

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA – CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JOÃO VICENTE BALVEDI GAIEWSKI  
KELVIN DE ALMEIDA KOZAKEVITCH  
MÁRIO AUGUSTO CARNASCIALI MENEZES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MICROFORNO ELÉTRICO  
UTILIZANDO CONTROLADOR PID**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA  
2015**

JOÃO VICENTE BALVEDI GAIEWSKI  
KELVIN DE ALMEIDA KOZAKEVITCH  
MÁRIO AUGUSTO CARNASCIALI MENEZES

## **DESENVOLVIMENTO DE UM MICROFORNO ELÉTRICO UTILIZANDO CONTROLADOR PID**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Metodologia Aplicada ao TCC, do Curso Superior de Engenharia industrial Elétrica com ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Dr. Valmir de Oliveira

Coorientador: Dr. Ismael Chiamenti

**CURITIBA  
2015**

JOÃO VICENTE BALVEDI GAIEWSKI  
KELVIN DE ALMEIDA KOZAKEVITCH  
MÁRIO AUGUSTO CARNASCIALI MENEZES

## DESENVOLVIMENTO DE UM MICROFORNO ELÉTRICO UTILIZANDO CONTROLADOR PID

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 15 de julho de 2015.

---

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.  
Coordenador de Curso de  
Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Automação

---

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma.  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Automação do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Valmir de Oliveira, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Ismael Chiamenti, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Coorientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Jaime Favretto, Me.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Valmir de Oliveira, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Automação

## RESUMO

GAIEWSKI, João Vicente Balvedi, KOZAKEVITCH, Kelvin de Almeida, MENEZES, Mário Augusto Carnasciali, **Desenvolvimento de um Microforno Elétrico Utilizando Controlador PID**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Automação, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Este trabalho de conclusão de curso consiste no projeto, montagem, programação, controle e análise da operação, de um microforno elétrico com controlador PID, implementado a partir de um microcontrolador. O Microforno tem como principal característica a temperatura de operação até 1000 °C. Sua aplicação inicial será o tratamento térmico e a caracterização de sensores em fibra ótica, porém poderá ser utilizado em outras atividades que requeiram uma área quente de pequeno volume e temperaturas daquela ordem. Foram dimensionados microcontrolador, cabos de alimentação, dispositivos de chaveamento, sensor de temperatura, resistência de aquecimento, e todos os demais dispositivos e componentes elétricos e eletrônicos para atender tal aplicação. Soluções para o isolamento térmico também foram atendidas. Além disso foram descritos as características e os circuitos de potência e aquisição de dados, assim como a implementação do controlador PID no microcontrolador. Por fim, foram apresentados os resultados encontrados para a curva de aquecimento do forno que comprovaram o adequado funcionamento do produto.

**Palavras chave:** Forno Elétrico, Controle de Temperatura, Isolamento Térmico.

## ABSTRACT

GAIIEWSKI, João Vicente Balvedi, KOZAKEVITCH, Kelvin de Almeida, MENEZES, Mário Augusto Carnasciali, **Development of an Electric Micro-oven Utilizing a PID Controller.** Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Automação, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

This project relays the building, programing, control, and analysis of an electrical micro-oven, with PID control implemented by a microcontroller. The micro-oven's main usage is to execute maintenance of optic-fiber cables, aside from other possible uses, and its size, heat area, maximum temperature, microcontroller, source cables, switching devices, temperature sensors, resistances, and all other instruments, devices and electrical components where designed to fill this main application featuring a complete relation of all the components that where utilized in the project, and a definition of why where they chosen, when compared to their similar ones, along with a complete explaining off all the components themselves. Also includes a thoroughly explaining of the PID control method used in the micro-oven's temperature control, and in conclusion, relates the final results of the heating curve found in the practical testing of the micro-oven, and proves the adequate functioning of the final built project.

**Keywords:** Electric Oven, Temperature Control, Thermal Insulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do efeito Seebeck. ....	20
Figura 2 - Efeito Seebeck. ....	20
Figura 3 - Termopares tipo K. ....	22
Figura 4 - Diagrama de blocos do processo de controle. ....	25
Figura 5 - Tiva C TM4C123G LaunchPad. ....	27
Figura 6 - PWM Simples AC sem modulação. ....	28
Figura 7 - PWM Simples AC com modulação 90 °. ....	29
Figura 8 - PWM simples em corrente contínua. ....	30
Figura 9 - PWM Múltipla AC, modulação mudando o número de pulsos. ....	31
Figura 10 - PWM Múltipla AC, modulação alterando a largura dos pulsos. ....	31
Figura 11 - PWM Senoidal AC básico. ....	32
Figura 12 - Funcionamento PWM Senoidal. ....	32
Figura 13 - Controle Liga-Desliga. ....	34
Figura 14 - Ação de um controlador tipo PID. ....	36
Figura 15 - Forno Elétrico montado. ....	38
Figura 16 - Forno, Transmissor e Circuito Controlador. ....	39
Figura 17 - Forno, Corte Frontal. ....	39
Figura 18 - Forno Corte Superior. ....	40
Figura 19 - Forno Corte Lateral. ....	40
Figura 20 - Circuito de Controle. ....	42
Figura 21 - Circuito de Aquisição de Dados. ....	43
Figura 22 - Aplicação dos limites do sinal. ....	44
Figura 23 - Limites do Sinal de Controle. ....	45
Figura 24 - Back-Calculation and Tracking. ....	45
Figura 25 - Curvas Comparativas do Sistema Anti Wind-Up. ....	47
Figura 26 - Aplicação do Anti Wind-up no código. ....	48
Figura 27 - Display LCD Nokia 5011 Vista Frontal. ....	48
Figura 28 - Display LCD Nokia 5011 Vista Traseira. ....	49
Figura 29 - Resultados do sistema para diferentes valores de coeficientes. ....	50
Figura 30 - Aproximação dos resultados para diferentes valores de coeficientes. ....	50
Figura 31 - Curva de esfriamento natural do sistema. ....	52

Figura 32 - Resultados do sistema para um step de 450 °C. ....	52
Figura 33 - Resposta do sistema a entrada em rampa. ....	53
Figura 34 - Comparação entre duas entradas de rampas diferentes .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga específica superficial ( $W/cm^2$ ).....	16
Tabela 2 - Propriedades de resistências utilizadas em fornos.....	17
Tabela 3 - Propriedades de isolantes e refratários utilizados em fornos .....	18

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1	TEMA .....	7
1.1.1	Delimitação do Tema .....	8
1.2	PROBLEMAS E PREMISAS .....	8
1.3	OBJETIVOS .....	9
1.3.1	Objetivo Geral.....	9
1.3.2	Objetivos Específicos .....	9
1.4	JUSTIFICATIVA .....	10
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	10
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	11
<b>2</b>	<b>FORNOS ELÉTRICOS.....</b>	<b>12</b>
2.1	CLASSIFICAÇÃO DE FORNOS ELÉTRICOS .....	13
2.1.1	Fornos a Resistência .....	13
2.1.2	Fornos de Indução.....	14
2.1.3	Fornos a Arco .....	15
2.2	RESISTÊNCIA.....	15
2.3	ISOLANTES E REFRATÁRIOS .....	18
2.4	SENSORES DE TEMPERATURA.....	19
2.4.1	Termopares.....	19
2.4.2	Resistências Metálicas (RTDs).....	22
2.4.3	Termistores .....	22
2.4.4	Relé de Estado Sólido .....	23
<b>3</b>	<b>CONTROLE .....</b>	<b>24</b>
3.1	CONTROLE ANALÓGICO.....	24
3.2	CONTROLE DIGITAL .....	24
3.2.1	Descrição do Controle de Processo .....	24
3.3	MICROCONTROLADORES.....	25
3.3.1	Microcontroladores no controle de temperatura .....	26
3.3.2	Tiva C <i>Series</i> TM4C123G.....	26
3.4	AQUISIÇÃO DE DADOS .....	27
3.4.1	ADC ( <i>Analog-to-Digital Converter</i> ) .....	27

3.5	<i>PULSE WIDTH MODULATION (PWM)</i> .....	27
3.5.1	PWM Simples .....	28
3.5.2	PWM Múltipla .....	30
3.5.3	PWM Senoidal.....	31
3.5.4	Acionamento.....	33
3.6	TIPOS DE CONTROLE .....	33
3.6.1	Controle Liga-Desliga .....	33
3.6.2	Controle Proporcional.....	34
3.6.3	Controle Proporcional-Integral (PI).....	34
3.6.4	Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) .....	35
<b>4</b>	<b>EXECUÇÃO DO PROJETO</b> .....	<b>37</b>
4.1	FORNO.....	37
4.2	CIRCUITO .....	41
4.2.1	Transistor (BC548) .....	41
4.2.2	Optoacoplador .....	41
4.2.3	Transmissor de Temperatura (TxBlock).....	41
4.2.4	Montagem do Circuito .....	42
4.2.5	Adequações ao Projeto do Código do Microcontrolador .....	43
4.2.5.1	Aquisição do Sinal e Determinação do Valor de Temperatura .....	43
4.2.5.2	Efeito Anti Wind-Up do termo Integrador do PID .....	44
4.2.6	LCD Nokia 5110 .....	48
4.3	MEDIÇÕES .....	49
4.4	CONCLUSÕES .....	55
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

Na indústria, a cada dia é mais intensa a busca por materiais mais resistentes, duráveis e com qualidades particulares. Muitas daquelas características, alguns materiais só conseguem pelo processo de fusão ou através de tratamento térmico. Para cada tipo de material a ser trabalhado há um certo tipo de forno mais recomendável (GUERRA, 2006).

Independente do meio de transmissão de calor que se utilize, os fornos são classificados segundo a função que desempenham. Dada a enorme diferença de potência térmica entre os grandes fornos empregados nas transformações metalúrgicas (altos-fornos) e fornos laboratoriais para ensaios, são determinantes as distinções entre suas especificações térmicas (ALVES, 2008).

Para aplicações laboratoriais, se destacam os fornos tipo Mufla, Cadinho e os Tubulares. Fornos tipo Mufla são fornos com câmaras no formato de cubo ou paralelepípedo, dotados com porta frontal. Este forno é muito utilizado em tratamentos térmicos, teste de ignição, fusão e análises gravimétricas. O forno tipo Cadinho possuem câmaras verticais abertas na parte superior e fechados no fundo, podendo ser fabricados com câmaras de seção circular, quadrada ou outros formatos (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

Sob a denominação de Forno Tubular são enquadrados os fornos que possuem câmaras aquecidas com comprimento muito maior que a área de seção transversal, sendo predominantemente construídos com seções transversais circulares, abertas em ambas as extremidades. Para fornos menores, o controle de temperatura é instalado em gabinete independente e são projetados para o uso sobre bancada (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

Como exemplo de aplicação de fornos tubulares tem-se a produção e manutenção de fibra ótica, a qual é necessária temperatura elevada, do nível de 800°C. Chegando a ter partes do processo de produção que podem chegar até 2000°C (FREUDENRICH,2009). Fornos presentes no mercado que fornecem estas temperaturas geralmente tem tamanhos muito grandes para algumas aplicações,

tais como a produção de sensores em fibra ótica baseados em redes de Bragg regenerada - RFBG (CANNING *et al.*, 2009), e terão rendimento baixo e problemas inerentes ao grande volume da área aquecida. Sendo que está sendo lidado com fibras óticas com diâmetros da ordem de centenas de micrometros e comprimento a ser aquecido de poucos milímetros.

Sendo assim o tema principal do trabalho é o desenvolvimento de um microforno elétrico que atenda aos requisitos de temperatura e tenha dimensões adequadas para se trabalhar com fibras óticas, além de apresentar elevada estabilidade térmica.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

O tema para o trabalho de conclusão de curso é o projeto de um microforno elétrico com controle proporcional integral derivativo (PID). O sistema é gerenciado através de um microcontrolador. O forno tem as dimensões da área aquecida na ordem de centímetros, operara na faixa de temperatura entre 20°C (ambiente) e 1000°C, para efetuar o tratamento térmico e caracterização de sensores em fibra ótica e em outros substratos. Apresenta também elevado grau de isolamento térmico, para que a temperatura ao redor do forno fique o mais perto possível da temperatura ambiente (limitando à 50 °C).

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

O forno anteriormente disponível para o trabalho na Universidade tem a área aquecida com 50 cm de comprimento e diâmetro de 5 cm. A necessidade é de um forno com dimensões na área quente da ordem de 10 cm de comprimento a diâmetro de 1 cm. Um forno menor diminui as perdas e o consumo, facilita a aplicação e tem um custo menor.

Foi necessária também a aquisição de um termopar tipo K (- 270 °C até 1200 °C), na ordem de tamanho requerida pelo projeto, pois este foi montado na área aquecida do forno. O aquecimento é produzido por resistência de níquel-cromo, adequada para trabalhar com corrente elevada e pode funcionar em temperatura nominal entre 800 °C e 1000 °C por um longo período de tempo da ordem de meses

e de forma ininterrupta.

A área quente do forno deve ser isolada do ambiente, de maneira que a temperatura no exterior do forno deve ser o mais próximo possível da temperatura ambiente. Para que se obtenha esse comportamento, são utilizados blocos refratários de lã de rocha ou cerâmica.

O controle do sistema é realizado por controlador proporcional integral derivativo – PID, implementado em microcontrolador. Através disso são possíveis a programação de ciclos de aquecimento, com o menor *overshoot* possível (a temperatura do processo ultrapassa o *setpoint* durante as rampas de aquecimento e somente após um dado tempo retorna para aquele valor) e estabilidade em temperatura com tolerância para variação máxima de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  em patamares entre 800 e 1000  $^{\circ}\text{C}$ .

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Objetivo geral do trabalho é o projeto e fabricação de um microforno elétrico com dimensões da área quente de 10 cm de comprimento e diâmetro de 1 cm. A faixa de temperatura pode ser ajustada desde a ambiente até 1000  $^{\circ}\text{C}$ . A região mais estável está entre 800 e 1000  $^{\circ}\text{C}$ . Este microforno possui controle PID executado em microcontrolador.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Efetuar estudo bibliográfico sobre controladores PID;
- Desenvolver solução para elevação de temperatura através de resistência elétrica;
- Solucionar o problema do isolamento térmico através da aplicação de diferentes materiais refratários; desenvolver o sistema de acionamento e controle eletroeletrônico;
- Definir melhor controlador a ser utilizado para o caso;
- Montar protótipo e ensaiá-lo em laboratório específico;

- Desenvolver rotinas de controle para a temperatura;
- Caracterizar o forno em diferentes níveis de temperatura e tempos de aquecimento.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de microfornos elétricos tem muitas aplicações laboratoriais e industriais. São úteis em aplicações onde o grande volume da área quente limita ou dificulta sua aplicação e também apresentam maior eficiência e eventualmente menor custo. Tratando-se da questão do espaço físico ocupado pelo equipamento, uma das vantagens de se possuir um equipamento com pequenas dimensões, possibilita a sua utilização em várias posições e lugares diferentes.

A partir da análise experimental e do desenvolvimento de um protótipo foi adquirido um maior conhecimento sobre termoeletricidade, dispositivos de controle de temperatura, isolamento térmico e também foi atendida uma importante necessidade laboratorial e industrial.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi desenvolvido sobre três estruturas principais: microforno para alta temperatura, programação de microcontrolador e Controle PID. Tais assuntos são amplamente abordadas na literatura e em artigos científicos ou através da internet. Além de terem sido utilizados em várias aulas teóricas e práticas.

O microforno elétrico é composto por material isolante térmico e aquecido por resistência elétrica. A temperatura e a operação do forno são controladas por um circuito microcontrolado e um controlador proporcional integral derivativo (PID). A isolação térmica do forno proporciona uma temperatura externa próxima à temperatura ambiente. O microcontrolador é programado para executar as funcionalidades do microforno. Através de um *driver* de potência (relé de estado sólido - SSR) a corrente é aplicada à resistência que aquece o forno, através da atuação do PID com base na especificação dos parâmetros de aquecimento. O controlador PID gerencia o tempo de aquecimento do forno, conforme programação do usuário, e procura reduzir o *overshoot* ao atingir a temperatura desejada. Além

disso ele é responsável por eliminar o erro de estado estacionário para que se tenha a temperatura estabilizada ao redor de 800 a 1000°C (OGATA,2010).

A partir das pesquisas bibliográficas foi necessário adquirir materiais que fossem compatíveis com o tipo de operação do forno, como um material isolante térmico adequado, uma resistência elétrica adequada à faixa de temperatura de operação, o controle PID e um microcontrolador adequado ao projeto.

Foram necessários vários testes no protótipo para que fosse obtido o melhor resultado através da correta sintonia dos parâmetros do PID.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco partes principais:

O primeiro capítulo se trata da apresentação do tema e seus pontos de interesse. Fazendo uma breve introdução à tecnologia proposta, os problemas a serem resolvidos e os elementos motivacionais para a resolução do problema.

O segundo capítulo aborda os aspectos teóricos intrínsecos ao projeto, apoiados pela revisão da literatura e que dão base aos capítulos subsequentes.

O terceiro capítulo é destinado a apresentação dos conhecimentos abordados na segunda parte, mas de maneira prática, através da apresentação do projeto a ser desenvolvido.

O quarto capítulo define detalhes da montagem do protótipo, obtenção e análise dos resultados experimentais. Por último é apresentada uma conclusão onde são abordadas as dificuldades encontradas e as análises quanto ao desempenho final do microforno, além de possíveis melhorias a serem realizadas.

## 2 FORNOS ELÉTRICOS

O forno elétrico é um dos equipamentos elétricos mais conhecidos e sua utilização na indústria e em centros de pesquisa não é recente. Um forno elétrico é constituído basicamente de uma câmara de aquecimento, um conjunto de resistências elétricas e uma carcaça metálica ou cerâmica. As câmaras de aquecimento têm um papel importante, uma vez que elas determinam as perdas de calor, por esta razão elas devem ser feitas com materiais refratários e isolantes térmicos. As resistências elétricas determinam a temperatura máxima de operação do forno elétrico (GUERRA, 2006).

Os fornos devem ser projetados para transferir um fluxo de calor, de forma a manter constantes a temperatura de entrada e a vazão. É necessário que o forno gere uma quantidade de calor que supra o processo e também compense as perdas (SAMPAIO, 2011).

A indústria utiliza principalmente fornos de indução e fornos a arco. Suas principais aplicações no campo metalúrgico são a fusão de metais e o tratamento térmico. Em especial o forno de indução se destaca, pois, apresenta um menor nível de contaminação do material a ser tratado, além de apresentar um consumo de energia menor (SENAI, 2012).

Dois dos principais conceitos relacionado a fornos são temperatura e calor. Temperatura é a grandeza física associada ao estado de movimento e ou agitação das partículas que compõem os corpos. Calor é definido como sendo energia térmica em transito e que flui de um corpo para outro em razão da diferença de temperatura existente entre eles (MANUAIS ELEKTRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2010).

Uma importante propriedade dos materiais a serem trabalhados é a sua capacidade calorífica, que serve de indicativo da habilidade de um material de absorver calor da sua vizinhança. Ela representa a quantidade de energia exigida para produzir um aumento unitário de temperatura. Em termos matemáticos, a capacidade calorífica pode ser representada pela equação 1:

$$c = \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

Onde,  $dQ$  representa a energia exigida para produzir uma variação de temperatura  $dT$ . O calor específico representa a capacidade calorífica por unidade de massa.

A propriedade que caracteriza o fenômeno de transportar calor das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura é a condutividade térmica. Ela pode ser definida em termos da equação 2:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Onde,  $q$  representa o fluxo de calor por unidade de tempo por unidade de área (CALLISTER, 1999). E  $dx$  representa a distância entre as regiões em temperaturas diferentes.

## 2.1 CLASSIFICAÇÃO DE FORNOS ELÉTRICOS

Segundo Cestile (2012, p. 331), pode-se classificar os fornos elétricos em 3 grupos:

- Fornos a Resistência
- Fornos a Indução
- Fornos a Arco

### 2.1.1 Fornos a Resistência

Fornos a resistência utilizam o calor gerado pelo efeito Joule, onde uma corrente elétrica ao percorrer uma determinada resistência produz calor. Tais fornos normalmente não geram oscilações na tensão da rede que os alimentam (CESTILE, 2012).

A maioria dos processos que empregam fornos a resistência requerem uma grande precisão na temperatura da câmara de aquecimento. Em alguns processos a temperatura não pode variar bruscamente, por isso, a temperatura desejada deve ter uma taxa de variação constante até atingir o valor de regime permanente. O sinal de referência deve ser um sinal do tipo rampa até que o forno alcance a temperatura final desejada, quando passa a ser um valor constante (GUERRA, 2006).

Pode-se classificar fornos a resistência, quanto ao seu tipo de aquecimento,

em direto e indireto. No aquecimento direto, o material a ser trabalhado é colocado entre dois eletrodos e por este passa a mesma corrente elétrica do circuito de acionamento. No aquecimento indireto, o material que será trabalhado é colocado em uma câmara isolada termicamente e o calor a ser transferido se dá por condução, convecção e irradiação (GUERRA, 2006). Os fornos de aquecimento indireto possuem no seu interior elementos resistivos, que devido ao efeito joule, cedem calor ao ambiente e ao material a ser processado.

Guerra (2006, p. 332) cita alguns exemplos do emprego de fornos de aquecimento indireto, como o aquecimento de água para produção de vapor, a manutenção da temperatura de fusão do vidro a partir de um bloco de material fundido, fabricação de eletrodos de grafite utilizados em fornos de arco, manutenção do banho que permite a têmpera dos aços, entre outros.

Fornos a resistência apresentam normalmente potências de até 300 kW e rendimento típico para tratamento térmico entre 60 a 70% (MANUAIS ELEKTRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2010).

Neste trabalho se optou pelo forno a resistência por aquecimento indireto em função da necessidade de uma área quente pequena, volume reduzido do conjunto e baixa tensão de operação. O suprimento da corrente para a resistência de aquecimento é um problema importante. No sistema desenvolvido optou-se pelo uso de transformador monofásico e a corrente CA foi chaveada diretamente através de relé de estado sólido – SSR.

### 2.1.2 Fornos de Indução

O funcionamento dos fornos de indução baseia-se na indução eletromagnética. O forno consiste basicamente de um transformador com o secundário em curto-circuito e constituído apenas por uma espira. Em princípio, uma corrente alternada percorre a bobina do primário induzindo um campo eletromagnético na carga do forno, que constitui o secundário do transformador (SENAI, 2012).

Uma grande vantagem do forno de indução é o fato de se poder transferir para a carga uma potência elevada de operação, sem que as características do material processado sejam alteradas.

As tensões de operação nas bobinas variam de 60 a 600V, dependendo da

regulação que se deseja. Os fornos de indução são geralmente monofásicos, sendo as bobinas de indução ligadas entre duas fases de um circuito trifásico, causando assim um desequilíbrio de correntes no sistema de alimentação (GUERRA, 2006).

### 2.1.3 Fornos a Arco

O forno a arco, como sugere o nome, é um forno elétrico que funciona utilizando-se do arco voltaico para o aquecimento de materiais. O arco voltaico é um fenômeno que ocorre quando há dois eletrodos próximos que possuam uma elevada diferença de potencial entre si envolvidos por um gás com uma determinada rigidez dielétrica. Quando a diferença de potencial entre os eletrodos é elevada até o ponto de ruptura da rigidez dielétrica do gás, ocorre uma descarga elétrica entre eles, que então é denominada arco voltaico (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

O arco voltaico é a fonte de calor do forno. É utilizado principalmente para a fusão de metais, minérios e ligas metálicas, os quais terão a descarga de corrente circulando pelo próprio material para gerar o aquecimento necessário. Esse tipo de forno é utilizado geralmente em ambiente industrial, especialmente quando se trata de materiais condutores com alto ponto de fusão, por poder atingir valores acima de 1700°C (ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2013).

O forno elétrico a arco é considerado um dos melhores instrumentos na produção de aço, quando se diz respeito à versatilidade e eficiência. Ele possui alta eficiência energética, pode se adequar à necessidade de produção parando, diminuindo, ou aumentando a mesma, pode ser operado até com 100% de carga sólida, independe de reações químicas e pode produzir qualquer tipo de aço (SILVA, 2011).

## 2.2 RESISTÊNCIA

Para que o forno atinja a temperatura de operação desejada, deve ser feita uma análise do material e do valor da resistência necessária (CESTILE, 2012).

Algumas condições são apresentadas a seguir:

- Ter um elevado ponto de fusão (na ordem de 25% superior à temperatura de

fusão do material a ser trabalhado);

- Ser resistente à corrosão na temperatura de operação;
- Ter resistividade elevada;
- Apresentar um elevado grau de dureza em altas temperaturas.

Existem alguns materiais que satisfazem as condições anteriormente citadas, sendo assim, utilizados como resistências para fornos. Entre os quais, pode-se citar:

- Nicromo V (80% Ni, 20% Cr);
- Cromax (30% Ni, 20% Cr, 50% Fe);
- Kantal (Cr, Al, Co, Fe).

Geralmente estes materiais são constituídos de fios ou fitas dispostos em forma de espiral, podendo ser ligadas em circuitos monofásicos ou trifásicos e em corrente contínua (CESTILE, 2012). O forno do presente projeto operara em corrente alternada obtida diretamente de um transformador monofásico.

A carga específica superficial é um dos principais dados que se deve levar em consideração para escolher a seção da resistência. Esta representa a taxa de transferência de potência cedida por unidade de superfície, sua unidade é dada em  $W/cm^2$  (CESTILE, 2012). A Tabela 1 apresenta alguns valores da carga específica superficial para diferentes tipos de ligas e temperaturas.

**Tabela 1 - Carga específica superficial ( $W/cm^2$ )**

Tipo de liga	Temperatura do forno ( $^{\circ}C$ )						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
80%Ni – 20%Cr	5,0	3,2	2,2	1,5	1,1	0,9	-
30%Ni – 20%Cr	4,6	3,0	2,0	1,4	1,0	0,8	-
20%Cr – 5%Al	8,0	5,8	4,3	3,1	2,2	1,3	-
Cr-Al-Co	3,9	3,5	3,0	2,4	1,5	-	0,8

Fonte: Cestile, 2012.

A potência desejada depende do material trabalhado e do tempo em que se deseja atingir a condição de operação. A equação (3) fornece a potência do forno de acordo com a quantidade de energia necessária para sua operação.

$$P_f = \frac{E \times P_m}{\eta \times t} \quad (3)$$

Onde,  $P_f$  representa a potência do forno,  $\eta$  é o rendimento, que pode variar de 0,6 a 0,8,  $t$  é o tempo desejado para o material atingir a sua temperatura de trabalho, "E" é a energia consumida no processo e  $P_m$  é o peso do material a ser trabalhado (CESTILE, 2012).

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades dos materiais utilizados nas resistências de fornos.

**Tabela 2 - Propriedades de resistências utilizadas em fornos**

Material	Composição	Resistividade	Ponto de fusão (°C)
Nicromo	Ni-Fe-Cr	1,1221	1350
Nicromo V	Ni-Cr	1,0806	1400
Cromax	Fe-Ni-Cr	0,9975	1380
Nirex	Ni-Cr-Fe	0,9809	1395
Nilvar	Fe-Ni	0,8046	1425
Bronze comercial	Cu-Zn	0,0415	1040
Ni puro	Ni	0,0997	1450
Platina	Pt	0,1060	1773
Aço	Fe	0,0999	1535
Zinco	Zn	0,0592	419
Molibdênio	Mo	0,0569	2625
Tungstênio	W	0,0552	3410
Alumínio	Al	0,0267	660
Ouro	Au	0,0242	1063
Cobre	Cu	0,0172	1083
Prata	Ag	0,0163	960

Fonte: Cestile, 2012.

Para se determinar o diâmetro do fio da resistência utiliza-se a equação (4).

$$D_f = 34.4 \times \sqrt{\frac{\rho}{P_e} \times \frac{P_{ff}}{(N_p \times V)}} \quad (4)$$

Onde “ $D_f$ ” é o diâmetro do fio resistor, “ $\rho$ ” é a resistividade do material resistor, “ $V$ ” é a tensão de alimentação, “ $P_e$ ” é a carga específica superficial do resistor, “ $P_{ff}$ ” é a potência por fase do forno, e “ $N_p$ ” é o número de circuitos resistores em paralelo (CESTILE, 2012).

E para se determinar o comprimento do fio resistor utiliza-se a equação (5).

$$L_f = \frac{R_f}{R} \quad (5)$$

Onde “ $L_f$ ” é o comprimento do fio, “ $R_f$ ” é a resistência do fio e “ $R$ ” é a resistência, por unidade do fio resistor (CESTILE, 2012).

## 2.3 ISOLANTES E REFRATÁRIOS

Segundo Santos (2010, p. 16), a cerâmica refratária é uma classe importante dos materiais utilizados em larga escala. As propriedades típicas desses materiais incluem a capacidade de resistir à temperaturas elevadas sem fundir ou decompor, e a capacidade de permanecer inertes quando expostos a ambientes severos. A habilidade para proporcionar isolamento térmico é, com frequência, uma consideração importante. Dentre os usos mais comuns podem ser citados revestimentos de fornos para refino de metais, fabricação de vidro, tratamento térmico metalúrgico e geração de energia. A Tabela 3 apresenta a densidade e a condutividade térmica para materiais comumente utilizados no isolamento de fornos.

**Tabela 3 - Propriedades de isolantes e refratários utilizados em fornos**

Material Isolante	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Condutibilidade
		Térmica (Kcal/m.h.°C)
Lã de vidro	200	0,037
Lã de rocha	180	0,031
Algodão (tecido)	81	0,048

Fonte: Lopes, 2004.

De acordo com a NBR 9575/2010, o isolamento térmico é a camada com a função de reduzir o gradiente de temperatura que atua sobre a camada impermeável, de modo a protegê-la contra os efeitos danosos do calor excessivo.

A lã de rocha ou lã mineral, é obtida ao se fundir minerais de sílica em um forno e vertendo a massa fundida em um jato de vapor a grande velocidade. O produto resultante, parecido com a lã, é quimicamente inerte e incombustível, e apresenta baixa condutividade térmica devido aos espaços com ar entre as fibras (MENQUER, 2013).

Segundo Santos (2010, p. 16), a cerâmica refratária é uma classe importante dos materiais cerâmicos utilizados em larga escala. As propriedades típicas destes materiais incluem a capacidade de resistir a temperaturas elevadas sem fundir ou decompor, e a capacidade de permanecer inertes quando expostos a ambientes severos. A habilidade para proporcionar isolamento térmico é com frequência uma consideração importante. Dentre as aplicações típicas, podem ser citados revestimentos de fornos para refino de metais, fabricação de vidro, tratamento térmico metalúrgico e geração de energia.

No trabalho foram utilizadas a lã de rocha e a cerâmica refratária.

## 2.4 SENSORES DE TEMPERATURA

A temperatura é uma medida da energia cinética medida em uma amostra de material expressa em unidades de graus em uma escala padrão. Pode-se medir temperatura de muitas formas, as quais variam em preço e precisão do equipamento. Os modelos mais comuns de sensores são termopares, resistências metálicas (RTDs), e termistores (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

### 2.4.1 Termopares

Segundo Oliveira (2008, p. 13), o princípio de medição de temperatura é definido a partir da tensão elétrica gerada pela diferença de temperatura entre os dois terminais de um termopar. Ou seja, os fios do termopar serão submetidos a temperaturas diferentes, o que gera a diferença de potencial necessária para a medição, tendo como referência a temperatura de um dos terminais, geralmente a

uma temperatura de 0 °C. A utilização dos termopares é vantajosa devido a sua confiabilidade, precisão e baixo custo. O seu princípio físico baseia-se em três efeitos: os efeitos Seebeck, Peltier e Thomson.

O efeito Seebeck (Figura 1) foi descoberto por Thomas Johan Seebeck em 1821, ao observar que dois condutores diferentes ao formarem um circuito fechado com uma de suas uniões a uma dada temperatura e a outra a uma temperatura diferente, existe uma força eletromotriz que gera uma corrente que circula enquanto as temperaturas forem diferentes (COCOTA JÚNIOR, 2005).

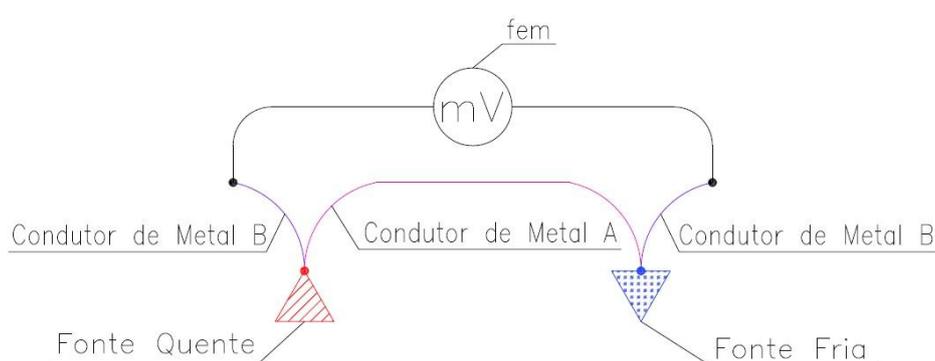


Figura 1 – Representação do efeito Seebeck.  
Fonte: Moura, 2010. Com adaptação.

Segundo Almeida (2013, p. 39) o efeito de Peltier (Figura 2) é o fenômeno inverso ao efeito Seebeck. Tal fenômeno consiste na produção de um gradiente de temperatura quando aplicada uma tensão em um circuito elétrico fechado que gera uma corrente que percorre um elemento formado por uma junção de condutores ou semicondutores distintos.

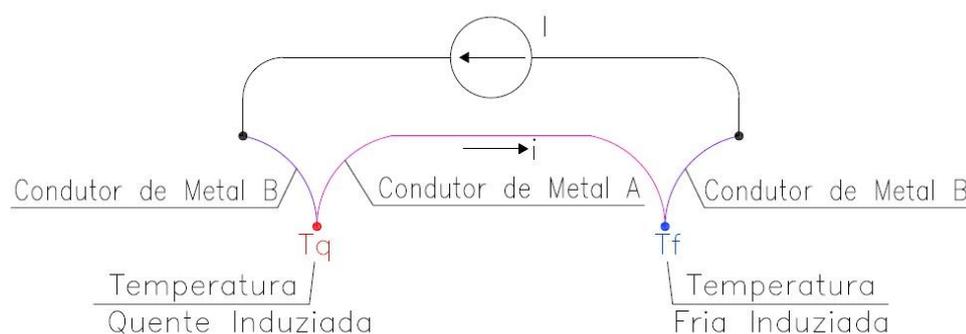


Figura 2 – Representação do efeito Peltier.  
Fonte: Moura, 2010. Com adaptação

O efeito Thomson refere-se à emissão ou absorção reversível de calor que ocorre quando uma corrente elétrica percorre um corpo condutor homogêneo no qual se mantém um gradiente de temperatura, não importando se a corrente é induzida pelo próprio termopar ou é introduzida de forma externa (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Justi (2009, p. 25), seleciona-se o melhor tipo de termopar para cada aplicação baseando-se na temperatura de processo, nas características ambientais, precisão e custo. Os tipos mais comuns de termopar são:

- Tipo K: Tem baixo custo e cobre temperaturas entre  $-200$  e  $1200^{\circ}\text{C}$ .
- Tipo E: Adequado para temperaturas abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ .
- Tipo J: Sua faixa de temperatura está entre  $-40$  e  $750^{\circ}\text{C}$ .
- Tipo N: Adequado para medições de temperaturas elevadas.

O termopar do tipo K é formado por fios de Alumel, como termoelemento negativo, e Chromel, como termoelemento positivo. É o termopar mais adequado para medições contínuas entre  $-200^{\circ}\text{C}$  até  $1260^{\circ}\text{C}$ . É recomendado para uso contínuo em atmosferas oxidantes ou completamente inertes (GRUPO ECIL). O termopar de tipo K foi selecionado para o projeto por atender à faixa de temperatura desejada.

Segundo Oliveira (2008, p. 17), devido a sua alta resistência à oxidação, o termopar do tipo K deve ser utilizado em temperaturas superiores a  $60^{\circ}\text{C}$ , e apenas ocasionalmente em temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$ . Não deve ser utilizado em atmosferas redutoras e sulfurosas. A força eletromotriz produzida varia de  $-6.458$  mV até  $48,838$  mV. A Figura 3 apresenta a fotografia com quatro modelos de termopar tipo K.



Figura 3 - Termopares tipo K.  
Fonte: Grupo Ecil.

#### 2.4.2 Resistências Metálicas (RTDs)

Um RTD é um dispositivo feito de bobinas ou filmes de metal (normalmente de platina). Ao ser aquecida, a resistência do metal aumenta, ao ser resfriada, a resistência diminui. Quando uma corrente percorre um RTD é gerada uma tensão. Medindo esta tensão, pode-se determinar sua resistência e, então, sua temperatura. A relação entre resistência e temperatura é linear. Tipicamente, a resistência de um RTD a 0 °C é de 100  $\Omega$  e estes podem medir temperaturas de até 850 °C (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

#### 2.4.3 Termistores

Termistores são sensores de temperatura do tipo resistivo que se dividem em dois grupos conforme o sinal do coeficiente de temperatura da resistência: PTC (*Positive Temperature Coefficient*) que apresentam coeficiente de temperatura positivo (resistência aumenta com o aumento de temperatura) e NTC (*Negative Temperature Coefficient*) que apresentam coeficiente de temperatura negativo (resistência diminui conforme a temperatura aumenta) (COCOTA JÚNIOR, 2005).

Segundo Oliveira (2008, p. 10), termistores NTC são utilizados como termômetros de resistência em medições de temperatura baixa, enquanto que os termistores PTC podem ser utilizados desde dispositivos de limitação de corrente no circuito de proteção até para a substituição de fusíveis.

#### 2.4.4 Relé de Estado Sólido

O relé de estado sólido (*Solid State Relay* - SSR) é um dispositivo eletrônico usado no chaveamento de cargas resistivas ou indutivas com inúmeras vantagens sobre os relés eletromecânicos convencionais. Sua vida útil de milhões de operações, a alta velocidade de manobra sem ruído elétrico, faiscamento ou desgaste mecânico e a baixa potência necessária para seu disparo, fazem do relé de estado sólido uma opção favorável em operações nas quais o controle com alta precisão é fundamental (NOVUS, 2011).

### 3 CONTROLE

Na maioria das vezes as estratégias de controle são implementadas através de circuitos eletrônicos. Esses circuitos podem utilizar a tecnologia da eletrônica analógica ou da eletrônica digital (FUENTES, 2005).

#### 3.1 CONTROLE ANALÓGICO

O controle analógico apresenta grande velocidade de ação devido à própria natureza analógica dos sinais envolvidos no processo. Sua tecnologia é baseada nos amplificadores operacionais. Estes circuitos apesar de sua simplicidade apresentam grande versatilidade podendo implementar desde um simples comparador até um controlador proporcional integral derivativo (PID) (FUENTES, 2005).

#### 3.2 CONTROLE DIGITAL

Os controladores de processo que utilizam a tecnologia digital são implementados por meio de microprocessadores ou microcontroladores e memórias. No controle digital são necessárias conversões dos sinais elétricos analógicos em informações digitais (conversão A/D). Estas informações são processadas com uso de um *hardware* e um *software* específicos produzindo as informações de controle que novamente são traduzidos em sinais analógicos (conversão D/A).

O controle digital tem apresentado grande evolução com a produção de microcontroladores com características cada vez mais complexas e velocidades de processamento cada vez maiores (FUENTES, 2005).

##### 3.2.1 Descrição do Controle de Processo

O controle de processo obedece à sequência disposta na Figura 4.

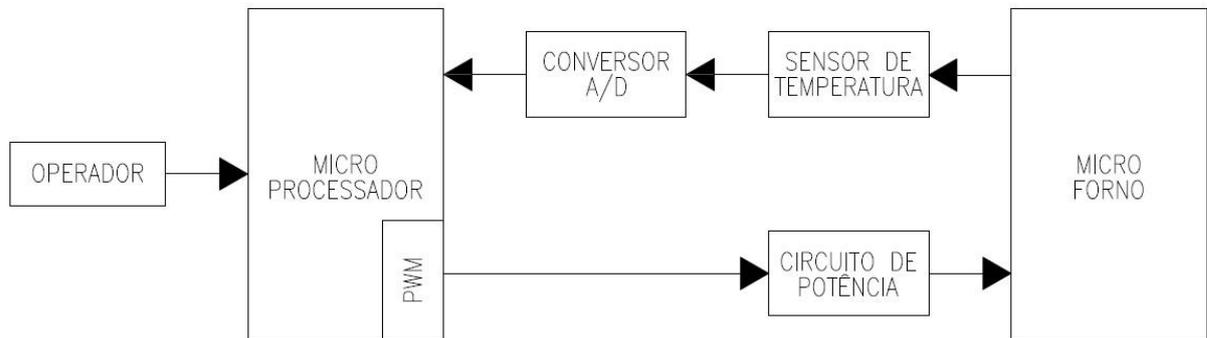


Figura 4 - Diagrama de blocos do processo de controle.  
 Fonte: MELO, Rosecléa L. O., 1985. Com adaptação.

1. O operador armazena no microcontrolador o valor da temperatura desejada (valor de *setpoint*).
2. O microcontrolador lê o valor fornecido pelo conjunto sensor, conversor A/D e faz uma comparação com o valor desejado.
3. Usando esta diferença, o programa de controle envia um sinal para o circuito de potência para fazer com que tal diferença tenda à zero.
4. O sistema permanece no ciclo 2-3 até que se atinja a temperatura e o tempo necessário do processo.

### 3.3 MICROCONTROLADORES

Segundo Silva (2009, p. 17), microcontroladores são dispositivos eletrônicos que contém microprocessador, memórias, interfaces de entrada e saída e diversos periféricos úteis ao desenvolvimento de sistemas tais como: temporizadores, comparadores, geradores de *clock*, conversores analógico/digital e também conversores digital/analógico. Geralmente microcontroladores contém uma grande quantidade de periféricos internos, reduzindo assim a necessidade de utilização de componentes externos.

Antigamente os controladores eram desenvolvidos analogicamente, hoje podem ser substituídos por programas de controle, tornando-os mais versáteis, flexíveis e precisos. Além disso, o microcontrolador pode detectar situações de alarme, permitindo uma melhor proteção do processo controlado contra o mau

funcionamento e contra a destruição do mesmo, além de possibilitar a obtenção de tabelas, gráficos e dados referentes ao estado do controlador, facilitando assim sua compreensão (MELO, 1985).

Para controle de processos específicos, o microcontrolador permite a implementação de programas simples, onde normalmente circuitos eletrônicos elaborados ou manipulação de dados complexos são necessários (MELO, 1985).

Pela sua fácil manipulação, são encontrados microcontroladores em várias situações, como em semáforos, eletrodomésticos, balanças eletrônicas, calculadoras, telefones públicos, microterminais, controle para carregamento de baterias e controles de acesso (SILVA, 2012).

### 3.3.1 Microcontroladores no controle de temperatura

O controle de temperatura consiste basicamente no controle de um processo de transferência de calor. Devido a própria natureza do processo, seu tempo de resposta é, em geral, maior do que quando se controla outras variáveis. O controle preciso e econômico de temperatura de fornos elétricos é um excelente campo de aplicação dos microcontroladores. Permitindo que o sistema seja expandido sem dificuldades (MELO, 1985).

### 3.3.2 Tiva C Series TM4C123G

O Tiva C Series TM4C123G *LaunchPad Evaluation Board* é uma plataforma de baixo custo produzida para avaliação dos microcontroladores baseados na família Cortex-M4, Figura 5. O projeto do *Tiva LaunchPad* coloca em destaque a interface USB 2.0 do microcontrolador TM4C123GH6PMI, módulo de hibernação e controle PWM (*pulse width modulation*). O Tiva C Series *LaunchPad* também possui botões programáveis e um LED RGB para aplicações customizada (TEXAS INSTRUMENTS, 2013, tradução própria). Essa plataforma foi a escolhida e utilizada no projeto, devido ao relativo baixo custo e atendimento das necessidades.

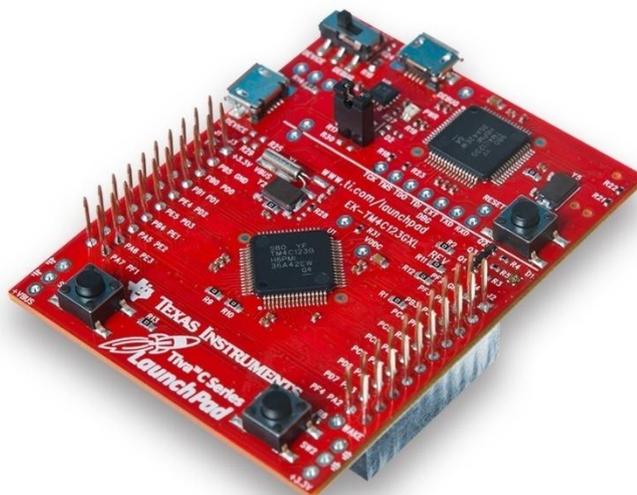


Figura 5 - Tiva C TM4C123G *LaunchPad*.  
Fonte: Texas Instruments.

## 3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

### 3.4.1 ADC (*Analog-to-Digital Converter*)

Segundo Dias (2010, p.18), conversores ADC são utilizados quando há interesse na alteração de sinais analógicos para digitais em um processo chamado de digitalização, que pode ser dividido em três etapas, a amostragem, que é a representação do sinal como uma sequência periódica de valores, a quantização, que é a representação aproximada de um valor do sinal por um conjunto finito de valores, e a codificação, que é uma associação de números binários para cada valor quantizado. Níveis de tensão (entrada analógica) são convertidos em números binários (saída digital), normalmente, com relação linear entre a entrada e a saída.

### 3.5 *PULSE WIDTH MODULATION* (PWM)

Modulação por largura de pulso ou "*Pulse Width Modulation*" é um método de controle de tensão digital que produz uma saída analógica, ou muito próxima

disso (HIRZEL, 2014). De acordo com Ahmed (2000, p.366), existem em geral 3 grupos de PWM, que são os seguintes:

- PWM simples;
- PWM múltipla;
- PWM senoidal.

### 3.5.1 PWM Simples

Quando se quer uma tensão de saída AC, esse método de controle garante um certo valor constante de tensão durante um determinado tempo para cada semiciclo da tensão de saída. Este pulso tem um valor de tensão “E+” no semiciclo positivo ou “E-” no semiciclo negativo. A largura deste pulso varia de 0 a  $T/2$  (sendo  $T$  o período da tensão de saída), e essa modulação de largura de pulso é utilizada para o controle da tensão de saída (AHMED, 2000). Como exemplo, pode-se utilizar a forma de onda da tensão de saída de um inversor monofásico para entender o funcionamento do PWM. A Figura 6 mostra a forma de onda do PWM sem modulação:

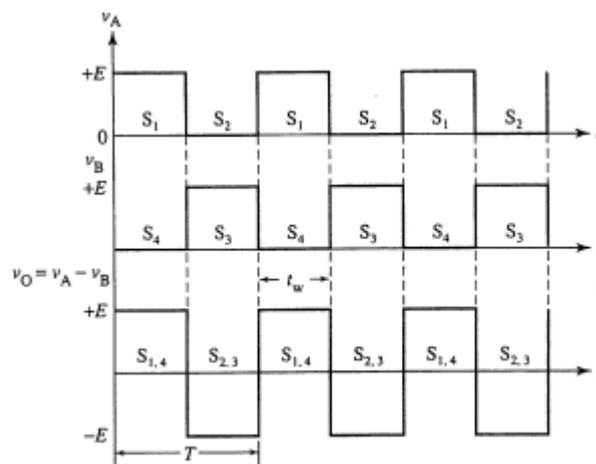


Figura 6 - PWM Simples AC sem modulação.  
Fonte: Ahmed, 2000.

Possui-se então 4 chaves,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ . Para que seja obtida a máxima tensão de saída, as chaves 1 e 4 permanecem ligadas durante um semiciclo, enquanto as chaves 2 e 3 permanecem ligadas durante o outro semiciclo. Para que se efetue o controle de tensão, basta que se descole a fase de  $S_3$  e  $S_4$  em relação à de  $S_1$  e  $S_2$ . Adiantando a fase de  $S_3$  e  $S_4$ , a largura do pulso de tensão contínua

diminui, como mostrado na Figura 7, onde o intervalo de condução de S3 e S4 é adiantado em  $90^\circ$ :

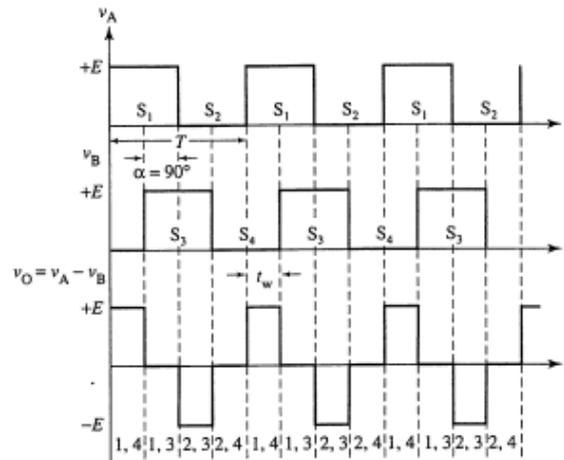


Figura 7 - PWM Simples AC com modulação  $90^\circ$ .  
Fonte: Ahmed, 2000.

O que resulta em uma tensão de saída com pulsos de largura iguais à metade do semiciclo da forma de onda. Há também a modulação simples para corrente contínua, que consiste somente de um valor de tensão fixo em corrente contínua (por exemplo 5 V) e um valor mínimo (por exemplo 0V). Dentro de um determinado período  $T$ , há um determinado pulso de tensão, com largura que pode variar de 0 a  $T$ . O tempo em que esse pulso ocorre em termos de porcentagem em relação ao período  $T$  se chama *Duty Cycle*. O controle de uma tensão de saída em DC pode ser feito a partir da modulação mostrada na Figura 8 de uma forma de onda de tensão, onde cada espaço entre linhas verdes equivale a um período  $T$  inteiro (HIRZEL, 2014). O forno deste projeto possui controle de temperatura através de PWM em corrente contínua.

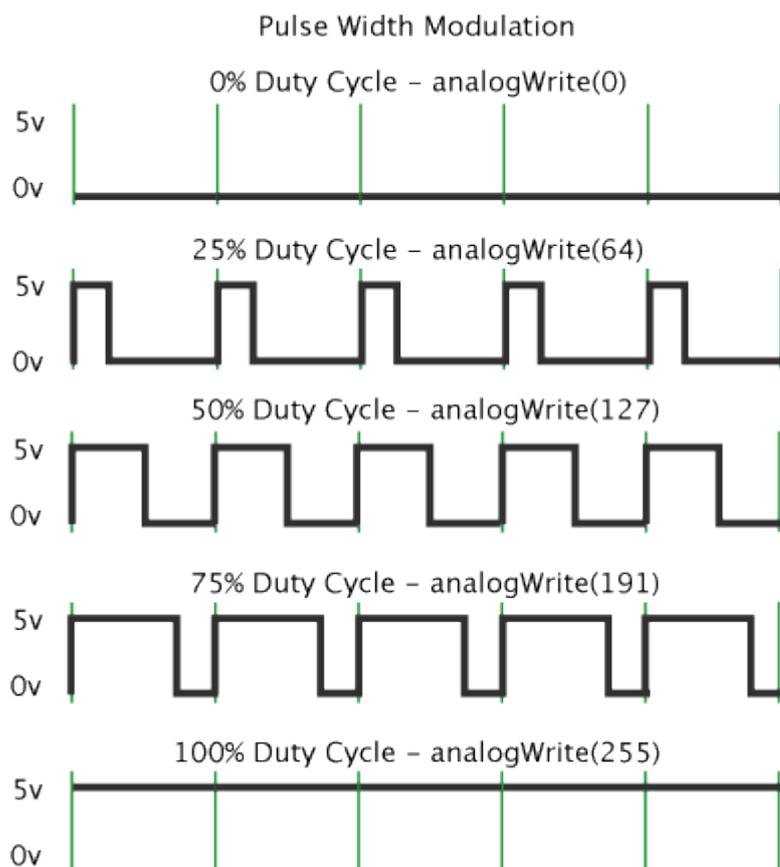


Figura 8 - PWM simples em corrente contínua.  
Fonte: Hirzel, 2014.

### 3.5.2 PWM Múltipla

A modulação múltipla consiste em chavear o valor fixo de tensão “E”, de maneira a criar um trem de pulsos com amplitude constante para cada semiciclo. Os métodos de controle variam em mudar o número de pulsos em cada semiciclo, mantendo as larguras dos mesmos, ou variar a largura dos pulsos enquanto o número de pulsos por semiciclo permanece constante (AHMED, 2000). Nas Figuras 10 e 11 são mostradas PWM múltiplas AC, variação do número de pulsos e variação da largura do pulso respectivamente.

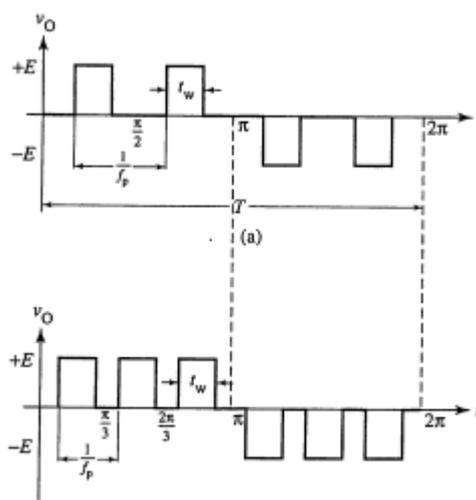


Figura 9 - PWM Múltipla AC, modulação mudando o número de pulsos.  
Fonte: Ahmed, 2000.

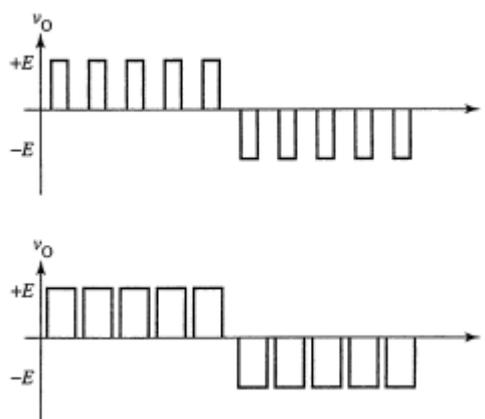


Figura 10 - PWM Múltipla AC, modulação alterando a largura dos pulsos.  
Fonte: Ahmed, 2000.

### 3.5.3 PWM Senoidal

Em modulação senoidal, a tensão controlada de saída também é representada através de um trem de pulsos, porém, os pulsos apresentam largura maior à medida que se aproximam do pico da onda senoidal de referência, como pode-se ver na Figura 11 (AHMED, 2000):



Figura 11 - PWM Senoidal AC básico.  
Fonte: Ahmed, 2000.

Para efetuar essa forma de controle é necessária uma onda senoidal de referência ( $V_r(t)$ , amplitude  $V_m$  e frequência  $F_m$ ), uma onda triangular ( $V_c(t)$ , amplitude  $V_c$  e frequência  $F_c$ ), e um circuito comparador. A partir das interseções entre as ondas  $V_r(t)$  e  $V_c(t)$  o comparador determina os pontos de chaveamento, e a largura de pulso ( $T_w$ ) é determinada pelo espaço de tempo em que a onda  $V_c(t) < V_r(t)$  no semiciclo positivo e  $V_c(t) > V_r(t)$  no semiciclo negativo da onda senoidal, como mostra a Figura 12 (AHMED, 2000):

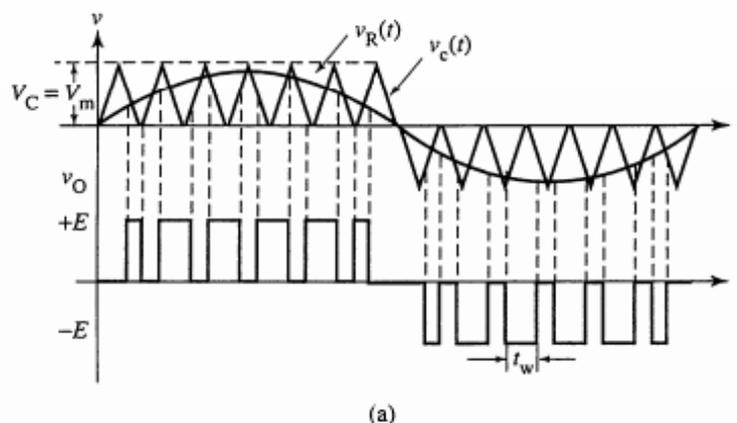


Figura 12 - Funcionamento PWM Senoidal.  
Fonte: Ahmed, 2000.

Este tipo de modulação é utilizada para emular uma tensão de saída analógica senoidal. De acordo com Ahmed, (2000, p.369) o controle nessa modulação utiliza dois parâmetros:

- $N$ , a relação de frequência  $F_c/F_m$  de funcionamento do *chopper* (onda quadrada) determina o número de pulsos em cada semiciclo da tensão de saída;
- $M$ , o índice de modulação determinado pela razão  $V_m/V_c$ . Este parâmetro

determina a largura dos pulsos da tensão de saída e assim o valor RMS da mesma.

#### 3.5.4 Acionamento

Neste trabalho, o acionamento do forno foi feito através de sinal PWM em corrente contínua acionando um relé de estado sólido (SSR). O SSR foi inserido entre a alimentação da resistência de aquecimento e o secundário do transformador. Através do sinal PWM é determinado o chaveamento do SSR, resultando na variação e controle da temperatura do forno. De acordo com o valor de temperatura do forno, o PWM vai de 0 a 100 % de *duty cycle*. O controlador PID faz o ajuste no *duty cycle* necessário para manter o forno na temperatura normalmente entre 800 -1000 °C. Não há problema em selecionar temperatura inferior a 800 °C, porém na aplicação inicial, há interesse maior na faixa de 800 a 1000 °C. A onda PWM é gerada pelo microcontrolador com valor 0 ou 3.3V e através do uso de um optoacoplador são adequadas ao valor de acionamento do SSR, garantindo também, adequada proteção entre o circuito de potência e o de controle.

### 3.6 TIPOS DE CONTROLE

A principal característica de um controlador é a maneira pela qual ele atua para manter a variável controlada no valor desejado. Sob esse aspecto, distinguem-se os controles dos tipos Liga-Desliga, Flutuante e Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (MELO, 1985).

#### 3.6.1 Controle Liga-Desliga

Nesta estratégia de controle, o sinal de controle que é aplicado ao processo apresenta um valor nulo ou um determinado valor fixo. A ação de controle gerada poderá ligar (*on*) ou desligar (*off*) o elemento atuador do processo (FUENTES,2005).

Trata-se de uma estratégia bastante simples e de larga aplicação prática (ex. geladeira, bomba para caixa d'água, compressor para pintura, entre outros). Este controle pode ser usado em processos que permitem uma grande oscilação do valor

da grandeza a ser controlada. O controle Liga-Desliga fornece a variável manipulada dois valores distintos, conforme o valor desejado (MELO, 1985). A Figura 13 apresenta a variação da temperatura do processo e o correspondente controle da válvula de combustível em um sistema de aquecimento por chama.

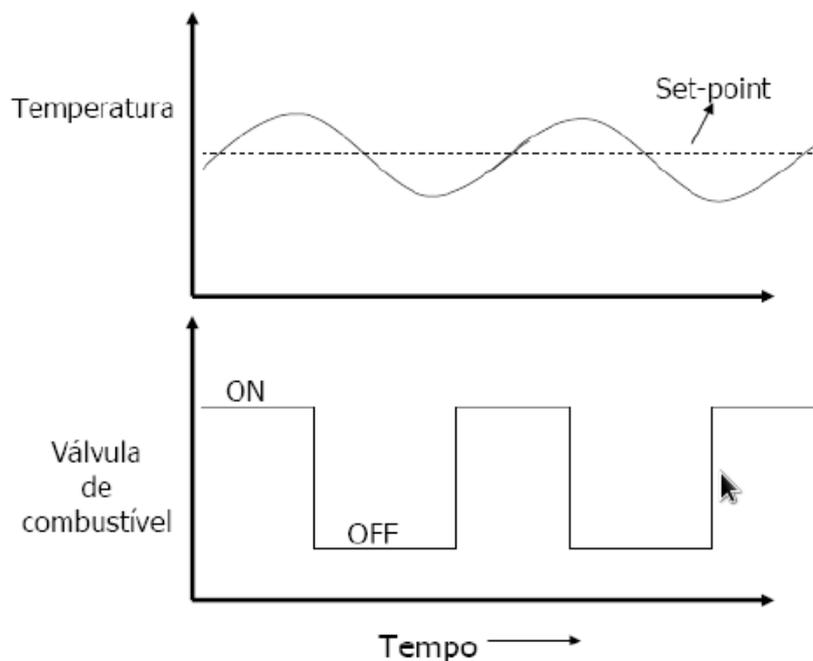


Figura 13 - Controle Liga-Desliga.  
Fonte: Fuentes, 2005.

### 3.6.2 Controle Proporcional

Este controlador produz na sua saída um sinal de controle que é proporcional ao erro, ou seja, quanto maior o erro maior será a ação corretiva produzida pelo controlador na saída. Esta proporcionalidade é definida pela constante  $k_p$ , que define o fator de amplificação do sistema (ganho) (FUENTES, 2005).

Esta estratégia é largamente empregada no controle industrial, pois minimiza os erros ao longo do tempo, permanecendo apenas um desvio em relação ao *setpoint* denominado *off-set* (FUENTES, 2005).

### 3.6.3 Controle Proporcional-Integral (PI)

O controle PI é uma combinação da ação proporcional com uma ação de integração. O integrador permite que o erro de regime se anule com o passar do

tempo. Desta forma o bloco integrador é usado frequentemente quando se precisa de uma convergência precisa do valor. Da mesma forma que existe um ganho  $k_p$  para o proporcional, existe também um ganho  $k_i$  para o integrador (SOUZA, 2004).

#### 3.6.4 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o algoritmo de controle mais utilizado em todo o mundo para sistemas de controle industrial. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite que engenheiros o operem de uma forma simples e direta (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

Segundo Couto (2006, p. 19), o controlador PID é uma combinação dos controladores proporcional, integral e derivativo. Ou seja, soma-se o sinal de saída de um amplificador, um integrador e um diferenciador, todos com o sinal de erro aplicado na entrada. A ação integral está diretamente ligada à precisão do sistema sendo responsável pelo erro nulo em regime permanente. A ação derivativa tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema ao mesmo tempo em que torna a resposta do sistema mais rápida devido ao seu efeito antecipatório.

Segundo Matas (2012, p. 22), o controlador proporcional é o controlador mais simples utilizado na família PID, a relação entre o sinal de entrada e saída é explicitada pela equação 6, sendo  $K_p$  a constante do proporcional,  $e(t)$  o erro da entrada pela saída e  $u(t)$  o valor aplicado na planta.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (6)$$

Segundo Couto (2006, p. 16), o integrador é um circuito que executa a ação matemática da integração, que pode ser descrita como somatório dos produtos dos valores instantâneos da grandeza de entrada por pequenos intervalos de tempo. A lei de controle que define a relação de entrada e saída do controlador PI é dada pela equação 7, sendo  $K_i$  a constante do integrador.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

Segundo Matas (2012, p. 23), o controlador do tipo derivativo tem como

característica minimizar o erro entre a referência e a saída. O comportamento deste controlador é definido pela equação 8, na qual  $K_d$  é a constante do derivativo.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

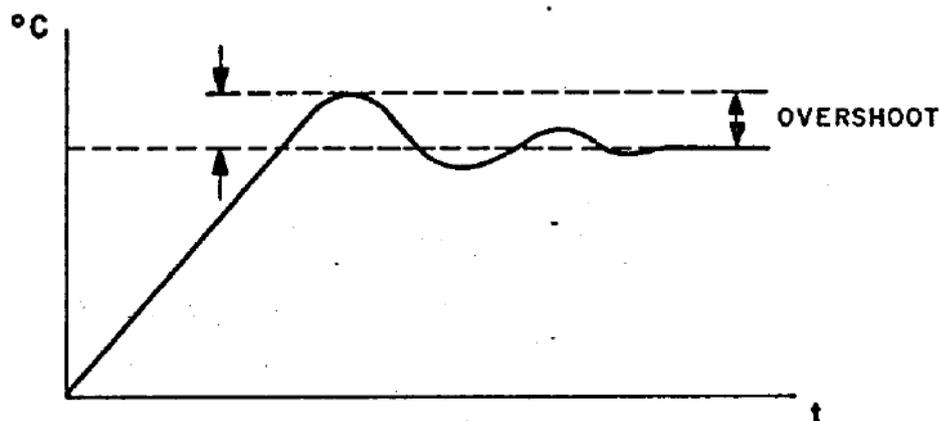


Figura 14 - Ação de um controlador tipo PID.  
Fonte: MELO, 1985.

A figura 14 mostra a curva típica do controle de temperatura PID, destacando o *overshoot* no *setpoint* da temperatura seguido da estabilização.

## 4 EXECUÇÃO DO PROJETO

Com base nos recursos tecnológicos já expostos, foram projetados a carcaça do forno, os circuitos eletroeletrônicos, a programação do microcontrolador, a integração e a caracterização do forno.

### 4.1 FORNO

Na fase do protótipo o forno foi confeccionado utilizando placas refratárias e lã cerâmica. A figura 15 mostra uma foto do forno operando à 900 °C. Foi feita uma cavidade nas duas placas refratárias. No interior da cavidade acomodou-se um tubo cerâmico de alumina com 1 cm de diâmetro interno, 10 cm de comprimento e parede de 1 mm de espessura. Ao redor do tubo de alumina foi confeccionada a resistência elétrica de níquel-cromo com fio de 1 mm de diâmetro e resistência da ordem de 1Ω.

A alimentação da resistência de aquecimento foi feita utilizando fio com isolamento para alta temperatura (fibra de vidro e silicone) e conector tipo Sindal em porcelana. Um termopar tipo K foi montado no interior do tubo de alumina e conectado à placa do microcontrolador.

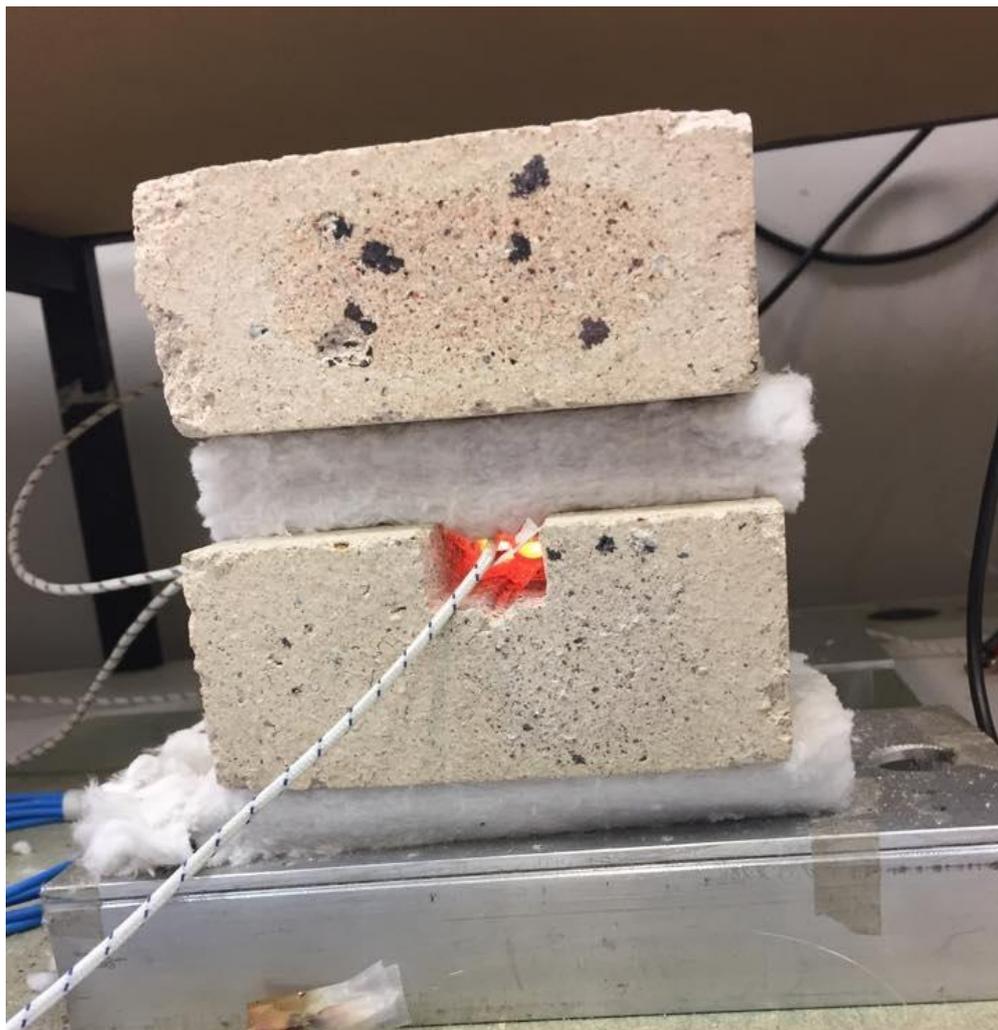


Figura 15 - Forno Elétrico montado.  
Fonte: Autoria própria.

O forno foi montado com base na estrutura vista na figura 15, a fim de facilitar a inserção da sonda do termopar e a manutenção necessária da resistência na parte aquecida, durante a fase de experimentos e análise do controle de temperatura. O sinal do termopar (Cabo AZ/BR visto na figura 15 e figura 16) então é conectado ao transmissor de sinal de temperatura, que somente então é ligado no circuito de controle do microcontrolador, como observado na figura 16.

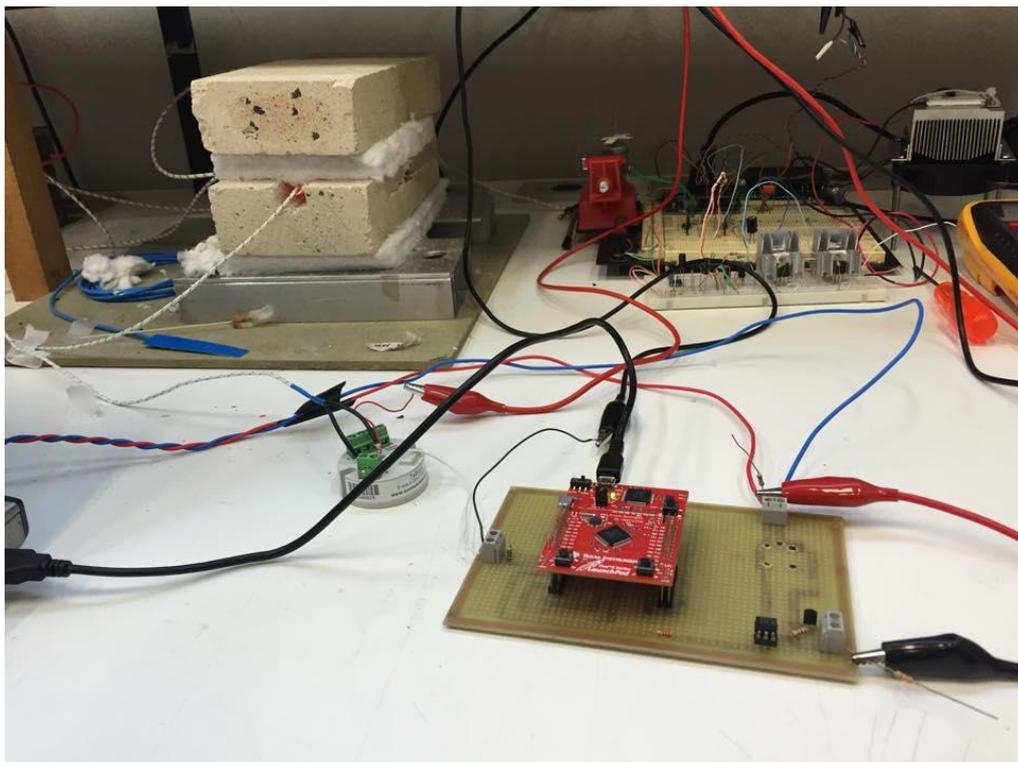
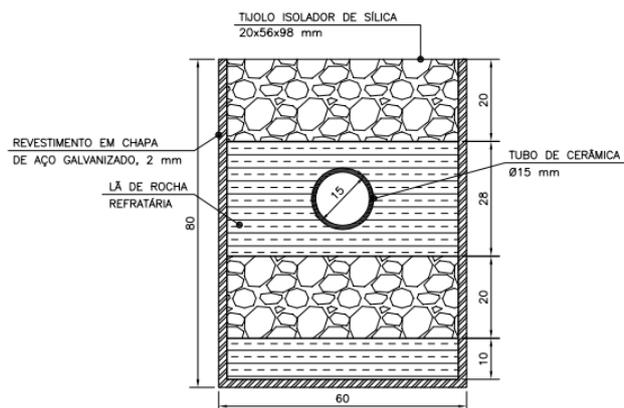


Figura 16 - Forno, Transmissor e Circuito Controlador.  
Fonte: Autoria própria.

O relé de estado sólido alimenta resistência no interior do forno, e de acordo com o controle PID o sinal PWM é variado e a temperatura do forno é controlada. Pode-se observar o projeto do forno nas figuras 17, 18 e 19.



MICROFORNO ELÉTRICO  
CORTE A-A  
ESCALA: 1:1

Figura 17 - Forno, Corte Frontal.  
Fonte: Autoria própria.

Na figura 17 pode-se observar o corte frontal do forno, a abertura de 15mm no tubo de cerâmica será a região em que será inserida a fibra ótica. Pode-se

observar também os tijolos isoladores de sílica que serão colocados acima da lâ de rocha.

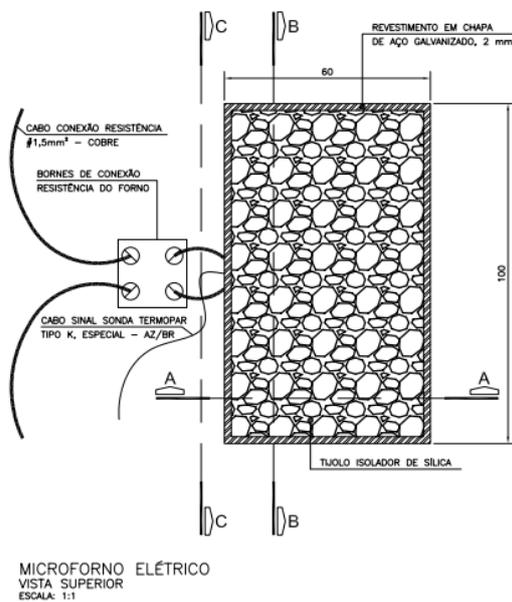


Figura 18 - Forno Corte Superior.  
Fonte: Autoria própria.

Na figura 18 pode-se observar o corte superior do forno, incluindo o tijolo isolador de sílica superior e suas dimensões.

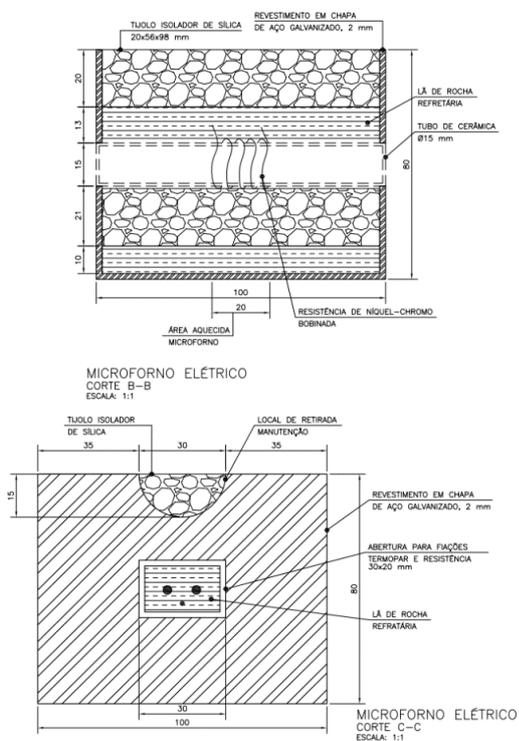


Figura 19 - Forno Corte Lateral.  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 19 pode-se observar os cortes laterais do forno, nos quais pode-se ver onde é colocada a resistência de níquel-cromo bobinada e a área a ser aquecida.

## 4.2 CIRCUITO

Para a montagem do circuito foi utilizado um transistor (BC548), um optoacoplador, um relé de estado sólido (TZC-40<sup>a</sup>, Metaltex) e um transmissor de temperatura (TxBlock).

### 4.2.1 Transistor (BC548)

O transistor BC548 é modelado para uso geral com junção NPN bipolar, utilizado para chaveamento ou amplificação, é projetado para baixas correntes (no máximo 100 mA) e baixas tensões (no máximo 65 V) (PHILLIPS, 1994).

### 4.2.2 Optoacoplador

O optoacoplador é um isolador opticamente acoplado. Um LED que emite ondas infravermelhas é acoplado a um fototransistor NPN. Este circuito integrado é fornecido em um encapsulamento de seis pinos (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, 2000). Foi utilizado o optoacoplador TIL111.

### 4.2.3 Transmissor de Temperatura (TxBlock)

O transmissor de temperatura é um equipamento utilizado para a conversão de um valor de resistência ou valor de tensão em um sinal correspondente proporcional (WIKA, 2007).

O TxBlock é um transmissor de temperatura tipo 4-20 mA a dois fios, para montagem em cabeçote. Permite ao usuário configurar facilmente o sensor e a faixa de medição de temperatura que serão utilizados no processo. A corrente de saída tem comportamento linear em relação a temperatura medida pelo sensor selecionado (NOVUS, 2008).

#### 4.2.4 Montagem do Circuito

A figura 20 apresenta o diagrama esquemático do circuito de acionamento da resistência de aquecimento. O sinal PWM proveniente do microcontrolador, aciona o optoacoplador e através do transistor BV548A aciona o relé de estado sólido.

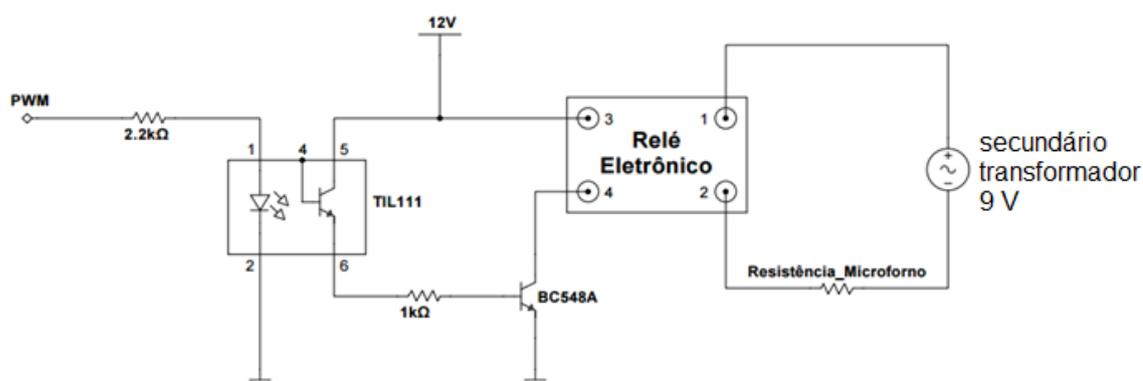


Figura 20 - Circuito de Controle.  
Fonte: Autoria própria.

A tensão  $9 V_{CA}$  proveniente do secundário do transformador fornece a energia elétrica para o aquecimento.

Para a aquisição de dados foi utilizado um termopar do tipo K que foi ligado a um transmissor de temperatura (TxBlock) que foi configurado para funcionar de 0 a  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou seja, para uma temperatura de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  o transmissor fornece uma corrente de 4 mA ao circuito e para uma temperatura de  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  este fornece uma corrente de 20 mA ao circuito. O transmissor de temperatura foi ligado a uma fonte de 12 V e a um resistor de  $150\ \Omega$ , o ADC do controlador foi ligado em paralelo com este resistor. Como a corrente do circuito varia entre 4 a 20 mA, a tensão neste resistor varia entre 0.6 e 3 V, que são tensões compreendidas na faixa de valores suportada pelo ADC do controlador.

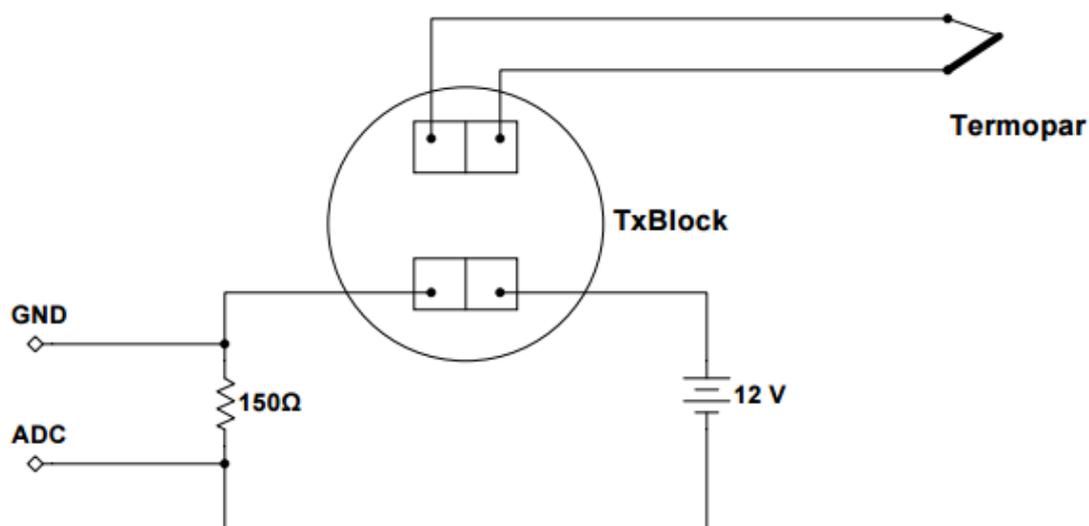


Figura 21 - Circuito de Aquisição de Dados.  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.5 Adequações ao Projeto do Código do Microcontrolador

O código utilizado para o controle PID do microcontrolador segue uma lógica com duas funções principais, a de aquisição do sinal de temperatura e assim a interpretação dos dados para que o controlador obtenha esse valor e a função do controlador PID de ajustar o *Duty-Cycle* do PWM com o intuito de acertar a temperatura do forno ao valor requerido. Algumas particularidades do funcionamento do código serão discriminadas a seguir.

##### 4.2.5.1 Aquisição do Sinal e Determinação do Valor de Temperatura

O controlador utilizado no circuito para o controle da temperatura do forno possui um conversor analógico digital, utilizado para aquisição do sinal de temperatura do termopar. A resolução do ADC é de 12 bits, com valor máximo de 4095, que equivale à aplicação de 3,3 Vdc à entrada respectiva do ADC. Foram utilizados limites de 0,6 V<sub>DC</sub> para o valor mínimo de temperatura (0 °C) e 3 V<sub>DC</sub> para o valor máximo de temperatura (1200 °C).

Desta maneira, foi definido o cálculo para a conversão do valor lido pelo ADC que varia entre 745 (0,6 Vdc ou 0 °C) e 3723 (3 Vdc ou 1200 °C), para o seu

valor correspondente em graus celsius, para auxiliar na coleta de dados, obtenção das curvas PID e auxílio interface do usuário. O cálculo ficou da seguinte maneira, equação 9:

$$T(^{\circ}C) = (ADC \cdot 0,403) - 300,052 \quad (9)$$

Sendo T a temperatura no interior do forno em graus celsius e ADC o valor lido pelo conversor analógico digital (valor inteiro entre 0 e 4095). Pode-se ver como esse cálculo foi efetuado, e a aplicação dos limites do sinal no código utilizado no microcontrolador, expresso na figura 22.

```
float getTemp(){ // 150 Ohms -> 0.6 V ~ 3V (745 ~ 3723)
    ADC0_Get();
    if (ADCvalue < 740){
        temperature = -10;
    }
    else {
        temperature = ADCvalue * 0.403 - 300.052;
    }
    return temperature;
}
```

Figura 22 - Aplicação dos limites do sinal.  
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.5.2 Efeito Anti *Wind-Up* do termo Integrador do PID

Segundo Junior (2000), um dos erros que pode ocorrer num controlador PID, é quando o valor da variável de controle atinge o valor máximo do atuador, e então ocorre a saturação do sinal de controle. Isto causa a "quebra" da malha de realimentação do controlador, pois fará com que o atuador permaneça no seu limite máximo (ou mínimo dependendo da aplicação) independente da saída do processo ou do sinal de entrada. Para Haffner (2008), essa limitação dos sinais para o funcionamento do controlador pode ser definida como visto na figura 23. Como está sendo utilizado um controlador PID, que possui um termo integral, novamente como diz Junior (2000), esse erro entre o sinal e o controle continuará a ser integrado e o termo I do controlador continuará crescendo e se tornará muito grande ou demasiadamente "carregado", da onde vem o termo "*Wind-up*" do inglês. Para que o



A *Back-Calculation and Tracking* faz com que, quando há saturação na saída do controlador, o termo integral será recalculado de forma que o seu valor permanece no limite que pode ser gerado pelo atuador. Pode-se ver na figura 24 que o sistema possui uma realimentação adicional, onde a entrada e a saída do atuador geram um erro, que é realimentado ao bloco integrador. Quando não há saturação do sinal de entrada, esse erro é zero, e o controlador opera normalmente. As variáveis vistas na figura 24 são discriminadas como:

$T_t$  - Constante Dinâmica de Tempo à ser utilizada no Anti *Wind-up* (chamada de  $T_t$ );

$T_d$  - Constante de tempo do bloco Derivativo (chamada de  $T_d$ );

$T_i$  - Constante de tempo do bloco Integrador (chamada de  $T_i$ );

$K$  - Constantes de controle;

$e$  - Sinal de entrada do controlador PID;

$e_s$  - Sinal de erro entre a entrada e saída do atuador.

Quando então ocorre a saturação, o sinal de entrada do bloco integrador muda, como mostra a equação 10, para:

$$\frac{1}{T_t} e_s + \frac{K}{T_i} e \quad (10)$$

Ou em regime permanente, equação 11:

$$e_s = -\frac{KT_t}{T_i} e \quad (11)$$

Forçando então com que a entrada do bloco integrador seja zero, e evitando com que ele se "sobrecarregue". Um exemplo dessa aplicação pode ser visto na figura 25, onde a curva tracejada representa um sistema PI sem ação Anti *Wind-Up*, e a curva de linha contínua apresenta um sistema PI com ação Anti *Wind-Up*.

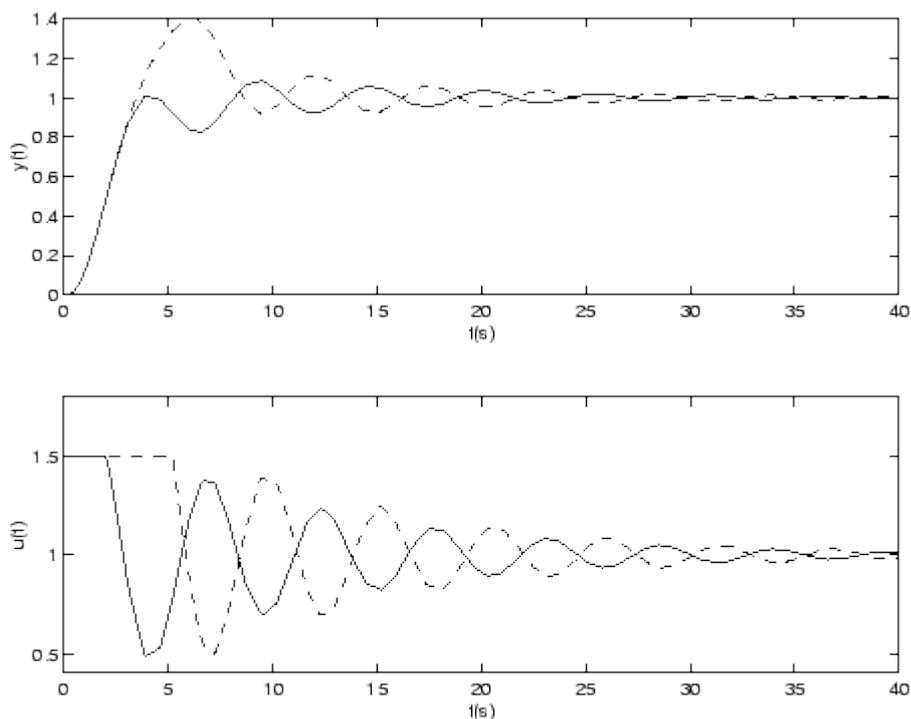


Figura 25 - Curvas Comparativas do Sistema Anti *Wind-Up*.  
Fonte: JUNIOR, (2000).

O outro método para a aplicação do Anti *Wind-Up* é o de integração condicional (JUNIOR, 2000), que consiste em desligar a ação integral quando o controle está longe do regime permanente. A ação integral é assim ativada apenas quando certas condições pré-estabelecidas são satisfeitas, caso contrário o termo integral é mantido constante, ou seja, a entrada do integrador é mantida em zero.

As condições para a integração ser inibida podem ser definidas de várias maneiras. Uma forma é desligar o integrador enquanto o sinal de erro for grande. Outra maneira é desligar o integrador somente durante a saturação. A desvantagem destas duas estratégias é que o valor do termo integral poderá ficar bloqueado em um valor muito alto enquanto o integrador permanecer desligado.

Para que seja evitado este tipo de problema uma terceira estratégia pode ser implementada. A ideia consiste em desligar o integrador somente quando o controlador está saturado e o erro é tal que provocaria um aumento da carga do integrador fazendo com que o sinal de controle ficasse mais saturado. Assim, por exemplo, se o controlador está saturado no limite máximo a ação seria desligada somente enquanto o erro fosse positivo. Entretanto, quando o sinal de erro se tornasse negativo a ação integral voltaria a ser ligada com o intuito de descarregar o

integrador.

No código do controlador utilizado na execução do projeto foi implementado o forçamento da variável de integração para o valor zero, a fim de evitar o efeito *Wind-Up*, como visto na figura 26.

```
//Integral term
if (Ik1 >= 99){           //anti wind-up
    I = 99;
}
else if (Ik1 <= 0){
    I = 0;
}
else {
    I = (Ki*T*(ek + ek1)/2) + Ik1;
}
```

Figura 26 - Aplicação do Anti *Wind-up* no código.  
Fonte: Autoria própria.

Assim, aplicando o sistema Anti *Wind-Up* no controlador PID.

#### 4.2.6 LCD Nokia 5110

Foi utilizado na montagem do circuito de controle, um display LCD, código Nokia 5110, monocromático, com 84x48 pixels, e tensão de operação 5 V<sub>DC</sub>. Pode-se ver nas figuras 28 e 29 o LCD utilizado.



Figura 27 - Display LCD Nokia 5011 Vista Frontal.  
Fonte: FlipeFlop.

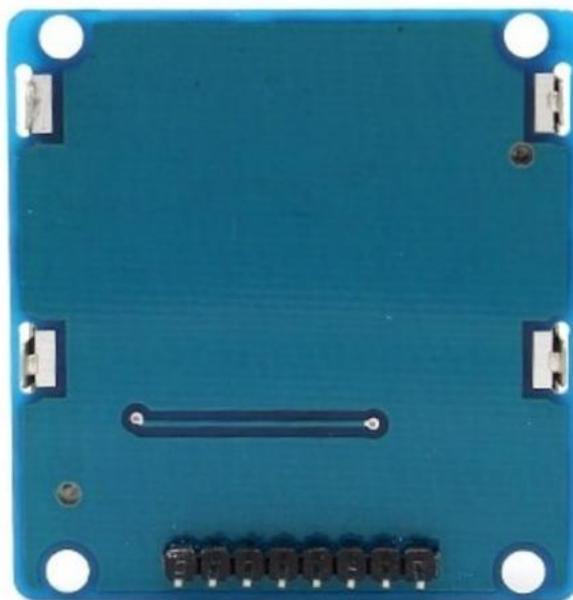


Figura 28 - Display LCD Nokia 5011 Vista Traseira.  
Fonte: FlipeFlop

O LCD foi utilizado como uma forma amigável de interface entre o operador e o forno elétrico, para indicar temperatura, estado do PID, e etc.

### 4.3 MEDIÇÕES

Para a medição dos resultados com o controlador PID foram utilizadas as leituras de temperatura do termopar do tipo K inserido no forno. Para a obtenção dos resultados desta medição foram utilizados os valores  $K_p=1$ ,  $K_i=0,01$  e  $K_d=0,25$  no controlador PID para que o sistema tivesse uma subida rápida (linha vermelha nas figuras 29 e 30) e  $K_p = 0,25$ ,  $K_i = 0,0025$  e  $K_d = 0,25$  para que o sistema tivesse uma subida lenta (linha azul nas figuras 29 e 30).

Esses valores para as constantes do controlador foram obtidos por meio de experimentos empíricos. Tais experimentos consistiram em testes iniciais para as constantes com valores unitários e posteriormente a análise de quais constantes deveriam ser incrementadas ou decrescidas de acordo com a teoria, buscando se atingir o resultado desejado.

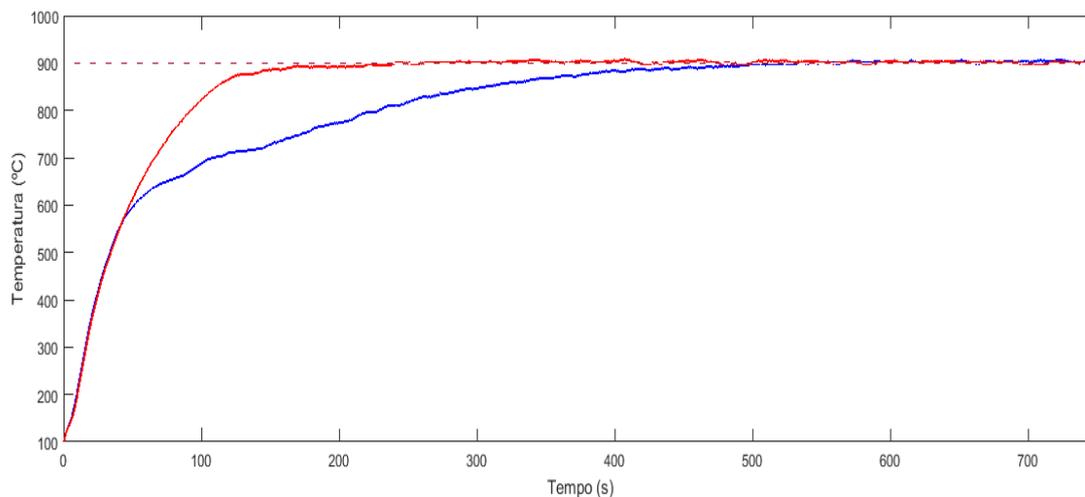


Figura 29 - Resultados do sistema para diferentes valores de coeficientes.  
Fonte: Autoria própria.

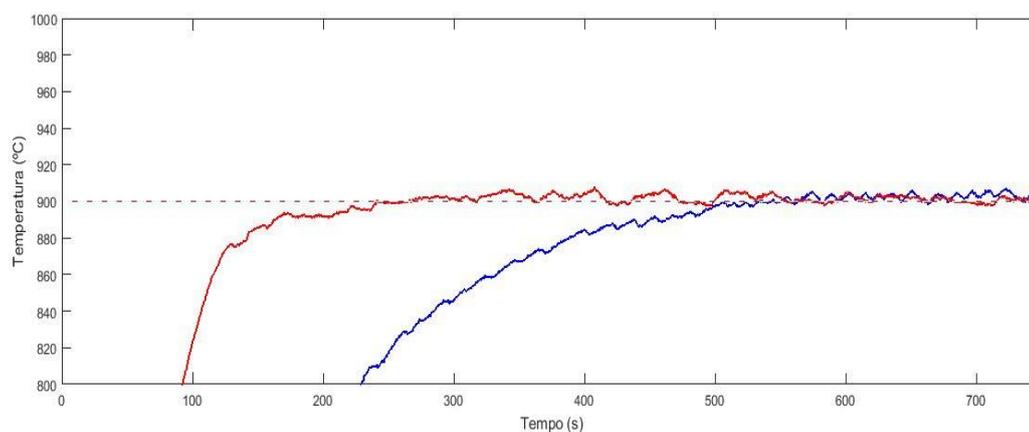


Figura 30 - Aproximação dos resultados para diferentes valores de coeficientes.  
Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados obtidos, foram calculados o percentual de *overshoot*, o tempo de subida e o tempo de assentamento para ambos os casos.

Percentual de *overshoot* para 904 °C que é o valor de pico em ambos os casos (equação 12).

$$PO = 100 \cdot \frac{904 - 900}{900} \cong 0.4\% \quad (12)$$

Para o tempo de subida, como o valor inicial foi de 100°C e o valor final foi de 900°C, foi calculado o tempo de aquecimento entre 180 e 820 °C. E foram obtidos os valores de  $t_r = 103$  s para o sistema mais rápido e  $t_r = 242$  s para o sistema mais lento.

Como o valor da temperatura não varia em mais do que 2% ao alcançar o valor de pico, o tempo de assentamento é de  $t_s = 120$  s para o sistema mais rápido e de  $t_s = 386$  s para o sistema mais lento.

Pode-se perceber que o sistema em ambos os casos permanece dentro da margem de erro máxima de  $\pm 8$  °C especificado no projeto. Porém para o sistema mais lento, este ao passar do valor de *setpoint* demora mais a cair devido ao sistema não ter como remover calor do sistema, tornando o sistema pior para o controle.

Um detalhe na comparação entre as duas respostas é a resposta inicial do sistema que permanece por um tempo igual a ambos. Isso é devido ao erro ser muito grande fazendo com que mesmo com um sistema mais lento este só apresente um comportamento diferente ao se aproximar da temperatura de *setpoint* desejado.

Outro ponto importante a se observar, é a dificuldade em se obter um tempo de subida específico com um degrau no sistema. Caso seja desejado um tempo de subida diferente é necessário alterar os valores dos coeficientes, algo que pode causar problemas como os apresentados no sistema mais lento. Um desses problemas é a demora na resposta, deixando o sistema mais oscilatório.

Para o sistema mais rápido percebe-se mais claramente a resposta exponencial do sistema tendendo a um valor limite, ou seja, para se aquecer cada vez mais é necessário cada vez mais tempo.

Na figura 31 pode-se observar a curva de esfriamento do sistema após o forno ser desligado.

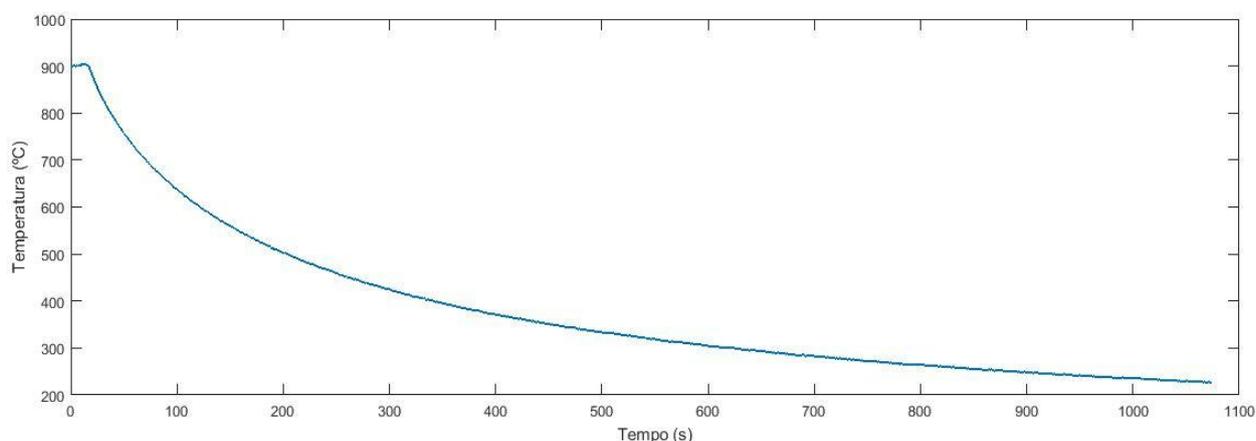


Figura 31 - Curva de esfriamento natural do sistema.  
Fonte: Autoria própria.

Esta curva mostra um comportamento exponencial decrescente onde para um valor alto de temperatura ele cai mais rapidamente e para um valor baixo de temperatura este demora mais tempo para esfriar. Importante ressaltar que este resfriamento foi obtido com a câmara do microforno fechada.

Com isso pode-se concluir que caso haja um alto valor de *overshoot* este demorará mais para diminuir em temperaturas mais inferiores, pois como mencionado anteriormente o sistema não consegue remover o calor, tendo que esperar este esfriar naturalmente para diminuir sua temperatura. Este fato ressalta a importância do microforno sempre apresentar um baixo valor de overshoot para não causar oscilações desnecessárias e aumentar com isto o tempo de assentamento

Na figura 32 pode-se observar os resultados obtidos para o sistema mais rápido com um *setpoint* de 450 °C.

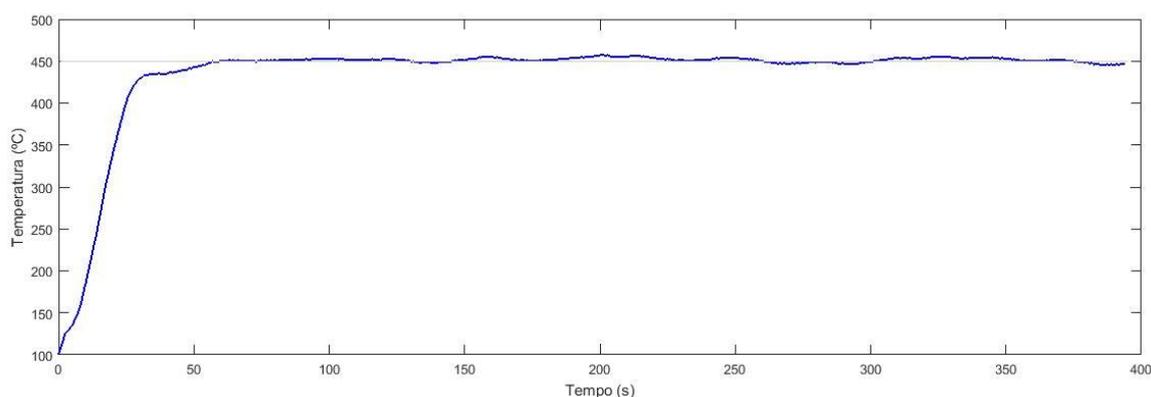


Figura 32 - Resultados do sistema para um *step* de 450 °C.  
Fonte: Autoria própria.

A resposta do sistema para um valor de *setpoint* diferente mostra ainda uma pequena flutuação de temperatura após se atingir o valor desejado, porém sem apresentar alto valor de *overshoot*. Demonstrando que este microforno pode ser utilizado para temperaturas diferentes da projetada de 900 °C, sem apresentar perdas no controle.

Outra observação para este gráfico é que para um valor de *setpoint* menor, o sistema apresenta um tempo de subida também menor. Para o *setpoint* de 450 °C o tempo de subida foi de aproximadamente 30 s em comparação ao *setpoint* de 900 °C que demorou 103 s.

A figura 33 apresenta a resposta ao sistema para uma entrada em rampa até os 900 °C.

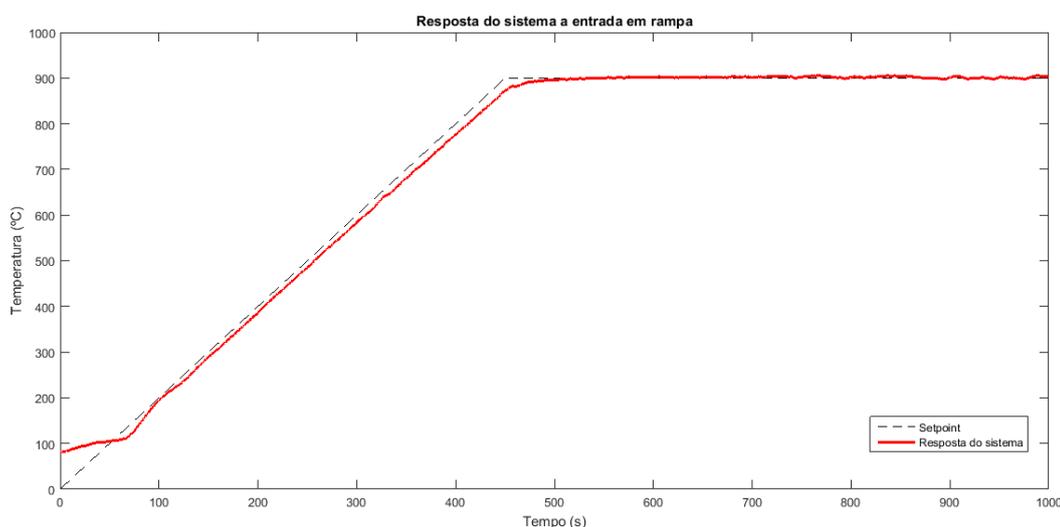


Figura 33 - Resposta do sistema a entrada em rampa.  
Fonte: Autoria própria.

Para se obter essa entrada em rampa, se incrementou o *setpoint* com o tempo até se atingir os 900 °C. Pode-se perceber que o sistema acompanhou muito bem essa rampa estando sempre a uma diferença de no máximo 12 °C. Esta resposta mostrou que o sistema permaneceu mais estável e apresentou um *overshoot* muito menor em comparação com a entrada em degrau.

A rampa da figura 33 demorou 450 s para atingir o valor desejado sendo que a temperatura no interior do microforno demorou 472 s, uma diferença de 22 s. Percebe-se que ao ligar o sistema o forno já possuía uma temperatura de aproximadamente 100 °C, e logo ao *setpoint* cruzar a temperatura medida, esta

passou a acompanhar a variação do *setpoint*.

A figura 34 apresenta duas respostas do sistema para duas rampas com tempo de subida distintos.

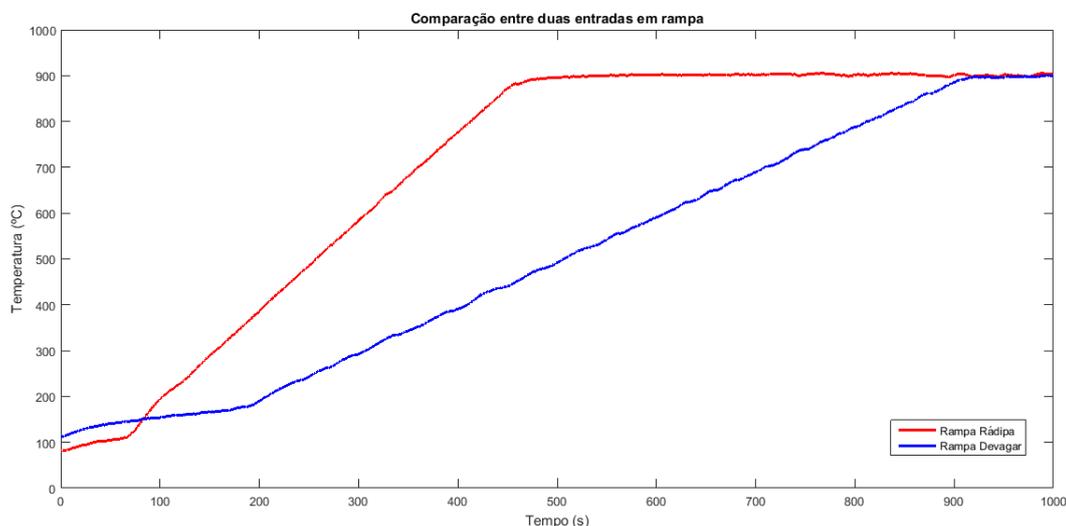


Figura 34 - Comparação entre duas entradas de rampas diferentes  
Fonte: Autoria própria.

Comparando as duas respostas das rampas, percebe-se que é possível através deste método alterar o tempo de subida de uma maneira bem mais fácil que em relação ao degrau, onde era necessário alterar os coeficientes do controlador. Para se ter um aquecimento mais rápido basta incrementar o *setpoint* com valores maiores a cada interação do loop do programa do microcontrolador. Para tornar este tempo de subida mais devagar, basta decrescer o valor do *setpoint*.

Algo importante a ser analisado neste gráfico é o fato da temperatura do sistema ser praticamente linear com o tempo. Isto garante uma variação constante da temperatura durante o aquecimento, evitando variações muito bruscas de temperatura principalmente nos instantes iniciais a se ligar o microforno.

## 4.4 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho de conclusão de curso exigiu da equipe uma grande quantidade de pesquisas e levantamentos sobre os equipamentos que deveriam ser utilizados no circuito de controle quais materiais seriam utilizados no microforno, incluindo os materiais isolantes como a lã de rocha e resistor de níquel-cromo, além dos tijolos de sílica.

A partir dos dados obtidos foi possível confeccionar um circuito de controle para que pudesse ser realizado o controle PID. Neste processo ocorreram grandes dificuldades, como a impossibilidade de utilização de um relé eletromecânico devido a frequência do PWM ser da ordem de 12 Hz e havia a necessidade de frequências mais baixas para operar este tipo de relê. Tal problema foi sanado com a opção pelo relé de estado sólido (SSR), que acabou por ser uma escolha melhor do que o relé eletromecânico, pois além de operar em frequências mais altas, este dispositivo possibilita uma atuação mais rápida em pequenas alterações de temperatura.

O código programado no controlador foi feito com base em controladores térmicos que já haviam sido montados pela equipe no decorrer do curso, sendo apenas aperfeiçoado, sofrendo alterações nas faixas de valores e nos coeficientes do controlador PID, e adaptado para utilização do *display* de LCD.

Após a montagem do circuito foram feitas diversas medições com o forno aquecendo-o até 900 °C, a fim de se obter os coeficientes adequados para o controlador PID que atendessem os requisitos de projeto especificados. Tais medições demandaram muito tempo pois deve-se esperar até que o sistema se esfrie sozinho após cada amostra (o sistema demora cerca de duas horas para retornar à temperatura ambiente).

Com o controlador PID regulado para uma subida rápida (103 segundos), foram feitas novas medições para que se obtivesse novos valores dos coeficientes para uma subida mais lenta (242 segundos), para que o sistema pudesse ser regulado para dois tempos de subidas distintos.

A fim de que se pudesse ter um maior controle sobre os tempos de subida do sistema, foram aplicadas entradas em rampa. Isto possibilitou que a variação dos

tempos de subida não necessitassem mais da alteração dos coeficientes do controlador, bastando variar os valores do *setpoint* a cada interação do loop do programa do microcontrolador.

Com base nos resultados obtidos o controlador PID se mostrou muito eficiente para operações de controle de temperatura, pois mesmo o erro máximo (*Overshoot*) que foi de  $\pm 4$  °C (0.4% de erro) que é uma faixa de valores muito baixa com relação ao *setpoint* de 900 °C, e após a estabilização do sistema a temperatura do forno teve uma oscilação mínima estando na faixa de 900 a 901 °C, sendo assim resultados bastante favoráveis.

## 5 REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Prentice-Hall, 2000. 479 p.

ALVES, L. P.; MUNIN, E. **Desenvolvimento de um sensor de deslocamento a fibra óptica baseado no princípio interferométrico**, 2005, São José dos Campos. São José dos Campos, UNIVAP, 2005.

ALMEIDA, Ayrton G. **Adega climatizada para vinhos utilizando a célula de Peltier**, 2013, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior em Engenharia da Computação. Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013

ANALÓGICA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, Disponível em: < <http://www.analogica.com.br/arquivos/nt-012-forno-a-arco-voltaico-de-uso-laboratorial-rev0.pdf> > Acesso em: 2 set. 2014.

BEZERRA, Luciano A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo**, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

BOYLESTAD, Louis Nashelsky Robert. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. [S.l.]:LTC, 1998.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; STEVENSON, M.; BISWAS, P.; FENTON, J.; ÅSLUND, M., **Regenerated Gratings**. Journal of European optical Society-Rapidly Publications 4, no. 09052, 2009.

CESTILE, Marlon, **Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos, fornos elétricos**, 2012, volume 4, Unioeste, 2012.

COCOTA JÚNIOR, José A. N. **Sistema de monitoramento de temperatura e umidade, e proposta de controle por condicionamento do ar em museus**, 2005, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

COUTO, Gustavo R. **Modelagem e desenvolvimento de controles de sistema termo-hidráulico, e interfaces para a aquisição e controle de dados**, 2006, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

DIAS, Jullierme E. A. **Eletrônica, Instrumentação e Telemetria do veículo UFVBAJA**, 2010, Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ELEKTRO – ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A, **Manuais Elektro de Eficiência Energética**, Disponível em: < [http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO\\_DE\\_VAPOR\\_E\\_CALOR.pdf](http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf) > Acesso em: 20 ago. 2014.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, Instituição. **Phototransistor Optoisolator Til111**. 2000.

FLIPEFLOP, Disponível em: < <http://www.filipeflop.com/pd-137999-display-lcd-nokia-5110.html> > Acesso em: 20 Jun. 2015.

FREUDENRICH, Craig C. **How fiber optics work**, Disponível em: < <http://computer.howstuffworks.com/fiber-optic6.htm> > Acesso em: 10 ago. 2014.

FUENTES, Rodrigo C. **Apostila de automação industrial**, 2005, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

FURUKAWA, Instituição. **MF 101: Introdução à tecnologia de redes**. 5. ed. 2008.

GODOI, Tomás S. M. **Prótese mioelétrica controlada por redes neurais**, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior em Engenharia da Computação. Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013.

GRUPO ECIL, Disponível em: < <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/termopares/termopar-tipo-k/> > Acesso em: 18 set. 2014.

GUERRA, Leonardo N. A. **Uso de compensador PID no controle da taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistência**, 2006, Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

HAFFNER, José Felipe **Implementação de Controladores PID**, Disponível em: < [http://www.feng.pucrs.br/~gacs/new/disciplinas/psc\\_CN/apostilas/Aula8\\_2008l.pdf](http://www.feng.pucrs.br/~gacs/new/disciplinas/psc_CN/apostilas/Aula8_2008l.pdf) > Acesso em: 20 Jul. 2015.

HIRZEL, Timothy **PWM**, Disponível em: < <http://arduino.cc/en/Tutorial/PWM> > Acesso em 19 set. 2014.

JUNIOR, João Manoel Gomes da Silva **Ajuste de Controladores PID**, Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node31.html>> Acesso em: 20 Jul. 2015.

JUSTI, Marcos A. **Automatização do controle de processo de refusão de solda lead free em uma linha de produção SMD**, 2009, Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade de Taubaté, Taubaté, 2009.

LIMA, Thiago J. **Regulação de temperatura com micro-controlador aplicado a forno resistivo PWM**, 2006, Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

LOPES, Joaquim Teixeira, **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MATAS, Alexandre L. **Sintonia de controladores PID , com controle adaptativo por modelo de referência (MRAC) aplicado a um motor de corrente contínua**, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MELO, Rosecléa L. O. **Implementação de controle digital PID com microcomputador**, 1985, Dissertação ( Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

MENGUER, Marcos V. **Redimensionamento da climatização do setor de embalagem primária e secundária de um frigorífico de aves**, 2013. Monografia (Graduação em Tecnologia em Manutenção Industrial) – Departamento de educação profissional , Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

MOURA, José A. S. **Filmes nanométricos de FeN e AlN crescidos por sputtering e aplicações do efeito Peltier**, 2010. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS Disponível em: < <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>> Acesso em: 16 set. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS Disponível em: < <http://www.ni.com/white-paper/10635/pt/>> Acesso em: 18 set. 2014.

NOVUS, Disponível em < <http://www.novus.com.br/catalogos/?ID=519490>> Acesso em: 10 jun. 2015.

NOVUS, Instituição. **Transmissor de Temperatura TxBlock Manual de Operação**. 2008.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, c2010, 809 p.

OLIVEIRA, Murilo T. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados via USB utilizando termopares**, 2008, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PHILLIPS, Instituição. **DATASHEET BC546;BC547;BC548; NPN general use transistors**. 1994.

REMIC REFRAFATÁRIOS, Disponível em <<http://www.remic.com.br/produtos.asp>> Acesso em 12 ago 2014.

ROCHA, Cleiton F. **Técnicas de controle de temperatura utilizando Labview**, 2009, Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SAMPAIO, Raimundo **Apostila de fornos de processo** , 2011, São Paulo.

SANTOS, Rômulo A. **Viabilidade da utilização de resíduos da Pedra sabão na fabricação de material refratário**, 2010, Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, André L. V. C. **Refino dos Aços, Capítulo 7: Forno Elétrico a Arco**, 2011, Disponível em: <[http://equilibriumtrix.net/refino/capitulos\\_acs\\_refino/](http://equilibriumtrix.net/refino/capitulos_acs_refino/)>

SILVA, Bruno L. R. **Sistema de controle do trio automotivo por meio de SMS**, 2012, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior em Engenharia da Computação. Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2012

SILVA, Davidson F. **Sistema de comunicação Bluetooth utilizando microcontrolador**, 2009, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior em Engenharia da Computação. Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

SOTECNISOL MATERIAIS, Disponível em <<http://www.sotecnisol.pt/materiais/produtos/solucoes-de-impermeabilizacao-isolamentos-e-drenagens/isolamentos-termicos/la-de-rocha/manta-la-de-rocha-30-kgm3/manta-la-de-rocha-30kgm3/>> Acesso em: 27 set. 2014.

SOUZA, Geraldo Teles de, **Controle e Automação Industrial**, Escola Técnica Estadual Pedro Ferreira Alves, Mogi Mirim, 2004.

SENAI, APOSTILA, Disponível em  
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfI3sAC/fornos-eletricos-industriais> > Acesso em: 26 ago. 2014.

TEXAS INSTRUMENTS, Disponível em  
<<http://www.ti.com/lit/ug/spmu296/spmu296.pdf>> Acesso em: 01 out. 2014.

WIKA, Disponível em <[http://de-de.wika.de/upload/OI\\_T32\\_pt\\_br\\_20832.pdf](http://de-de.wika.de/upload/OI_T32_pt_br_20832.pdf)>  
Acesso em: 02 jun. 2015.