

**DANIEL CRUVINEL CORRAL**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA  
PARA TESTE DE INFLAMABILIDADE  
EM LENTES SOLARES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase  
em Eletrônica

ORIENTADORA: Profa. Dra. Liliane Ventura

São Carlos

2011

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Corral, Daniel Cruvinel

C824d            Desenvolvimento de sistema para teste de inflamabilidade em lentes  
solares. / Daniel Cruvinel Corral ; orientador Liliãne Ventura -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola  
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

## Dedicatória

À minha família, em especial ao meu segundo pai e avô, Enio Corral. Homem dedicado ao trabalho, que sempre o fez com excelência, honestidade e perfeição. Ensinou-me a gostar de engenharia desde criança, fazendo e me incentivando a criar brinquedos com sobras de materiais mecânicos em sua oficina, sempre com paciência e carisma. Ainda este ano, antes de partir para sempre, pedi conselhos sobre este projeto, pois o considerava muito criativo. Deixou para mim o sentimento “fiz o que tinha que fazer e me tornei exemplo”. Sua presença foi indispensável para formar o homem que sou hoje e poder concluir esse trabalho com sucesso.



## **Agradecimentos**

Ao meu pai, Roberto Corral, por sempre apoiar e incentivar o meu trabalho e a realização deste projeto.

À minha mãe, Claudia Baldo Cruvinel Corral, pelos vários momentos que me incentivou e ajudou a retomar a jornada, quando estive desanimado.

À minha irmãzinha, Isabela Cruvinel Corral, pelo carinho e carisma nos momentos difíceis.

Ao meu irmãozinho, Felipe Cruvinel Corral, pelas risadas e brincadeiras, me ajudou com a criatividade.

Às minhas avós Ondina de Carvalho Corral e Silvia Paschoa Baldo, pelo incentivo constante.

À Heloisa Morotti de Guide, minha namorada que me ajudou a manter a calma e paciência quando as coisas pareciam distantes do fim.

À Profa. Dra. Liliane Ventura, pela atenção e apoio durante o período que trabalhei no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO) e também pela definição e orientação do meu projeto de trabalho de conclusão do curso.

Ao Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Júnior, pela atenção durante as aulas de laboratório de eletrônica de potência e orientação em períodos extra aulas.

Ao Prof. Manoel Luís de Aguiar, pela orientação na parte de controladores digitais.

Ao Victor Lincoln, co-orientador e amigo, trabalhou como parceiro no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO) e foi peça importante para o desenvolvimento e discussão do meu projeto. Orientou-me no desenvolvimento do software, controlador dos sistemas e também com outros afazeres, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Ao Marcio Mello, amigo e companheiro de república, trabalhou como parceiro no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO), ajudando nas discussões sobre os projetos e em específico este, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Ao Luciano Coutinho Caldas, amigo que ajudou com o desenvolvimento do motor de passo e contribuiu muito para meu crescimento científico e intelectual durante o curso de engenharia elétrica – ênfase em eletrônica.

Ao Ciro Horner Hoe de Castro, amigo com quem trabalhei no Laboratório de Eletrônica de Potência e ajudou no desenvolvimento do sistema de controle do forno.

Ao Gabriel Stein, amigo com quem trabalhei no Laboratório de Eletrônica de Potência e ajudou no desenvolvimento do sistema de controle do forno.

Aos técnicos do departamento da elétrica Rui Bertho e Odair, por se mostrarem dispostos a ajudar e realizar peças, projetos mecânicos e placas de circuito impresso.

Aos colaboradores Evandro e Douglas da empresa EDG equipamentos, pelo auxílio e doação de materiais para construção do forno elétrico.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de graduação.

À Universidade de São Paulo, pela oportunidade de estudar na melhor universidade brasileira durante o período de minha graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa conquistada para o projeto.

Sou grato a todos que de alguma forma contribuíram, diretamente ou indiretamente, para o sucesso deste trabalho.

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Absorção de R-UV pelos elementos do olho humano.<br>[< <a href="http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html">http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html</a> >. Acesso em 04 nov. 2011.].....  | 22 |
| Figura 2 – Esquemático do olho humano e suas respectivas estruturas<br>[< <a href="http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html">http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html</a> >. Acesso em 04 nov. 2011.].....  | 23 |
| Figura 3 - Doenças relacionadas aos olhos causadas por radiações. a) Câncer de pele na região dos olhos, b) Degeneração macular, c) Catarata, d) Pterígio. [UV < <a href="http://www.esa-sunglasses.com/de/">http://www.esa-sunglasses.com/de/</a> >. Acesso em: 25 mar. 2011.].....  | 24 |
| Figura 4 - Aparato do ensaio de ignição .....   | 28 |
| Figura 5 - Diagrama em blocos do sistema .....  | 29 |
| Figura 6 - Barra de aço inoxidável 304 .....  | 31 |
| Figura 7 - Transformador utilizado no projeto com relação de tensão 3,6:1 .....   | 33 |
| Figura 8 - Parâmetros da Cerâmica do forno .....  | 39 |
| Figura 9 - Construção do forno: centralização da cerâmica com a resistência Kanthal A1 enrolada.....  | 40 |
| Figura 10 - Construção do forno: preenchimento com material refratário para isolamento de temperatura interna para o exterior.....  | 40 |
| Figura 11 - Forno elétrico construído para o projeto .....  | 41 |
| Figura 12 - Foto do aparato para realização dos testes.....   | 41 |
| Figura 13 - Resposta da temperatura ao degrau de tensão (~17 V) em relação ao tempo para o forno, de acordo com os dados da tabela 6. ....  | 44 |
| Figura 14 - Resposta da temperatura ao degrau de tensão (~22 V) em relação ao tempo para o forno, de acordo com os dados da tabela 7. ....  | 46 |
| Figura 15 - Curva comparativa dos tipos de termopares. [EDUARDO. Termopares. Disponível em:<br>< <a href="http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termopares_curvas_variacao_fem/">http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termopares_curvas_variacao_fem/</a> >. Acesso em: 27 set. 2011.] ..... | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 16 - Termômetro MTK-16 da Minipa .....  | 48 |
| Figura 17 - Termômetro MT-525 da Minipa .....  | 48 |
| Figura 18 - Manual do termômetro MT-525, mostrando funcionamento da transmissão da porta serial RS-232. ....   | 49 |
| Figura 19 - Circuito de potência, controlador CA-CA, utilizando Triac, onde a carga é o forno .....  | 51 |
| A Figura 20 relaciona a Amplitude dos harmônicos de tensão (normalizado em relação à amplitude da tensão de entrada), para carga resistiva. ....   | 51 |
| Figura 21 - Amplitude dos harmônicos de tensão (normalizado em relação à amplitude da tensão de entrada), para carga resistiva. ....   | 52 |
| Figura 22 - Ondas de saída do controlador CA-CA, pelos controles <i>On-Off</i> e de fase. [OLIVEIRA Jr., A. A. <b>Controladores de tensão CA monofásicos</b> . Apostilas de aula. 2010.] .....   | 54 |
| Figura 23 - Triac BTA41 usado no projeto<br>[< <a href="http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf">http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf</a> >. Acesso em: 27 set. 2011]. ....                               | 55 |
| Figura 24 - Driver utilizado para acionamento do motor de passo, LN298<br>[< <a href="http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf">http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf</a> >. Acesso em: 27set. 2011.] ..... | 56 |
| Figura 25 - Modelo esquemático do bloco de controle .....  | 57 |
| Figura 26 – “RLTOOL”, lugar das raízes .....   | 58 |
| Figura 27 – (a) Curva azul: Resposta da temperatura do forno ao degrau de potência aplicado; (b) Curva verde: Resposta do erro de temperatura do forno ao degrau de potência aplicado. ....  | 59 |
| Figura 28 – Circuito usado na simulação do sistema completo no simulink (matlab).....  | 59 |
| Figura 29 – (a) Curva superior: Tempo necessário ligado durante o aquecimento, sendo que foi estabelecido o máximo de 2 seg por período T; (b) Curva inferior: Resposta da temperatura ao degrau de potência aplicado.....   | 60 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 30 - Estrutura organizacional do PIC 18F4550<br>[< <a href="http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf">http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf</a> >. Acesso em: 27 set.<br>2011]. ..... | 61 |
| Figura 31 - Esquemático da placa 1, circuito de baixa potência .....  | 64 |
| Figura 32 - Placa 1 visualizada no modo 3D do programa kicad.....   | 65 |
| Figura 33 - Placa 2, controlador CA-CA (circuito de alta potência) .....  | 65 |
| Figura 34 - Placa 2 visualizada no modo 3D do programa kicad.....   | 66 |
| Figura 35 - Equipamento para realizar o teste de inflamabilidade pronto .....   | 67 |
| Figura 36 – Testes, mostrando um pouco sobre o transformador .....  | 68 |
| Figura 37 - Testes com o forno em bancada.....  | 69 |
| Figura 38 - Circuito de baixa e alta potência .....   | 69 |
| Figura 39 - Forno emitindo luz por estar em alta temperatura .....  | 70 |
| Figura 40 – Termopar vermelho por causa da alta temperatura.....  | 70 |

## Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Efeitos da radiação solar sobre o olho humano [Sliney, D.; et, 1973; 2005]. .....  | 21 |
| Tabela 2 – Principais testes que devem ser realizados para a certificação de óculos de sol. ....   | 26 |
| Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável austenítico tipo 304, de acordo com as normas da ABNT.<br>[< <a href="http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html">http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html</a> >. Acesso em: 20 ago. 2010.].....   | 30 |
| Tabela 4 - Típicos usos para o aço inoxidável austenítico 304.<br>[< <a href="http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html">http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html</a> >. Acesso em: 20 ago. 2010.].....   | 31 |
| Tabela 5 - Características da resistência Kanthal A1.<br>< <a href="http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf">http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf</a> >. Acesso em: 31 mai. 2011. ....  | 36 |
| Tabela 6 - Características do diâmetro da cerâmica do forno em função do diâmetro do fio Kanthal A1.<br>[< <a href="http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf">http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf</a> >. Acesso em: 31 mai. 2011]. .... | 38 |
| Tabela 7 - Dados de temperatura e tensão, adquiridos pela RS-232, seguidos dos dados calculados. ....  | 42 |
| Tabela 8 – Tabela gerada com dados adquiridos pelos supervisórios do termômetro e do voltímetro.....   | 45 |
| Tabela 9 - Hipóteses da utilização das variáveis corrente, tensão ou potência como variáveis de controle para a alimentação do forno e suas respectivas funções matemáticas. ....  | 53 |
| Tabela 10 - Características principais do triac BTA41<br>[< <a href="http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf">http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf</a> >. Acesso em: 27 set. 2011]. ....  | 55 |

Tabela 11 - Passo completo..... 56

Tabela 12 - Características físicas do equipamento desenvolvido ..... 71

## Lista de siglas

|          |   |
|----------|---|
| EDG      | Fábrica de fornos industriais   |
| LACEP    | Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência                      |
| LIO      | Laboratório de Instrumentação Oftálmica                               |
| UVA      | radiação ultravioleta A   |
| UVB      | radiação ultravioleta B   |
| UVC      | radiação ultravioleta C   |
| UV       | radiação ultravioleta   |
| USP      | Universidade de São Paulo   |
| ABNT     |   |
| EN       | Norma européia  |
| NBR      | Norma brasileira  |
| INMETRO  | Instituto nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial |
| Abiótica | Associação Brasileira de Produtos e Equipamentos Ópticos              |
| CI       | Circuito integrado  |

## Lista de símbolos

|           |   |
|-----------|---|
| <i>Le</i> | comprimento total do enrolamento do fio resistivo |
| D         | diâmetro externo da cerâmica                      |
| s         | passo do enrolamento                              |
| V         | unidade de tensão, Volts                          |
| °C        | unidade de temperatura, graus Celsius             |
| m         | unidade de medida, metros                         |
| seg       | unidade de tempo, segundos                        |
| A         | unidade de corrente elétrica, Ampère              |
| nm        | nanômetro   |
| IV-A      | Raio infravermelho tipo A (780-1400nm)            |
| IV-B      | Raio infravermelho tipo B (1400-3000nm)           |
| IV-C      | Raio infravermelho tipo C (3000-10000nm)          |
| UV-A      | Raio ultravioleta tipo A (330-400nm)              |
| UV-B      | Raio ultravioleta tipo B (280-330nm)              |
| UV-C      | Raio ultravioleta tipo A (240-280nm)              |



## Sumário

|  |    |
|--|----|
| Lista de figuras .....   | 7  |
| Lista de tabelas.....  | 10 |
| Lista de siglas .....  | 12 |
| Lista de símbolos.....   | 13 |
| Resumo.....  | 16 |
| Abstract.....  | 18 |
| 1. Introdução.....   | 20 |
| 1.1. A radiação ultravioleta .....                                       | 20 |
| 1.2. Doenças relacionadas à radiação UV .....                            | 23 |
| 1.3. Proposta e objetivo .....   | 24 |
| 2. Desenvolvimento do projeto .....                                      | 28 |
| 2.1. Barra de aço .....  | 30 |
| 2.2. Circuito abaixador de tensão: Transformador de tensão .....         | 33 |
| 2.3. Fonte de calor: projeto do forno .....                              | 35 |
| 2.4. Termopar e dispositivo indicador de temperatura .....               | 47 |
| 2.5. Circuito de Eletrônica de Potência: Projeto Controlador CA-CA.....  | 50 |
| 2.6. Motor de passo .....  | 56 |
| 2.7. Projeto do Controlador tipo PI .....                                | 57 |
| 2.8. Software .....  | 61 |
| 2.9. Construção da placa de circuito de impresso .....                   | 63 |
| 3. Resultados.....   | 67 |
| 4. Discussões e conclusões.....  | 72 |
| ANEXOS .....   | 74 |
| ANEXO A - Código matlab para desenvolver o controlador PID do forno..... | 74 |
| ANEXO B - Software programado no PIC18F4550 .....                        | 75 |
| Referências.....   | 84 |

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um equipamento para testar o material das lentes de óculos de sol quanto à inflamabilidade ou ignição, usando um forno, que deva operar em temperatura de 650°C, controlado por sistema eletrônico, utilizando termopar e termômetro com saída RS-232, atendendo aos requisitos das normas, brasileira NBR15111/2004 e européia EN168/2001. O forno desenvolvido possui 480mm de comprimento e 205mm de diâmetro e possui paredes de aço inoxidável, resistência kanthal A1 enrolada em cerâmica refratária, tijolos refratários nas faces finais e lã de vidro para preenchimento interno, afim de reter o calor dentro do forno. Inicialmente foi projetado para aquecer à 1000°C, já que a norma exige que a fonte de calor deva ser capaz de operar à 750°C com precisão de  $\pm 20^\circ\text{C}$ . O forno atinge os 650 °C necessários para a realização do ensaio em aproximadamente 720 seg e a temperatura tem uma variação de  $\pm 10^\circ\text{C}$ . A construção deste sistema contribuiu para o Laboratório de Instrumentação Oftálmica na certificação de óculos de sol em um dos itens da norma brasileira citada.

**Palavras chave:** 1. Inflamabilidade. 2. Forno. 3. Kanthal. 4. Temperatura. 5. NBR15111/2004. 6. Óculos de sol.





## Abstract

This study aimed to develop a device to test the material of the lenses of sunglasses on the flammability (or ignition), using an oven, which is to operate at a temperature of 650 °C, controlled by electronic system, using thermocouple and thermometer with RS -232, meeting the requirements of standards, brazilian and european NBR15111/2004 EN168/2001. The oven has developed 480mm long and 205mm in diameter, with walls of stainless steel, Kanthal A1 coiled strength refractory ceramic, refractory bricks on the end faces and glass wool for internal padding in order to retain heat within the oven. Initially designed to heat at 1000 °C, since the standard requires that the heat source must be able to operate at 750 °C with an accuracy of  $\pm 20$  °C. The oven reaches 650 °C required for the test in about 720 sec and has a temperature range of  $\pm 10$  °C. The construction of this system contributed to the Laboratory of Ophthalmic Instrumentation in the certification of sunglasses on one of the items cited in the Brazilian norm.

**Key Words:** 1. Flammability. 2. Oven. 3. Kanthal. 4. Temperature. 5. NBR15111/2004. 6. Sunglasses.



## 1. Introdução

Atualmente a preocupação com a radiação ultravioleta cresceu devido a alguns males que podem causar ao ser humano. Para isso, algumas atitudes estão se tornando cada vez mais comuns na população, tais como o uso de protetor solar.

Do mesmo modo que a radiação ultravioleta pode causar danos à pele humana, ela também pode ocasionar ou intensificar problemas e doenças nos olhos. De um modo geral, a exposição excessiva a qualquer tipo de radiação pode levar a algum tipo de prejuízo à saúde dos olhos.

### 1.1. A radiação ultravioleta

A luz ultravioleta (UV) é separada em três regiões do espectro: UV-A (330-400nm), UV-B (280-330nm), UV-C (240-280nm). Uma série de estudos recentes aponta que a exposição da córnea (vide figura 1- Absorção de R-UV pelos elementos do olho humano) à irradiação ultravioleta induz alterações patológicas em sua estrutura [Doughty, MJ., Cullen, AP. 1989]. Os raios ultravioletas podem causar inflamações na córnea, opacidade no cristalino (catarata) além de problemas na retina (vide figura 3 - Doenças relacionadas aos olhos causadas por radiações). A exposição UV da córnea, a altos níveis ou baixos níveis repetidamente, podem causar danos irreversíveis resultando em ceratopatias que afetam o epitélio e a parte anterior do estroma.

Os danos causados no olho devido às radiações provenientes do sol estão resumidamente apresentados na tabela 1.

Na tabela 1 o espectro está dividido em: UV-C (< 290nm), UV-B (290–315nm), UV-A (315–400nm), Visível (400–750nm), IV-A (780–1400nm), IV-B (1400–3000nm) e IV-C (3000–10000nm). Quanto menor o comprimento de onda da radiação, maior o dano causado à estrutura ocular. Por esta razão, a radiação ultravioleta é mais nociva do que as radiações dos comprimentos de onda: visível e infravermelho. Outro fator que diferencia os danos causados pela radiação ultravioleta é que sua percepção não é imediata. Enquanto a

radiação infravermelha se manifesta na forma de calor e a radiação no visível é perceptiva, o ultravioleta não provoca nenhuma reação que desperte algum dos sentidos do ser humano.

Tabela 1- Efeitos da radiação solar sobre o olho humano [Sloney, D.; et, 1973; 2005].

| <b>Espectro</b> | <b>Tecido afetado</b> | <b>Local de absorção</b> | <b>Tipo de dano</b>                               |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|---|
| UVC / UVB       | Córnea                | Epitélio                 | Fotoquímico: fotoqueratite e opacidades na córnea |
| UVB / UVA       | Cristalino            | Núcleo                   | Fotoquímico: Catarata                             |
| Visível         | Retina                | Epitélio pigmentário     | Térmico: diminuição da visão                      |
|                 |                       | Hemoglobina              | Hemorragia intra-ocular                           |
|                 |                       | Pigmento macular         | Alterações na percepção de cores                  |
| IVA             | Retina                | Epitélio pigmentário     | Térmico: diminuição da visão                      |
|                 | Cristalino            | Epitélio                 | Catarata  |
| IVB             | Córnea                | Epitélio                 | Opacidades  |
| IVC             | Córnea                | Epitélio                 | Queimaduras superficiais                          |

*Legenda: UV: Ultravioleta; IV: Infravermelho*

A figura 1 ilustra a absorção de raios ultravioletas pelos elementos do olho humano [Sloney, D.; Wolbarsht, M.; 1980].

O tecido epitelial da córnea é a estrutura do olho exposta mais severamente aos raios UV, indicando a necessidade de um forte mecanismo de proteção nesta camada [Ringvold, A.; 1998]. Há apenas um número limitado de estudos relativos à absorção da radiação UV em diferentes camadas da córnea. A maior parte da radiação UV inferior a 280nm (UVC) é absorvida no epitélio da córnea, a radiação UVB tem uma absorção média de 80% no epitélio, e a radiação UVA apresenta uma absorção de 25 – 34% no estroma [Zigman, S.; 1993; Tsubai, T., Matsuo, M.; 2002; Kinsey, VE.; 1948].

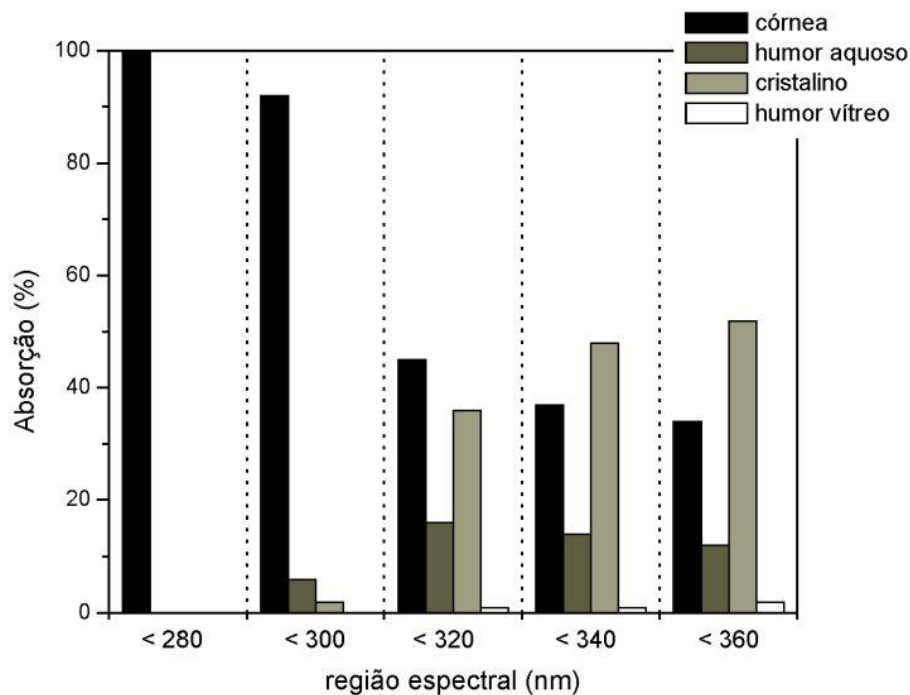


Figura 1 - Absorção de R-UV pelos elementos do olho humano. [[http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV\\_e\\_olho.html](http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html)]. Acesso em 04 nov. 2011.]

Idealmente, todos os tipos de óculos de sol, incluindo os de prescrição, lentes de contato e lentes intra-oculares implantadas, devem absorver todo o espectro de radiações UV-A e UV-B. A absorção UV pode ser incorporada em quase todos os materiais ópticos, é barata e não interfere na visão [<http://www.esa-sunglasses.com/de/>]. Acesso em: 25 mar. 2011.]. O grau de proteção da radiação UV não está relacionado com o preço dos óculos, mas com a proteção que eles podem proporcionar. De acordo com o INMETRO e a Abiótica, a decisão de compra dos óculos de sol deve levar em consideração, principalmente, o nível de proteção contra as radiações UV que as lentes oferecem. Esta informação deve estar disponível no momento da compra, seja através de adesivo afixado aos óculos ou livreto contendo informações técnicas sobre o produto e deve ser exigida pelo consumidor [<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/oculos2.asp>]. Acesso em: 20 ago. 2011.].

A figura 2 mostra o Esquemático do olho humano e suas respectivas estruturas.

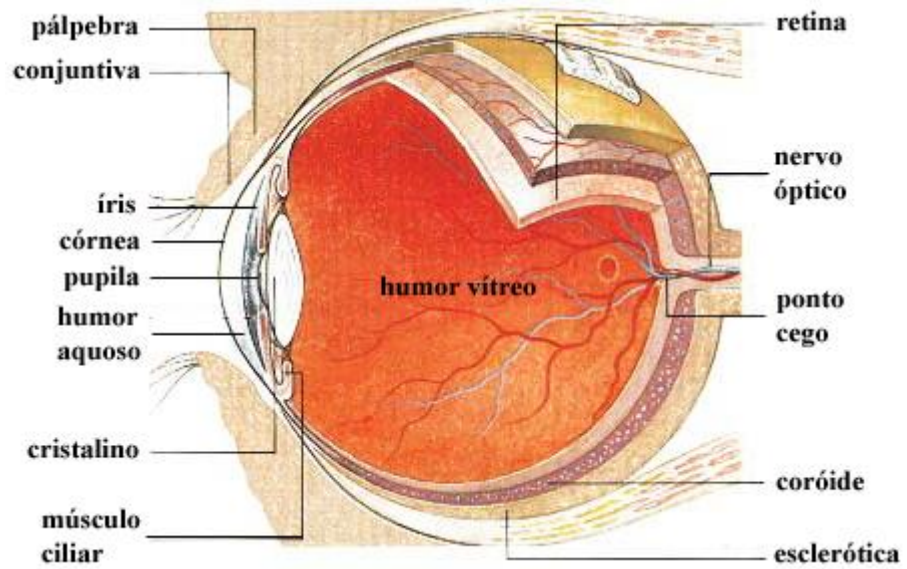


Figura 2 – Esquemático do olho humano e suas respectivas estruturas  
[<[http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV\\_e\\_olho.html](http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html)>. Acesso em 04 nov. 2011.]

## 1.2. Doenças relacionadas à radiação UV

A radiação UV pode contribuir para o desenvolvimento de várias doenças oculares incluindo catarata, pterígio, câncer de pele ao redor dos olhos, fotoqueratite, alterações degenerativas da córnea e pode influenciar na degeneração macular. [ZIGMAN, S., 1993].

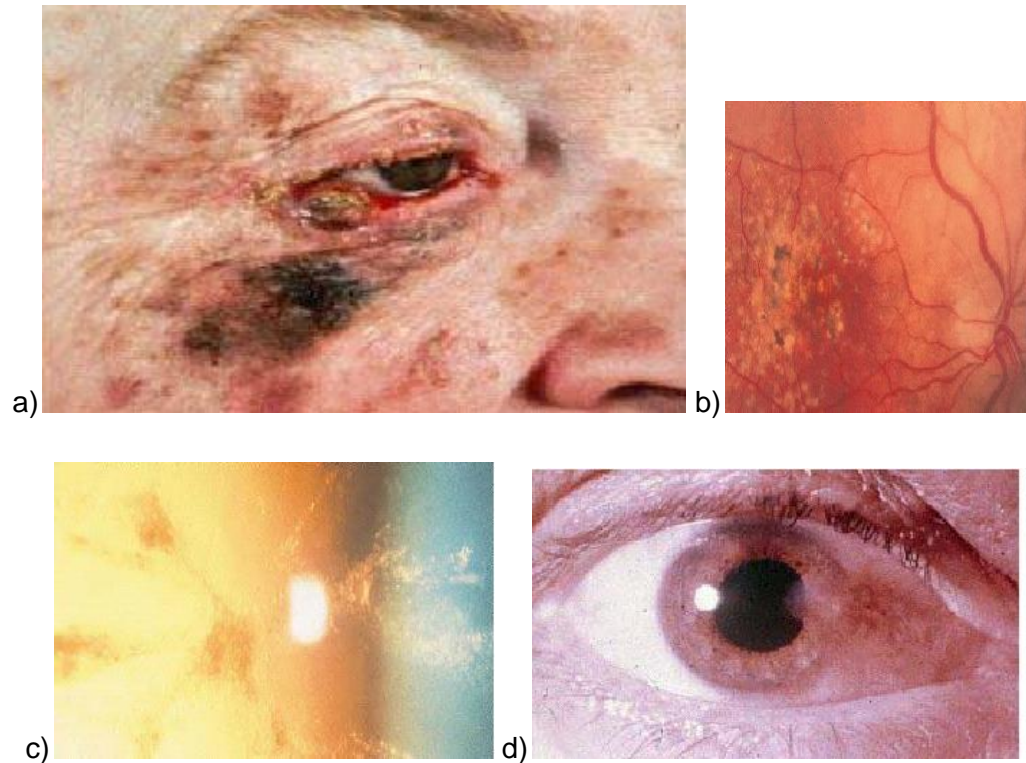


Figura 3 - Doenças relacionadas aos olhos causadas por radiações. a) Câncer de pele na região dos olhos, b) Degeneração macular, c) Catarata, d) Pterígio. [UV < <http://www.esa-sunglasses.com/de/>>. Acesso em: 25 mar. 2011.]

### 1.3. Proposta e objetivo

Nos itens anteriores deste trabalho, foi comentado sobre os raios ultravioletas e seus malefícios ao olho humano para realmente chamar a atenção da importância do uso dos óculos de sol, que têm a função prioritária para o usuário aumentar o conforto visual, quando o olho é exposto à grande quantidade luminosa e, principalmente, proteção aos olhos. Daí vem a necessidade da certificação dos óculos de sol, que representa a garantia do consumidor.

Na prática, o que acontece é que o olho nu, quando exposto ao sol, possui mecanismos de defesa natural, que fecha a pupila para proteger a retina da incidência dos raios solares em excesso. A baixa luminosidade, proporcionada pela utilização dos óculos de sol, inibe essas defesas naturais e a pupila se dilata, permitindo que os raios solares



atinjam o olho, se os óculos não bloquearem com proteção adequada. Os raios UV passam a incidir então, diretamente na retina, provocando gradualmente o aparecimento de lesões oculares. O caso considerado mais crítico da utilização de óculos de sol é quando estes oferecem proteção ilusória aos raios UV-A e UV-B.

Sabendo das necessidades de testar os óculos de sol vendidos no mercado brasileiro, a Professora Doutora. Liliane Ventura - responsável pelo Laboratório de Instrumentação Oftálmica da Universidade de São Paulo, em São Carlos, que já colaborou algumas vezes com o INMETRO para a realização de alguns experimentos para certificações em óculos de sol, está atualizando seu laboratório para atender aos vários itens para a certificação de óculos de sol, todos de acordo com a norma brasileira de certificação de lentes oftálmicas da ABNT, NBR15111 de 2004.

. O teste de inflamabilidade é parte importante dos ensaios de certificação de óculos de sol, pois garante ao consumidor a qualidade da lente comprada e o protege dos riscos que podem ser causados por materiais inflamáveis, tais como irritações cutâneas, reações tóxicas, danos à pele, além de poder causar acidentes como incêndios.

Para o entendimento do contexto em que este trabalho está inserido, a tabela 2 mostra de modo simplificado alguns dos testes principais a serem executados nas amostras de óculos de sol a serem certificados, com a finalidade de proteger o usuário.

Tabela 2 – Principais testes que devem ser realizados para a certificação de óculos de sol.

| <b>Teste</b>                          | <b>Itens possíveis de não conformidade</b>   | <b>Malefícios que podem ser causados</b>                              |
|---------------------------------------|--|---|
| Transmitância                         | Falta de proteção UVA e UVB, reconhecimento inadequado de cores, falta de uniformidade de lentes e de definição de categoria do filtro | Riscos de lesão à visão   |
| Potência óptica                       | Poder de refração (ou seja, os óculos "tenham grau"), distorção óptica e efeito prismático   | Riscos à integridade física   |
| Luz difusa                            | Espalhamento de luz (embaçamento)  | Riscos à integridade física   |
| Qualidade do material e da superfície | Falta de qualidade óptica, mau acabamento da superfície e tratamento superficial (filmes)  | Riscos de irritação cutânea, reações tóxicas, danos à pele (alergias) |
| Resistência mecânica                  | Robustez, fratura da lente e deformação  | Riscos de lesão à visão e à integridade física (rosto/cabeça)         |
| Estabilidade da radiação              | Envelhecimento e desgaste acelerado de lentes e armação  | Riscos de irritação cutânea, reações tóxicas, danos à pele (alergias) |
| Inflamabilidade (lentes)              | Ignição, combustão e manutenção de chamas após ignição   | Riscos de irritação cutânea, reações tóxicas, danos à pele (alergias) |
| Requisitos mecânicos                  | Quebra da armação, deformação da lente e armação e retenção da lente   | Riscos de lesão à visão e à integridade física (rosto/cabeça)         |

Os capítulos adiante retratarão como foi construído o equipamento para realização do teste de inflamabilidade para óculos de sol. Será mostrada a construção de um forno elétrico, o desenvolvimento eletrônico do projeto de controle de potência para estabilizar a temperatura, o acionamento de um motor de passo para movimentar uma barra de aço na direção vertical, a programação do PIC 18F4550 em linguagem C para realização de todas as tarefas, incluindo temporização do ensaio.

## 2. Desenvolvimento do projeto

O teste de ignição, ou inflamabilidade, consiste em aquecer uma das extremidades de uma barra de aço, estipulada conforme o item 2.1, a uma distância mínima de 50 mm da fonte de calor, estipulada conforme item 2.1. A figura 4 mostra o diagrama esquemático do sistema completo desenvolvido.

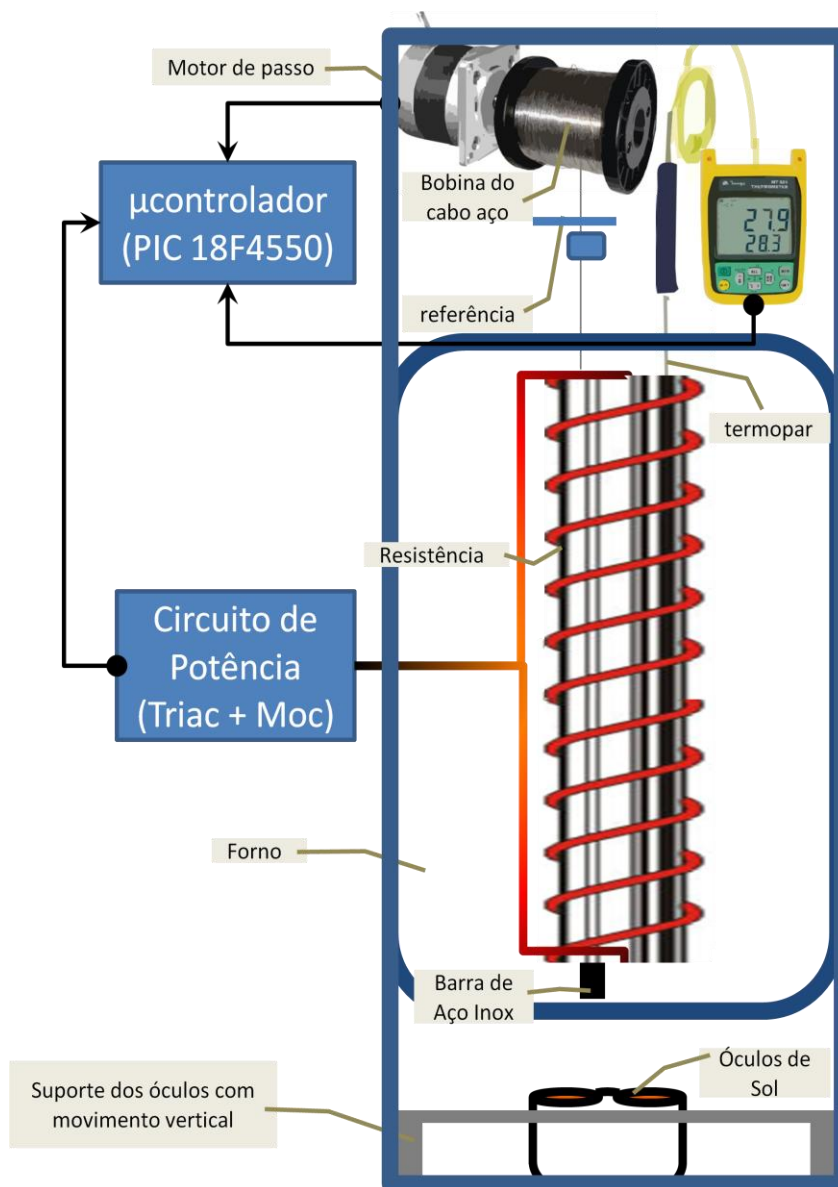


Figura 4 - Aparato do ensaio de ignição

A temperatura da barra é monitorada por meio de um termopar instalado dentro do forno e controlada por um circuito controlador de potência. De acordo com a temperatura recebida pelo circuito de controle, via porta serial RS-232 do termômetro (instrumento MT-525 da Minipa), o sistema de controle faz com que a temperatura permaneça em  $650 \pm 20$  °C durante o ensaio.

A barra é posicionada verticalmente e movimentada por meio de um motor de passo. A barra fica com a face aquecida em contato contra a superfície de amostra (óculos de sol), somente com o peso da barra, por um período de  $5.0s \pm 0.5$  seg. Quando é atingido este tempo, o dispositivo recua mecanicamente pelo acionamento do motor de passo.

A inspeção visual deve ser realizada durante o ensaio, a fim de determinar se a amostra inflama, entra em combustão ou continua a brilhar.

Um circuito de eletrônica de potência foi desenvolvido para controlar a potência que alimenta o forno e, conseqüentemente, controlar a temperatura, tal como exemplifica o diagrama de em blocos da figura 5.

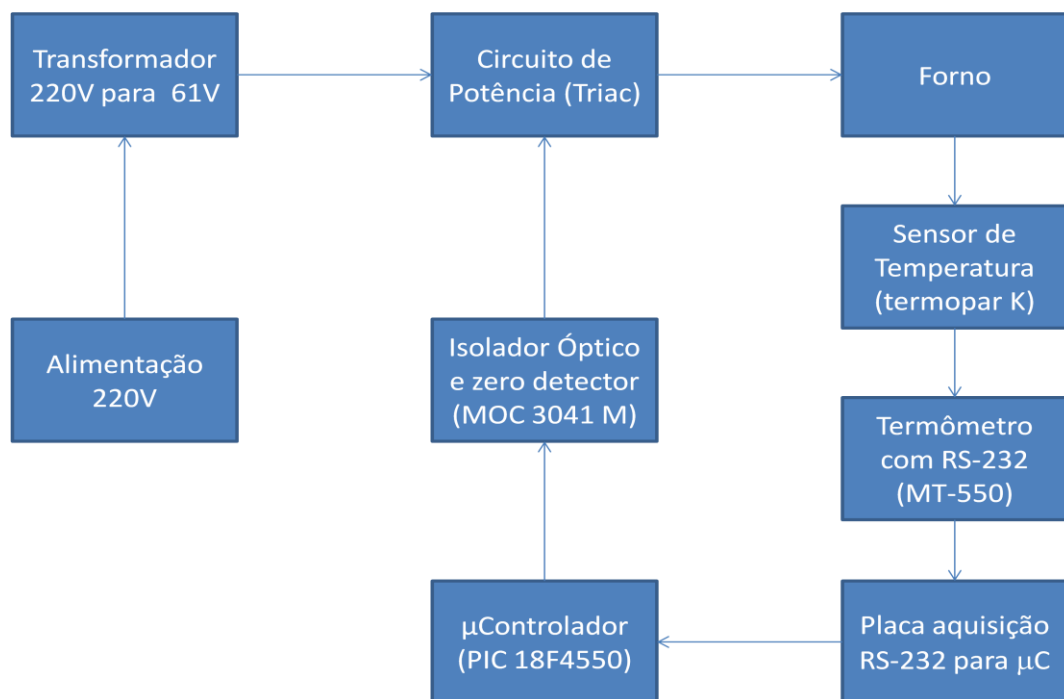


Figura 5 - Diagrama em blocos do sistema

A seguir serão descritos os materiais utilizados para a construção do equipamento e realização do experimento, como eles foram determinados e construídos.

## 2.1. Barra de aço

Uma barra de aço do tipo aço inoxidável 304, cuja composição é mostrada na tabela 3, foi escolhida para o ensaio e é mostrada pela figura 6, já que a norma prevê a utilização de barra de aço, mas sem especificar o tipo. Considerando que o aço inoxidável possui características adequadas para o trabalho em altas temperaturas, sem atingir a têmpera na temperatura estabelecida para o ensaio, a barra escolhida enquadrou-se perfeitamente nos termos da norma.

Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável austenítico tipo 304, de acordo com as normas da ABNT.

[<[http://www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Aco\\_Inox/body\\_aco\\_inox.html](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html)>. Acesso em: 20 ago. 2010.]

| Elemento químico presente na liga | % Máxima |
|-----------------------------------|----------|
| C                                 | 0,08     |
| Mn                                | 2,00     |
| Si                                | 1,00     |
| P                                 | 0,045    |
| S                                 | 0,030    |
| Cr                                | 18,00    |
| Ni                                | 8,00     |



Figura 6 - Barra de aço inoxidável 304

A escolha do aço 304 foi feita se valendo dos dados da tabela 4, que diz respeito aos tipos de uso do aço inoxidável 304 e também em relação ao mercado, considerando que esta é uma liga comum e é encontrada com facilidade em revendas.

Tabela 4 - Típicos usos para o aço inoxidável austenítico 304.

[<[http://www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Aco\\_Inox/body\\_aco\\_inox.html](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html)>. Acesso em: 20 ago. 2010.]

---

#### Aço inoxidável austenítico 304

---

Utensílios domésticos; fins estruturais; equipamentos para indústria química e naval; indústria farmacêutica; indústria textil; indústria de papel e celulose; refinaria de petróleo; permutadores de calor; válvulas e peças de tubulações; indústria frigorífica, instalações criogênicas; depósitos de cerveja; tanques de fermentação de cerveja ; tanques de estocarem de cerveja; equipamentos para refino de produtos de milho; equipamentos para leiteria; cúpula para casa de reator de usina atômica; tubos de vapor; equipamentos e recipientes para usinas nucleares; peças para depósito de algumas bebidas carbonatadas; condutores descendentes de águas pluviais; carros ferroviários; calhas.

---

A barra de aço inoxidável possui  $300\pm 3$  mm de comprimento e 6 mm de diâmetro nominais, faces finais planas e perpendiculares ao eixo longitudinal, de acordo com a norma.

A barra será usada para contatar os óculos de sol. E será movimentada por um motor de passo, ligada por meio de um cabo de aço comum.



## 2.2. Circuito abaixador de tensão: Transformador de tensão

Um transformador de tensão foi utilizado para baixar a tensão de alimentação do equipamento: 220 V para a tensão de alimentação do forno: 61 V, valor que é bem próximo do calculado para o projeto (~50V).

O transformador teria de ser encomendado com as características (220 V para 50V). Porém, o Prof. Azauri Albano de Oliveira Junior do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, que é um dos responsáveis pelo Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência – LACEP na mesma universidade, sabendo da necessidade, cedeu para o projeto um transformador com as características de 220 V para 61,26 V, isso significa que a relação de transformação de tensão é de 3,6 : 1. O transformador doado é mostrado pela figura 7.

É interessante também ressaltar que o transformador isola o circuito do equipamento da rede elétrica, o que é muito importante.



Figura 7 - Transformador utilizado no projeto com relação de tensão 3,6:1



### 2.3. Fonte de calor: projeto do forno

A norma estipula que uma fonte de calor deve ser usada para aquecer a barra de aço e que seja capaz de aquecer a pelo menos 750°C.

Inicialmente foram pensados alguns tipos de fontes de calor, tais como maçarico, soprador térmico, soldadores eletrônicos, fornos de indução ou resistivos. Uma análise rápida mostra que o maçarico é um processo não muito seguro e quando é pensado na posterior automatização do processo, tornam-se bastante complexos. Os sopradores térmicos e soldadores eletrônicos não chegam à temperatura de aquecimento necessário para respeitar a norma (750°C), mesmo os vários modelos pesquisados. Os fornos de aquecimento por indução têm ótimo aproveitamento energético, mas acrescentam dificuldades para o sistema de eletrônica de potência e controle. Também deve ser acrescentado que termopares não podem ser utilizados para medir a temperatura nos fornos de indução, já que podem alterar o valor da medida. Mas, de acordo com a norma, um termopar deve ser utilizado. Então, o forno de indução não pôde ser usado.

Após muitas pesquisas realizadas, uma solução foi encontrada. A resistência da marca Kanthal, tipo A1 (*Iron-Chromium-Aluminium*), que é capaz de aquecer a altas temperaturas (máximo de 1400°C) e possui a vantagem de variar apenas 4% no valor da resistência quando aquecida de 20°C à 1000°C.

Definido o tipo de resistência, o forno pôde ser projetado, utilizando a literatura da empresa Kanthal, disponibilizada na internet no site da empresa. [www.kanthal.com]

Há diversos diâmetros para a resistência designada ao projeto. O diâmetro escolhido do fio Kanthal A1 foi  $d = 2,2\text{mm}$ , para considerar uma margem de segurança acima do diâmetro mínimo considerando o valor de corrente que passará pelo fio. A corrente pode ser calculada pela equação 1, que está descrita no material "*Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces ENG UK*", de onde também foram obtidas as constantes relacionadas na tabela 5.

$$\frac{I^2 \cdot C_t}{p} = \frac{A_c}{R_{20}} \quad (1)$$

Tabela 5 - Características da resistência Kanthal A1.

<<http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2011.

## KANTHAL A-1 and APM

### Wire Standard Stock Items. Strip Standard Sizes.

Resistivity  $1.45 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$ . Density  $7.1 \text{ g cm}^{-3}$ . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor  $C_t$  in following table.

| °C    | 20   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C_t$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.01 | 1.02 | 1.02 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.04 | 1.04 | 1.04 | 1.05 |

### Wire (at 20°C)

| Diameter [mm] | Resistance [ $\Omega/\text{m}$ ] | Resistivity [ $\text{cm}^2/\Omega$ ] | Weight [g/m] |
|---------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| 10.0          | 0.0185                           | 17017                                | 558          |
| 9.5           | 0.0205                           | 14590                                | 503          |
| 8.25          | 0.0271                           | 9555                                 | 380          |
| 8.0           | 0.0288                           | 8712                                 | 357          |
| 7.35          | 0.0340                           | 6790                                 | 300          |
| 7.0           | 0.0377                           | 5837                                 | 273          |
| 6.5           | 0.0437                           | 4673                                 | 236          |
| 6.0           | 0.0513                           | 3676                                 | 201          |
| 5.5           | 0.0610                           | 2831                                 | 169          |
| 5.0           | 0.0738                           | 2127                                 | 139          |
| 4.75          | 0.0818                           | 1824                                 | 126          |
| 4.5           | 0.0912                           | 1550                                 | 113          |
| 4.25          | 0.102                            | 1306                                 | 101          |
| 4.0           | 0.115                            | 1090                                 | 89.2         |
| 3.75          | 0.131                            | 897                                  | 78.4         |
| 3.5           | 0.151                            | 730                                  | 68.3         |
| 3.25          | 0.175                            | 584                                  | 58.9         |
| 3.0           | 0.205                            | 460                                  | 50.2         |
| 2.9           | 0.220                            | 416                                  | 46.9         |
| 2.8           | 0.235                            | 374                                  | 43.7         |
| 2.6           | 0.273                            | 299                                  | 37.7         |
| 2.5           | 0.295                            | 266                                  | 34.9         |
| 2.4*          | 0.321                            | 235                                  | 32.1         |
| 2.3           | 0.349                            | 207                                  | 29.5         |
| 2.2           | 0.381                            | 181                                  | 27.0         |
| 2.0           | 0.462                            | 136                                  | 22.3         |
| 1.8           | 0.570                            | 99.2                                 | 18.1         |
| 1.7           | 0.639                            | 83.6                                 | 16.1         |

\* only A-1

$C_t = 1.04$ ; fator de correção da temperatura, retirado da tabela 6 do material Kanthal A1 para que o forno tenha o poder de aquecer até 1000°C.

$p = 3 \frac{W}{cm^2}$ ; potência da carga de superfície do elemento em aquecimento, estabelecida, sendo que pela literatura o valor máximo varia de 3 a 4.

$\frac{A_c}{R_{20}} = 181 \frac{cm^2}{\Omega}$ ; área superficial do condutor em aquecimento sobre a resistência a 20°C, que é uma taxa dada pela tabela 6 do material Kanthal A1 e depende do diâmetro do fio escolhido.

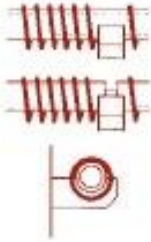
A partir da equação 1 pode-se obter a corrente que passa pela resistência e utilizando os valores das constantes do material, a corrente máxima será:

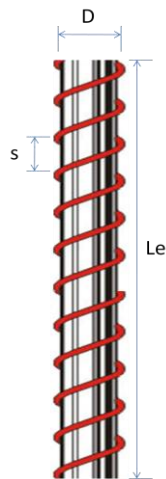
$$I = \sqrt{\frac{A_c}{R_{20}} * \frac{p}{C_t}} = \sqrt{\frac{181 \times 3}{1.04}} = 22,85A$$

Uma cerâmica graduada com passos (s), de acordo com a figura 6, foi doada ao projeto pela empresa EDG equipamentos, que fabrica fornos industriais. Com os dados estabelecidos anteriormente, os dados da tabela 6 e considerando os valores comerciais de cerâmica, o comprimento total de fio Kanthal A1 pôde ser calculado pela equação 2, também extraída da literatura citada acima. A tabela 6 mostra os parâmetros estabelecidos para o projeto e a figura 8, as dimensões da cerâmica do forno.

Tabela 6 - Características do diâmetro da cerâmica do forno em função do diâmetro do fio Kanthal A1.

[<<http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2011].

| Wire Elements                                   |                      |  |
|---|----------------------|--|
| Element Systems                                 |                      | Spiral   |
| Supports  |                      | Ceramic tubes<br> |
| Material  |                      | Sillimanite  |
| Max. furnace temperature                        | [°C]                 | 1300   |
| Max. wall loading at 1000°C furnace temperature | [kW/m <sup>2</sup> ] | 40   |
| Max. surface load at 1000°C furnace temperature | [W/cm <sup>2</sup> ] | 3–4  |
| Wire diameter (d)                               | [mm]                 | 2.0–6,5  |
| Strip thickness (t)                             | [mm]                 | –  |
| Strip width (w)                                 | [mm]                 | –  |
| Outer coil diameter (D)                         | [mm]                 | (12–14) d  |
| Max. loop length at 1000°C furnace temperature  | [mm]                 | –  |
| Min. pitch at max. loop length                  | [mm]                 | 3d   |



$d = 2\text{mm}$ ; diâmetro do fio kanthal A1 utilizado.

$Le = 32\text{cm}$ ; comprimento total do enrolamento do fio resistivo.

$D = 40\text{mm}$ ; diâmetro externo da cerâmica.

$s = 6.6\text{mm}$ ; passo do enrolamento.

Figura 8 - Parâmetros da Cerâmica do forno

$$\left[ \frac{\pi * (D - d)}{s} \right]^2 + 1 = \left[ \frac{l_{fio}}{Le} \right]^2 \quad (2)$$

Portanto, o comprimento do fio é estabelecido em  $l_{fio} = 5.77\text{m}$ .

Isso significa que são necessários 5,77m de fio Kanthal A1 para enrolar na cerâmica. E então, de acordo com a tabela 5, a Resistência em relação ao comprimento de fio Kanthal A1 é dada por:

$$\frac{R_{20}}{l_{fio}} = 0.381 \frac{\Omega}{m} \quad (3)$$

Com o auxílio da primeira lei de Ohm ( $V = R * I$ ), a tensão de trabalho do forno foi calculada, utilizando a equação 4.

$$\frac{R_{20}}{l_{fio}} = \frac{V}{I * l_{fio}} \quad (4)$$

$$R_{fio} = 2,2 \Omega$$

Assim, o forno projetado tem as seguintes características de alimentação:

$$V = 50,2 V$$

$$I = 22,85 A$$

Para a construção do forno, utilizou-se o projeto realizado, mas com os valores projetados aproximado para os valores comerciais e disponíveis como o caso do transformador, alimentando o forno com a tensão de  $V = 61,26V$ . O comprimento do fio aproximado para  $l_{fio} \cong 6 m$ , já que deve haver uma sobra para instalação dos terminais.

A construção do forno elétrico foi realizada com auxílio da empresa EDG equipamentos, que cedeu espaço em suas instalações, materiais e funcionários para auxílio. As figuras 9 e 10 mostram um pouco sobre o trabalho realizado.



Figura 9 - Construção do forno: centralização da cerâmica com a resistência Kanthal A1 enrolada



Figura 10 - Construção do forno: preenchimento com material refratário para isolamento de temperatura interna para o exterior

A figura 11 mostra o forno pronto para ser ligado.





Figura 11 - Forno elétrico construído para o projeto

Após o forno ter ficado pronto, foi ligado no LACEP e funcionou com sucesso. O aparato montado teve auxílio de 4 multímetros (acompanhamento das tensões e correntes de entrada e saída do transformador), 1 transformador (3,6:1), 1 variac (estabelecer tensões de entrada menores que 220V), 1 termopar e 1 termômetro com saída RS-232 (aquisição de Temperatura e Tensão, respectivamente, por meio de *software* computacional), conforme figura 12.



Figura 12 - Foto do aparato para realização dos testes

Alguns testes foram realizados utilizando as portas seriais, RS-232, tanto do termômetro quanto do multímetro para adquirir os dados por meio dos *softwares* supervisórios, inclusos no termômetro e no multímetro, instalados em um computador com duas placas seriais. Os dados adquiridos foram armazenados em tabelas com o formato dado pelos supervisórios e transferidos para planilhas do Excel posteriormente e dois testes estão apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Dados de temperatura e tensão, adquiridos pela RS-232, seguidos dos dados calculados.

| tempo<br>ensaio<br>[min] | Temp<br>[°C] | Entrada do Trafo    |                       | Saída do Trafo       |                        | Relação Trafo |          | Rfio<br>[Ohm] |
|--------------------------|--------------|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------|----------|---------------|
|                          |              | Tensão<br>(Vin) [V] | Corrente<br>(Iin) [A] | Tensão<br>(Vout) [V] | Corrente<br>(Iout) [A] | Vin/Vout      | Iout/Iin |               |
| 0                        | 24.1         | 60.00               | 2.00                  | 17                   | 5.95                   | 3.53          | 2.98     | 2.86          |
| 5                        | 44.4         | 60.62               | 1.97                  | 16.9                 | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 10                       | 69.9         | 60.70               | 1.97                  | 16.91                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 15                       | 95.4         | 60.70               | 1.97                  | 16.92                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 20                       | 124.4        | 60.86               | 1.97                  | 16.97                | 5.97                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 25                       | 151.8        | 60.48               | 1.96                  | 16.84                | 5.93                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 30                       | 171.5        | 60.38               | 1.96                  | 16.84                | 5.93                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 35                       | 197          | 60.48               | 1.96                  | 16.86                | 5.93                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 40                       | 212.1        | 60.41               | 1.95                  | 16.81                | 5.92                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 45                       | 229.8        | 60.45               | 1.96                  | 16.84                | 5.92                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 50                       | 247.5        | 60.49               | 1.96                  | 16.89                | 5.93                   | 3.58          | 3.03     | 2.85          |
| 55                       | 263.2        | 60.44               | 1.95                  | 16.83                | 5.92                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 60                       | 277.5        | 60.56               | 1.96                  | 16.86                | 5.93                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 65                       | 292.4        | 60.74               | 1.97                  | 16.93                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.84          |
| 70                       | 305.3        | 60.87               | 1.97                  | 17.02                | 5.98                   | 3.58          | 3.03     | 2.85          |
| 75                       | 318.3        | 60.66               | 1.96                  | 16.87                | 5.94                   | 3.60          | 3.03     | 2.84          |
| 80                       | 329.6        | 60.82               | 1.96                  | 16.92                | 5.94                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 85                       | 341.4        | 60.50               | 1.96                  | 16.89                | 5.94                   | 3.58          | 3.04     | 2.84          |

Continua.

Continuação.

| tempo<br>ensaio<br>[min] | Temp<br>[°C] | Entrada do Trafo    |                       | Saída do Trafo       |                        | Relação Trafo |          | Rfio<br>[Ohm] |
|--------------------------|--------------|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------|----------|---------------|
|                          |              | Tensão<br>(Vin) [V] | Corrente<br>(lin) [A] | Tensão<br>(Vout) [V] | Corrente<br>(lout) [A] | Vin/Vout      | lout/lin |               |
| 90                       | 351.7        | 60.65               | 1.96                  | 16.91                | 5.94                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 95                       | 362          | 60.96               | 1.97                  | 16.97                | 5.97                   | 3.59          | 3.04     | 2.84          |
| 100                      | 371.1        | 60.97               | 1.97                  | 16.98                | 5.97                   | 3.59          | 3.04     | 2.84          |
| 105                      | 380.5        | 60.97               | 1.97                  | 17.02                | 5.97                   | 3.58          | 3.03     | 2.85          |
| 110                      | 389.5        | 61.13               | 1.97                  | 17.03                | 5.98                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 115                      | 397.6        | 60.95               | 1.97                  | 16.97                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 120                      | 405.5        | 61.36               | 1.98                  | 17.07                | 6                      | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 125                      | 413.5        | 60.62               | 1.95                  | 16.87                | 5.92                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 130                      | 419.8        | 60.83               | 1.96                  | 16.93                | 5.94                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 135                      | 426.8        | 60.94               | 1.97                  | 16.98                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 140                      | 432.7        | 60.89               | 1.96                  | 16.92                | 5.94                   | 3.60          | 3.03     | 2.85          |
| 145                      | 438.9        | 60.76               | 1.96                  | 16.93                | 5.94                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 150                      | 444.1        | 60.67               | 1.95                  | 16.89                | 5.93                   | 3.59          | 3.04     | 2.85          |
| 155                      | 449.5        | 60.76               | 1.96                  | 16.93                | 5.94                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 160                      | 454.9        | 61.14               | 1.97                  | 17.04                | 5.97                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 165                      | 459.4        | 60.92               | 1.96                  | 16.97                | 5.95                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 170                      | 463.5        | 61.06               | 1.97                  | 16.98                | 5.95                   | 3.60          | 3.03     | 2.85          |
| 175                      | 469.5        | 61.14               | 1.97                  | 17.02                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.86          |
| 180                      | 473.1        | 60.97               | 1.96                  | 16.98                | 5.95                   | 3.59          | 3.04     | 2.85          |
| 185                      | 477.4        | 61.07               | 1.96                  | 17.01                | 5.96                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |
| 190                      | 481.5        | 62.34               | 1.97                  | 17.07                | 5.98                   | 3.65          | 3.03     | 2.85          |
| 200                      | 488.9        | 60.85               | 1.96                  | 16.93                | 5.92                   | 3.59          | 3.03     | 2.86          |
| 210                      | 494.9        | 60.40               | 1.94                  | 16.8                 | 5.88                   | 3.60          | 3.03     | 2.86          |
| 215                      | 497.6        | 60.37               | 1.94                  | 16.79                | 5.87                   | 3.60          | 3.03     | 2.86          |
| 220                      | 500.2        | 60.32               | 1.94                  | 16.77                | 5.88                   | 3.60          | 3.04     | 2.85          |
| 225                      | 502.9        | 60.20               | 1.93                  | 16.68                | 5.85                   | 3.61          | 3.03     | 2.85          |
| 240                      | 508          | 60.12               | 1.92                  | 16.71                | 5.85                   | 3.60          | 3.05     | 2.86          |
| <b>Médias:</b>           |              | 60.74               | 1.96                  | 16.92                | 5.94                   | 3.59          | 3.03     | 2.85          |

Conclusão.

Os dados foram necessários para obter a função de transferência do forno elétrico da temperatura ao degrau de tensão. Por ser importante a estabilização da temperatura durante o ensaio para adquirir essa curva, foi utilizada uma tensão de alimentação menor do que a calculada para utilizar no sistema de controle, já que implica em menor tempo para a estabilização da temperatura. Mas as implicações são as mesmas. A curva é mostrada no gráfico da figura 13.

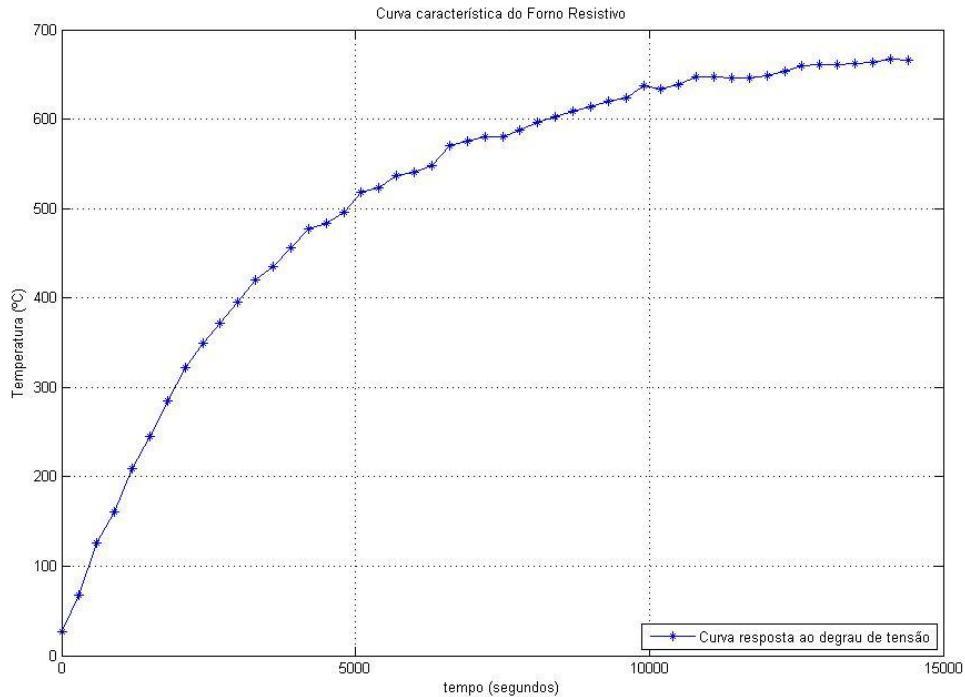


Figura 13 - Resposta da temperatura ao degrau de tensão (~17 V) em relação ao tempo para o forno, de acordo com os dados da tabela 7.

Vários testes foram realizados, porém os primeiros descartados, já que os métodos estavam sendo estabelecidos. Entre os ensaios que foram realizados com metodologia adequada, está o ensaio da tabela 7, que perdurou por 4 horas, adquirindo dados a cada 5 min. A tabela 8 e o gráfico da figura 14 estão apresentados aqui com a finalidade de mostrar que a curva gerada pelo ensaio anterior é concisa. Os gráficos foram gerados pelo matlab.

Tabela 8 – Tabela gerada com dados adquiridos pelos supervisórios do termômetro e do voltímetro

| tempo (Min) | Temperatura (°C) | Tensão (V) | Potência (W) |
|-------------|------------------|------------|--------------|
| 0           | 26.2             | 0.79       | 0.22         |
| 5           | 67.7             | 22.53      | 178.11       |
| 10          | 125.9            | 22.53      | 178.11       |
| 15          | 160.3            | 22.55      | 178.42       |
| 20          | 208.6            | 22.55      | 178.42       |
| 25          | 244.7            | 22.58      | 178.90       |
| 30          | 284.6            | 22.54      | 178.26       |
| 35          | 321.6            | 22.41      | 176.21       |
| 40          | 349.6            | 22.41      | 176.21       |
| 45          | 371.4            | 22.4       | 176.06       |
| 50          | 395.8            | 22.4       | 176.06       |
| 55          | 419.7            | 22.27      | 174.02       |
| 60          | 435.6            | 22.27      | 174.02       |
| 65          | 456.7            | 22.39      | 175.90       |
| 70          | 476.9            | 22.38      | 175.74       |
| 75          | 483.2            | 22.51      | 177.79       |
| 80          | 495.7            | 22.52      | 177.95       |
| 85          | 517.9            | 22.45      | 176.84       |
| 90          | 522.6            | 22.56      | 178.58       |
| 95          | 537.2            | 22.47      | 177.16       |
| 100         | 540              | 22.36      | 175.43       |
| 105         | 547.4            | 22.39      | 175.90       |
| 110         | 570.9            | 22.26      | 173.86       |
| 115         | 575              | 22.24      | 173.55       |
| 120         | 580.5            | 22.28      | 174.17       |
| 125         | 580.7            | 22.34      | 175.11       |
| 130         | 587.9            | 22.4       | 176.06       |
| 135         | 596.3            | 22.52      | 177.95       |
| 140         | 602              | 22.34      | 175.11       |
| 145         | 609.3            | 22.35      | 175.27       |
| 150         | 613.5            | 22.3       | 174.49       |
| 155         | 619.8            | 22.34      | 175.11       |
| 160         | 623.1            | 22.28      | 174.17       |
| 165         | 637.4            | 22.32      | 174.80       |
| 170         | 633.1            | 22.29      | 174.33       |
| 175         | 638.8            | 22.3       | 174.49       |
| 180         | 647.1            | 22.32      | 174.80       |
| 185         | 647.3            | 22.36      | 175.43       |
| 190         | 645.6            | 22.32      | 174.80       |
| 195         | 645.8            | 22.14      | 171.99       |

Continua.

Continuação

| tempo (Min)    | Temperatura (°C) | Tensão (V) | Potência (W) |
|----------------|------------------|------------|--------------|
| 200            | 648.9            | 22.19      | 172.77       |
| 205            | 653.8            | 22.13      | 171.84       |
| 210            | 660              | 22.11      | 171.53       |
| 215            | 660.8            | 22.23      | 173.39       |
| 220            | 661              | 22.13      | 171.84       |
| 225            | 661.7            | 22.1       | 171.37       |
| 230            | 663.9            | 22.05      | 170.60       |
| 235            | 666.9            | 22.07      | 170.91       |
| 240            | 665.9            | 22.18      | 172.61       |
| <b>Médias:</b> |                  | 21.90      | 171.56       |

Conclusão.

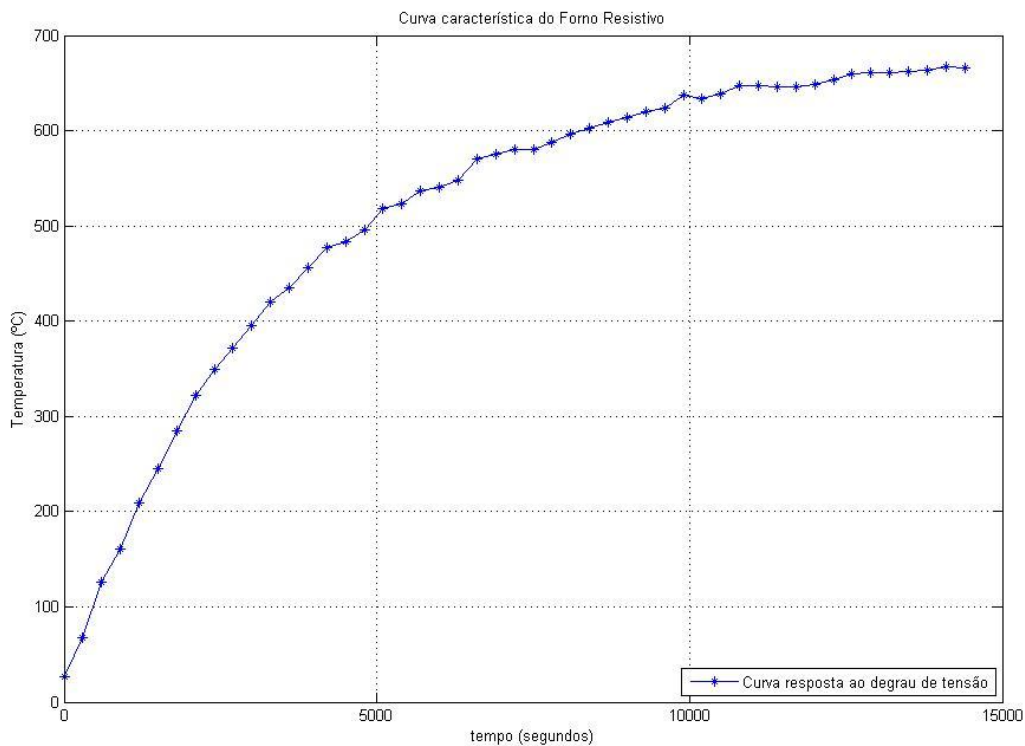


Figura 14 - Resposta da temperatura ao degrau de tensão (~22 V) em relação ao tempo para o forno, de acordo com os dados da tabela 8.

## 2.4. Termopar e dispositivo indicador de temperatura

As normas sobre o teste de inflamabilidade exigem o uso de um termopar. O termopar para o teste foi escolhido de modo analítico, utilizando o gráfico da figura 15, que compara as curvas de tensão gerada pelo termopar em relação à temperatura, de alguns tipos de termopares.

O gráfico da figura 15 mostra que o termopar do tipo k é o que apresenta melhor linearidade e, além disso, é o mais comum no mercado. Estes são os principais motivos da escolha do uso do termopar tipo k.

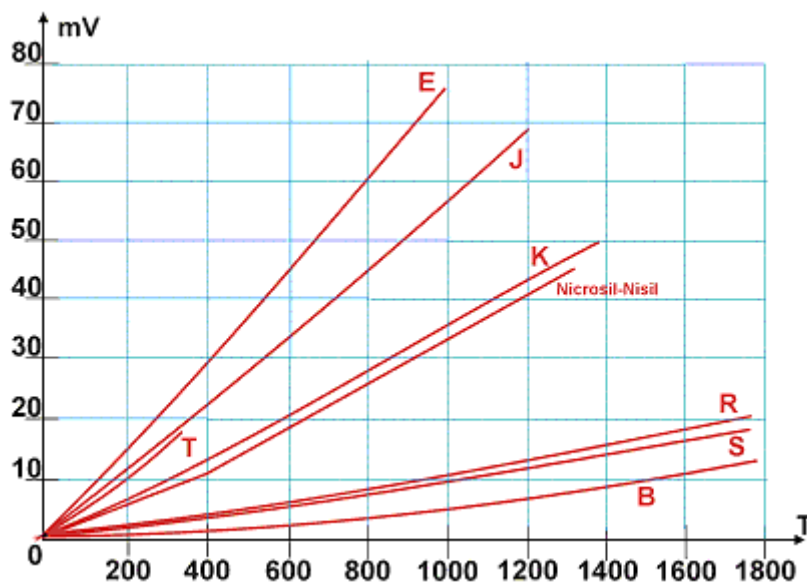


Figura 15 - Curva comparativa dos tipos de termopares. [EDUARDO. Termopares. Disponível em: <[http://www.termopares.com.br/teoria\\_sensores\\_temperatura\\_termopares\\_curvas\\_variacao\\_fem/](http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termopares_curvas_variacao_fem/)>. Acesso em: 27 set. 2011.]

O termopar tipo k adquirido (instrumento MTK-16 da Minipa – mostrado pela figura 16) foi instalado dentro do forno elétrico conectado em um termômetro (instrumento MT-550 da Minipa – mostrado pela figura 17), que além de indicar a temperatura, transmite-a por meio de uma porta serial RS-232 a um circuito conversor RS-232 para TTL, que fornece à saída um sinal de 0 a +5 V, permitindo que o microprocessador receba os dados. Os dados transmitidos são usados para o controle de temperatura do forno em  $650 \pm 20$  °C via *software*. O sistema tem capacidade de medir temperaturas de até 1370 °C.



Figura 16 - Termômetro MTK-16 da Minipa

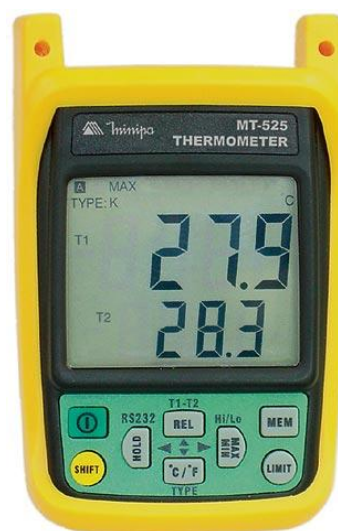


Figura 17 - Termômetro MT-525 da Minipa

O circuito conversor RS-232 para TTL foi colocado na placa 1, juntamente com os outros componentes de baixa potência, mostrados nas figuras 30 e 31. O circuito conversor RS-232 para TTL utiliza os componentes: 1 MAX232, 4 capacitores eletrolíticos de  $1\mu\text{F}$ , 1 capacitor eletrolítico de  $10\mu\text{F}$ , 1 conector tipo DB9.

Para fazer a transmissão de dados do termômetro MT-525 para o circuito conversor RS-232 – TTL via porta serial RS-232, houve a necessidade de consultar o manual do fabricante do termômetro (Minipa), que é mostrado pela figura 18 e também programar o microcontrolador PIC 18F4550 para mostrar num display LCD os dados e respectiva ordem, que estavam sendo transmitidos pela porta serial RS-232 do termômetro.



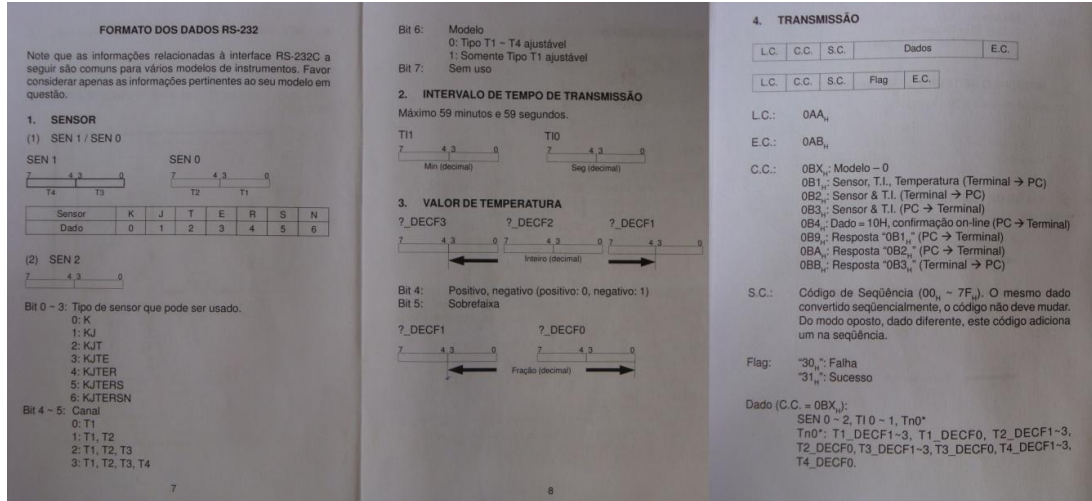


Figura 18 - Manual do termômetro MT-525, mostrando funcionamento da transmissão da porta serial RS-232.

## 2.5. Circuito de Eletrônica de Potência: Projeto Controlador CA-CA

Neste capítulo será tratado do método do controle de potência do forno, como foi escolhido, dentre os dois tipos de conversores CA-CA propostos, que são circuitos que produzem na saída uma tensão alternada, dada uma entrada também senoidal, mas com características distintas, seja em valor eficaz, seja em frequência, ou em ambas. E como foi realizado, tendo em vista que o mais importante é o controle de temperatura do forno, conforme foi estipulada pelo projeto, em  $650 \pm 20$  °C.

Em algumas aplicações, alimentadas em corrente alternada (CA), nas quais se deseja alterar o valor da tensão (e da corrente) eficaz da carga, é usual o emprego dos chamados Variadores de Tensão. Como aplicações típicas podem-se citar, dentre outras:

- aquecimento (controle de temperatura);
- reguladores de tensão;
- controle de intensidade luminosa em lâmpadas incandescentes;
- acionamento de motores CA;
- partida suave de motores de indução;
- compensação de reativos em sistemas de potência (RCT, CCT).

O material da kanthal [SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. “**Handbook**”. Disponível em: <<http://www.mtixtl.com/machineflyer/Handbook.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2011.], fornece dados e também propõe que seja utilizado um dos dois métodos para projetar o controlador do forno:

- Controle de Fase
- Controle *On-Off*

A carga é puramente resistiva (o forno tem apenas uma resistência) e o circuito é monofásico, conforme é mostrado na figura 19.

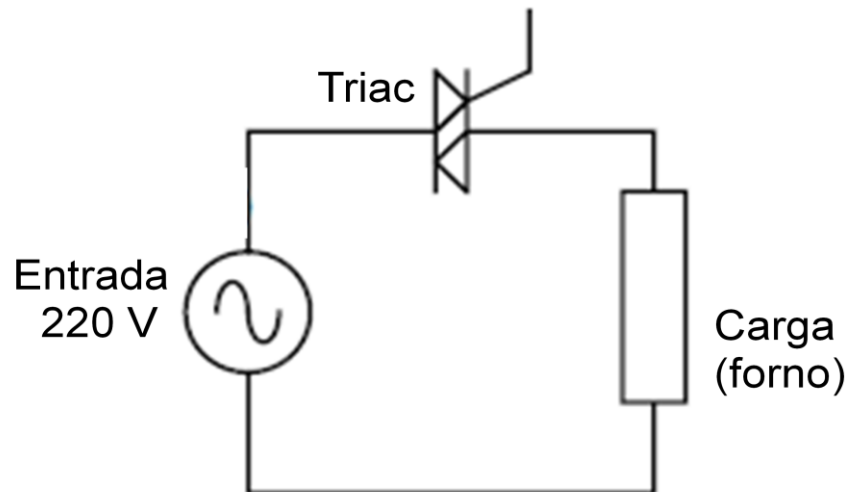


Figura 19 - Circuito de potência, controlador CA-CA, utilizando Triac, onde a carga é o forno

No Controle de Fase, em um dado semiciclo da rede, o Triac (CI que contém dois SCR's) é acionado em um determinado instante, fazendo com que a carga esteja conectada à entrada por um intervalo de tempo menor ou igual a um semiciclo. Os valores de tensão, corrente e potência na carga dependerão, não apenas de ângulo de disparo, mas também do tipo de carga que é alimentada, que no caso é Resistiva.

A amplitude da componente fundamental da tensão sobre a carga é dada por:

$$V_{h1} = V_i * \sqrt{\left[ \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2\pi} \right]^2 + \frac{[\cos(2\alpha) - 1]^2}{(2\pi)^2}} \quad (5)$$

A variação das componentes harmônicas da tensão na carga é dada por:

$$V_{h(2k-1)} = \frac{V_i}{\pi} * \sqrt{\frac{k^2 - k + 1}{2k^2 * (k-1)^2} - \frac{\cos(2\alpha)}{2k * (k-1)} + \frac{\cos(2k\alpha)}{2k^2 * (k-1)} - \frac{\cos[2(k-1)\alpha]}{2k * (k-1)^2}} \quad (6)$$

Onde,  $\alpha$  é o ângulo de disparo do SCR, em radianos, medido a partir do cruzamento da tensão com o zero e  $k$  inteiro e maior que 1.

A Figura 20 relaciona a Amplitude dos harmônicos de tensão (normalizado em relação à amplitude da tensão de entrada), para carga resistiva.

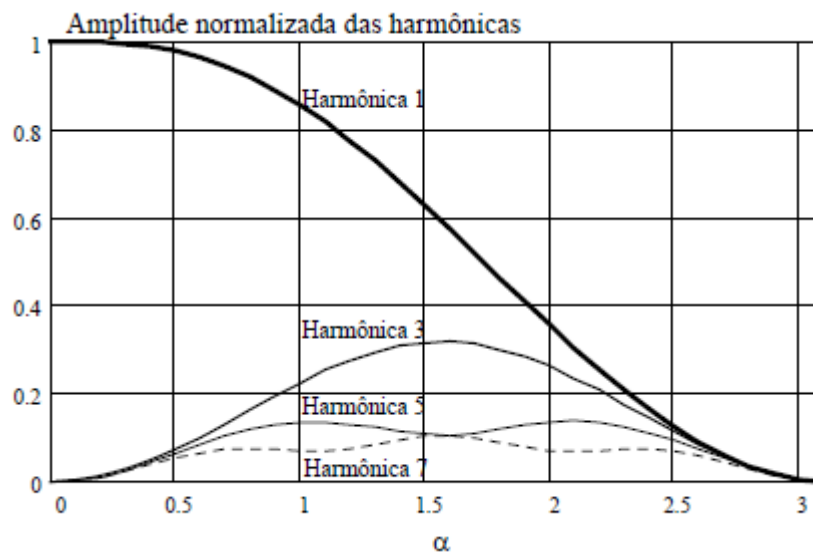


Figura 21 - Amplitude dos harmônicos de tensão (normalizado em relação à amplitude da tensão de entrada), para carga resistiva.

O Controle de Fase gera harmônicas no sinal, que podem interferir no sistema, principalmente na parte de baixa potência. Por este motivo, determinou-se o uso do Controle tipo *On-Off*, considerando a desvantagem apresentada do Controle de Fase.

Para realizar o Controle do Triac pelo método *On-Off*, três hipóteses foram feitas a fim de determinar a variável a ser controlada na alimentação do forno:

- Corrente (I)
- Tensão (V)
- Potência (P)

A Corrente (I) e a Tensão (V) se relacionam de forma quadrática e isso poderia trazer algumas complicações para o processamento dos cálculos. Por este motivo, foi determinado que a variável a ser controlada fosse a Potência (P), pensando em facilitar o projeto onde fosse possível. As equações que relacionam cada variável citada são mostradas pela tabela 9.

Tabela 9 - Hipóteses da utilização das variáveis corrente, tensão ou potência como variáveis de controle para a alimentação do forno e suas respectivas funções matemáticas.

| Equação      |   |
|--------------|---|
| Corrente (I) | $I_{oef} = \sqrt{\frac{n}{(n+m)2\pi} \int_0^{2\pi} I_i^2 [\text{sen}(wt)]^2 d(wt)} = \frac{I_i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n}{n+m}} = I_{ef} \sqrt{\frac{\delta}{T_{ciclos}}}$ |
| Tensão (V)   | $V_{oef} = \sqrt{\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} V_i^2 [\text{sen}(wt)]^2 d(wt)} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_{ef} \sqrt{\frac{\delta}{T_{ciclos}}}$ |
| Potência (P) | $P = P_{MAX} * \frac{\delta}{T_{ciclos}} = \frac{V_i^2}{R} * \frac{\delta}{T_{ciclos}}$   |

O Controle *On-Off* é usado geralmente em situações em que a constante de tempo da carga é muito grande em relação ao período da rede CA, como em sistemas de aquecimento. O controle consiste simplesmente em ligar e desligar a alimentação da carga (em geral uma resistência). O intervalo de condução e também o de bloqueio do interruptor é tipicamente de muitos ciclos da rede.

Para cargas resistivas, tanto o início da condução quanto o fim podem ocorrer em situações em que tensão e corrente são nulas (*zero crossing* - início e final de cada semiciclo da rede). Assim, terá então, o chamado controle por ciclos inteiros. Sua vantagem é o de praticamente eliminar problemas de Interferência Eletromagnética (IEM) devido a baixos valores de di/dt e dv/dt produzidos por este tipo de modulação.

Para o forno foi escolhido  $T = 1$  seg, contendo 60 ciclos da tensão de alimentação, usando o PWM interno do PIC 18f4550. A conta basicamente pode ser feita como mostra a equação 7.

$$T = \frac{1}{60} * T_{ciclos} = 1 \text{ seg} \rightarrow T_{ciclos} = 60 \text{ ciclos (7)}$$

Dentro do período escolhido, a duração do fornecimento de potência à carga varia desde zero à potência máxima, o que significa zero ciclos ( $\delta=0$ ) a 60 ciclos ( $\delta=60$ ) para determinar o tempo que a porta do PIC ficará em alto (5 V) acionando o gate do triac. A precisão do ajuste depende, assim, da base de tempo utilizada. O ajuste da tensão aplicada à carga pode ter uma resolução mínima de 1/60. A potência é calculada por período, dado o valor de  $\delta$ , tal como mostra a equação 8.

$$P = P_{MAX} * \frac{\delta}{T_{ciclos}} = \frac{V_i^2}{R} * \frac{\delta}{T_{ciclos}} = \frac{1305,6}{60} * \delta = 21,76 * \delta \text{ (8)}$$

A figura 21 mostra a saída para os dois tipos de Controle citados (Fase e *On-Off*), que são conversores CA-CA.

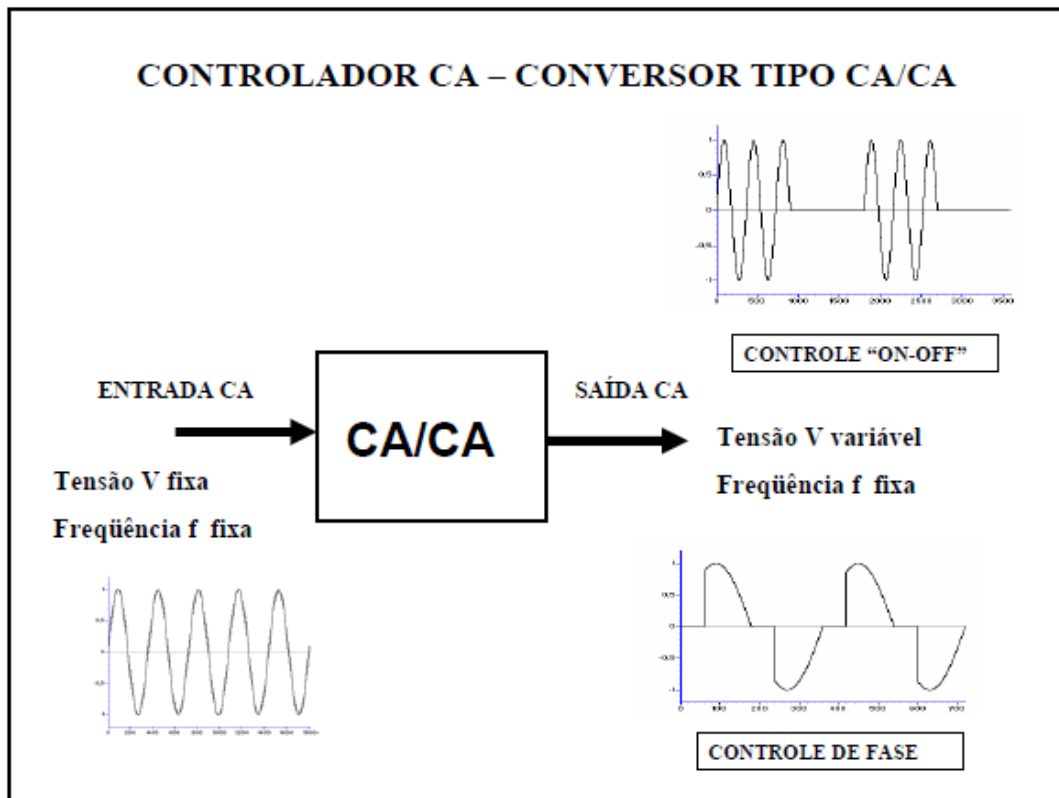


Figura 22 - Ondas de saída do controlador CA-CA, pelos controles *On-Off* e de fase. [OLIVEIRA Jr., A. A. **Controladores de tensão CA monofásicos**. Apostilas de aula. 2010.]

O circuito de potência do tipo Controlador CA-CA foi projetado utilizando um Triac BTA41, cujas características principais são mostradas pela tabela 10. A figura 22 mostra o tipo de encapsulamento do CI utilizado e a simbologia usada para tratar este tipo de componente nos diagramas eletrônicos.

Tabela 10 - Características principais do triac BTA41

[<[http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2011].

| Symbol            | Value       | Unit |
|-------------------|-------------|------|
| $I_{T(RMS)}$      | 40          | A    |
| $V_{DRM}/V_{RRM}$ | 600 and 800 | V    |
| $I_{GT} (Q_1)$    | 50          | mA   |

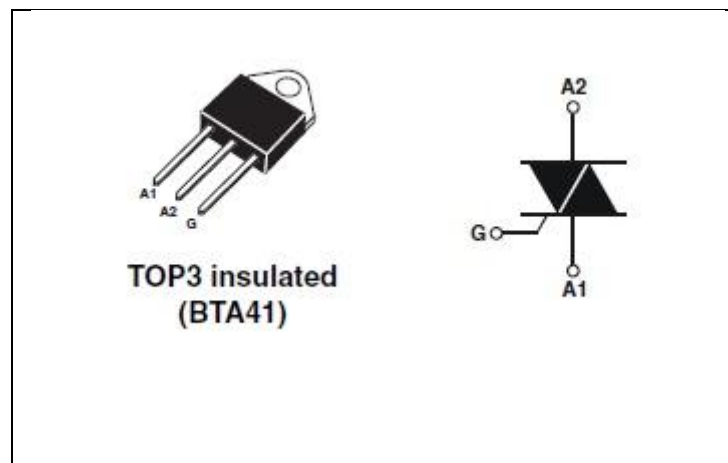


Figura 23 - Triac BTA41 usado no projeto

[<[http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2011].

## 2.6. Motor de passo

O motor de passo foi utilizado para movimentar a barra no sentido vertical. Ele foi programado conforme a tabela 11.

Tabela 11 - Passo completo

| Nº do passo | Bobina 3 | Bobina 2 | Bobina 1 | Bobina 0 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 1           | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 2           | 0        | 1        | 1        | 0        |
| 3           | 0        | 0        | 1        | 1        |
| 4           | 0        | 0        | 0        | 1        |

A forma de operação do motor foi o modo passo completo (*Full-step*) com acionamento de 2 bobinas a cada passo, já que a necessidade é maior torque.

O motor de passo tem as seguintes características:

-Tensão: 12V

-Corente: 340mA

E é acionado pelo driver L298N, mostrado pela figura 23.

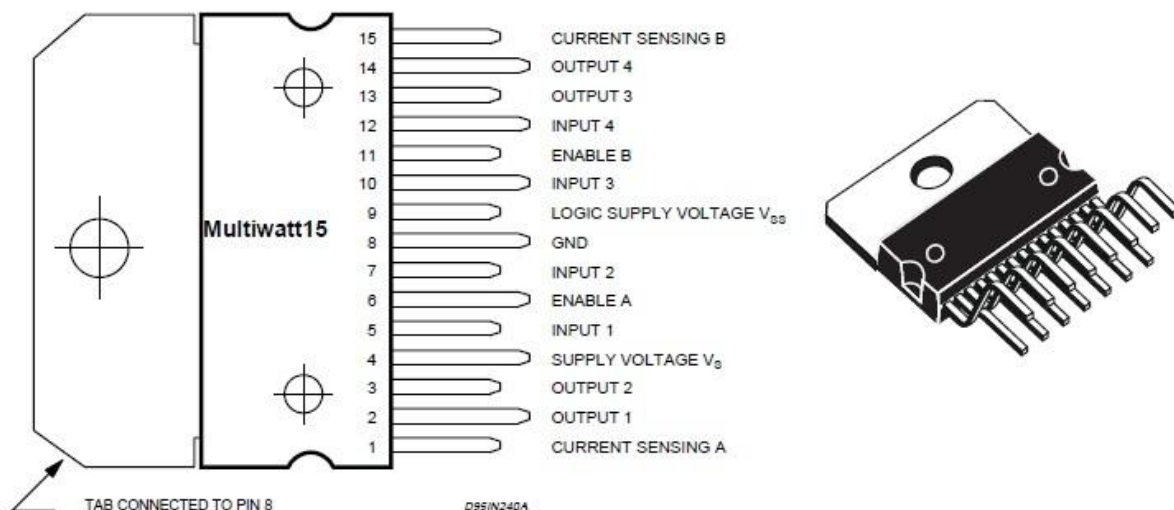


Figura 24 - Driver utilizado para acionamento do motor de passo, LN298

[<[http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf)>. Acesso em: 27set. 2011.]



## 2.7. Projeto do Controlador tipo PI

Para controlar a temperatura do forno, foi necessário projetar um controlador digital do tipo PI (proporcional / integral), utilizando as técnicas de controle analógico e digital, considerando a planta do sistema (forno),  $G(s)$  um sistema de 1º grau, tal como será visto posteriormente.

O sistema de controle de temperatura do forno foi feito conforme o modelo esquemático da figura 24, onde o controlador C foi projetado; o ganho k, que é a potência fornecida pelo controlador CA-CA, de acordo com a equação 8, mostrada anteriormente; a planta  $G(s)$ , é a função do forno.

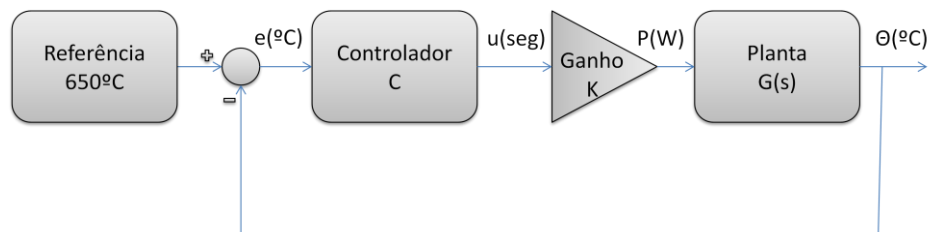


Figura 25 - Modelo esquemático do bloco de controle

O controlador foi desenvolvido utilizando técnicas de controle digital, programadas e simuladas no programa matlab.

Inicialmente, para extrair a função de transferência do forno,  $G(s)$ , utilizando as tabelas 7 e 8 e a função "IDENT" no matlab. Conhecida a função  $G(s)$ , função de transferência de tensão para temperatura, e sabendo que o ganho k é dado por:  $k = P_{MAX} * \frac{1}{T_{ciclos}} = 21,76$ , foi feito o produto  $k * G(s)$ , com a função "SERIES" do matlab.

A função  $k * G(s)$ , obtida do forno foi de 1º ordem e é mostrada pela equação 6.

$$k * G(s) = \frac{2598}{4632 * s + 1} \quad (6)$$

Então, a função  $G(s)$  foi discretizada com tempo de amostragem (*sample time*) de 1 seg, gerando a função  $GD(z)$ , para ser usada na ferramenta “RLTOOL” do matlab, onde foi desenvolvido o controlador. A função  $GD(z)$  é mostrada pela equação 7.

$$GD(z) = \frac{1.121}{z - 0,9996} \quad (7)$$

No “RLTOOL”, o controlador foi planejado com pólos, zeros e ganho. Assim, na janela do lugar das raízes, o pólo do controlador foi ajustado tão próximo de 1, para balancear ganho baixo com tempo de resposta rápido para o sistema de controle, conforme é mostrado na figura 25.

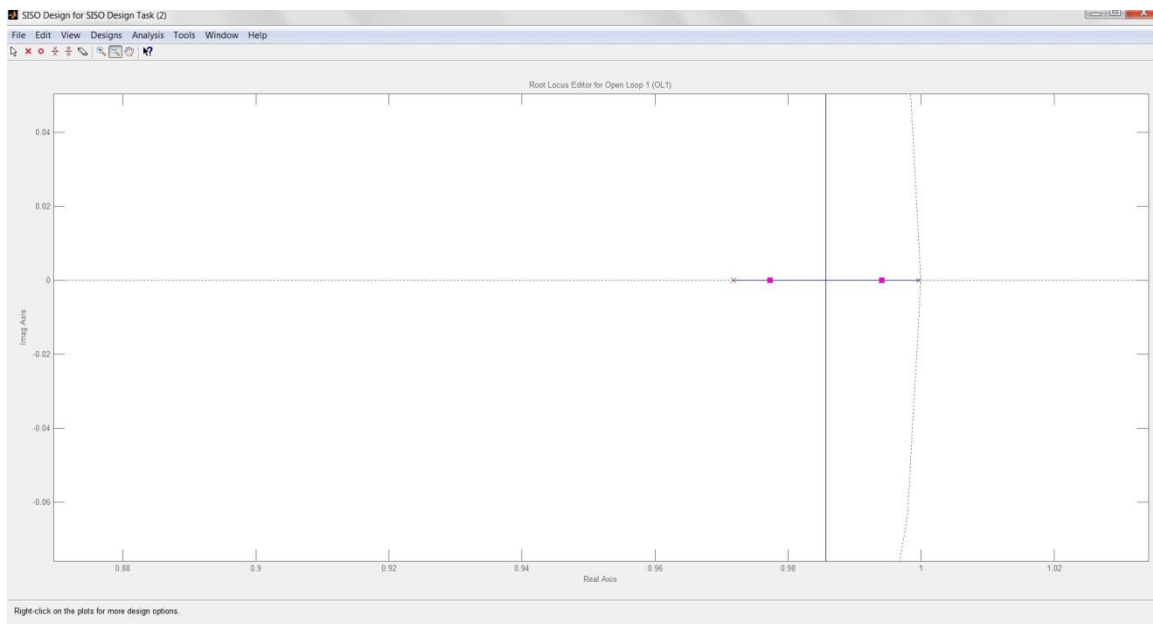


Figura 26 – “RLTOOL”, lugar das raízes

E então, automaticamente, um ganho foi gerado pelo matlab. Dessa forma, o controlador  $C(z)$  assumiu os valores descritos pela equação 8.

$$C(z) = \frac{0.00010917}{z - 0,972} \quad (8)$$

Para verificação do projeto do controlador, as curvas de resposta da temperatura ao degrau de potência aplicado e resposta do erro de temperatura do forno ao degrau de potência aplicado, mostrada pela figura 26. Analisando esta figura, pôde ser verificado que o forno atinge a temperatura necessária e com valores de entrada possíveis ao sistema.

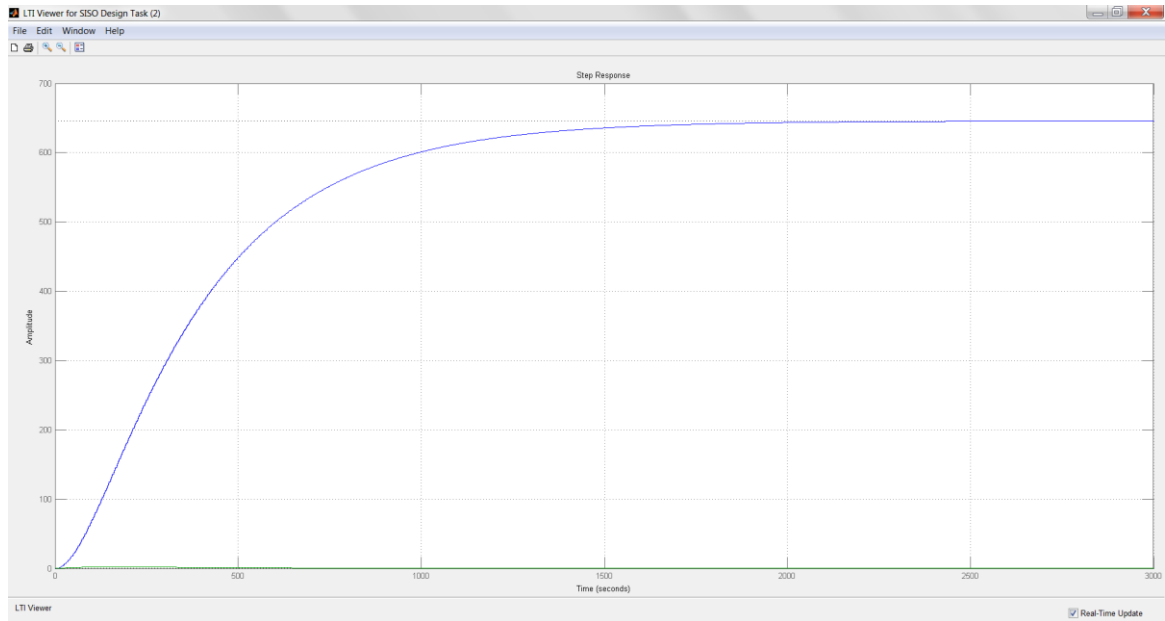


Figura 27 – (a) Curva azul: Resposta da temperatura do forno ao degrau de potência aplicado; (b) Curva verde: Resposta do erro de temperatura do forno ao degrau de potência aplicado.

Estes passos descritos são do programa colocado no ANEXO A.

Com o controlador projetado,  $C(z)$ , e a função da planta,  $G(s)$ , foi usada a ferramenta “simulink” do matlab para simular o sistema completo, podendo verificar possíveis erros. A figura 27, mostra o circuito usado na simulação pelo simulink e é observado que o bloco *saturation* foi usado para limitar a saída do controlador ( $\delta$ ) em 1 seg, que é o período total de um ciclo ( $T$ ).

O resultado da simulação no simulink, figura 28, foi satisfatório e condizente com o projetado no matlab. A saída, vista do *scope*, é mostrada pela figura 28.

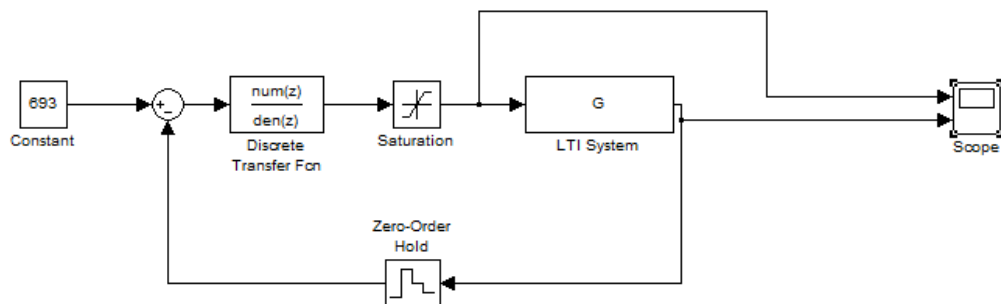


Figura 28 – Circuito usado na simulação do sistema completo no simulink (matlab).

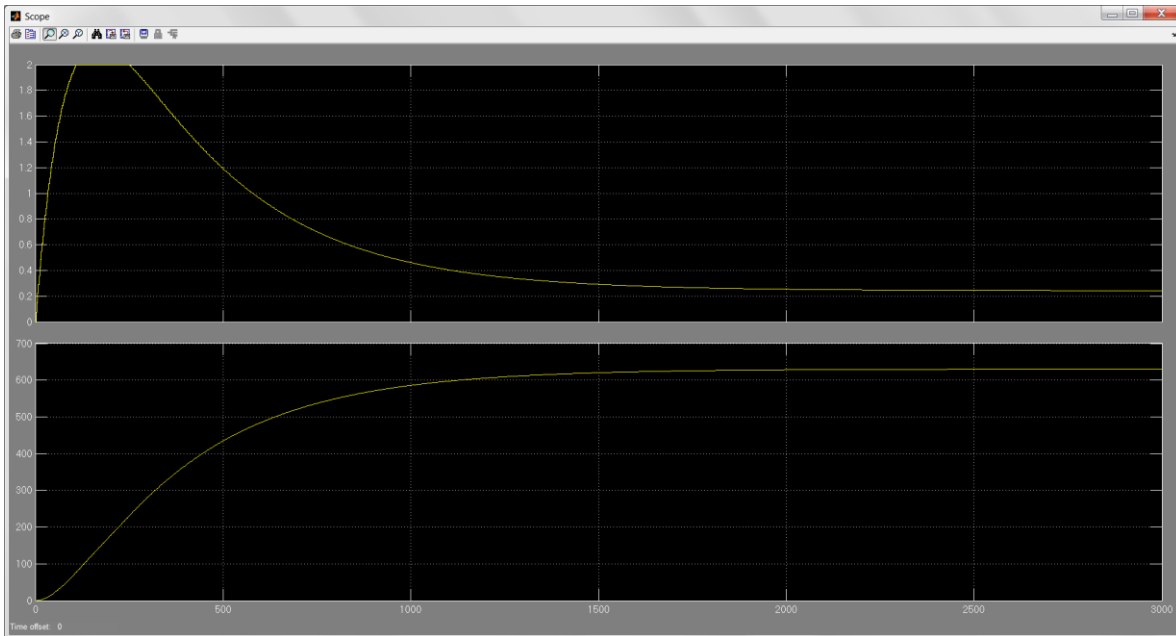


Figura 29 – (a) Curva superior: Tempo necessário ligado durante o aquecimento, sendo que foi estabelecido o máximo de 2 seg por período T; (b) Curva inferior: Resposta da temperatura ao degrau de potência aplicado.

## 2.8. Software

O *software* foi desenvolvido para o funcionamento dos componentes:

- controlador da temperatura;
- controle do motor de passo e, assim, da movimentação vertical da barra de aço;
- recebimento e tratamento dos dados de temperatura do termômetro, via RS-232;
- temporização para o contato da barra de aço com os óculos de sol;
- disponibilização para o acionamento do equipamento pelo usuário;

O *software* foi programado no PIC18F4550, vide figura 29, e pode ser visto no ANEXO B.

### 40-Pin PDIP

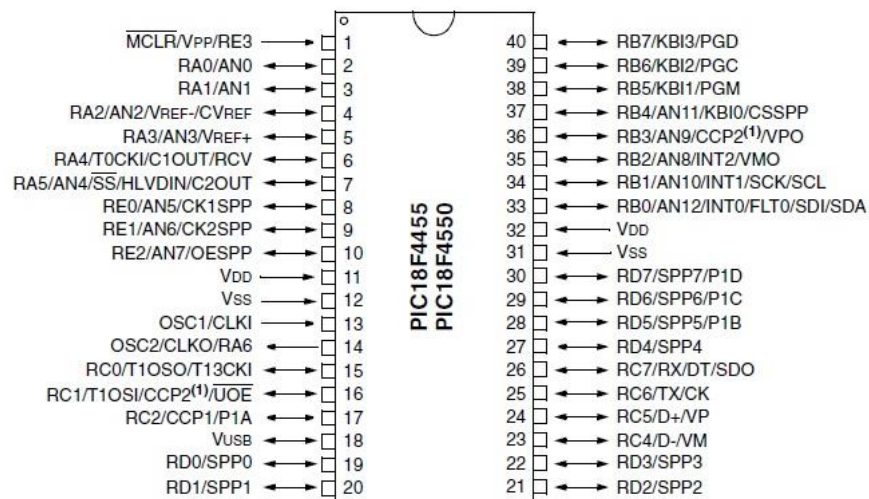


Figura 30 - Estrutura organizacional do PIC 18F4550

[<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2011].

O tempo para realização do experimento, que é o tempo de contato entre a barra de aço e os óculos de sol, é de  $5 \pm 0,5 \text{ seg}$  e é feito por um temporizador (timer) na programação do microcontrolador (PIC18F4550).

As ligações dos pinos no PIC ficaram como é mostrado na figura 30 e descrito a seguir:

- Pino 1 – MCLR: lógica de Reset do PIC, feita com 3 resistores (2 de  $1k\Omega$  e 1 de  $10k\Omega$ ), 1 capacitor de  $10\mu F$  e 1 conector 2x2, como mostrado na figura 30;
- Pinos 11 e 32 - Vdd: alimentação da fonte em +5V. Os dois pinos devem ser alimentados, como mostrado na figura 30;
- Pinos 12 e 31 - Vss: terra da fonte. Os dois pinos devem ser alimentados, como mostrado na figura 30;
- Pino 33 – INT0: Interrupção externa 0, utilizada para ligar o equipamento depois que ele estiver pronto. Ativa em 0, feita com 3 resistores (2 de  $1k\Omega$  e 1 de  $10k\Omega$ ), 1 capacitor de  $10\mu F$  e 1 conector 2x2, como mostrado na figura 30;
- Pino 16 – Porta RC1, usada para ativar o triac BTA41, que está alocado na placa 2, de potência, como mostrado nas figuras 30e 31;
- Pino 26 – Entrada Rx da transmissão Tx da RS-232 do termômetro, como mostrado na figura 30;
- Pinos 27, 28, 29 e 30 – Portas RD4, RD5, RD6, RD7 fazem o controle do motor de passo, mandando a sequência de pulsos, de acordo com a tabela 11, ao driver L298N, como mostrado na figura 30;
- Pinos 33, 34, 35, 36, 37, 38, 38, 39 e 40 – Portas destinadas ao display LCD 20x4, que fornece as informações necessárias ao usuário do equipamento, como mostrado na figura 30.

## **2.9. Construção da placa de circuito de impresso**

Para o circuito eletrônico projetado foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso, com a finalidade de poder embarcar o circuito dentro do equipamento. Foi considerado necessário fazer duas placas para poder separar o circuito de baixa potência (figuras 30 e 31) com o de alta potência (figuras 32 e 33), isto é, o controlador CA-CA dispôs de uma placa, já que precisa de trilhas e outras condições especiais.

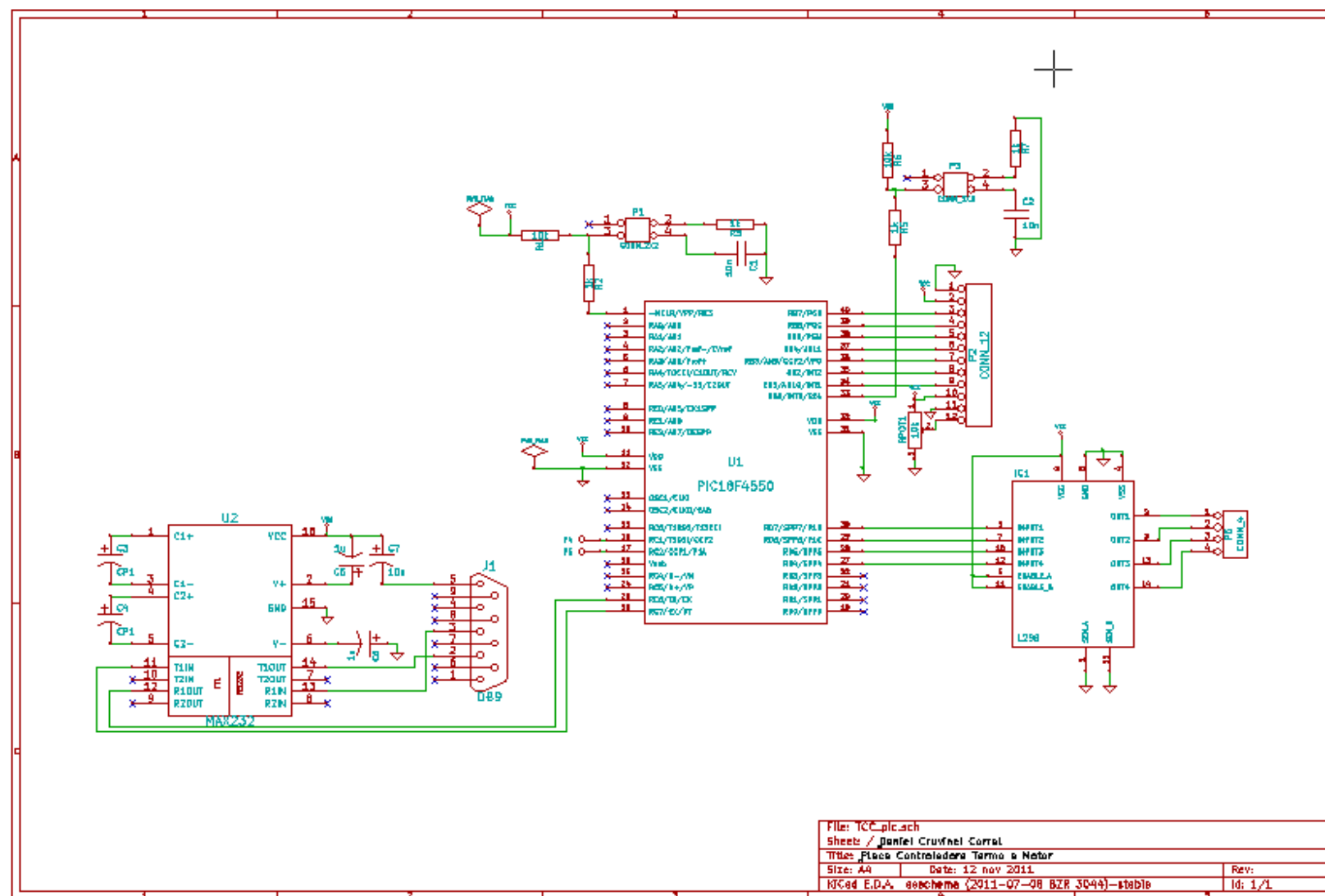


Figura 31 - Esquemático da placa 1, circuito de baixa potência



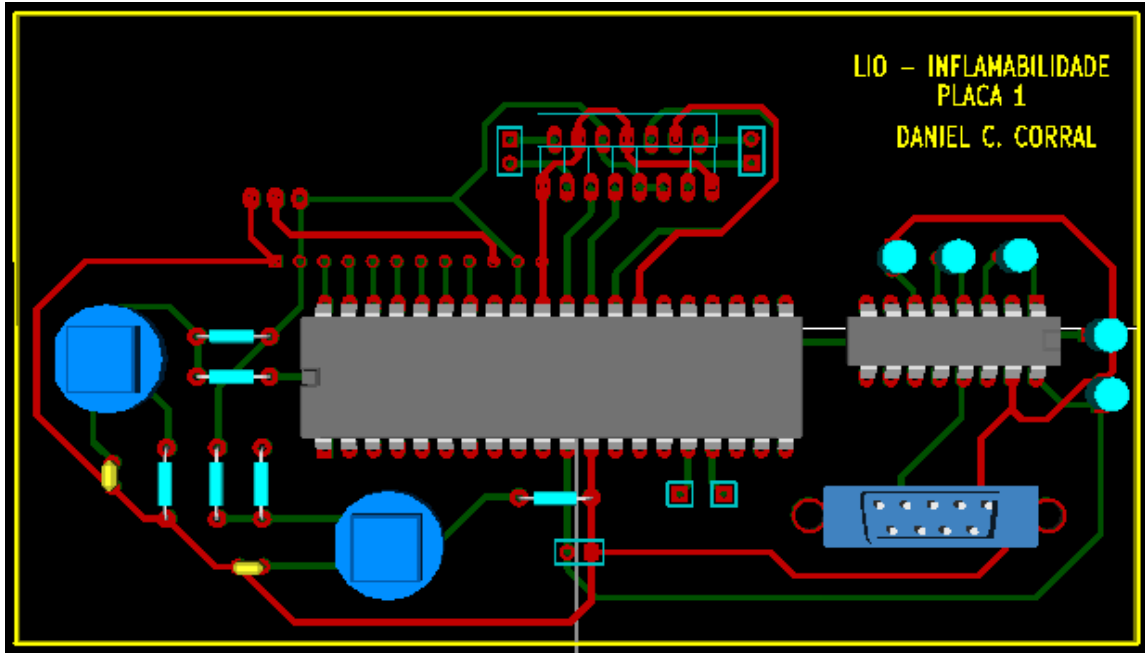


Figura 32 - Placa 1 visualizada no modo 3D do programa kicad

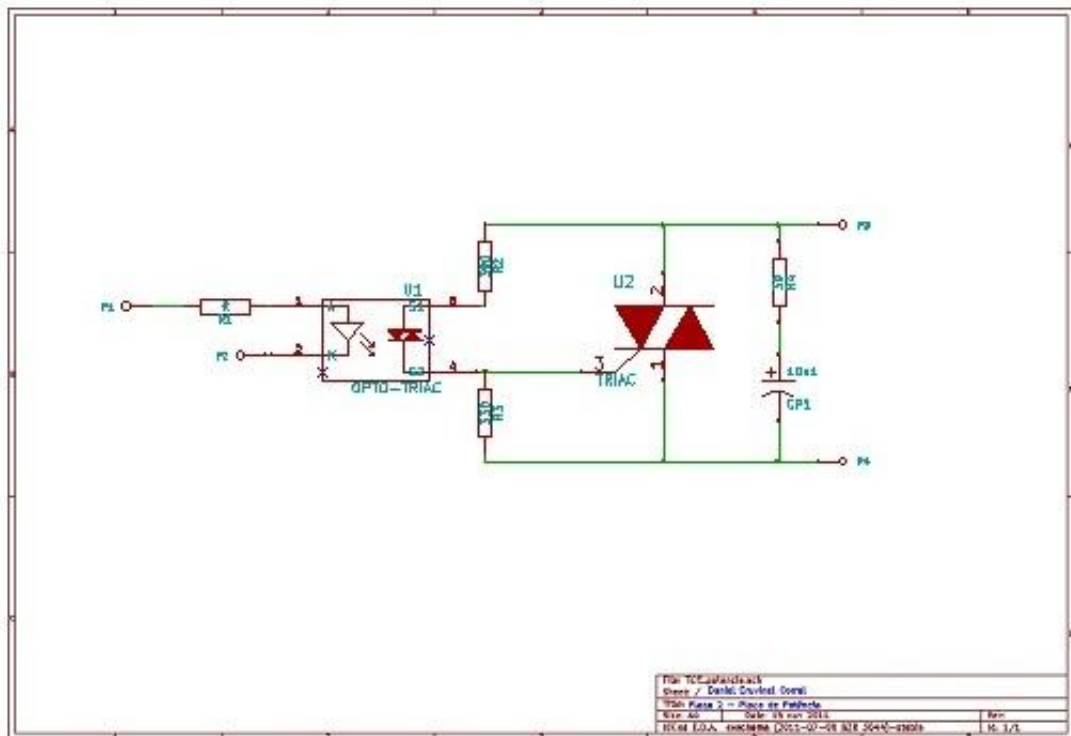


Figura 33 - Placa 2, controlador CA-CA (circuito de alta potência)

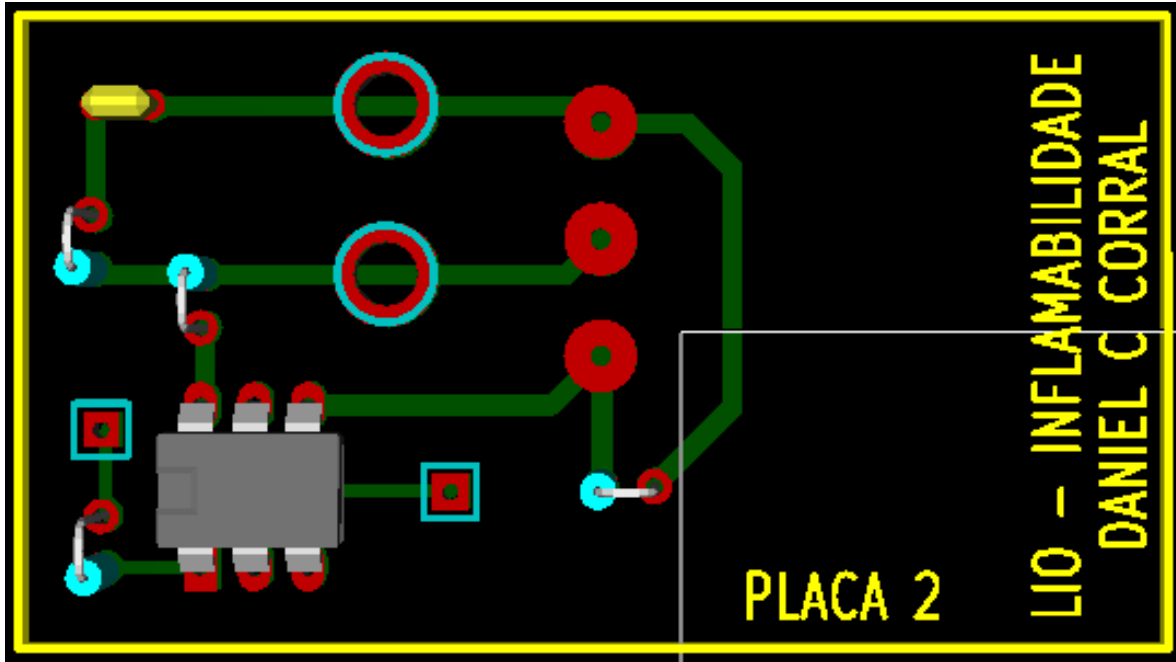


Figura 34 - Placa 2 visualizada no modo 3D do programa kicad

### 3. Resultados

O resultado do projeto é o equipamento que está mostrado pela figura 34.



Figura 35 - Equipamento para realizar o teste de inflamabilidade pronto

Os testes do equipamento foram feitos com o circuito montado em protoboard, considerando que as placas de circuito impresso demoraram um pouco para ficarem prontas. O resultado foi excelente. A temperatura do forno foi controlada com a margem de erro dentro do esperado,  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a movimentação da barra pelo motor de passo funcionou corretamente, assim como o tempo de contato que ela deve ficar com os óculos de sol ( $5 \pm 0,5\text{ seg}$ ).

As figuras 36, 37, 38, 39 e 40 mostram a realização dos testes feitos em bancada, o circuito montado em protoboard, assim como o dissipador acoplado ao Triac, já que este aqueceu muito por passar alta corrente (figura 38) e também a incandescência do forno e do termopar por causa da lata temperatura (figuras 39 e 40).

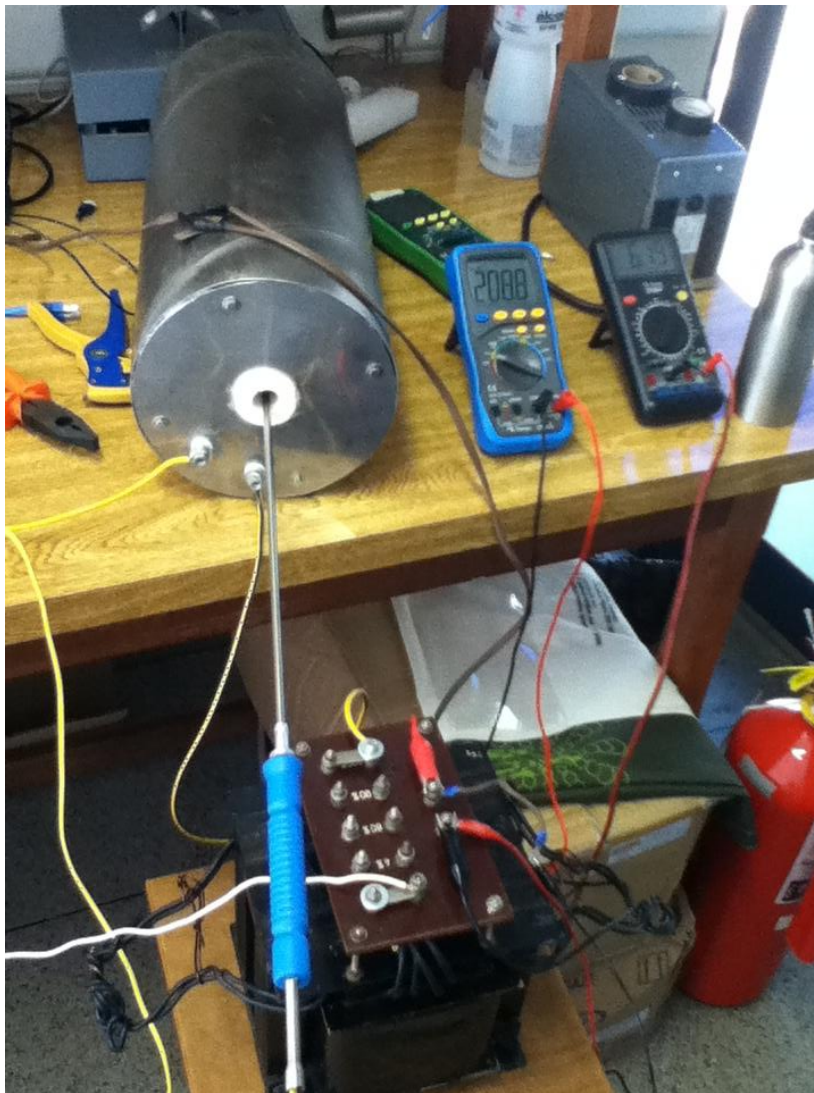


Figura 36 – Testes, mostrando um pouco sobre o transformador

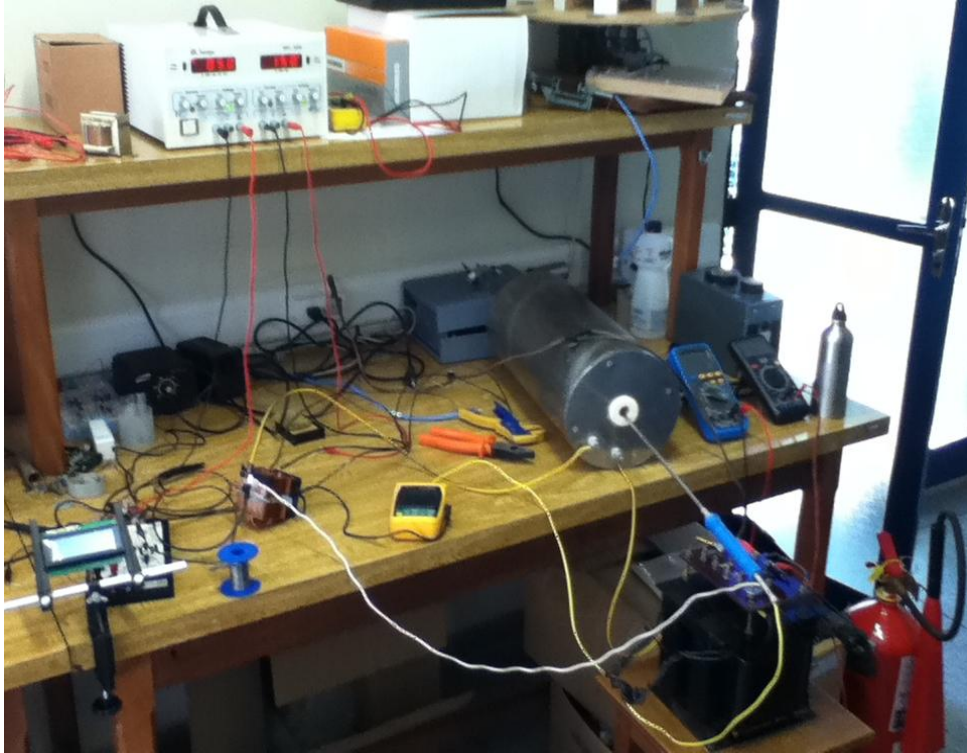


Figura 37 - Testes com o forno em bancada

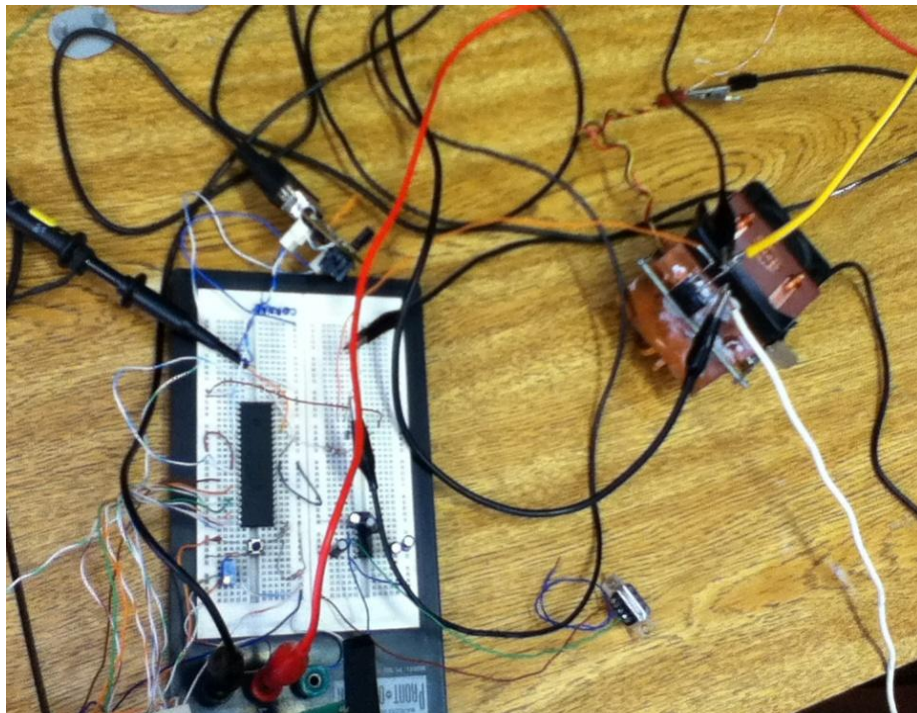


Figura 38 - Circuito de baixa e alta potência

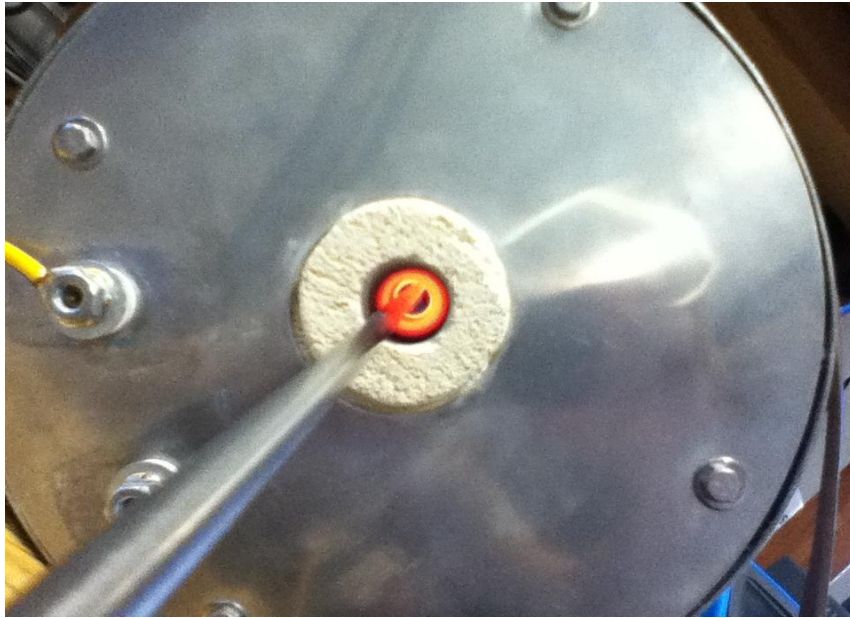


Figura 39 - Forno emitindo luz por estar em alta temperatura

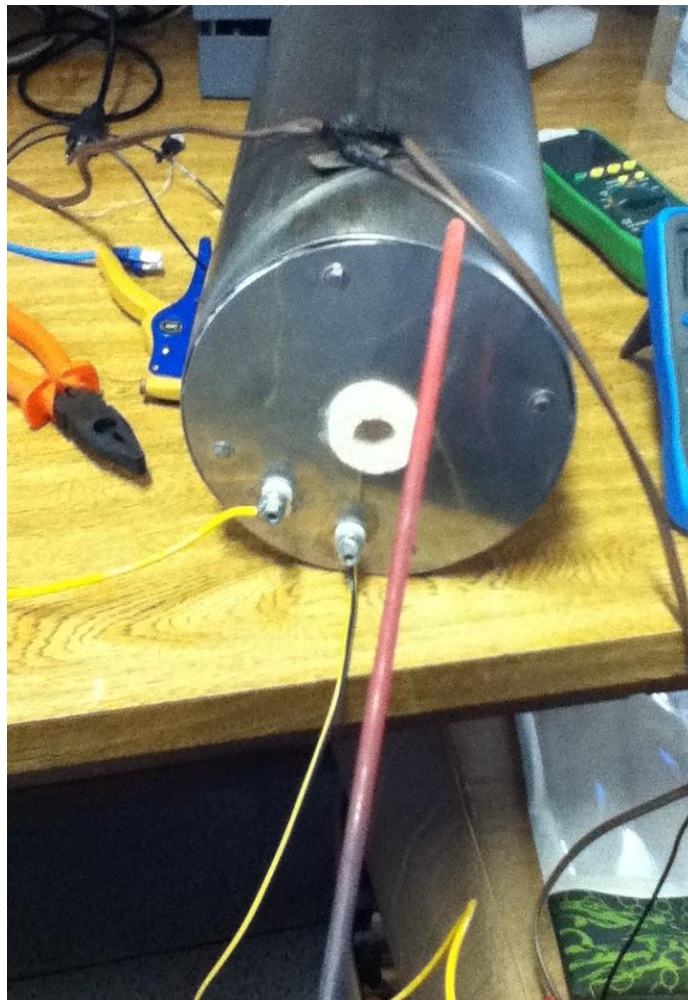


Figura 40 – Termopar vermelho por causa da alta temperatura

As características físicas do equipamento desenvolvido, designado para o teste de inflamabilidade em lentes de óculos de sol, estão descritas na tabela 12.

Tabela 12 - Características físicas do equipamento desenvolvido

| Características                           | Valor           |
|---|-----------------|
| Tensão máxima de entrada do equipamento   | 220 V           |
| Corrente máxima de entrada do equipamento | 7,08 A          |
| Resistência do forno                      | 2,85 $\Omega$   |
| Tensão máxima de alimentação do forno     | 61,11 V         |
| Corrente máxima de alimentação do forno   | 21.44 A         |
| Temperatura de Operação                   | 650 $\pm$ 20°C  |
| Dimensões do forno                        | 480mmx200mm     |
| Peso do forno                             | ~10kg           |
| Dimensões do equipamento                  | 100cmx40cmx40cm |
| Peso do equipamento                       | ~20kg           |

## 4. Discussões e conclusões

O projeto teve como objetivo projetar e concretizar um equipamento para realizar os testes de inflamabilidade nas lentes de óculos de sol. A realização do teste consiste em aquecer uma barra de aço à temperatura  $650\pm 20^{\circ}\text{C}$  e encostá-la na lente a ser testada por  $5\pm 0,5$ seg e o equipamento feito realiza estas tarefas automaticamente.

Para isso, um forno foi construído. E de acordo com a norma brasileira NBR15111/2004, deve ser capaz de aquecer à pelo menos  $750^{\circ}\text{C}$ . O forno desenvolvido tem capacidade para atingir altas temperaturas e experimentalmente já atingiu até  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Quanto à precisão de controle da temperatura, o sistema mantém a temperatura dentro do exigido:  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ . Para estabelecer a precisão do equipamento, há vários parâmetros que devem ser levados em consideração, como o erro causado pelo termômetro e termopar da minipa.

Durante a realização dos testes é necessário que o termômetro seja reinicializado a cada 1 hora, já que ele envia os dados, via RS-232, diretamente por 59 min e 59 seg. Após isso, ele trava e espera que seja reiniciado.

Assim, o projeto atingiu a meta de construção do aparelho para certificação de óculos de sol, no item que se refere a TESTE DE INFLAMABILIDADE da norma brasileira NBR15111(2004).

A maior parte dos recursos utilizados para este projeto foi do Laboratório de Instrumentação Oftálmica – EESC/USP, sob coordenação da Profa. Dra. Liliene Ventura. O transformador, utilizado na alimentação do equipamento para abaixamento de tensão, foi doado pelo Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Junior, que é um dos responsáveis pelo Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência – LACEP. O termômetro e o termopar tipo k foram comprados pela coordenação de graduação, Prof. Dr. Homero Schiabel.

Para aperfeiçoamento do equipamento é sugerido que seja projetado um circuito que envolva um termômetro, utilizando o termopar tipo k, específico para essa utilidade, com leitor de temperatura e envio tipo usb para o sistema de controle já projetado.

Também para aperfeiçoamento estético do produto e visual, pode ser implementado uma tela de LCD *touch*, com a finalidade de melhorar a interface gráfica com o usuário.





## ANEXOS

### ANEXO A - Código matlab para desenvolver o controlador PID do forno

```
close all
clear all
tempo = [0 300 600 900 1200 1500 1800 2100 2400 2700 3000 3300 3600 3900
4200 4500 4800 5100 5400 5700 6000 6300 6600 6900 7200 7500 7800 8100 8400
8700 9000 9300 9600 9900 10200 10500 10800 11100 11400 11700 12000 12300
12600 12900 13200 13500 13800 14100 14400];
Temperatura = [26.2 67.7 125.9 160.3 208.6 244.7 284.6 321.6 349.6 371.4
395.8 419.7 435.6 456.7 476.9 483.2 495.7 517.9 522.6 537.2 540.0 547.4
570.9 575.0 580.5 580.7 587.9 596.3 602.0 609.3 613.5 619.8 623.1 637.4
633.1 638.8 647.1 647.3 645.6 645.8 648.9 653.8 660.0 660.8 661.0 661.7
663.9 666.9 665.9];
vin=[0.790 22.53 22.53 22.55 22.55 22.58 22.54 22.41 22.41 22.40 22.40
22.27 22.27 22.39 22.38 22.51 22.52 22.45 22.56 22.47 22.36 22.39 22.26
22.24 22.28 22.34 22.40 22.52 22.34 22.35 22.30 22.34 22.28 22.32 22.29
22.30 22.32 22.36 22.32 22.14 22.19 22.13 22.11 22.23 22.13 22.10 22.05
22.07 22.18];
Pin = [0.218982456 178.1055789 178.1055789 178.4219298 178.4219298
178.8969825 178.2637193 176.2133684 176.2133684 176.0561404 176.0561404
174.0185614 174.0185614 175.8989825 175.7418947 177.7895088 177.9475088
176.8429825 178.5802105 177.1582105 175.4279298 175.8989825 173.8623158
173.5500351 174.1748772 175.1142456 176.0561404 177.9475088 175.1142456
175.2710526 174.4877193 175.1142456 174.1748772 174.8008421 174.3312632
174.4877193 174.8008421 175.4279298 174.8008421 171.9928421 172.7705614
171.8375088 171.5270526 173.394 171.8375088 171.3719298 170.5973684
170.9069825 172.6148772];
plot(tempo, Temperatura, '*-')
grid
xlabel('Tempo (segundos)')
```

```

ylabel('Temperatura (°C)')
title('Curva característica do Forno Resistivo')
legend('Curva degrau','Location','Southeast')
vmed=61.26;      %valor da tensão na entrada do circuito de potência
pmax=vmed^2/2.85; %potência máxima V^2/R,onde R=2.85ohm
Tp1=4631.8865;  %constante encontrada no IDENT
k=3.9404;       %constante encontrada no IDENT
g1=tf([k],[Tp1 1]); %função de transferência g1(s)
kpot=pmax/2;    %T=2 seg – período completo da onda
G=series(kpot,g1); %nova função G(s)=kpot*g1(s)
GD=c2d(G,2)     %função de discretização com T=2 (tempo de discretização)

```

## ANEXO B - Software programado no PIC18F4550

```

#include <18F4550.h>

#fuses INTHS,NOPUT,NOWDT,NOPROTECT,NOBROWNOUT,NOLVP //
Configurações Iniciais

#fuses NOSTVREN,NOPBADEN,WDT1,PLL2

#device ADC=10      // AD de 10 bits

#use delay (clock = 500000) // MCU clock = 8 MHz

#use rs232(baud=9600, uart, Bits=8,Parity=N, Stop=1,Timeout=1000) //RS-232 e
suas particularidades setadas

//inclusão da biblioteca do display lcd

#include <lcd_plus.h>

```

```

//declaração das variáveis globais usadas

unsigned char vector [25];

unsigned int n=0, PWM_flag=0, PWM_flag_duty=0, x=0, T=20, f=0;

float temp=0, u2, a=0, b=0;

long int un, m, c, d;

float u=0, u_ant=0, e=0, e_ant=0;

void direita();

void esquerda();

#int_EXT                //pino RB0, testar HIGH

void isr_EXT(){          // #int_timer associates the following function with
the interrupt service routine that should be called

        DISABLE_INTERRUPTS(global);          //desabilita todas as interrupções

        //DISABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER2); //desabilita a interrupção do timer2

        DISABLE_INTERRUPTS(INT_EXT);        //desabilita a interrupção externa

        esquerda();

        delay_ms(1000);

        direita();

        delay_ms(1000);

        CLEAR_INTERRUPT(INT_EXT);           //reinicia o contador int ext

        enable_interrupts(GLOBAL);

        enable_interrupts(INT_EXT);

```

```

//enable_interrupts(INT_TIMER2);
}

//Interrupção do timer2

#int_Timer2                                // Interrupt name

void isrTimer2()                            // Interrupt service routine
{
    DISABLE_INTERRUPTS(global);            //desabilita todas as interrupções
    DISABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER2); //desabilita a interrupção do timer2

    if (PWM_flag_duty==x)                  //x é o numero de ciclos que fica em alto durante
120 ciclos de 60Hz
    {
        set_pwm2_duty(0);                  //seta o trecho do pwm, à partir de x, para 0
    }

    if (PWM_flag==120)                     //verifica se a onda já completou 120 ciclos
    {
        x=u*60;                            //pega o ultimo u,
calculado pela equação do controlador, em segundos, e da o valor de ciclos

        PWM_flag=0;                        //reinicia as flags

        PWM_flag_duty=0;

        if (x!=0)                          //seta o novo pwm para 1,
até x
        {

```

```

        set_pwm2_duty(130);

    }

}

    PWM_flag++; //incrementa as
flags

    PWM_flag_duty++;

    CLEAR_INTERRUPT(INT_TIMER2); //reinicia o contador do
timer2

    ENABLE_INTERRUPTS(global); //habilita todas as interrupções

    ENABLE_INTERRUPTS(INT_TIMER2); //habilita a interrupção do timer2
}

void main()

{

    setup_oscillator(OSC_500KHZ); //set do oscilador interno
como 8MHz

    lcd_init(); //permite
inicialização do lcd

    lcd_putc("\f"); //clear o display,
para que o display comece limpo

    delay_ms(1000); //delay de 1
segundo

    // Setup CCP2 for PWM output on pin C1.

    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 130, 1); //configuração do timer2

```

```

    set_timer2(0); //habilita a
contagem do timer2

    setup_ccp2(CCP_PWM); //configurações do pwm interno
do pic

    set_pwm2_duty(130);
//configurações do pwm interno do pic, com contagem de 0 a 130

    enable_interrupts(global); //habilita todas as interrupções

    enable_interrupts(INT_TIMER2); //habilita a
interrupção do timer2

    x=60;
//meia onda em alta no começo

    e_ant = 630; //erro anterior inicializa com
630°C para inicializar os cálculos

    u_ant = 1;
//saída anterior inicializa com 1seg, valor médio

    a=157.0919e-6;
//157.091917296961e-6;

    b=973.0197e-3;
//973.01973760259e-3;

    ext_int_edge (H_TO_L); //interrupção
externa, chamada quando o botão é pressionado

    enable_interrupts(INT_EXT);

    enable_interrupts(GLOBAL);

while(1) {

    e=650-temp; //sinal de erro do controle

```

```

u = (b*u_ant + a*e_ant);           //função de controle, do tipo P

    if(u<=0){
//Compara se a função der valor de u negativo, estabiliza em 0

        u=0;

    }

    if(u>=2){
//Compara se a função der valor de u acima de 2seg, estabiliza em 2

        u=2;

    }

e_ant = e;                          //erro atual torna-se erro anterior para próximo
cálculo

    u_ant = u;                        //u
atual torna-se u anterior para próximo cálculo

    while(vector[0]!=0xAA)           //espera o recebimento dos dados do
termômetro na RS232

        {

            vector[0]=getc();

        }

    for(n=1; n<25; n++)              //quando o start de recebimento for dado,
pelo 0xAA

        {

            vector[n]=getc();        //os dados serão armazenados num vetor
de 25 posições

        }

```



```

        un=vector[8]&0x0F;                                //Cálculos para
mostrar o valor correto da temperatura no display

        c=vector[9]&0x0F;

        d=vector[8]&0xF0;

        d=d>>4;

        m=vector[9]&0xF0;

        m=m>>4;

        u2=un;                                           //transformado pra float pra poder dividir
por 10 e dar divisao

        temp=m*100 +c*10 + d + u2/10;                   //valor da temperatura a
ser mostrado no display

        lcd_putc("\f");                                  //limpa o
display

        printf(lcd_putc,"%3.1f",temp);                  //mostra o valor da temperatura no
display

        lcd_putc("\n");                                  //vai pra
próxima linha

        printf(lcd_putc,"%3.1f",u);                    //mostra o valor da
saída u, em segundos, no display

        lcd_putc("\n");                                  //vai pra
próxima linha

        printf(lcd_putc,"%u",x);                        //mostra o valor da
saída x, em ciclos, no display

        vector[0]=0; //reinicia o vetor inicial para receber próximos dados

    }

}

```

```
void direita(){  
    for (f=0;f<10;f++){  
        output_high(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_high(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_low(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_low(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
  
        output_low(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_high(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_high(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_low(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
  
        output_low(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_low(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_high(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_high(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
  
        output_high(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_low(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_low(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_high(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
    }  
}
```

```
void esquerda(){  
    for (f=0;f<10;f++){  
        output_high(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_high(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_low(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_low(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
        output_high(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_low(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_low(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_high(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
        output_low(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_low(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_high(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_high(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T);  
        output_low(PIN_D4); // Set direction register output (Bobina 3)  
        output_high(PIN_D5); // Set direction register output (Bobina 2)  
        output_high(PIN_D6); // Set direction register output (Bobina 1)  
        output_low(PIN_D7); // Set direction register output (Bobina 0)  
        delay_ms(T); }  
    }  
}
```

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normalização**. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/>>. Acesso em: 04 nov. 2011.

AS/NZS 1067: **“Sunglasses and fashion spectacles”**: Australian/New Zealand Standard Test for Resistance to ignition, 2003.

DOUGHTY, MJ.; CULLEN, AP; **“Long-term effects of a single dose of ultraviolet-B on albino rabbit cornea-I”**. in vivo analyses Photochem Photobiol, 49:185-196, 1989.

EUROPEAN SUNGLASSES ASSOCIATION. **“UV related eye diseases”**. Disponível em: <<http://www.esa-sunglasses.com/de/>>. Acesso em: 25 mar. 2011.

EN 168: **“Personal eye-protection”**: Non-optical test methods, 2001.

FARREL, R. A.; MCCALLY, R. L. **“Interaction of light and the cornea”**: Absorption versus wavelength. *The cornea: Transaction of the world congress on the cornea III, Chapter 31*, 1988.

\_\_\_\_\_. **“Interaction of light and the cornea: Light Scattering versus Transparency”**. *The Cornea: Transaction of the world congress on the cornea III, Chapter 30*, 1988.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D. **Fundamentos de transferência de calor**. 4a. ed. Naucalpan de Juárez, México: Pearson, 1999.

INMETRO. **Programa de análise de produtos: relatório sobre análise em óculos de sol**. Disponível em: <[http://portaldoconsumidor.files.wordpress.com/2009/08/rel\\_final-\\_oculos-de-sol\\_11\\_uv\\_.pdf](http://portaldoconsumidor.files.wordpress.com/2009/08/rel_final-_oculos-de-sol_11_uv_.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2011.

\_\_\_\_\_. **Óculos de sol II**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/oculos2.asp>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

KINSEY, V. E. **“Spectral transmission of the eye to ultraviolet radiations”**. *Arch Ophthalmol*, 39:508-513, 1948.

MICROCHIP. **“PIC 18F4550 datasheet”**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2011.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Efeitos da R-UV sobre os olhos**. Disponível em: <[http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV\\_e\\_olho.html](http://satelite.cptec.inpe.br/uv/R-UV_e_olho.html)>. Acesso em: 04 nov. 2011.

NBR15111: **Proteção pessoal dos olhos**: Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral, 2004.

OLIVEIRA Jr., A. A. **Controladores de tensão CA monofásicos**. Apostilas de aula. 2010.

PIPESYSTEM. **Artigos Técnicos: Aços Inoxidáveis**. Disponível em: <[http://www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Aco\\_Inox/body\\_aco\\_inox.html](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html)>. Acesso em: 20 ago. 2010.

POMÍLIO, J. A. **Eletrônica de potência**. Cap. 10. DSCE – FEEC – UNICAMP. 2009.

RINGVOLD, A. **“Corneal epithelium and UV-protection of the eye”**. *Acta Ophthalmol*, 76:149-153, 1998.

SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **“Handbook”**. Disponível em: <<http://www.mtixtl.com/machineflyer/Handbook.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

\_\_\_\_\_. **“Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces ENG UK”**.

Disponível em:

<<http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/Metallic%20heating%20elements/Resistance%20heating%20alloys%20and%20systems%20for%20industrial%20furnaces%20ENG%20UK.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2011.

\_\_\_\_\_. **“1-A-3-3 precision wire”**. Disponível em:

<[http://www.sandvik.com/C12570A7004E2D46/062CC3B124D69A8EC1256988002A3D76/D1D355F37C940491C12572B9003FD970/\\$file/1-A-3-3%20precision%20wire.pdf?OpenElement](http://www.sandvik.com/C12570A7004E2D46/062CC3B124D69A8EC1256988002A3D76/D1D355F37C940491C12572B9003FD970/$file/1-A-3-3%20precision%20wire.pdf?OpenElement)>. Acesso em: 31 mai. 2011.

ST MICROELETRONICS. **“BTA41 datasheet”**. Disponível em:

<[http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00002263.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2011.

\_\_\_\_\_. **“L298Ndatasheet”**. Disponível em:

<[http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000240.pdf)>. Acesso em: 27set. 2011.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4ª Ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000.

SCHOCOLNICOV, B. **Elementos de Óptica Oftálmica**. Ed. Universitária Macchi Hnos, 3ª. Edição, Cap. XVI, p. 535-536, 1990.

SLINEY D. H.; Freasier, B. C. **"The evaluation of optical radiation hazards"**. *Applied Opt.* 12(1):1-24, 1973.

SLINEY D.H.; WOLBARSHT, M. **"Safety with lasers and other optical sources"**. *Plenum Press, New York; Chapter 4, p. 102-150*, 1980.

EDUARDO. Termopares. Disponível em:  
<[http://www.termopares.com.br/teoria\\_sensores\\_temperatura\\_termopares\\_curvas\\_variacao\\_fem/](http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termopares_curvas_variacao_fem/)>. Acesso em : 27 set. 2011.

TSUBAI, T.; Matsuo, M. **"Ultraviolet light-induced changes in the glucose-6-phosphate dehydrogenase activity of porcine corneas"**. *Cornea*, 21: 495-500, 2002.

VAUGHAN, D.; Asbury, T. **Oftalmologia Geral**, 2ª Edição, Cap. 8, p. 88, 1988.

ZIGMAN, S. **"Ocular light damage"**. *Photochem Photobiol*, 57: 1060-1068, 1993.