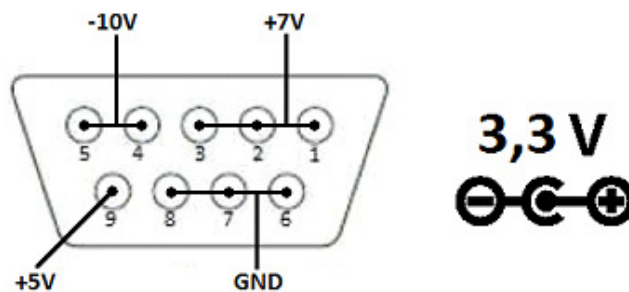


Figura 4.18: Layout da fonte e aparência após concluída



Foi utilizado um conector do tipo “RS232”, fêmea, de nove pinos na caixa da fonte, como forma de evitar que sejam feitas conexões indevidas ou incompletas que poderiam danificar componentes do projeto. Um cabo foi especialmente montado com a configuração mostrada na Figura 4.19 e está de acordo com a saída da fonte. Para a tensão de 3,3V, destinada ao circuito centelhador, foi designado um soquete do tipo “RCA” cuja polaridade está apresentada na Figura 4.19.



**Figura 4.19: Conectores na caixa da fonte de alimentação**

#### **4.11 PLACA DO MICROPROCESSADOR**

É a principal parte de *hardware* deste projeto (Figura 4.20). Esta placa acomoda o microprocessador (ATMEGA16), o *display* (LCD 2x16), os circuitos de gravação, de acionamento dos solenóides, dos sensores de água e chama, dos botões, ficando de fora apenas os circuitos do centelhador e do sensor de temperatura.

O *layout* desta placa foi desenhado no *software* “PCB Wizard” cujo aspecto é mostrado na Figura 4.21. A placa possui trilhas de cobre em suas duas faces. As trilhas comuns têm 0,8 mm de largura e as de alimentação dos solenóides têm 2 mm.

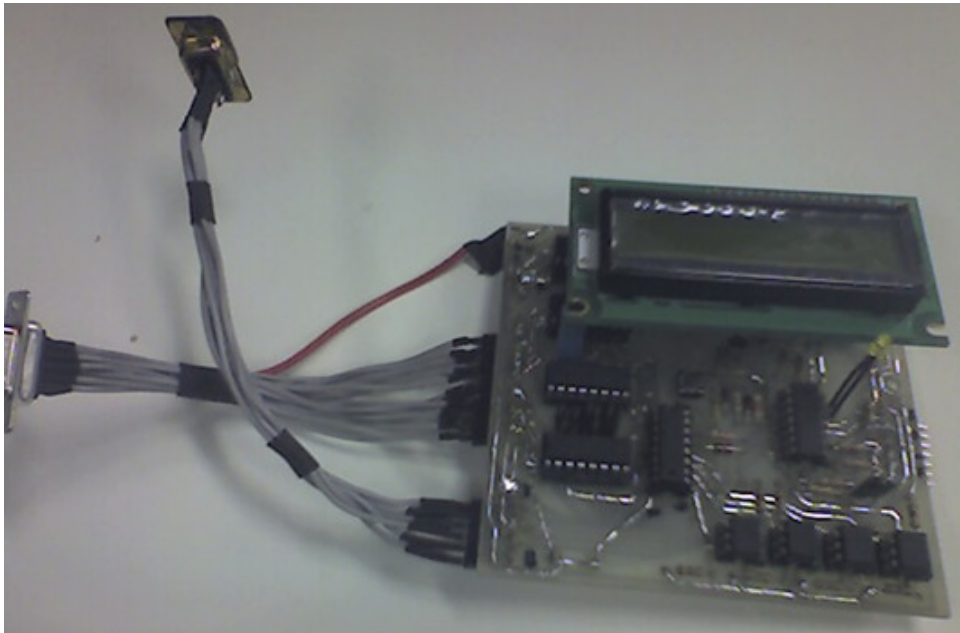


Figura 4.20: Placa controladora desenvolvida

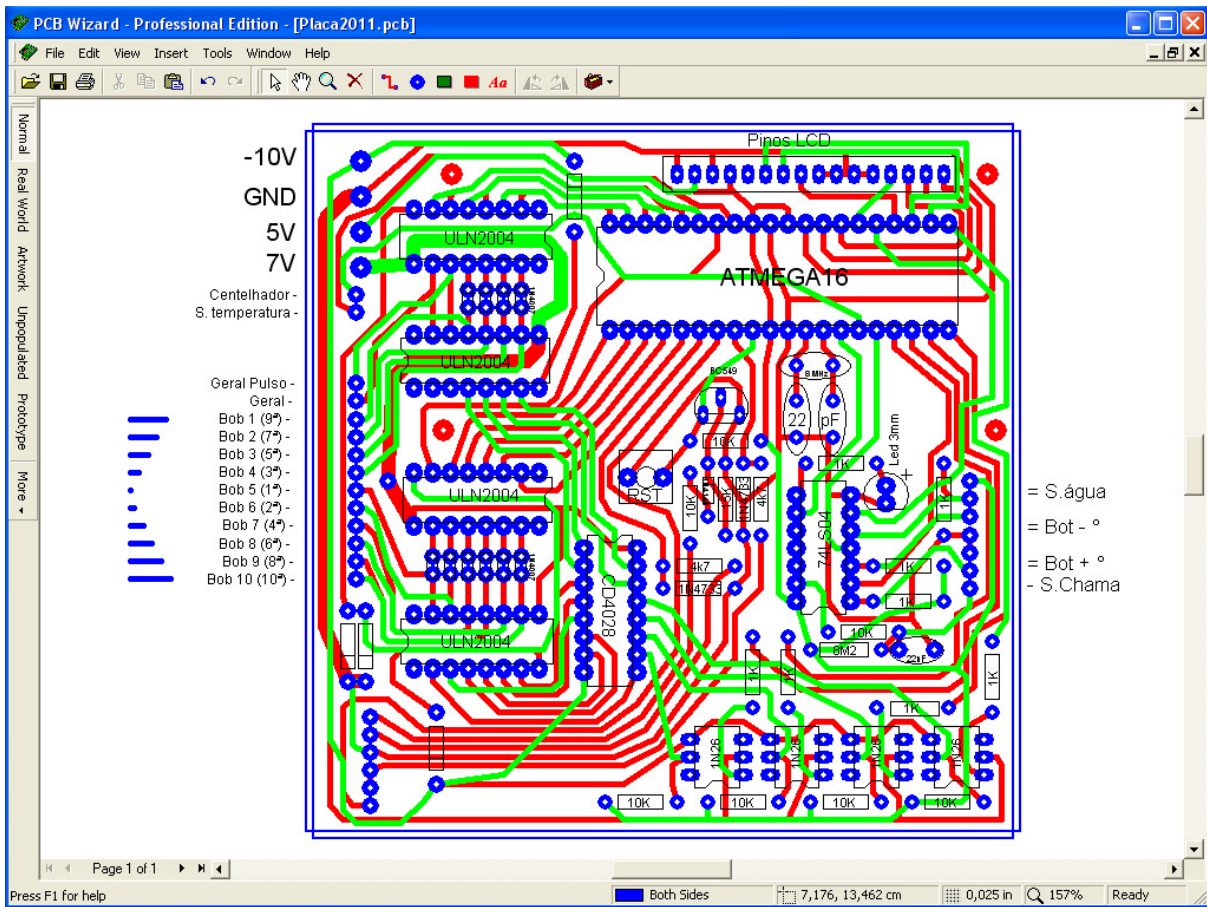


Figura 4.21: Layout da placa do controlador

Os pontos de saída para as bobinas estão agrupados e alinhados em ordem crescente (de acordo com a posição dos queimadores), facilitando a montagem dos fios. O mesmo ocorre com os pinos para gravação do firmware e alimentação da placa. Há também um conjunto de pinos convenientemente disposto para que o *display* possa ser encaixado diretamente à placa.

Esta placa tem duas camadas com trilhas e uma complexidade maior que as demais, portanto, fez-se necessário preparar uma máscara a partir do *layout* feito no computador. O desenho das trilhas desta placa foi encaminhado a uma gráfica, a qual produziu a máscara adesiva que permitiu fazer a corrosão do cobre, de acordo com as dimensões projetadas no *software*.

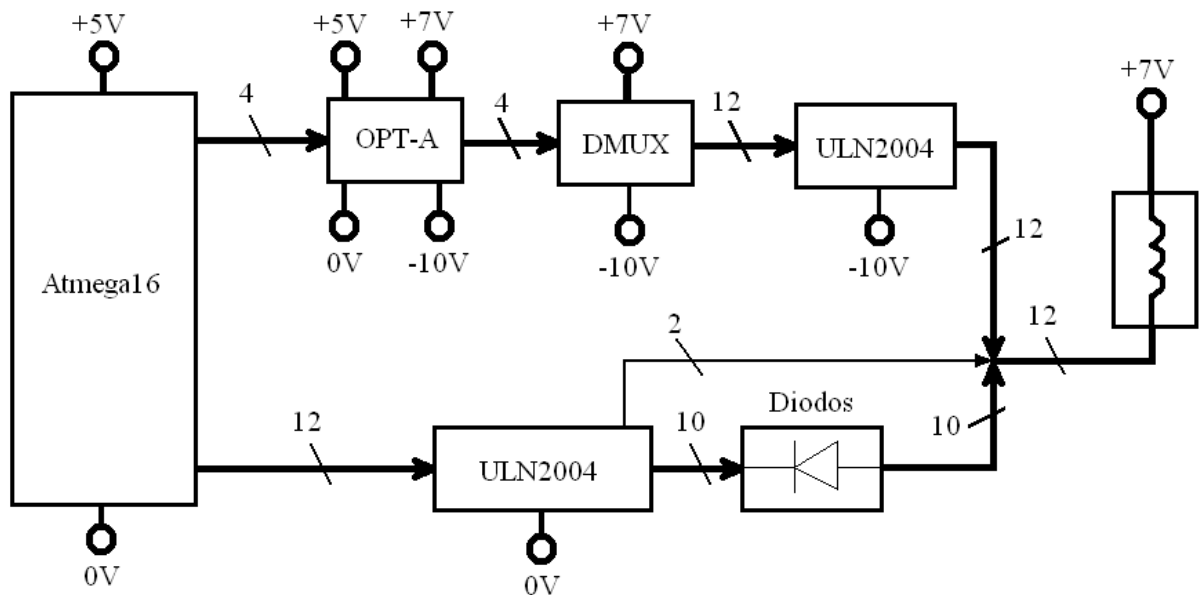
#### **4.12 CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS SOLENÓIDES**

Como mencionado anteriormente, foi empregado um circuito integrado contendo sete canais de transistores *Darlington*, cada um. Para acionar as bobinas em dois estágios foi necessário alimentar esses CIs com tensões de +7 V, 0V e -10 V.

Um demultiplexador de 10 portas foi empregado para fornecer o sinal de “Pulso” (maior corrente) que promove o deslocamento inicial do pistão de cada válvula. Não há necessidade de manter este sinal em nível alto em diferentes bobinas simultaneamente, portanto apenas quatro pinos do microprocessador são necessários para selecionar a bobina.

Porém, há um inconveniente, a alimentação do demultiplexador (DMUX) deve ser semelhante à do *array* de transistores, ou seja, +7 V e -10V, enquanto que o sinal proveniente do micro é de 0 V ou +5 V. Para converter a troca de sinais de “TTL” para “CMOS” (do microprocessador e do demultiplexador, respectivamente) foram empregados quatro opto-acopladores (OPT-A).

A Figura 4.22 mostra como funciona o circuito de acionamento dos solenóides. Deve-se notar os níveis de tensão que alimentam os componentes. Quatro pinos do processador selecionam o endereço para os “pulsos”, enquanto outros doze pinos mantêm as válvulas em regime (menor corrente). Na imagem ainda pode-se perceber que dois fios estão separados dos demais e não passam pelos diodos. Tratam-se dos fios que acionam a válvula geral de gás, que, por sua vez, é composta por bobinas que necessitam de menor tensão para entrar em funcionamento.



**Figura 4.22: Diagrama de blocos dos *drivers* dos solenóides com tensões indicadas**

#### 4.13 FIRMWARE

É o programa que contém toda a rotina que gerencia o sistema gravado no microprocessador. Foi escrito em linguagem C no compilador CodevisionAVR, que gera um arquivo com código hexadecimal. Esse arquivo é carregado no *software* de gravação PonyProg que transmite o *firmware* pela porta serial do computador.

Uma biblioteca foi criada especialmente para facilitar o acionamento ou desligamento do centelhador e das bobinas. Em vez de selecionar e habilitar individualmente os pinos do microcontrolador, esta biblioteca permite chamar uma rotina que executa as linhas de comando necessárias para tais ações. Por exemplo:

```
centelha(1);    // Liga centelhador
pulso(5);      // Pulso na válvula 5 || {PORTD.7 = 1; PORTD.6 = 1; PORTD.5 = 1; PORTD.4 = 0;}
regime(8);     // Manter bobina 8 em regime
desliga(0);   // Desliga Válvula Geral
liga(10);     // Liga Válvula 10 com pulso e regime
```

O comando “pulso(5)”, citado acima, atribui os valores necessários aos pinos do microprocessador que endereçam o demultiplexador, acionando a bobina de número cinco. Após 50 ms, os pinos de endereçamento retornam ao estado original, desligando o sinal de pulso. O comando “liga(8)” serve para acionar a bobina com um pulso, ativa o sinal de regime e, em seguida, desliga o pulso, mantendo o respectivo solenóide liberando o gás até ser desligado.

#### 4.13.1 Algoritmo

No momento em que é ligada a chave geral da fonte, o visor da caixa de controle mostra o texto “CONTROLGAS 2011” e “aperte um botão” até que seja pressionado um botão. Esta situação só se repetirá caso o controlador seja reinicializado.

Há três botões na caixa, dois deles (pretos) dispostos verticalmente que servem para aumentar ou diminuir a temperatura desejada para a saída de água. Esses botões estão ligados aos pinos de interrupção do ATMEGA16, que fazem com que sub-rotinas (seleção da temperatura desejada) sejam executadas no mesmo instante que for pressionado um botão. O outro (vermelho) é o botão “RESET” que reinicializa o sistema.

Quando qualquer botão preto for pressionado, o sistema passa a monitorar a temperatura da água na saída do aquecedor, verifica se a água está circulando e se há

necessidade de provocar a ignição da chama, caso em que a temperatura da água é menor do que a temperatura escolhida pelo usuário. Toda vez que o sistema mede a temperatura, o seu valor é atualizado no visor.

Se a água estiver circulando, a seguinte mensagem aparece alternadamente com os valores de temperatura “água esta circulando”. Se a temperatura desejada estiver abaixo da medida, a mensagem será complementada por: “e ja esta quente”. Caso a temperatura da água estiver abaixo do desejado, o processo de acendimento das chamas será iniciado.

A mensagem “Acendendo o fogo” “Tentativa nº 1” aparecerá, a válvula de gás geral será aberta e o centelhador começará a produzir centelhas. Se, em 400 ms, o fogo não foi aceso, o sistema fecha a passagem de gás através da válvula geral, aguarda 600 ms, e tenta novamente (atualizando a contagem de tentativas no *display*).

O controlador tenta provocar a ignição do gás por três vezes e, se falhar, retorna a mensagem: “Sem gas. Reinicie o sistema.”, desativa todas as válvulas e o centelhador e aguarda a reinicialização do sistema. Durante todo esse tempo o controlador está constantemente verificando se há passagem de água e se o fogo foi aceso.

Se o fogo acendeu, o centelhador desliga, e o processo entra na fase de acendimento dos queimadores individuais. Um LED amarelo, diretamente ligado ao sensor de chama, indica se o fogo está aceso (Figura 4.23).

O controlador calcula quantos queimadores devem ser acionados para alcançar a temperatura desejada. Os queimadores são ativados alternadamente (esquerda-direita) do centro do aquecedor para os extremos (a chama “piloto” ou “geral” corresponde aos dois bicos centrais abertos).

LEDs instalados na caixa do controlador permitem ao usuário acompanhar quais queimadores estão ligados. Na Figura 4.23 pode-se visualizar um LED amarelo (sensor de

chama), uma linha contendo dois LEDs vermelhos (representativos dos estágios da válvula geral de gás) e dez LEDs verdes (queimadores individuais). No caso da fotografia da Figura 4.23, o fogo está aceso, a válvula geral está em regime e cinco queimadores estão em funcionamento. Ainda há um LED vermelho (desligado na figura) situado logo abaixo do botão “RESET”. Este representa o sistema de segurança que é acionado caso a temperatura da água tenha atingido o limite de 76 °C, indicando que o microprocessador foi reiniciado por sobreaquecimento. Todas as válvulas são desligadas nesse momento.



**Figura 4.23: Fotografia do controlador em operação**

Se, em qualquer momento, o fogo apagar ou se a passagem de água for fechada, o sistema desliga imediatamente as válvulas de gás e verifica qual foi a causa. Caso a torneira tenha sido fechada, a rotina volta para o estado inicial, verificando a temperatura da água e a necessidade de religar o sistema. Se o fogo apagou, o controlador interrompe sua ação e aguarda a reinicialização manual do sistema, por medida de segurança.

#### 4.13.2 Controle

Primeiramente, para teste e observação do sistema, foi projetado um controle proporcional com ganho proporcional “ $K_p$ ” unitário. O atuador, neste caso, é um conjunto discreto limitado ao número de queimadores disponíveis, ou seja, dez, sem considerar os dois centrais da chama piloto. Se o erro<sup>5</sup> passar de 10 °C, o número de queimadores ligados será o máximo, ou seja, dez. Se o erro se torna negativo, todos os bicos individuais são desligados (com exceção da chama piloto).

Para esta primeira versão do controle proporcional, observou-se a presença de um grande erro de regime permanente, pois, na medida em que a temperatura da água se aproximava do valor desejado, os queimadores se desligavam (pois o erro diminuía), não atingindo a proximidade da temperatura selecionada. Cabe destacar que, nesta configuração, o número de bicos abertos é igual ao valor da parte inteira do erro de temperatura (em graus Celsius). Por exemplo, se o erro é igual a 1,9 °C, apenas um queimador estará funcionando. Nestas condições, todos os queimadores são desligados caso o erro seja menor que 1 °C. Concluiu-se assim que o uso de um controlador proporcional nestes moldes era inadequado.

A etapa seguinte foi implementar um controlador baseado na última versão do Controlgás, que se constitui também em um controlador proporcional com ganho unitário, mas com algumas modificações significativas. A primeira delas é a definição de uma faixa de histerese de  $\pm 1$  °C em torno da temperatura desejada, na qual o controlador mantém aceso o mesmo número de queimadores imediatamente posterior ao momento em que a temperatura medida entrou nesta faixa.

---

<sup>5</sup> Diferença entre temperatura desejada e medida.



Outra característica desta nova rotina de controle foi a introdução de um coeficiente de regulagem, descrita na Seção 4.13.3, que eleva o valor da referência. Com isso o controlador proporcional busca atingir uma temperatura de referência acima da selecionada pelo usuário. Com isso, devido ao erro de regime permanente existente com relação à nova referência, a temperatura da água se acomoda próxima ao valor desejado.

Esse segundo método de controle<sup>6</sup> funcionou como esperado, mas apenas para temperaturas acima de 50°C. Para solução em toda a faixa de temperatura, foi necessário levar em conta que a potência calorífica do conjunto de queimadores varia de maneira não-linear à medida que se aumenta o número de bicos abertos.

Assim, alterando o número de bicos acesos de zero a dez e comparando a máxima temperatura atingida em cada caso com a temperatura da água para o sistema desligado, foram definidas novas constantes de regulagem, permitindo melhorar o desempenho do controlador.

### **4.13.3 Regulagem**

Foi feito um ensaio para verificar a influência do número de queimadores acionados. Neste ensaio, a água circulava a 27,2 °C com o sistema desligado. Com a vazão d'água mantida constante (cerca de 5,4 l/min), os bicos foram acionados de forma incremental e verificou-se a diferença de temperatura de acordo com a Tabela 4.2.

Neste ensaio pode-se constatar que a variação da temperatura ao acionar o próximo queimador não é uniforme e que a vazão de gás em cada bico é menor para um maior número

---

<sup>6</sup> Constante de regulagem de 1,13, calibrado para 52 °C, baseado em Perondi (2008b).

de bicos abertos. A geometria dos componentes do trocador de calor também contribui para esse efeito.

**Tabela 4.2: Relação do número de queimadores com incremento de temperatura**

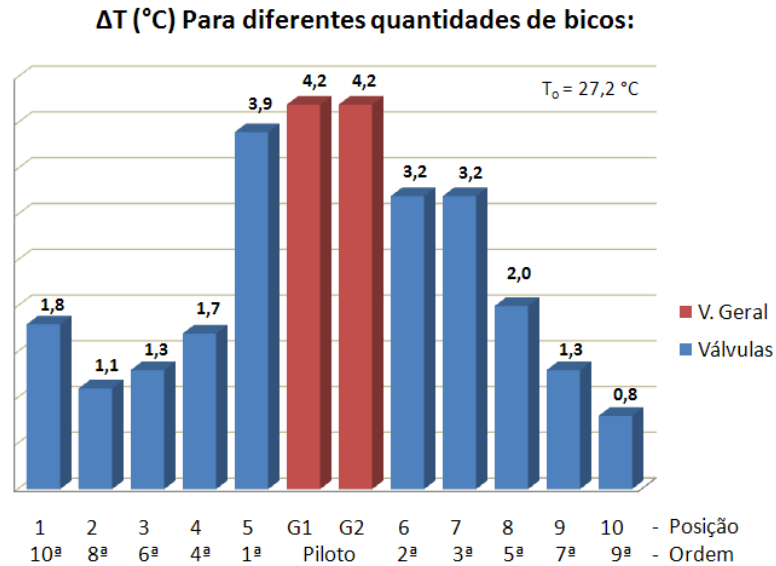
Nº de bicos acesos	Temperatura atingida (°C)	Incremento da temperatura (°C)
Desligado	<b>27,2</b>	-
Piloto	35,6	8,4
1	39,5	3,9
2	42,7	3,2
3	45,9	3,2
4	47,6	1,7
5	49,6	2,0
6	50,9	1,3
7	52,2	1,3
8	53,3	1,1
9	54,1	0,8
10	55,9	1,8

O gráfico da Figura 4.24 ilustra os resultados da tabela acima, apresentando a ordem em que as bobinas foram acionadas e suas posições no aquecedor. Percebe-se que a última bobina a ser acionada tem um comportamento distinto, pois fornece um maior acréscimo na temperatura. Isto se deve ao fato que a posição em que se encontra o queimador correspondente à última bobina é a mais próxima de onde a serpentina desce<sup>7</sup>. Com base nesses dados, a ordem do acionamento pode vir a ser modificada visando um melhor aproveitamento energético.

O cálculo dos coeficientes de regulação foi feito com auxílio da Tabela 4.2. Foram definidas faixas de temperatura para as quais são atribuídos valores distintos de regulação. O controlador proporcional com  $K_p$  unitário, sem regulação desliga as válvulas de acordo com a diferença entre o valor da referência e a temperatura saída.

---

<sup>7</sup> Rente à parede do trocador de calor



**Figura 4.24: Relação do número de queimadores com incremento de temperatura**

Conforme já comentado na Seção 4.13.2, e, por exemplo, a referência for de  $55^\circ\text{C}$ , de acordo com a Tabela 4,2, o controlador deverá manter nove válvulas ligadas e modular a décima. Porém, quando a temperatura atingir um valor próximo à referência, com erro, por exemplo, de  $8^\circ\text{C}$ , o número de queimadores passa a ser igual a oito. Este número é decrementado à medida que o erro diminui, tornando impossível atingir, ou manter a temperatura de saída perto da referência.

Para regular este caso, basta adicionar nove queimadores ao valor de bicos definido pelo controlador proporcional, ou elevar a referência em  $9^\circ\text{C}$  para um ganho unitário. Analogamente, foram definidos os demais valores de regulação, mostrados na Tabela 4.3. Para diferentes valores de  $K_p$ , basta dividir os valores da terceira linha da tabela por  $K_p$ .

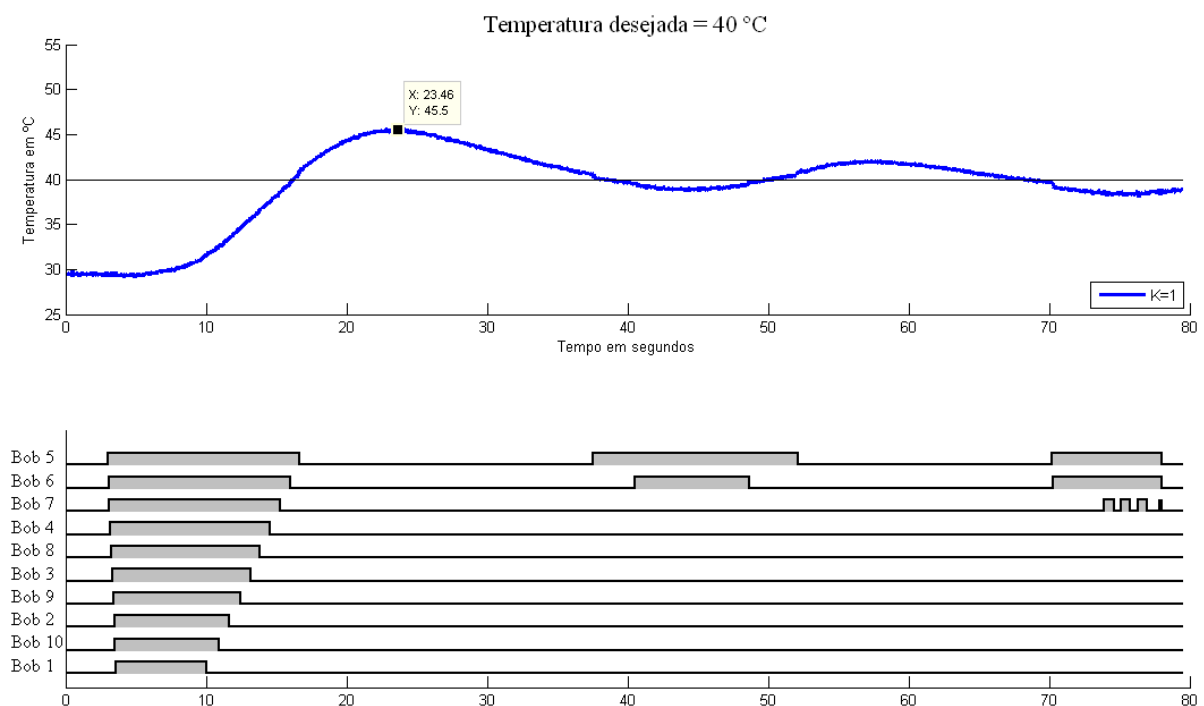
**Tabela 4.3: Regulação para  $K_p = 1$**

Temperatura (°C)	37,6	41,1	44,3	46,8	48,6	50,3	51,6	52,8	53,7	55,0
Condição	≤	>	≤	>	≤	>	≤	>	≤	>
Queimadores	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9

## 5 RESULTADOS ALCANÇADOS

Para a obtenção dos resultados apresentados aqui, foi utilizada uma placa de aquisição de dados<sup>1</sup> via porta USB juntamente com o software LabVIEW. Foi medido o sinal analógico na saída do sensor de temperatura, bem como os valores digitais do sensor de chama e de cada bobina. Os arquivos gerados após cada ensaio foram manipulados por uma rotina executada pelo *software* MATLAB, que, por sua vez, apresentou gráficos dos resultados dos ensaios.

Primeiramente, foi medido o comportamento do sistema, com regulagem e  $Kp$  unitário (um queimador ligado para cada °C de erro), para diferentes referências. Alguns desses ensaios são mostrados nas Figuras 5.1, a 5.4. Pode ser observado o comportamento das bobinas, organizadas pela ordem de acionamento<sup>2</sup>.



**Figura 5.1: Ensaio para referência a 40 °C**

<sup>1</sup> National Instruments USB-6009

<sup>2</sup> A bobina “Bob 5” é a primeira a ser acionada enquanto que “Bob 1” é a última.

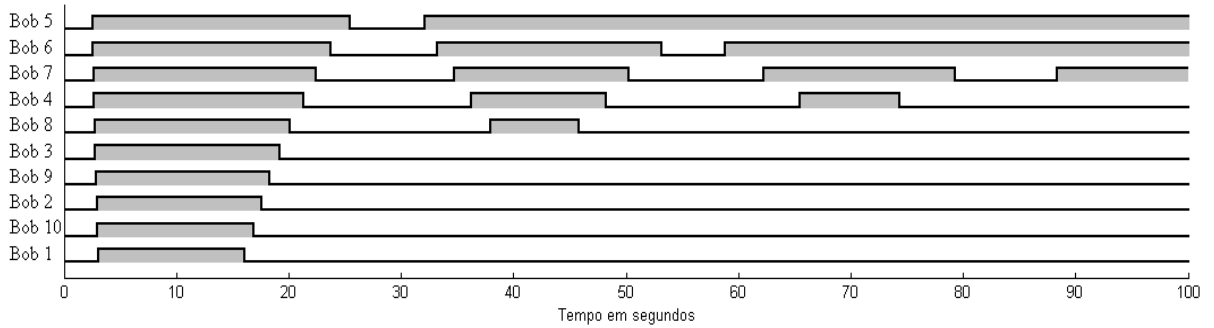
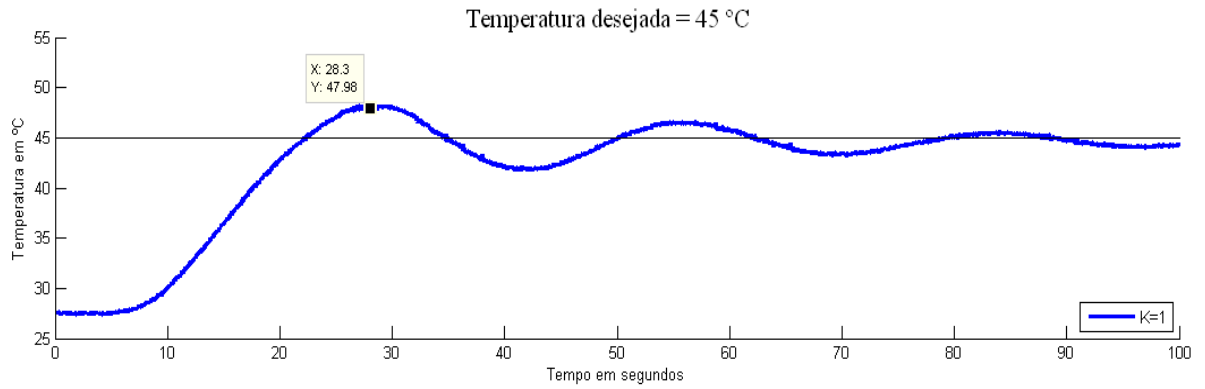


Figura 5.2: Ensaio para referência a 45 °C

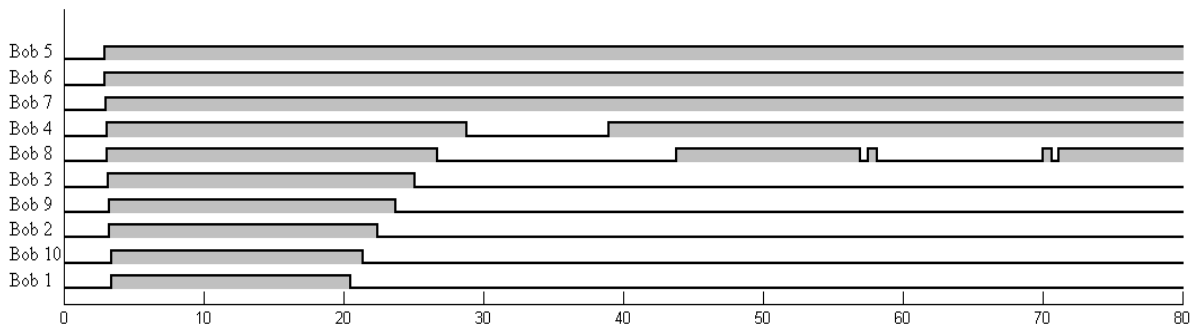
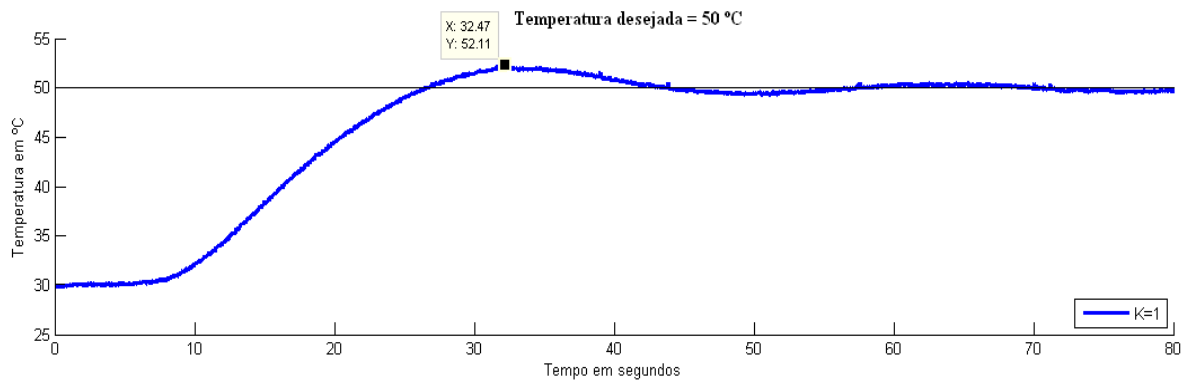
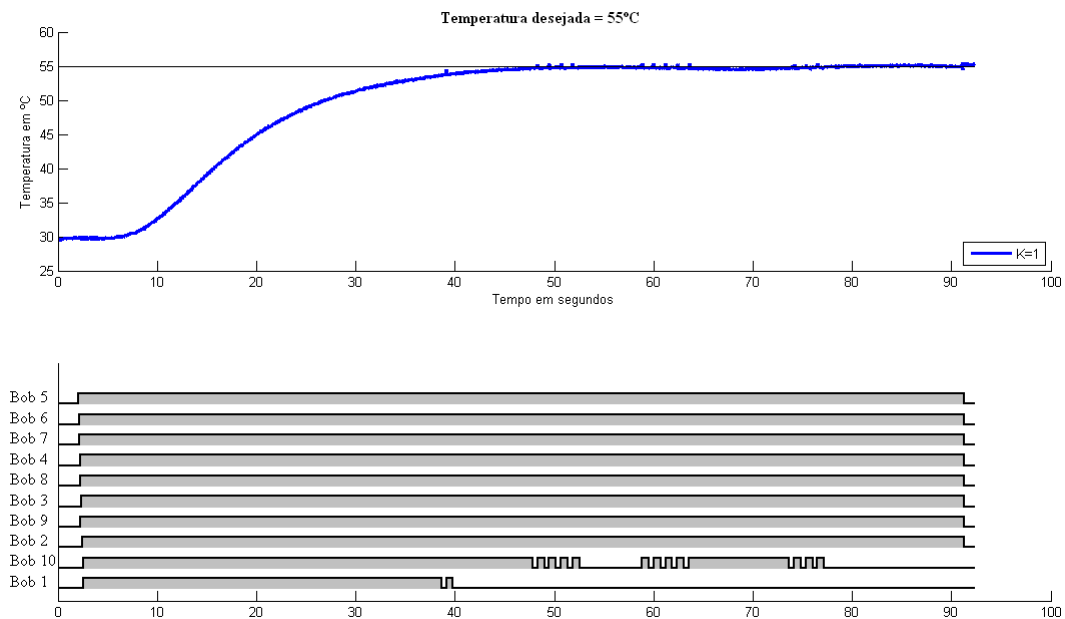
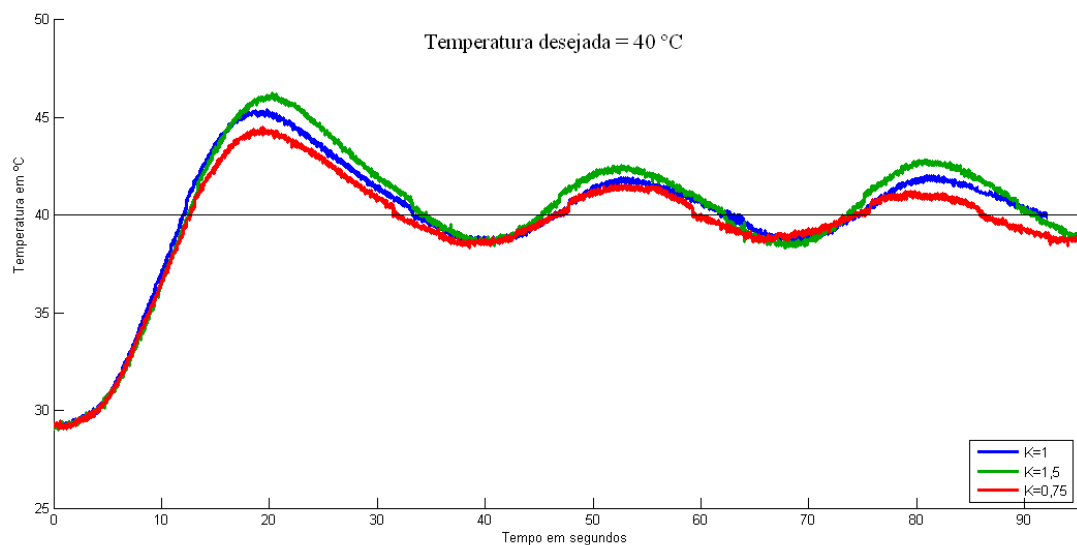


Figura 5.3: Ensaio para referência a 50 °C



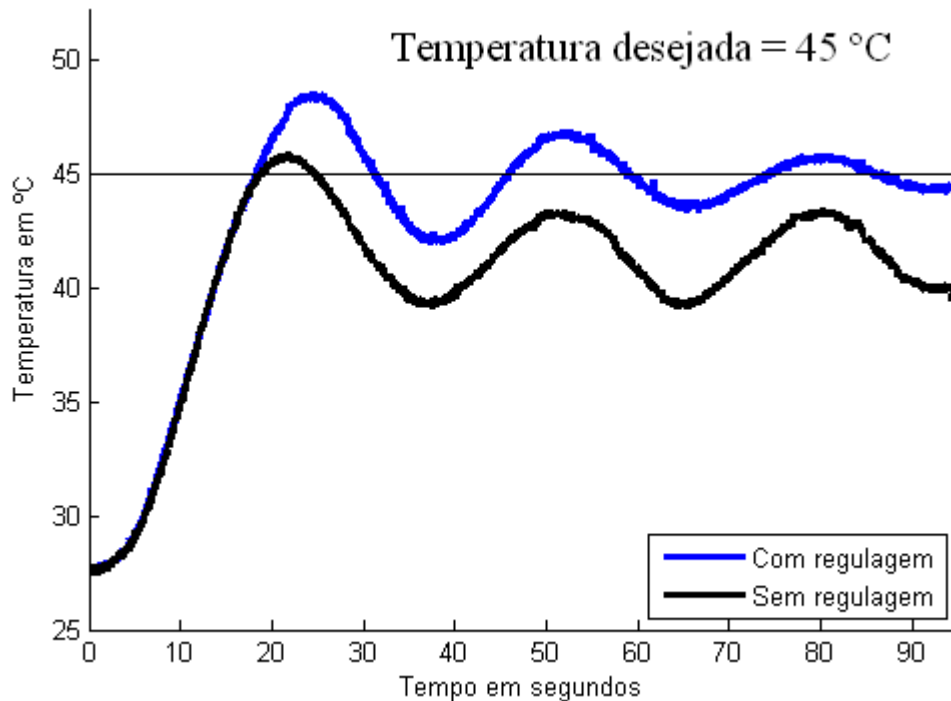
**Figura 5.4: Ensaio para referência a 55 °C**

Também, foi comparado o comportamento do sistema para diferentes valores de  $K_p$ . Quanto maior for  $K_p$ , maior é a amplitude da oscilação da temperatura, como mostrado na Figura 5.5. Para ganhos menores, a temperatura de referência com regulagem é menor, portanto, os queimadores são desligados mais cedo, diminuindo o sobressaio e a amplitude da oscilação da temperatura da água na saída.



**Figura 5.5: Comparação da resposta para diferentes  $K_p$**

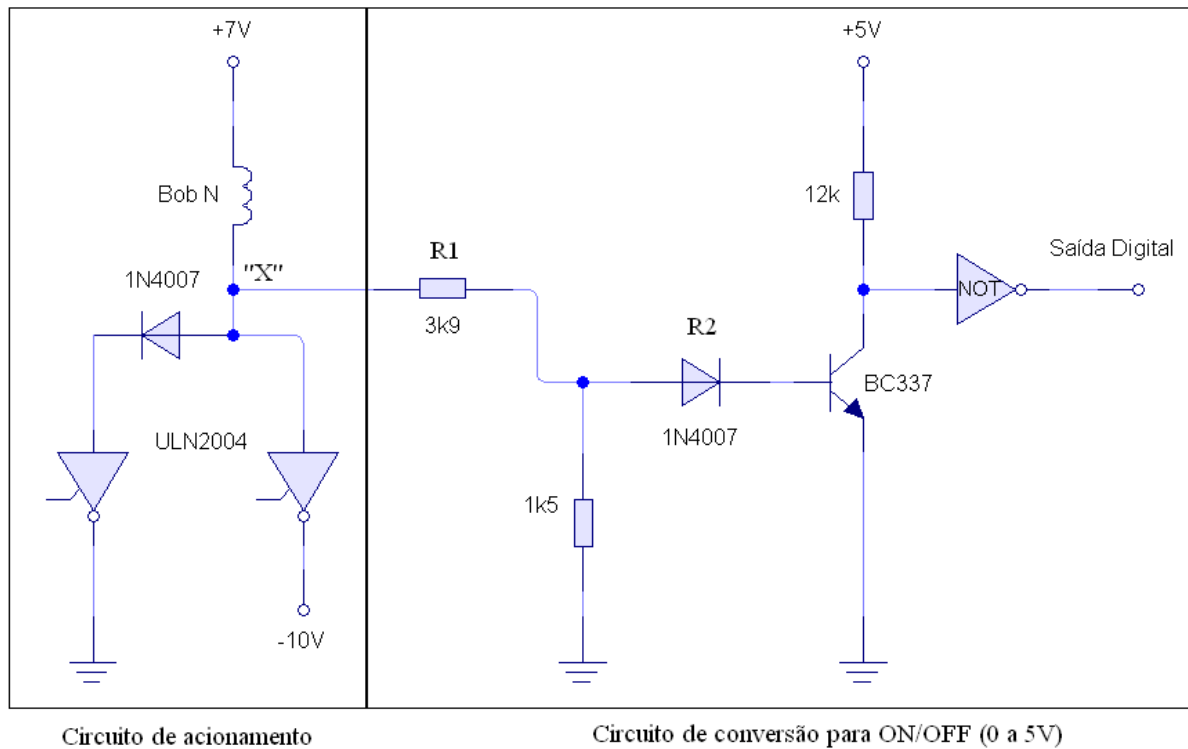
A seguir, são apresentados resultados dos ensaios comparativos do controle do sistema com e sem regulagem (Figura 5.6).



**Figura 5.6: Efeito da regulagem**

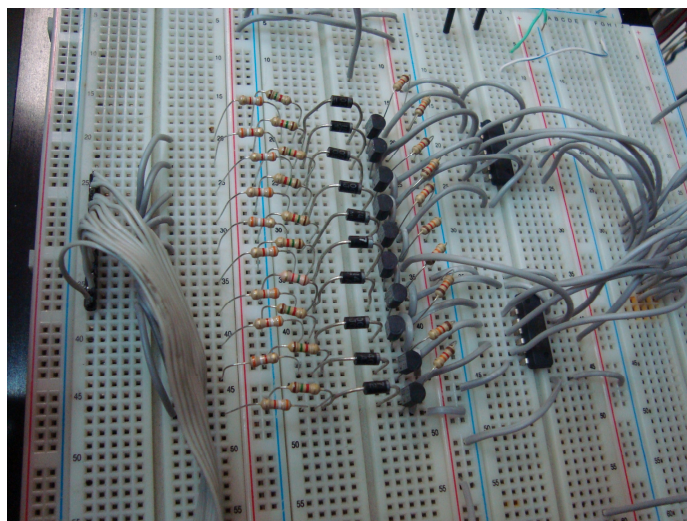
Os resultados deste projeto foram obtidos com vazão constante de água, pois para diferentes vazões o comportamento do sistema se altera. Quando a quantidade de água que circula pelo trocador de calor diminui, menor é a capacidade térmica do volume de água em circulação, portanto, mais facilmente varia a temperatura, dificultando a ação de controle.

Para detectar o estado de cada bobina, foi montado um circuito intermediário em *protoboard*, através do qual o sinal nos terminais de cada bobina é convertido em sinal digital (Figura 5.1). A tensão no nó indicado por “X” na Figura 5.7 assume os valores: +7 V; -8,5 V e 1,8 V (desligado, pulso, regime, respectivamente). O sinal de entrada digital da placa de aquisição admite valores 0 V e 5 V.



**Figura 5.7: Circuito conversor de tensão para leitura ON/OFF das bobinas**

O diodo é usado para eliminar o sinal de tensão negativo. Os resistores “R1” e “R2” polarizam o transistor para funcionar de acordo com as demais tensões positivas. O inversor digital garante valores para as tensões de saída compatíveis com as necessárias para adequada operação da placa de aquisição.



**Figura 5.8: Aparência física do circuito da Figura 5.7**



## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho envolveu o projeto de um novo o *hardware* para controle de temperatura de aquecedores de passagem, incluindo, desde fonte de alimentação, sensores, dispositivos para acionamento da chama, até a placa do controlador em si. Durante sua montagem, foram aplicados na prática os conteúdos da maior parte das disciplinas do curso de engenharia elétrica. Eventualmente, foi necessário buscar materiais com assuntos além dos vistos em sala de aula.

O estudo das versões passadas do projeto Controlgás foi indispensável para o entendimento do funcionamento deste aquecedor, bem como para a tomada de decisões quanto às alterações ou inovações a serem realizadas nesta versão do projeto. Algumas alterações se devem à possibilidade de redução do custo total dos componentes envolvidos.

Neste projeto, ainda há espaço para melhorias tanto na parte de controle, de componentes mecânicos e eletrônicos. Este documento foi escrito como forma de contribuir para tais avanços.

Uma sugestão que pode vir a ser implementada em trabalhos futuros para a minimização da oscilação da temperatura de saída consiste na inserção de uma válvula proporcional de gás capaz de controlar a intensidade das chamas nos queimadores. Assim, deverá ser possível alcançar temperaturas intermediárias às normalmente fornecidas pelos queimadores, regulando-se a quantidade de gás total liberada após o acionamento do número de queimadores que mais se aproxima da temperatura desejada.

Levando em conta o efeito da alteração da demanda de água, um estudo de controle mais específico pode ser feito, ou com medição de vazão, ou com medição da temperatura na entrada do aquecedor, ou até mesmo com algoritmos capazes de analisar o comportamento do sinal de saída e estimar a vazão baseado em modelos matemáticos.

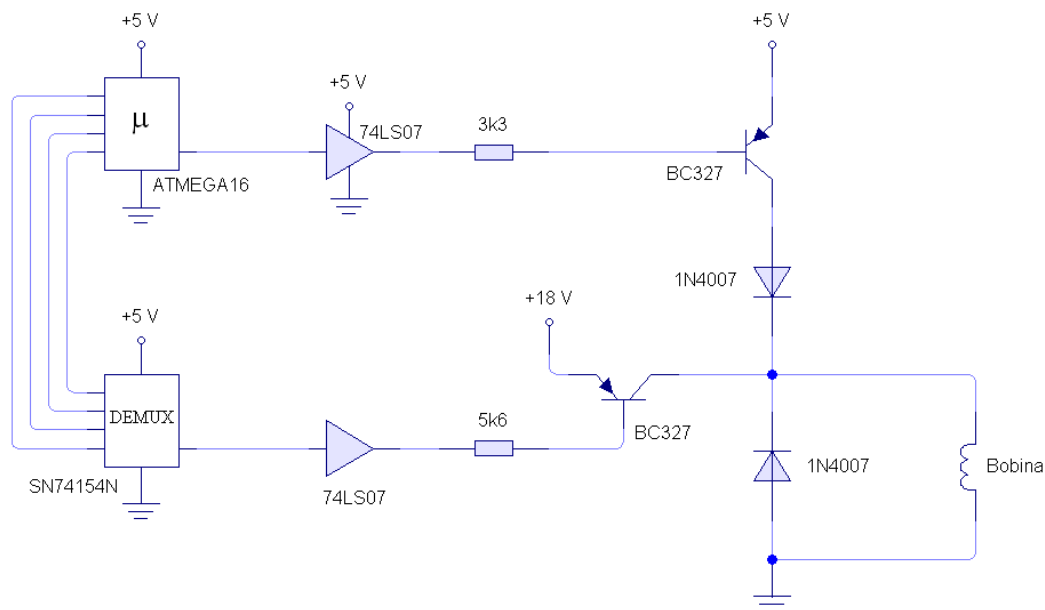
## REFERÊNCIAS

- ATMEL CORPORATION. **ATMEGA16 – Data Sheet**. [S. l.], Disponível em: <[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2466.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf)>. Acesso em: ago. 2011.
- AZEVEDO, A.; SILVA, A. Relatório do trabalho sobre medição de temperatura com PT100. Porto, Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~ee02057/outras/Relatorio%20PT100.pdf>>. Acesso em: set. 2011.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas Vol. 1**. 2.ed., [S. l.] LTC 2010, ISBN 8521617542
- BARBIERI, G. W. **RELATÓRIO DE BOLSISTA CNPQ**. Porto Alegre, 2007.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. M. G. **Sistemas de Controle - princípios e métodos de projeto**. 1.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. ISBN 8570258496
- BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. 8.ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004, ISBN 8587918222
- BRAGA, N. C. **Fontes de Alimentação**. [S. l.]: Saber, 2005. ISBN 8571160309
- KRAKHECHE, I. et al. **SENSORES DE TEMPERATURA**. Caxias do Sul, 2003, Disponível em: <<http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/temp2.pdf>>. Acesso em : ago 2011.
- OLIVEIRA, EVERTON F. **ESTÁGIO SUPERVISIONADO III, Sistema de Controle Automático para Aquecedores de Passagem a Gás Natural**. Porto Alegre, 2007.
- PERONDI, E.A. et al. **Análise de desempenho de um novo sistema de controle de temperatura de aquecedores de passagem baseado em chama modulante**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5, 2008a, Salvador.
- PERONDI, E.A. et al. **Desenvolvimento de um novo sistema de controle de temperatura de aquecedores de passagem baseado em chama modulante**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5, 2008b, Salvador.
- PERONDI, E.A. **INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE SISTEMAS MECÂNICOS**. 3.ed., Porto Alegre, 2010. P. 62-66.

## APÊNDICE:

### COMPARAÇÃO ENTRE CIRCUITOS DE ACIONAMENTO DAS VÁLVULAS SOLENÓIDES

O circuito de acionamento das válvulas da versão anterior do Projeto Controlgás pode ser representado pelo diagrama esquemático abaixo.



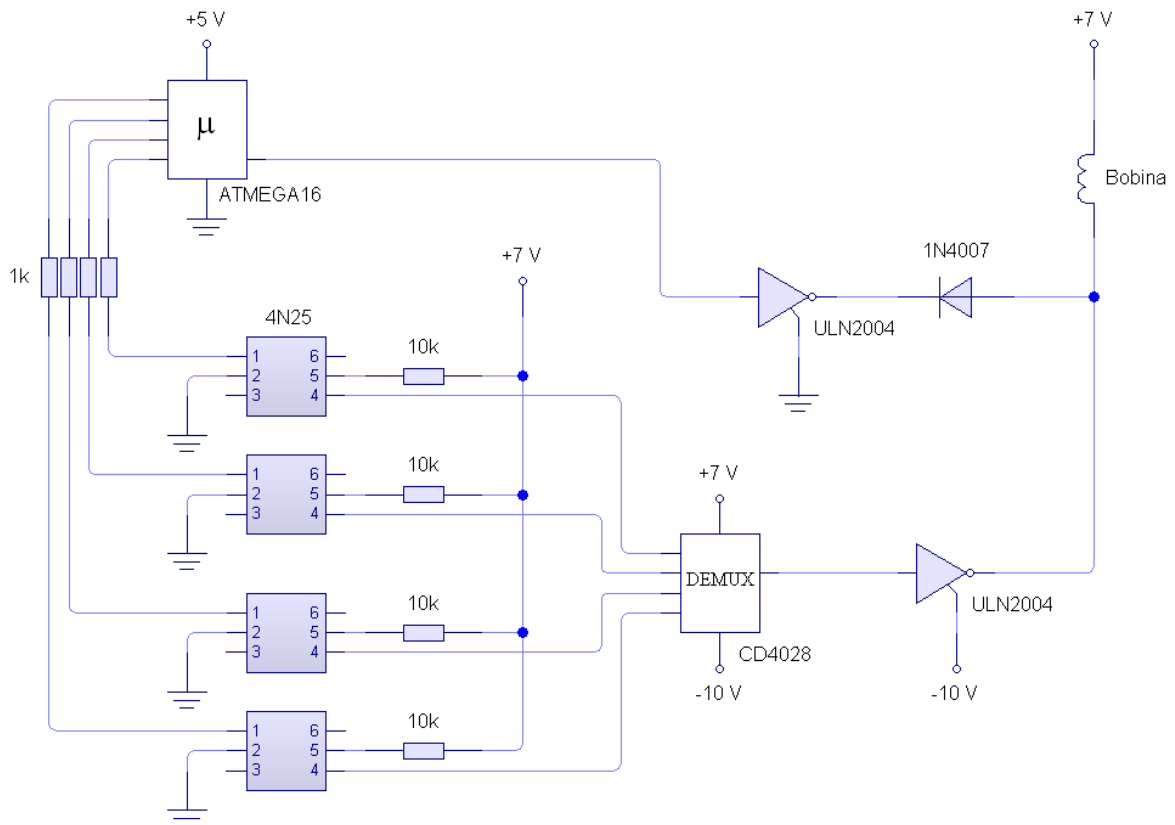
As tensões de referência necessárias para este circuito são de 0 V, +5 V e +18 V. O conjunto de componentes necessários para acionar as válvulas dos dez queimadores e a geral era composto por:

- 22 transistores PNP (**BC327**);
- 20 diodos (**1N4007**);
- 21 resistores;
- 4 circuitos integrados do modelo **74LS07**, cada um contendo 6 canais de *buffers*;
- 1 demultiplexador, circuito integrado modelo **SN74154N**.

O preço total desse circuito<sup>1</sup> resulta em um valor aproximado de **R\$ 22,23**. As dimensões da placa que acomoda os *drivers* das bobinas e o microcontrolador (**ATMEGA16**) são de 174 x 96 mm.

<sup>1</sup> Baseado nos preços disponibilizados, em dezembro de 2011, pelo catálogo *on-line* da empresa Farnell Newark, distribuidora de componentes eletrônicos e instrumentos de medição.

O circuito da versão desenvolvida em 2011 pode ser simplificado pelo diagrama abaixo:



As tensões de referência necessárias para este circuito são de -10 V, 0 V, +5 V e +7 V. O conjunto de componentes necessários para acionar as válvulas dos dez queimadores e a geral era composto por:

- 4 circuitos integrados do modelo **ULN2004**, contendo 7 canais de transistores *Darlington*;
- 10 diodos (**1N4007**);
- 8 resistores;
- 4 opto-acopladores (modelo **4N26**);
- 1 demultiplexador , circuito integrado modelo **CD40228**.

O preço total desse circuito<sup>2</sup> resulta em um valor aproximado de **R\$ 9,51**. As dimensões da nova placa que acomoda os *drivers* das bobinas e o microcontrolador (**ATMEGA16**) são de 100 x 100 mm.

<sup>2</sup> Também baseado nos preços disponibilizados, em dezembro de 2011, pelo catálogo *on-line* da empresa Farnell Newark, distribuidora de componentes eletrônicos e instrumentos de medição.