UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RENAN MAGRI

Desenvolvimento de um protótipo para realização do ensaio de inflamabilidade
em óculos de sol

São Carlos
2015

RENAN MAGRI

Desenvolvimento de um protótipo para realização do ensaio de inflamabilidade
em óculos de sol¹

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Ciências, Programa de Engenharia
Elétrica.

Área de Concentração: Processamento
de Sinais e Instrumentação.

Orientadora: Profa. Dra. Liliane
Ventura.

São Carlos
2015

¹ Trata-se da versão original.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M212d Magri, Renan
Desenvolvimento de um protótipo para realização do
ensaio de inflamabilidade em óculos de sol / Renan
Magri; orientadora Liliane Ventura. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. Norma brasileira NBR15111. 2. Teste de
inflamabilidade. 3. Óculos de sol. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RENAN MAGRI**.

Título da dissertação: "Desenvolvimento de um protótipo para realização do ensaio de inflamabilidade em óculos de sol".

Data da defesa: 23/03/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Associado **Liliane Ventura Schiabel (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Ligia de Oliveira Ruggiero**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

À minha família e namorada pelo amor incondicional e incansável apoio. Muito obrigado pelo intenso carinho e inspiração.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Liliane Ventura, minha orientadora, agradeço a oportunidade e confiança dada para o desenvolvimento desse projeto. Agradeço também a dedicação e o apoio que contribuíram muito para o meu desenvolvimento científico e intelectual.

Aos amigos Luís Eduardo Lopes, Marcio Makiyama Mello e Leonardo Mariano Gomes, companheiros do Laboratório de Instrumentação Oftálmica, pelos conselhos e experiências compartilhadas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial ao Rui Bertho, por todo auxílio e serviços prestados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo suporte financeiro do projeto 2011/06079-2.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo auxílio financeiro concedido por meio da bolsa de mestrado durante toda a duração deste projeto.

“Não sonhe grande, sonhe enorme!”

Ozires Silva

RESUMO

MAGRI, R. **Desenvolvimento de um protótipo para realização do ensaio de inflamabilidade em óculos de sol.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Desde a invenção dos óculos de sol sua popularidade cresceu enormemente. Esse fato ocasionou a necessidade de criar normas para certificação de óculos de sol, cujo principal objetivo é manter os consumidores protegidos contra danos e perigos secundários decorrentes do uso de óculos. No Brasil a NBR 15111 faz recomendações para o desempenho dos óculos de sol, entretanto, nenhuma instituição de certificação efetua todos os procedimentos requeridos pela norma no país. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para testes de inflamabilidade e os resultados obtidos em óculos de sol de acordo com o procedimento descrito na NBR 15111. O ensaio de inflamabilidade consiste em pressionar uma haste metálica aquecida a $650\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ contra as superfícies da amostra – lentes e armações dos óculos de sol – com uma força equivalente ao peso da haste aquecida por um período de 5 segundos. Após este período, cessa-se o contato da haste aquecida com a superfície testada. Para que a amostra seja aprovada, esta não deve se inflamar e nem continuar a derreter após o término do procedimento. Para realizar essa verificação, deve-se fazer inspeção visual durante todo ensaio. O equipamento aqui desenvolvido está em conformidade com as recomendações feitas pela NBR 15111 para o teste de inflamabilidade e consiste das seguintes partes: um termopar afere a temperatura da haste metálica aquecida no interior do forno, que envia a informação a um controlador PID para estabilizar a temperatura em $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Então, um circuito de potência desenvolvido controla a potência elétrica aplicada na resistência elétrica do forno utilizando o sinal de PWM gerado pelo PID. Há um atuador linear conectado à haste aquecida por meio de um cabo de aço que controla a movimentação vertical desta. O protótipo construído também apresenta um painel de controle, indicador de temperatura e um suporte de fixação para a amostra de óculos na parte inferior. Foi criada uma interface com o computador em *LabView* para fazer aquisição de dados e armazená-los automaticamente no disco rígido. O equipamento construído estabiliza na temperatura de trabalho em 22 minutos, tem a capacidade de efetuar ensaios de inflamabilidade consecutivos e está em conformidade com todas as recomendações da NBR15111. Foram testados 48 pares de óculos utilizando o protótipo desenvolvido e todos os procedimentos foram executados de acordo com o descrito na norma. Das amostras, 47 apresentavam lentes de policarbonato e apenas uma apresentava lentes de vidro, enquanto que

todas tinham armações feitas de policarbonato. Nenhuma amostra se inflamou ou continuou a derreter após o término do teste, entretanto, todas as superfícies de policarbonato em contato com a haste metálica aquecida sofreram derretimento. Dos resultados apresentados, conclui-se que óculos de sol feitos de policarbonato são extremamente resistentes à ignição.

Palavras-chave: norma brasileira NBR15111, teste de inflamabilidade, óculos de sol.

ABSTRACT

MAGRI, R. **Prototype development for performing flammability test on sunglasses.** 2015. Thesis (Master Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

Sunglasses popularity has skyrocketed since its invention. This fact has further led to the need for creating sunglasses standards. The main purpose of a sunglass standard is to keep consumers safe from damages and secondary hazards due to sunglass use. In Brazil, the NBR 15111 made recommendations for desired sunglasses features, unfortunately, none certification institution addresses all test procedures required by the standard. This work presents the development of a flammability test system and results for sunglasses tests based on the NBR 15111 requirements. The flammability test procedure consists in a hot steel rod at $650\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pressed against the sunglasses surfaces with a force equals to the weight of the steel rod for a period of 5 seconds and then remove it. The sample should not ignite or continue to glow after the end of the test. During the procedure, we carry out visual inspection. The equipment developed comply with all NBR 15111 recommendations for the flammability test. First, the thermocouple measures the hot steel rod temperature inside the furnace and send it to the PID controller to set the temperature to $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Then the power circuit drives power to the furnace electrical resistance using the PID PWM output. There is a linear actuator controlling the vertical movement of the hot steel rod, connected by a steel cable. The prototype built also has a control panel, temperature indicator and a fastening support at the bottom for placing the sunglass sample. We created a PC interface with *LabView* to collect data and store it automatically to the hard drive. The built equipment reaches the working temperature in 22 minutes; it can perform consecutive flammability tests and comply with all NBR 15111 recommendations. We assessed 48 pairs of sunglasses using the prototype developed and all procedures were carried out as required by the NBR 15111. From the samples, 47 had polycarbonate lenses and one had glass lenses, while all frames were made of polycarbonate. None sample ignited or continued to glow after the hot steel rod removal, however, all polycarbonate surfaces in contact with the hot steel rod has melted. Results were been presented and the proof argues that sunglasses made of polycarbonate are extremely resistant to ignition.

Keywords: Brazilian Standard NBR15111, flammability test, sunglasses,

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Óculos de sol e suas nomenclaturas para as respectivas partes.	28
Figura 2. Representação da primeira etapa do procedimento do teste de inflamabilidade.	33
Figura 3. Desenho esquemático ilustrando a segunda etapa do procedimento.	33
Figura 4. Representação pictográfica da terceira etapa do procedimento do ensaio de inflamabilidade.	34
Figura 5. Diagrama de blocos do equipamento desenvolvido.....	35
Figura 6. Diagrama com os principais elementos do equipamento desenvolvido indicando a ordem dos processos envolvidos.....	37
Figura 7. Interior da caixa metálica do painel de controle do equipamento exibindo os circuitos digitais presentes.....	37
Figura 8. Componentes da caixa de eletrônica de potência, localizada na parte inferior do protótipo.....	38
Figura 9. Vista do protótipo mostrando o transformador elétrico, as rodas com travas e o suporte de fixação da amostra para o teste de inflamabilidade.....	38
Figura 10. Equipamento desenvolvido mostrado por diferentes ângulos.....	39
Figura 11. Parâmetros da cerâmica graduada e do enrolamento do fio. Adaptado da folha de dados do fabricante.	41
Figura 12. Montagem do forno elétrico. Adaptado de (CORRAL, 2011).....	42
Figura 13. Montagem do forno elétrico: preenchimento com material refratário para isolamento térmico do forno. Adaptado de (CORRAL, 2011).....	42
Figura 14. Forno elétrico finalizado e montado em um suporte de aço para fixação na posição vertical. Adaptado de (CORRAL, 2011).	43
Figura 15. Transformador de tensão utilizado no forno elétrico.	44
Figura 16. Haste de aço AISI 304 fixada em uma extremidade a um cabo de aço usado para movimentação vertical da barra.	45
Figura 17. Curva da diferença de potencial em função da temperatura de diferentes tipos de termopares comerciais.....	46
Figura 18. Minipa MTK-16: Termopar tipo K de haste de alta temperatura com conector compensado miniatura. Retirado da folha de dados do fabricante.	47
Figura 19. Minipa MT-525: termômetro digital microprocessado utilizado como indicador de temperatura do termopar no projeto. Retirado da folha de dados do fabricante.....	47

Figura 20. Placa de desenvolvimento Freescale FRDM-KL25Z com microcontrolador ARM Cortex M0.....	48
Figura 21. Diagrama com os pinos e configurações da placa de desenvolvimento FRDM-KL25Z.	49
Figura 22. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de temperaturas automatizado com comunicação e interface com o PC desenvolvido para o projeto.	49
Figura 23. Circuito de condicionamento do sinal de temperatura para aquisição.	50
Figura 24. Placa de circuito impressa desenvolvida para o circuito de condicionamento do sinal de temperatura.	50
Figura 25. Placa de circuito confeccionada manualmente para aquisição de temperaturas e comunicação USB com o computador – primeira versão do protótipo.....	51
Figura 26. Representação do sistema de controle de potência desenvolvido para o equipamento por meio de um diagrama de blocos.....	51
Figura 27. Circuito de controle de potência.....	52
Figura 28. Vista superior (esquerda) e vista inferior (direita) da PCB para o sistema de controle de potência.....	52
Figura 29. Placa confeccionada para o controle de potência.	53
Figura 30. Resposta do sistema em malha aberta para uma entrada degrau máxima de 61 VAC. A figura apresenta duas curvas: em azul encontram-se os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que em preto encontram-se os dados empíricos adquiridos do sistema.	56
Figura 31. Resposta do sistema em malha aberta para uma entrada degrau de 61 VAC, com enfoque na região de temperatura de operação do equipamento em desenvolvimento. A curva em cor azul apresenta os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que a curva em preto apresenta os dados empíricos.	56
Figura 32. Resfriamento natural do sistema. A figura apresenta duas curvas: em azul encontram-se os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que em preto encontram-se os dados empíricos adquiridos do sistema.	57
Figura 33. Resposta livre do sistema, com enfoque na região de temperatura de operação do equipamento em desenvolvimento. A curva em azul apresenta os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que a curva em preto apresenta os dados empíricos.	58
Figura 34. Diagrama de controle da planta ou processo utilizando-se um controlador do tipo PID.....	59

Figura 35. Diagrama de blocos com o esquemático do atuador linear construído para o protótipo.....	61
Figura 36. Desenho tridimensional do atuador linear construído para o protótipo.	61
Figura 37. Atuador linear desenvolvido para o projeto e seus principais componentes.	62
Figura 38. Painel de controle do equipamento. Da esquerda para a direita encontram-se, respectivamente, o indicador de temperaturas, o LED verde, o amarelo e o botão verde de acionamento.....	63
Figura 39. Painel de controle do sistema de aquisição e controle de temperaturas do forno...64	
Figura 40. Diagrama de blocos do software desenvolvido em <i>LabView</i>	64
Figura 41. Resposta de temperatura do forno. Em aproximadamente 22 min o equipamento atinge a faixa de operação de temperaturas de trabalho, que de acordo com a NBR 15111, varia de 630 °C a 670 °C.....	67
Figura 42. Temperatura aferida no interior do forno durante a realização de ensaios de inflamabilidade em amostras de óculos de sol.....	67
Figura 43. Lentes de policarbonato danificadas após o ensaio de inflamabilidade.....	69
Figura 44. Lente de vidro permaneceu intacta após o teste de inflamabilidade.	69
Figura 45. Hastes de policarbonato danificadas após o procedimento do ensaio de inflamabilidade.	70
Figura 46. Marcações de referência para o posicionamento inicial da haste metálica e do termopar.	87
Figura 47. Linha de referência do cubo alinhada com a linha de referência da posição final do atuador linear.....	88
Figura 48. Haste metálica na posição de contato com a amostra no suporte de fixação.....	88
Figura 49. Pino guia de latão alinhado com a haste metálica no suporte de fixação da amostra.	89
Figura 50. Atuador linear configurado em sua posição inicial.....	89
Figura 51. Haste metálica em sua posição inicial para o teste de inflamabilidade.....	90
Figura 52. Termopar ajustado em sua posição inicial.	90
Figura 53. Parafuso de fixação do termopar.....	91
Figura 54. Visor do termômetro digital em funcionamento.	91
Figura 55. Porta mini-USB do painel de controle do equipamento.	92
Figura 56. LED amarelo aceso no painel de controle após a conexão USB com o computador.	92
Figura 57. Interior do painel de controle do equipamento em funcionamento.	93

Figura 58. Botão para seleccionar a porta de comunicação utilizada.	93
Figura 59. Botão para iniciar o programa desenvolvido em <i>LabView</i>	94
Figura 60. Painel de controle em <i>LabView</i> do equipamento funcionando.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos elementos e suas respectivas características para o aparato do ensaio de inflamabilidade, como recomendado pela NBR 15111.	32
Tabela 2. Fator de temperatura Ct em função da temperatura de trabalho. O fator de temperatura é definido como a razão entre a resistência elétrica na temperatura de trabalho (R_t) e a resistência elétrica na temperatura ambiente de 20 °C (R_{20}) sendo assim, $Ct = R_t/R_{20}$. Retirado da folha de dados do fabricante.....	40
Tabela 3. Parâmetros do fio de Kanthal escolhido, com suas respectivas variáveis, descrição dos parâmetros, valores adotados e unidades.....	40
Tabela 4. Parâmetros da cerâmica e do enrolamento da resistência.....	41
Tabela 5. Principais características elétricas do forno, como resistência, corrente, tensão e potência dissipada.	44
Tabela 6. Características físicas estabelecidas pela NBR15111 para a haste de aço do ensaio de inflamabilidade em óculos de sol.....	45
Tabela 7. Composição química da liga metálica AISI 304 utilizada na haste de aço do protótipo desenvolvido.	45
Tabela 8. Informações sobre a precisão dos instrumentos utilizados para medição de temperatura do projeto: termopar tipo K MTK-16 e termômetro digital MT-525. .	47
Tabela 9. Regra de Ziegler-Nichols para ajuste de controladores PID para planta em malha aberta.....	60
Tabela 10. Ganhos do controlador PID calculados pelo método de Ziegler-Nichols para a planta em malha aberta.	60
Tabela 11. Comparação entre as versões do equipamento para ensaios de inflamabilidade desenvolvido.	65
Tabela 12. Precisão dos equipamentos de medição de temperatura para 650 °C.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIÓPTICA	Associação Brasileira da Indústria Óptica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	Norma Européia
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LIO	Laboratório de Instrumentação Oftálmica
NBR	Norma Brasileira
PCB	Placa de Circuito Impressa
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
SCR	Retificador Controlado de Silício
TRIAC	Triodo para Corrente Alternada
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
A	Ampères, amplitude da entrada degrau aplicada
A_c	Área superficial de aquecimento
cm	Centímetros
cm^2	Centímetros quadrados
C_t	Fator de temperatura
d	Diâmetro do fio
D	Diâmetro externo da cerâmica
e	Número de Euler
$G(s)$	Função transferência em malha aberta
I	Corrente elétrica
I_r	Corrente elétrica real no forno
k	Ganho estático
K_p	Ganho proporcional
L_e	Comprimento total do enrolamento na cerâmica
L	Comprimento do fio à temperatura ambiente
mm	Milímetros
ms	Milissegundos
p	Potência máxima por unidade de superfície do fio
P	Potência elétrica
P_r	Potência elétrica real no forno
R	Resistência elétrica
R_{20}	Resistência elétrica à temperatura ambiente
R_t	Resistência elétrica à temperatura de trabalho
s	Passo do enrolamento, segundos, variável de Laplace
t	Tempo
T	Atraso
Td	Ganho derivativo
Ti	Ganho integral
U	Tensão elétrica
U_r	Tensão elétrica real no forno
V	Volts
VAC	Volts Corrente Alternada
W	Watt
$y(t)$	Resposta do sistema no domínio do tempo
y_0	Amplitude inicial da resposta livre
τ	Constante de tempo
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	Introdução	27
1.1	Óculos de Sol.....	28
1.2	Normas Técnicas	29
1.3	Inflamabilidade	30
1.4	Ensaio de Inflamabilidade	31
1.4.1	Aparato.....	32
1.4.2	Procedimento	32
1.4.3	Inspeção	34
1.4.4	Critério de Aceitação	34
1.5	Objetivos.....	34
2	Metodologia	35
2.1	Esquemático do Sistema de Testes de Inflamabilidade em Óculos de Sol.....	35
2.2	Fonte de Calor	39
2.3	Haste de Aço.....	45
2.4	Termopar e Dispositivo Indicador de Temperatura.....	46
2.5	Microcontrolador	48
2.6	Sistema de Aquisição de Temperaturas	49
2.7	Sistema de Controle de Potência	51
2.8	Controlador de Temperatura.....	53
2.8.1	Identificação Da Resposta do Sistema em Malha Aberta.....	53
2.8.2	Projeto do Controlador PID	59
2.9	Atuador Linear.....	61
2.10	Painel de Controle	63
2.11	Software.....	63
3	Resultados e Discussões.....	65

3.1	Protótipo.....	65
3.1.1	Performance do equipamento.....	66
3.2	Ensaio de Inflamabilidade	68
3.2.1	Lentes	68
3.2.2	Hastes	69
4	Conclusão	71
4.1	Protótipo.....	71
4.2	Ensaio de Inflamabilidade	71
4.3	Síntese	72
5	Referências	73
6	Apêndice.....	75
6.1	Código Fonte – Versão 1.0 - Microcontrolador PIC 18F4550	75
6.2	Código Fonte – Versão 2.0 - Microcontrolador ARM Cortex M0	78
6.3	Procedimento de Uso do Equipamento Desenvolvido.....	87
6.3.1	Marcações de Referência	87
6.3.2	Ajustar Posição Inicial da Haste Metálica.....	88
6.3.3	Ajustar Posição Inicial do Termopar.....	90
6.3.4	Iniciar o Sistema.....	91
6.3.5	Desligar o Sistema.....	94

1 INTRODUÇÃO

Estudos na literatura relacionam a exposição aos raios UV com o desenvolvimento de alterações patológicas e danos irreversíveis na córnea (SLINEY E FREASIER, 1973; SLINEY, 2001; COLE, 2003; ROGERS *ET AL.*, 2004; WANG, BALAGULA E OSTERWALDER, 2010) além de danos à pele (ROSENTHAL *ET AL.*, 1991; KULLAVANIJAYA E LIM, 2005; WANG, BALAGULA E OSTERWALDER, 2010). Embora o olho humano possua mecanismos de defesa naturais contra a luminosidade e a radiação UV emitida pelo sol (RINGVOLD, 1998), a proteção natural por si só não é suficiente.

Desde a invenção dos óculos de sol sua popularidade cresceu enormemente. No Brasil, tais óculos antes apenas adquiridos pelo conforto visual ou pela finalidade estética, recentemente tem sua procura como forma de proteção contra os efeitos nocivos do sol (INMETRO, 2009).

Os óculos de sol devem reduzir os males causados à córnea e ainda garantir que nenhum dano secundário seja causado ao usuário. Os consumidores não conseguem verificar nos pontos de vendas se o produto apresenta proteção adequada contra radiação UV ou se os óculos estão protegidos da inflamabilidade imediata, a menos que estes sejam certificados. Nesse contexto, surgiu a necessidade de certificação dos óculos de sol (COLE, 2003).

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, por meio da NBR15111 estabelece recomendações de desempenho desejáveis aos óculos de sol, descrevendo inclusive procedimentos técnicos de ensaio. No entanto, o país não apresenta uma Instituição que faça todos os ensaios necessários ou a certificação de tais óculos.

Situado no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), o Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO) criado em 2001 tem como objetivo o desenvolvimento de sistemas e técnicas para Oftalmologia. Desde 2010, a coordenadora do LIO participa ativamente no desenvolvimento da NBR15111 e tem como uma das principais áreas de pesquisa as avaliações e estudos em óculos de sol.

1.1 ÓCULOS DE SOL

A invenção dos óculos de sol é creditada a James Ayscough, que em 1752, anunciou os primeiros óculos com lentes coloridas e charneiras. Ayscough acreditava que lentes incolores proporcionavam um brilho excessivo aos olhos, podendo ser prejudicial, e recomendava o uso de lentes verdes ou azuis. Um fato interessante é que os chineses há mais de dois milênios utilizavam lentes coloridas, mas não com o intuito de proteger os olhos contra brilhos ofuscantes, e sim para protegê-los contra os maus espíritos. Presume-se ainda que devido a miopia, o Imperador Nero de Roma assistia a seus gladiadores por meio de uma esmeralda côncava (DAIN, 2003).

Em meados da década de 1920, os óculos de sol começaram a ser produzidos em massa. O primeiro registro de vendas ocorreu em 1929, nos Estados Unidos, com a Foster-Grant. A popularidade dos óculos de sol se expandiu realmente em 1970, quando começou a fazer parte da moda, com muitas opções de estilos e cores (DAIN, 2003).

As principais partes dos óculos de sol e seus respectivos nomes são dados na Figura 1.

Figura 1. Óculos de sol e suas nomenclaturas para as respectivas partes.

A escolha do tipo adequado de óculos de sol e sua utilização de forma correta é importante, para evitar potencializar danos aos olhos (ROSENTHAL ET AL., 1988). O olho humano apresenta mecanismos naturais de proteção contra luminosidade e radiação ultravioleta (RINGVOLD, 1998), esses mecanismos, entretanto, são inibidos com o uso de óculos de sol devido à redução da intensidade luminosa incidente no olho, podendo aumentar a exposição do cristalino e da córnea aos raios ultravioletas caso os óculos não apresentem a proteção adequada (SLINEY, 2011). Como consequência a essa exposição à radiação UV, pode-se desenvolver patologias oculares e danos irreversíveis à córnea, como relacionados em diversos estudos

(SLINEY E FREASIER, 1973; SLINEY, 2001; COLE, 2003; ROGERS *ET AL.*, 2004; WANG, BALAGULA E OSTERWALDER, 2010).

1.2 NORMAS TÉCNICAS

A primeira norma no mundo para óculos de sol de uso geral foi a norma Australiana AS1067, publicada em 1971. Até dado momento havia apenas regulação para óculos de uso industrial ou profissional. Atualmente, a norma Australiana se uniu a Neozelandesa – AS/NZS1067. Intitulada “Sunglasses and fashion spectacles”, sua última versão foi lançada em 2003.

Nos Estados Unidos, o primeiro padrão para óculos de sol foi emitido em 1972, a ANSI Z80.3. Sua versão mais recente “Ophthalmics - Nonprescription Sunglass and Fashion Eyewear Requirements” é datada de 2010.

A EN 1836, norma oficial europeia, foi adotada em 1997. Sua última atualização ocorreu em 2005: “Personal eye-equipment - Sunglasses and sunglare filters for general use and filters for direct observation of the sun”. Este padrão faz recomendações de performance para características óticas e não óticas, além de indicar os respectivos procedimentos de avaliação. Recentemente, a União Europeia substituiu a EN 1836 por dois padrões ISO para os óculos de sol. O primeiro é a ISO 12312-1, intitulada “Eye and face protection – Sunglasses and related eyewear – Part 1: Sunglasses for general use”. O segundo é a ISO 12311: “Personal protective equipment – Test methods for sunglasses”, ambos publicados em 2013.

Apenas em 2003 a Associação Brasileira de Normas Técnicas criou a norma Brasileira NBR 15111 para óculos de sol. Esta é baseada na norma europeia EN 1836 e passou por alterações. A versão vigente foi publicada em junho de 2013, intitulada “Óculos para proteção solar, filtros para proteção solar para uso geral e filtros para observação direta do sol”. Ela estabelece características físicas dos óculos de sol e filtros de proteção solar e não se aplica a óculos de esqui, óculos de proteção contra radiação de fontes artificiais ou óculos receitados por motivo médico para atenuar radiação. A NBR 15111 inclui requisitos para proteger os consumidores de óculos de sol contra radiações nocivas, brilho excessivo e danos secundários, como o risco de inflamabilidade.

O teste de inflamabilidade, objeto deste trabalho, é referenciado nesta norma e está totalmente descrito no padrão Europeu EN 168 publicado em 2002: “Personal eye-protection -

Non-optical test methods”. O teste de inflamabilidade também é conhecido como ensaio de resistência à ignição. Neste, as lentes dos óculos e sua armação devem ser submetidos ao ensaio de inflamabilidade estabelecido na norma, em que os mesmos não deverão inflamar-se nem continuar em combustão após o término do teste para que a amostra seja aprovada.

1.3 INFLAMABILIDADE

Um material é dito inflamável quando pode pegar fogo. Para que haja fogo, são necessários pelo menos três componentes: calor, combustível e comburente. Um polímero, quando aquecido, sofre pirólise e derrete, o líquido resultante sofre vaporização e se transforma em combustível gasoso. A ignição deste ocorre na presença de calor e oxigênio, fazendo com que o material se inflame (MADRZYKOWSKI E STROUP, 2008).

A inflamabilidade avaliada pelos ensaios descritos nas normas Australiana AS/NZ1067, Europeia EN 168 e Brasileira NBR 15111 consiste em aquecer uma haste metálica a 650 °C e pressioná-la sobre as superfícies da amostra por um período de 5 segundos. Em contrapartida, o padrão Americano ANSI Z80.3, de acordo com o descrito na seção 5.3, recomenda que os óculos de sol sejam colocados por um período de 15 minutos no interior de um forno aquecido na temperatura de 200 °C.

O nitrato de celulose, durante as décadas de 50 e 60, foi o material mais utilizado na fabricação de óculos. Era ideal para as armações por apresentar alta dureza e durabilidade, além de ser capaz de manter sua forma e cor por longos períodos. Devido à questão de segurança, por ser altamente inflamável, seu uso foi descontinuado na década de 80 (CELLULOSE NITRATE SPECTACLES, 2014).

O sucessor do nitrato de celulose foi o acetato de celulose, que embora menos inflamável, teve seu uso descontinuado na década de 90 após a adoção da haste aquecida no ensaio de inflamabilidade (CELLULOSE NITRATE SPECTACLES, 2014). Apesar da propagação da chama neste material ser lenta, o risco real para o usuário encontrava-se na ignição das roupas e cabelo, podendo ser fatal (PAIN, 1975).

Na década de 70, o vidro foi muito utilizado nas lentes dos óculos de sol. Um estudo australiano publicado neste período avaliou a resistência a ignição dos principais materiais utilizados na fabricação de óculos. O nitrato de celulose foi classificado como extremamente inflamável. O acetato de celulose, o butirato acetato de celulose e o nylon foram categorizados

como resistentes à propagação de chamas. Os materiais mais resistentes à ignição foram o policarbonato e o PVC, considerados auto extingüíveis (PAIN, 1975).

Há registros de pelo menos três grandes incêndios em fábricas de armações de óculos em países como Austrália, Reino Unido e Holanda. Acredita-se que todos estavam relacionados diretamente com o uso do nitrato de celulose devido às características em comum dos incêndios: tiveram início de forma inesperada e as chamas se espalharam rapidamente. Um dos incêndios resultou na destruição completa da planta fabril em questão de minutos, enquanto que os outros dois causaram prejuízos enormes (CELLULOSE NITRATE SPECTACLES, 2014).

O Departamento de Cirurgia Oftálmica da Universidade de Michigan nos Estados Unidos documentou um caso em que uma mulher acidentalmente incendiou seus óculos quando tentou acender um cigarro sentada na cama. Embora ela tenha tirado os óculos rapidamente, o fogo se espalhou para suas roupas e ela morreu três dias após o acidente, apresentando ainda as marcas de queimaduras no nariz, pálpebras, pescoço e rosto provenientes da queima intensa do nitrato de celulose. Há ainda outros relatos de casos menos graves, nos quais os óculos acabaram em chamas de forma acidental, seja devido à uma vela, isqueiro e até mesmo churrasqueira (CELLULOSE NITRATE SPECTACLES, 2014).

Atualmente, os principais materiais que compõe os óculos de sol são o policarbonato e o acrílico. Para óculos de lentes polarizadas, o butirato acetato de celulose é o mais utilizado (DAIN, 2003). Em 2012, acredita-se que um antigo estoque de armações de óculos feitas de nitrato de celulose tenha sido reintroduzido no mercado em Londres. A evidência aponta que armações feitas deste material foram vendidas em mercados de antiguidades no centro da cidade (CELLULOSE NITRATE SPECTACLES, 2014).

Assim, com o histórico de inflamabilidade em óculos de sol, as normas preveem um teste que permite assegurar que os óculos certificados não sejam inflamáveis quando expostos às fontes de calor que os usuários estão sujeitos na vida cotidiana.

1.4 ENSAIO DE INFLAMABILIDADE

De forma resumida, o ensaio de inflamabilidade consiste em uma haste de aço aquecida a 650 °C que é pressionada contra as superfícies das lentes e da armação dos óculos de sol por um período de 5 segundos. Para que a amostra esteja em conformidade com a NBR 15111, esta

não deve se inflamar e nem continuar a derreter após cessar o contato da haste aquecida com a superfície da amostra.

1.4.1 APARATO

O aparato para o ensaio de inflamabilidade é composto por uma haste de aço, uma fonte de calor, um termopar com dispositivo indicador de temperatura e um temporizador. A descrição dos requisitos para estes elementos encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos elementos e suas respectivas características para o aparato do ensaio de inflamabilidade, como recomendado pela NBR 15111.

Elemento	Característica	Dimensão / Valor
Haste de aço	Comprimento nominal	300 mm
	Máx. incerteza do comprimento	± 3 mm
	Diâmetro nominal	6 mm
	Com faces finais planas e perpendiculares ao eixo longitudinal	-
	Temperatura de trabalho	$650\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$
Fonte de calor	Capacidade de aquecer até	750 °C
Termopar e dispositivo indicador de temperatura	Intervalo de medição de temperaturas	500 °C a 750 °C
	Máx. incerteza no intervalo de medição	$\pm 10\text{ °C}$
Temporizador	Capaz de medir	10 s
	Máx. incerteza de medição	$\pm 0,1$ s

A haste de aço deve apresentar faces finais planas e perpendiculares ao eixo longitudinal, ter comprimento de 300 ± 3 mm e diâmetro nominal de 6 mm. O teste deve ocorrer com a haste aquecida a $650\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$. Para a fonte de calor, a única recomendação é que esta tenha a capacidade de atingir até 750 °C . A aferição de temperaturas não deve apresentar incerteza maior do que $\pm 10\text{ °C}$ para o intervalo de medição de 500 °C a 750 °C . O último elemento citado é o temporizador, que deve ser capaz de medir um período de 10 segundos com incerteza máxima na medição de $\pm 0,1$ s.

1.4.2 PROCEDIMENTO

O procedimento estabelecido na NBR15111 para o teste de inflamabilidade consiste em:

Aquecer um dos finais da barra de aço com extensão mínima de 50 mm a uma temperatura de $650\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Representação da primeira etapa do procedimento do teste de inflamabilidade.

Aferir a temperatura da haste por meio de um termopar acoplado a uma distância de $20\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ da face aquecida. Ver Figura 3.

Figura 3. Desenho esquemático ilustrando a segunda etapa do procedimento.

Pressionar a face quente da haste, na posição vertical, contra a superfície de amostra do teste (superfície das lentes ou da armação dos óculos de sol) com força igual ao peso da haste durante um tempo de $5\text{ s} \pm 0,5\text{ s}$. Alcançado esse tempo, cessar o contato da haste com a superfície da amostra. A Figura 4 ilustra essa etapa do procedimento.

1. Pressionar haste contra superfície da amostra

2. $5\text{ s} \pm 0,5\text{ s}$

3. Cessar contato da haste com amostra

Figura 4. Representação pictográfica da terceira etapa do procedimento do ensaio de inflamabilidade.

Por fim, repetem-se os procedimentos acima descritos até que o teste seja realizado em todas as partes dos óculos de sol.

1.4.3 INSPEÇÃO

Durante a realização de todo o procedimento do ensaio de inflamabilidade, a amostra deve ser inspecionada visualmente. Todos os testes devem ocorrer em um ambiente com temperatura de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

1.4.4 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO

Para aprovação da amostra, durante a inspeção visual, as lentes e a armação não devem inflamar-se ou continuar em combustão após interrompido o contato da haste com qualquer superfície da amostra.

1.5 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um equipamento para realizar ensaios de inflamabilidade em amostras de óculos de sol e analisar características de ignição em lentes e armações de amostras representativas de óculos de sol vendidos no Brasil.

2 METODOLOGIA

A seção de metodologia descreve o desenvolvimento do protótipo para realização dos ensaios de inflamabilidade de acordo com as recomendações da norma brasileira NBR 15111.

Durante a etapa de desenvolvimento, o equipamento teve duas versões. A primeira versão considera os principais requisitos da NBR. Entretanto, esta versão possui o controle manual da haste aquecida utilizada nos ensaios. Com o intuito de atender a todas as recomendações e facilitar o procedimento de uso do equipamento, a primeira versão passou por melhorias originando a segunda versão. Entre as modificações, a movimentação da haste aquecida foi automatizada, o equipamento recebeu um painel de controle físico e para facilitar o aperfeiçoamento do próprio protótipo, o antigo microcontrolador PIC18F4550 foi substituído por uma placa de desenvolvimento da *Freescale*, a FRDM-KL25Z, com um microcontrolador ARM Cortex M0.

É importante ressaltar que o protótipo desenvolvido contemplou todas recomendações de desempenho da NBR 15111 para o aparato do ensaio de inflamabilidade. Seus principais elementos encontram-se descritos no diagrama de blocos a seguir.

2.1 ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE TESTES DE INFLAMABILIDADE EM ÓCULOS DE SOL

Figura 5. Diagrama de blocos do equipamento desenvolvido.

A Figura 5 exibe o diagrama de blocos do equipamento desenvolvido, que opera da seguinte forma: o termopar Minipa MTK-16 no interior do forno elétrico, juntamente com o termômetro digital Minipa MT-525, afere a temperatura e a envia para o circuito de aquisição. O microcontrolador transmite à interface em *LabView* do PC via USB o dado de temperatura, este por sua vez é utilizado pelo controlador PID (proporcional, integral e derivativo) elaborado no software em *LabView* para calcular os parâmetros do controle de temperatura. A saída do controlador é o valor de PWM (modulação por largura de pulso) da potência elétrica aplicada na resistência do forno, transmitido via USB para o microcontrolador. Por fim, o microcontrolador Freescale ARM Cortex M0 comanda a eletrônica de potência com o valor do PWM do PID para controlar a temperatura da haste metálica aquecida em 650 °C. Quando a haste atinge a temperatura de trabalho, o usuário do equipamento utiliza o painel de controle para iniciar o teste. O atuador linear é então ativado e comanda a movimentação vertical da haste metálica aquecida. Esta é posta em contato com a amostra de óculos de sol por um período de 5 segundos e o sistema automaticamente cessa o contato da haste com a amostra, retornando-a para dentro do forno elétrico. O equipamento apresenta um painel de controle físico, com um botão para realização do ensaio de inflamabilidade e dois LEDs indicadores de estado: o verde indica que a haste aquecida atingiu a temperatura de trabalho e o teste pode ser iniciado, enquanto o amarelo indica que o ensaio de inflamabilidade está em andamento. Além do painel físico, também foi desenvolvida uma interface com o computador usando-se o software *LabView*, em que o usuário pode controlar o equipamento e monitorar seu funcionamento.

A Figura 6 exibe com detalhes os principais elementos do equipamento desenvolvido, bem como a ordem dos processos envolvidos.

Figura 6. Diagrama com os principais elementos do equipamento desenvolvido indicando a ordem dos processos envolvidos.

Figura 7. Interior da caixa metálica do painel de controle do equipamento exibindo os circuitos digitais presentes.

O microcontrolador, o circuito de aquisição de temperaturas e o driver DRV8825 do motor de passo do atuador linear encontram-se dentro da caixa metálica do painel de controle. A Figura 7 mostra a eletrônica contida no interior da caixa.

Na parte inferior do protótipo, abaixo do suporte de fixação dos óculos de sol, estão posicionados o transformador elétrico utilizado no projeto e a caixa metálica que contém a eletrônica de potência. A Figura 8 exibe os componentes que compõe a caixa de eletrônica de potência, enquanto a Figura 9 ilustra o transformador elétrico fixado na estrutura. O equipamento também possui rodas com travas para facilitar sua movimentação.

Figura 8. Componentes da caixa de eletrônica de potência, localizada na parte inferior do protótipo.

Figura 9. Vista do protótipo mostrando o transformador elétrico, as rodas com travas e o suporte de fixação da amostra para o teste de inflamabilidade.

A Figura 10 expõe o equipamento desenvolvido por diferentes ângulos.

Figura 10. Equipamento desenvolvido mostrado por diferentes ângulos.

2.2 FONTE DE CALOR

Este item descreve a fonte de calor escolhida para o equipamento. Como recomendação dada pela NBR15111, a fonte de calor deve ser capaz de gerar temperaturas de até 750 °C.

A fonte de calor escolhida foi um forno elétrico, inicialmente construído como parte de um trabalho de conclusão de curso no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (CORRAL, 2011), cujos parâmetros do forno e os aspectos de sua construção estão descritos a seguir.

A resistência elétrica escolhida para o forno elétrico foi uma liga de ferro, cromo e alumínio, conhecido comercialmente como Kanthal do tipo A1. Essa liga é capaz de atingir temperaturas de até 1400 °C. Uma vantagem do Kanthal é que no intervalo de temperaturas de 20 °C a 1000 °C, o valor de sua resistência elétrica varia apenas 4%.

Para um forno elétrico com resistência enrolada em espiral ao redor de um tubo cerâmico, tem-se alguns parâmetros de projeto que podem ser encontrados no manual de

aplicações do fabricante: “Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Systems”, da empresa Sandvik.

O forno foi projetado para atingir temperaturas de até 1000 °C. O diâmetro do fio de Kanthal A1 escolhido (d) foi de 2,2 mm. A partir do diâmetro do fio definem-se outros parâmetros do projeto. De acordo com o manual de aplicações, a relação entre a área superficial de aquecimento e a resistência elétrica à temperatura ambiente para um condutor (A_c/R_{20}) com esse diâmetro deve ser de 181 cm²/Ω.

A potência máxima tabelada por unidade de superfície do fio (p) é igual a 3 W/cm², de um valor que pode variar entre 3 e 4. Um valor p maior que 4 W/cm² pode diminuir drasticamente a vida útil da resistência elétrica, enquanto um valor menor que 3 W/cm² pode não fornecer potência suficiente para que se atinja a temperatura do projeto.

Seja C_t o fator de temperatura definido como a razão entre a resistência elétrica na temperatura de trabalho máxima de 1000 °C (R_t) e a resistência elétrica na temperatura ambiente de 20 °C (R_{20}), tem-se C_t igual a 1,04, retirado da Tabela 2.

Tabela 2. Fator de temperatura C_t em função da temperatura de trabalho. O fator de temperatura é definido como a razão entre a resistência elétrica na temperatura de trabalho (R_t) e a resistência elétrica na temperatura ambiente de 20 °C (R_{20}) sendo assim, $C_t = R_t/R_{20}$. Retirado da folha de dados do fabricante.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
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

A Tabela 3 traz um resumo dos parâmetros adotados para o projeto, com informações sobre as variáveis, suas descrições, valores e unidades.

Tabela 3. Parâmetros do fio de Kanthal escolhido, com suas respectivas variáveis, descrição dos parâmetros, valores adotados e unidades.

Parâmetros do fio de Kanthal A1			
Variável	Descrição	Valor	Unidade
d	Diâmetro do fio	2,20	mm
p	Potência máxima por unidade de superfície do fio	3,00	3 W/cm ²
$\frac{A_c}{R_{20}}$	Relação entre a área superficial de aquecimento e a resistência elétrica à temperatura ambiente (20 °C) para o condutor	181,00	cm ² /Ω
C_t	Fator de temperatura	1,04	-

Definidos esses parâmetros, pode-se calcular a corrente elétrica (I) necessária no fio para que o forno atinja as especificações acima. Para o cálculo da corrente, é usada a Equação (1):

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

Da Equação (1) obtém-se a corrente, sendo $I = 22,85$ A.

Figura 11. Parâmetros da cerâmica graduada e do enrolamento do fio. Adaptado da folha de dados do fabricante.

Foi utilizada uma cerâmica cilíndrica graduada para o projeto. A Figura 11 ilustra os parâmetros da cerâmica graduada e do enrolamento do fio. Os valores desses parâmetros, suas unidades e descrições podem ser consultados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros da cerâmica e do enrolamento da resistência.

Parâmetros do enrolamento do fio resistivo e da cerâmica graduada			
Variável	Descrição	Valor	Unidade
d	Diâmetro do fio	2,2	mm
s	Passo do enrolamento	6,6	mm
D	Diâmetro externo da cerâmica	40,0	mm
L_e	Comprimento total do enrolamento na cerâmica	320,0	mm

Com os parâmetros da cerâmica e do enrolamento definidos acima pode-se calcular o comprimento do fio (L) à temperatura ambiente de 20 °C utilizando a Equação (2):

$$L = L_e \sqrt{\left(\frac{\pi(D - d)}{s}\right)^2 + 1} \quad (2)$$

Portanto, faz-se necessário um comprimento L de 5,77 m de fio de Kanthal A1. A resistência elétrica por metro linear do fio de Kanthal com diâmetro de 2,2 mm é de 0,381 Ω /m.

Sendo assim, a resistência elétrica total (R_{20}) do fio à temperatura ambiente de 20 °C é de 2,2 Ω .

Foram enrolados 6m de fio de Kanthal na cerâmica graduada, que foram centralizados no invólucro metálico, como mostra a Figura 12.

Figura 12. Montagem do forno elétrico. Adaptado de (CORRAL, 2011).

Para isolamento térmico do forno, o espaço entre a cerâmica e o invólucro metálico foi preenchido com material refratário, conforme exibido na Figura 13.

Figura 13. Montagem do forno elétrico: preenchimento com material refratário para isolamento térmico do forno. Adaptado de (CORRAL, 2011).

Terminada a montagem do forno, foi utilizado um suporte de aço para fixação do mesmo. O forno elétrico montado no suporte é exibido na Figura 14.

Figura 14. Forno elétrico finalizado e montado em um suporte de aço para fixação na posição vertical. Adaptado de (CORRAL, 2011).

Para calcular a tensão elétrica que deve ser aplicada para que se obtenha a corrente elétrica de 22,85 A necessária no forno, utiliza-se a primeira lei de Ohm representada pela Equação (3). Sendo a variável U a tensão elétrica aplicada, R a resistência e I a corrente.

$$U = RI \quad (3)$$

Dessa forma, a tensão de alimentação calculada para o forno é de 50,2 V.

Calcula-se agora a resistência na temperatura máxima de trabalho. Seja R_t a resistência do enrolamento à temperatura de trabalho máxima de 1000 °C, utilizando a relação que define C_t dada na Equação (4):

$$R_t = C_t R_{20} \quad (4)$$

Obtém-se R_t igual a 2,3 Ω para C_t igual a 1,04, representando uma variação no valor da resistência elétrica na temperatura máxima de trabalho menor que 5% do valor inicial.

Dessa forma, a potência elétrica P gasta pelo forno pode ser calculada pela Equação (5):

$$P = IU \quad (5)$$

Sendo assim, a potência elétrica P dissipada pela resistência é igual a 1145 W.

Figura 15. Transformador de tensão utilizado no forno elétrico.

Para diminuir a tensão de alimentação e isolar o equipamento da rede elétrica foi utilizado um transformador de tensão, com relação de 3,6:1, com entrada 220 V e saída de 61,1 V, um valor próximo aos 50,2 V definido no projeto. A Figura 15 ilustra o transformador utilizado no protótipo.

Em decorrência do uso desse transformador, houve uma pequena alteração na corrente e na potência do forno em virtude da tensão U , da saída do transformador, ser ligeiramente maior que a tensão definida no projeto. Utilizando novamente as Equações (3) e (5), calcula-se a corrente nominal do forno em operação, que será de 27,77 A, enquanto a potência elétrica nominal dissipada também será maior, com valor de 1697 W.

Um resumo sobre as principais características elétricas do forno é dado na Tabela 5.

Tabela 5. Principais características elétricas do forno, como resistência, corrente, tensão e potência dissipada.

Parâmetros Elétricos do Forno			
Variável	Descrição	Valor	Unidade
R_{20}	Resistência elétrica à temperatura ambiente (20 °C)	2,2	Ω
R_t	Resistência elétrica à temperatura máxima de trabalho (1000 °C)	2,3	Ω
I	Corrente elétrica calculada para o forno	22,85	A
U	Tensão elétrica calculada para o forno	50,2	V
P	Potência elétrica calculada do forno	1145	W
U_R	Tensão elétrica nominal no forno	61,1	V
I_R	Corrente elétrica nominal no forno	27,77	A
P_R	Potência elétrica nominal do forno	1697	W

2.3 HASTE DE AÇO

A haste de aço faz parte do aparato necessário para efetuar os ensaios de inflamabilidade nos óculos de sol e segundo a NBR15111 deve possuir as dimensões descritas na Tabela 6.

Tabela 6. Características físicas estabelecidas pela NBR15111 para a haste de aço do ensaio de inflamabilidade em óculos de sol.

Elemento	Característica	Dimensão / Valor
Haste de aço com faces finais planas e perpendiculares ao eixo longitudinal	Comprimento nominal	300 mm
	Máx. incerteza do comprimento	± 3 mm
	Diâmetro nominal	6 mm

Foi escolhida para a construção do protótipo uma haste de aço inox AISI 304. Esta possui características adequadas para o equipamento, é resistente à oxidação e às altas temperaturas, apresenta ponto de fusão de 1400 °C, além de ser muito comum na indústria. Sua composição química é dada na Tabela 7.

Tabela 7. Composição química da liga metálica AISI 304 utilizada na haste de aço do protótipo desenvolvido.²

Composição da liga – Aço AISI Inox 304	
Elemento Químico	% em Massa
Carbono, C	$\leq 0,080$
Cromo, Cr	18,000 a 20,000
Ferro, Fe	66,345 a 74,000
Manganês, Mn	$\leq 2,000$
Níquel, Ni	8 a 10,500
Fósforo, P	$\leq 0,045$
Silício, Si	$\leq 1,000$
Enxofre, S	$\leq 0,030$

A Figura 16 exibe a haste de aço AISI 304 fixada em uma das extremidades por um cabo de aço, que será movida pelo sistema de movimentação vertical da barra.

Figura 16. Haste de aço AISI 304 fixada em uma extremidade a um cabo de aço usado para movimentação vertical da barra.

² Fonte: <http://www.matweb.com/>.

2.4 TERMOPAR E DISPOSITIVO INDICADOR DE TEMPERATURA

Essa seção apresenta informações acerca do termopar e do dispositivo indicador de temperatura escolhidos no projeto.

A linearidade da resposta de um termopar para determinado intervalo de temperaturas é dada pela curva de diferença de potencial em função da temperatura, que representa a diferença de potencial gerada pela junta metálica do termopar para cada temperatura aferida. Cada tipo de termopar apresenta uma resposta diferente devido aos diferentes materiais que compõe a junta metálica. A Figura 17 exibe os diferentes tipos de termopares existentes e suas respostas elétricas para o intervalo de temperaturas de 0 °C a 1800 °C.

Figura 17. Curva da diferença de potencial em função da temperatura de diferentes tipos de termopares comerciais.³

Para o projeto, foi escolhido o termopar do tipo K, que apresenta boa linearidade na faixa de temperatura de operação do forno. Entre os termopares comerciais, o tipo K é comum, podendo ser encontrado facilmente.

O instrumento utilizado foi o Minipa MTK-16, termopar tipo K com haste de alta temperatura, com conector compensado miniatura, capaz de medir temperaturas na faixa de - 50 °C a 1300 °C. O sensor tem comprimento de 700 mm e diâmetro de 6 mm, a manopla tem comprimento de 150 mm e o cabo tem 1 m de comprimento, com conector soquete tipo K na extremidade. A Figura 18 mostra o termopar MTK-16 utilizado no projeto.

³ Retirado de: <http://www.termopares.com.br/>.

Figura 18. Minipa MTK-16: Termopar tipo K de haste de alta temperatura com conector compensado miniatura. Retirado da folha de dados do fabricante.

De acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, o termopar MTK-16 apresenta precisão de $\pm 0,4 \%$ da leitura ou $\pm 1,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (o que for maior).

Juntamente com o termopar, foi adquirido o termômetro digital microprocessado Minipa MT-525, com visor indicador de temperatura e interface serial RS-232 para comunicação. O dispositivo adquirido é exibido na Figura 19.

Figura 19. Minipa MT-525: termômetro digital microprocessado utilizado como indicador de temperatura do termopar no projeto. Retirado da folha de dados do fabricante.

De acordo com o manual de instruções do termômetro digital, o instrumento MT-525 tem resolução do display de $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ no intervalo de temperatura de $-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e resolução de $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ acima de $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$. O termômetro digital apresenta uma precisão, não incluindo o erro do termopar, de $\pm 0,1 \%$ da leitura + $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A Tabela 8 traz os valores de precisão do termopar e do termômetro digital utilizados no projeto.

Tabela 8. Informações sobre a precisão dos instrumentos utilizados para medição de temperatura do projeto: termopar tipo K MTK-16 e termômetro digital MT-525.

Instrumento	Precisão
Termopar tipo K MTK-16	$\pm 0,4 \%$ da leitura ou $\pm 1,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (o que for maior)
Termômetro digital MT-525	$\pm 0,1 \%$ da leitura + $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.5 MICROCONTROLADOR

A placa de desenvolvimento da Freescale FRDM-KL25Z, exibida na Figura 20, foi escolhida para composição do protótipo. A placa conta com o microcontrolador ARM Cortex M0 como elemento principal e também possui o hardware de programação do microcontrolador embutido.

Figura 20. Placa de desenvolvimento Freescale FRDM-KL25Z com microcontrolador ARM Cortex M0.

A escolha da FRDM-KL25Z, comparada à seleção de um microcontrolador e confecção de uma placa de circuito impressa, se deu pela maior velocidade de desenvolvimento do protótipo e menor custo da solução. O diagrama exibido na Figura 21 mostra os principais pinos e configuração da placa utilizada.

Figura 21. Diagrama com os pinos e configurações da placa de desenvolvimento FRDM-KL25Z.

2.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURAS

Figura 22. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de temperaturas automatizado com comunicação e interface com o PC desenvolvido para o projeto.

Para automatizar a aquisição da temperatura no interior do forno, foi construído um sistema de aquisição de dados com interface para um microcomputador via conexão USB. A Figura 22 apresenta o diagrama de blocos desse sistema.

A temperatura no interior do forno é aferida pelo termopar e o termômetro digital efetua essa leitura e a exibe. Além disso, o termômetro envia a temperatura medida por uma conexão serial RS232. O circuito elétrico projetado para condicionamento do sinal RS232 é exibido na Figura 23.

Figura 23. Circuito de condicionamento do sinal de temperatura para aquisição.

Foi desenvolvida para o projeto uma placa de circuito impresso para este circuito de condicionamento de sinal, exibido na Figura 24. A imagem da esquerda representa a vista superior da PCB enquanto a da direita a vista inferior.

Figura 24. Placa de circuito impressa desenvolvida para o circuito de condicionamento do sinal de temperatura.

Após o tratamento do sinal, o microcontrolador efetua a leitura da temperatura e envia o dado pela conexão USB do computador. O termômetro envia dados com a temperatura a cada 750 ms. O microcontrolador utilizado é um ARM Cortex M0+ presente no kit de

desenvolvimento *Freescale* FRDM-KL25Z e sofre uma interrupção toda vez que esse dado chega transmitindo-o imediatamente para o computador.

A Figura 25 exibe a placa de circuito montada manualmente para o sistema de aquisição descrito, juntamente com o microcontrolador PIC18F4550 da primeira versão do equipamento.

Figura 25. Placa de circuito confeccionada manualmente para aquisição de temperaturas e comunicação USB com o computador – primeira versão do protótipo.

2.7 SISTEMA DE CONTROLE DE POTÊNCIA

Neste tópico tem-se a descrição detalhada do sistema de controle de potência desenvolvido para o projeto, descrito na Figura 26 por meio de um diagrama de blocos.

Figura 26. Representação do sistema de controle de potência desenvolvido para o equipamento por meio de um diagrama de blocos.

Para isolar eletricamente o sistema de potência do restante dos circuitos digitais, foi utilizado um optoacoplador com circuito detector de zero, que tem por finalidade também acionar o TRIAC, responsável pela potência entregue ao forno. O circuito elétrico é exibido na Figura 27.

Figura 27. Circuito de controle de potência.

Dado o circuito acima, foi feito o projeto da PCB no *software Altium Designer*. O projeto final é dado na Figura 28.

Figura 28. Vista superior (esquerda) e vista inferior (direita) da PCB para o sistema de controle de potência.

A placa de circuito impressa foi confeccionada nas oficinas do Departamento de Engenharia Elétrica e sua montagem final é exibida na Figura 29.

Figura 29. Placa confeccionada para o controle de potência.

Na Figura 29 nota-se que o TRIAC está conectado a um dissipador de calor, visto que a corrente que passa no componente é a mesma que passa na resistência do forno elétrico. Além do dissipador, é necessária uma ventoinha para que o componente não ultrapasse sua temperatura máxima de operação.

2.8 CONTROLADOR DE TEMPERATURA

2.8.1 IDENTIFICAÇÃO DA RESPOSTA DO SISTEMA EM MALHA ABERTA

Uma vez montados os sistemas e circuitos elétricos, faz-se necessária a identificação da resposta do forno em malha aberta para que se prossiga com o projeto do controlador de temperatura.

Quanto à resposta do sistema em malha aberta para uma entrada degrau, fornos elétricos resistivos apresentam comportamento similar aos sistemas de primeira ordem com atraso. Já a resposta livre do sistema em malha aberta pode ser caracterizada como um sistema de primeira ordem sem atraso.

A Equação (6) descreve a resposta à uma entrada degrau para um sistema de primeira ordem com atraso.

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < T \\ kA \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}(t-T)} \right), & t \geq T \end{cases} \quad (6)$$

Em que $y(t)$ é a resposta no tempo, t é o tempo, T é o atraso, k é o ganho estático, A é amplitude da entrada aplicada e τ é a constante de tempo.

A função transferência para um sistema de primeira ordem com atraso é dada pela Equação (7).

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-Ts} \quad (7)$$

Em que $G(s)$ é a função transferência no domínio de Laplace, s é a variável de Laplace, k é o ganho estático, T é o atraso e τ é a constante de tempo.

Já a resposta livre do sistema é dada pela Equação (8).

$$y(t) = y_0 e^{-\frac{1}{\tau}t} \quad (8)$$

Sendo $y(t)$ a resposta do sistema no domínio do tempo, t o tempo, y_0 a amplitude inicial da resposta livre e τ a constante de tempo.

A Equação (9) caracteriza a função transferência para um sistema de primeira ordem sem atraso.

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (9)$$

Em que $G(s)$ é a função transferência no domínio de Laplace, s é a variável de Laplace, k é o ganho estático e τ é a constante de tempo.

Para identificação dos parâmetros do forno a uma entrada degrau, o procedimento é descrito a seguir:

1. Aplica-se a tensão alternada na resistência do forno (61 VAC);
2. Mede-se a temperatura no interior do forno e levanta-se a curva de resposta. Espera-se até que o sistema atinja o regime permanente (temperatura final constante);

3. Analisa-se a curva de resposta para determinar os parâmetros e função transferência em malha aberta;
4. Validam-se os dados experimentais com o modelo teórico desenvolvido.

Para identificação dos parâmetros de resposta livre, aplica-se um procedimento semelhante ao anterior:

1. Desliga-se o forno após a temperatura no seu interior alcançar o valor de regime permanente;
2. Mede-se a temperatura no interior do forno e levantar a curva de resfriamento. Espera-se até que o sistema atinja a temperatura ambiente;
3. Analisa-se a curva de resposta para determinar os parâmetros e função transferência em malha aberta;
4. Validam-se os dados experimentais com o modelo teórico desenvolvido.

É importante citar que durante os testes experimentais do forno, a temperatura de regime permanente ultrapassa o limite máximo de temperaturas que o termopar consegue aferir. Desse modo, o forno foi desligado um pouco antes de atingir o limite de temperaturas do termopar para evitar danos ao instrumento. Em consequência desse fato, a análise das curvas de resposta do forno para o degrau e a resposta livres foram efetuadas no *MATLAB*, com auxílio da ferramenta *Curve Fitting*.

Prossegue-se então para a análise da resposta do sistema a uma entrada degrau. Quando o forno é ligado, uma tensão alternada de 61 VAC é aplicada na resistência elétrica do mesmo, caracterizando uma entrada degrau de amplitude 61 VAC. Com auxílio do sistema de aquisição de temperaturas desenvolvido consegue-se medir a resposta do forno no domínio do tempo por meio da curva de temperaturas.

A Figura 30 exibe a resposta do sistema em malha aberta para a entrada degrau de 61 VAC. Quando o forno é ligado, nota-se um atraso para que se comece de fato a aumentar a temperatura em seu interior. O forno entra, então, em regime transitório de temperaturas e com o passar do tempo, tende a atingir o regime permanente, até estabilizar a temperatura novamente. Não foi possível obter dados experimentais das temperaturas do forno para o regime permanente, visto que a temperatura máxima que o termopar consegue aferir sem sofrer danos é de 1300 °C, e como medida preventiva, o sistema foi desligado logo após atingir os 1200 °C. O forno atingiu a temperatura de 650 °C após 15 min ligado com potência máxima.

Figura 30. Resposta do sistema em malha aberta para uma entrada degrau máxima de 61 VAC. A figura apresenta duas curvas: em azul encontram-se os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que em preto encontram-se os dados empíricos adquiridos do sistema.

Figura 31. Resposta do sistema em malha aberta para uma entrada degrau de 61 VAC, com enfoque na região de temperatura de operação do equipamento em desenvolvimento. A curva em cor azul apresenta os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que a curva em preto apresenta os dados empíricos.

A Figura 31 mostra a resposta do sistema para a entrada degrau de 61 VAC com ampliação do gráfico na região de temperaturas de 600 °C a 700 °C.

O modelo teórico foi desenvolvido com base na resposta real do forno, caracterizado por um sistema de primeira ordem com atraso. A Equação (10) exhibe o modelo para a resposta em malha aberta a uma entrada degrau de 61 VAC.

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < 100,2 \\ 1786 \left(1 - e^{-\frac{1}{2874}(t-109,3)} \right), & t \geq 100,2 \end{cases} \quad (10)$$

Utilizando-se o modelo descrito acima, obtém-se a função transferência do forno em malha aberta dado pela Equação (11).

$$G(s) = \frac{29,24}{2874s + 1} e^{-100,2s} \quad (11)$$

Nota-se que o sistema apresenta uma constante de tempo τ de 2874 s, um ganho estático k de 29,24 e um atraso T de 100,2 s.

Figura 32. Resfriamento natural do sistema. A figura apresenta duas curvas: em azul encontram-se os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que em preto encontram-se os dados empíricos adquiridos do sistema.

Prossegue-se agora para os resultados da resposta livre do sistema. Após o aquecimento do forno até o seu limite de temperatura, o sistema foi desligado. A temperatura no interior do forno foi então medida em relação ao tempo. Os resultados experimentais para o resfriamento natural do forno, resposta livre, são exibidos na Figura 32, juntamente com os dados obtidos no modelo teórico.

Com base na resposta livre do protótipo, assegura-se que o sistema é de primeira ordem sem atraso. A resposta do sistema simulado é dada pela Equação (12).

$$y(t) = 873,2e^{\frac{-t}{4377}} \quad (12)$$

Utilizando o modelo descrito acima, obtém-se então a função transferência do sistema para o resfriamento natural, dado na Equação (13).

$$G(s) = \frac{29,24}{4377s + 1} \quad (13)$$

Observa-se que a constante de tempo τ na resposta livre é de 4377 s. A constante de tempo para o sistema na condição de resposta livre é aproximadamente 1,5 vezes o valor do mesmo parâmetro para o forno em resposta a uma entrada degrau, que é de 2874 s. Desse fato incorre que a velocidade de resposta do sistema durante o aquecimento é proporcionalmente maior que a velocidade de resposta do sistema quando em resfriamento natural.

Durante a resposta livre, o ganho k do sistema não influencia, sendo relevante apenas no aquecimento, representando a razão entre a amplitude de temperatura final e a amplitude da entrada degrau aplicada. Quanto maior o ganho k , maior a temperatura final do sistema.

Figura 33. Resposta livre do sistema, com enfoque na região de temperatura de operação do equipamento em desenvolvimento. A curva em azul apresenta os resultados do modelo teórico desenvolvido, enquanto que a curva em preto apresenta os dados empíricos.

A Figura 33 exhibe a resposta livre do forno na faixa de temperaturas de 600 °C a 700 °C.

2.8.2 PROJETO DO CONTROLADOR PID

Atualmente, mais da metade dos controladores industriais utilizados são do tipo PID (proporcional, integral e derivativo) ou apresentam uma estrutura do PID modificada para melhor performance. Uma vantagem deste controlador é que seus parâmetros podem ser facilmente ajustados. Por esta razão o controlador de temperatura escolhido para este trabalho foi o PID. (OGATA, 1997)

Para ajustar o controlador foi escolhido o Método de Ziegler-Nichols. Ziegler e Nichols foram pesquisadores que propuseram regras para ajuste de controladores PID baseados em dados empíricos de sistemas dinâmicos. Dessa forma, não é necessário o conhecimento em detalhes do modelo matemático do sistema a ser controlado, para efetuar a sintonia do controlador PID basta que o engenheiro efetue alguns testes práticos na planta e aplique as regras de ajuste. (OGATA, 1997)

O diagrama exibido na Figura 34 ilustra o controlador PID aplicado na planta. As constantes K_p , T_i e T_d são chamadas de ganhos do controlador, sendo K_p o ganho proporcional, T_i o tempo de integração e T_d o tempo derivativo. SP representa a referência de temperatura, PV a variável temperatura medida no sistema, E o erro resultante da diferença entre SP e PV, V a saída do controlador e Y a saída de temperatura do sistema.

Figura 34. Diagrama de controle da planta ou processo utilizando-se um controlador do tipo PID.

Portanto, o Método de Ziegler-Nichols para a planta em malha aberta é dado na Tabela 9, em que K_p é o ganho proporcional do controlador, T_i é o tempo integral e T_d o tempo derivativo. Os parâmetros k , T e τ são, respectivamente, o ganho estático da planta, o atraso de tempo e a constante de tempo.

Utilizando os parâmetros do sistema em malha aberta calculados no tópico “Identificação da Resposta do Forno em Malha Aberta” e aplicando a regra de Ziegler-Nichols

descrita na Tabela 9, obtém-se a Tabela 10 com os parâmetros do controlador PID calculados. Os valores das constantes utilizadas foram: ganho estático k igual a 29,24, atraso de tempo T igual a 100,2 s e constante de tempo τ igual a 2874 s.

Tabela 9. Regra de Ziegler-Nichols para ajuste de controladores PID para planta em malha aberta.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{\tau}{kT}$	-	-
PI	$\frac{0,9\tau}{kT}$	$3,3T$	-
PID	$\frac{1,2\tau}{kT}$	$2T$	$0,5T$

Tabela 10. Ganhos do controlador PID calculados pelo método de Ziegler-Nichols para a planta em malha aberta.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0,98	-	-
PI	0,88	330,7	-
PID	1,18	200,4	50,1

Portanto, foi implementado no sistema do forno elétrico o controlador do tipo PID, com ganho proporcional de 1,18 V/ °C, tempo integral de 200,4 s e tempo derivativo de 50,1 s.

2.9 ATUADOR LINEAR

O diagrama esquemático do atuador linear montado é dado na Figura 35.

Figura 35. Diagrama de blocos com o esquemático do atuador linear construído para o protótipo.

Figura 36. Desenho tridimensional do atuador linear construído para o protótipo.

O microcontrolador envia o comando para o driver DRV8825 que controla o motor de passo híbrido modelo 4S56R de 6 V e 1,2 A por fase. O eixo do motor está acoplado à uma

polia sincronizadora HTD 3M feita em alumínio com diâmetro de 20 mm e passo de 3 mm conectada a uma correia sincronizadora OMEGA 3M-A constituída de borracha neoprene e fibra de vidro, com largura 9 mm e passo 3 mm. A correia é tensionada por uma polia lisa de alumínio com 20 mm de diâmetro localizada na extremidade oposta à da polia sincronizadora. O cabo de aço conectado à haste metálica aquecida é então fixado na correia sincronizada por meio de um cubo de alumínio. A Figura 36 ilustra o desenho 3-D do atuador linear desenvolvido.

A Figura 37 exhibe o atuador linear e seus principais componentes.

Figura 37. Atuador linear desenvolvido para o projeto e seus principais componentes.

2.10 PAINEL DE CONTROLE

O painel de controle físico montado para o protótipo apresenta um botão verde e dois LEDs indicadores de estado: um verde e um amarelo, exibidos na Figura 38. A temperatura aferida no interior do forno é mostrada no *display* LCD localizado ao lado do painel de controle.

Figura 38. Painel de controle do equipamento. Da esquerda para a direita encontram-se, respectivamente, o indicador de temperaturas, o LED verde, o amarelo e o botão verde de acionamento.

O LED verde, quando acesso, indica que a haste metálica aquecida atingiu a temperatura de trabalho e os ensaios de inflamabilidade podem ser iniciados. O botão verde quando pressionado inicia o teste e o LED amarelo então se acende, indicando que o ensaio está em andamento. Ao término, o LED amarelo se apaga e outro teste pode ser realizado na sequência.

Além do painel físico, o equipamento pode ser controlado também pelo software desenvolvido em *LabView*, como descrito no tópico seguinte.

2.11 SOFTWARE

O software para aquisição, armazenamento, exibição dos dados e controle de temperatura foi feito em ambiente *LabView*. O painel de controle virtual desenvolvido é mostrado na Figura 39. Nota-se a existência de dois gráficos: o de cima exibe as informações

sobre a temperatura medida em tempo real (linha vermelha) e a temperatura desejada (linha azul); o gráfico de baixo exibe a saída do PWM (potência) aplicado no forno. No painel de controle ainda é possível ajustar os ganhos do controle automático (PID) ou operar o controle de forma manual (liga-desliga). Todos os dados adquiridos são automaticamente salvos no disco rígido do computador e podem ser importados por outros softwares posteriormente.

Figura 39. Painel de controle do sistema de aquisição e controle de temperaturas do forno.

A Figura 40 exibe o diagrama de blocos do software desenvolvido no LabView.

Figura 40. Diagrama de blocos do software desenvolvido em LabView.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões deste trabalho foram organizados em subitens para facilitar o entendimento. Primeiramente foram apresentados os resultados referentes ao desenvolvimento do protótipo e na sequência, os resultados dos ensaios de inflamabilidade realizados.

3.1 PROTÓTIPO

O protótipo desenvolvido para ensaios de inflamabilidade atendeu os requisitos necessários para realização do teste de inflamabilidade em óculos de sol, conforme descrito pela Norma Brasileira NBR 15111.

Na Tabela 11 é apresentada uma análise comparativa qualitativa entre as duas versões do protótipo desenvolvido.

Tabela 11. Comparação entre as versões do equipamento para ensaios de inflamabilidade desenvolvido.

Versão	Controle da Haste	Microcontrolador	Meio de Interação
1.0	Manual	PIC 18	USB - PC
2.0	Automático	Arm Cortex M0	USB – PC, Display LCD e Painel

Como se observa na Tabela 11, a primeira versão do protótipo apresentava controle da haste manual, que corresponde ao modo de movimentação vertical da haste aquecida. No modo manual o usuário deve controlar o movimento da haste e o tempo de contato com a amostra, enquanto que no modo automático, o usuário apenas aperta um botão para que o teste se inicie e o sistema efetua todo o controle. Nesta primeira versão, o equipamento utilizava o microcontrolador PIC 18F4550 e tinha como meio de interação com o usuário uma interface USB-PC desenvolvida no *LabView*. Por outro lado, a segunda versão do equipamento apresentou uma série de melhorias para que o usuário do equipamento fosse capaz de efetuar os testes de maneira efetiva, sem a necessidade de mais uma pessoa para tal. Uma das melhorias foi o controle da haste automático. Após posicionar a amostra no suporte do equipamento para o teste, basta apertar um botão para que o teste seja efetuado. Outra mudança foi a substituição do PIC 18F4550 pela placa de desenvolvimento *Freescale* FRDM-KL25Z com microcontrolador ARM Cortex M0, que possibilitou o desenvolvimento mais rápido do

equipamento. Nesta versão final, além da interface USB-PC, é possível também acionar o equipamento pelo painel frontal enquanto um display LCD exibe a temperatura aferida em tempo real. O software desenvolvido passou por otimizações e novas funções foram adicionadas, como por exemplo, permitir ao usuário ajustar os parâmetros do controlador PID com os testes em andamento.

3.1.1 PERFORMANCE DO EQUIPAMENTO

Para aferição das temperaturas no interior do forno foi utilizado um termopar do tipo K com haste de alta temperatura, modelo Minipa MTK-16, juntamente com o termômetro digital Minipa MT-525. A Tabela 12 exibe a precisão dos equipamentos de medição na temperatura de trabalho, equivalente a 650 °C.

Tabela 12. Precisão dos equipamentos de medição de temperatura para 650 °C.

Precisão dos Equipamentos de Medição de Temperatura (650 °C)	
Termopar MTK-16	$\pm 2,60$ °C
Termômetro Digital MT-525	$\pm 1,35$ °C
Precisão da Aferição	$\pm 3,95$ °C

Portanto, a precisão da medição de temperaturas no protótipo é de $\pm 3,95$ °C para uma temperatura de 650 °C. De acordo com as recomendações da norma, a aferição de temperaturas deve apresentar incerteza na medição de no máximo ± 10 °C. Sendo assim, o protótipo desenvolvido atende esse requisito.

Outro requisito da NBR 15111 para o teste de inflamabilidade é que a temperatura da haste de aço seja de 650 °C ± 20 °C. O controle de temperatura do forno foi feito por meio de um controlador PID. Após ligado, o equipamento demora cerca de 22 minutos para estabilizar à temperatura de trabalho e, então, os testes de inflamabilidade nas amostras de óculos de sol podem ser feitos. A Figura 41 exibe a resposta da temperatura pelo tempo.

De acordo com as recomendações da NBR 15111, a temperatura de trabalho está compreendida dentro da faixa de 630 °C a 670 °C. Da Figura 41, as duas linhas pontilhadas correspondem aos limites máximo e mínimo de temperaturas exigidos pela NBR, a linha tracejada azul corresponde à referência de 650 °C enquanto que a linha preta contínua representa a temperatura no interior do forno elétrico.

Figura 41. Resposta de temperatura do forno. Em aproximadamente 22 min o equipamento atinge a faixa de operação de temperaturas de trabalho, que de acordo com a NBR 15111, varia de 630 °C a 670 °C.

Figura 42. Temperatura aferida no interior do forno durante a realização de ensaios de inflamabilidade em amostras de óculos de sol.

Quando o equipamento atinge a temperatura de trabalho, esta se mantém dentro dos limites recomendados, sendo possível fazer um ensaio de inflamabilidade a cada 7 min em média. A Figura 42 exibe a temperatura aferida no interior do forno para a haste metálica

durante uma sequência de quatro ensaios de inflamabilidade consecutivos. Nota-se que as quedas bruscas de temperaturas ocorrem no momento em que os testes ocorrem.

Portanto, como a temperatura de trabalho durante a operação se mantém entre os limites de 630 °C e 670 °C, o protótipo desenvolvido atende ao requisito da temperatura da haste de aço igual a $650\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$.

O sistema desenvolvido apresentou desempenho confiável e robusto para a realização dos ensaios de inflamabilidade de acordo com as recomendações descritas na NBR 15111.

3.2 ENSAIOS DE INFLAMABILIDADE

Ao total foram efetuados testes de inflamabilidade em 48 amostras de óculo de sol: cada amostra teve uma lente e uma haste avaliada utilizando o equipamento desenvolvido e seguindo as recomendações da NBR 15111. As amostras foram selecionadas de forma aleatória dentro de um total de 369 unidades disponíveis.

Das 48 lentes testadas, 47 eram feitas de policarbonato enquanto apenas uma era de vidro. A totalidade das 48 hastes submetidas ao ensaio de inflamabilidade eram feitas de policarbonato.

3.2.1 LENTES

Todas as 47 lentes de policarbonato testadas sofreram derretimento na região de contato com a haste metálica aquecida durante o teste. Apenas a lente de vidro permaneceu intacta após o ensaio. Este fato ocorre porque o policarbonato (PC) é um polímero termoplástico com temperatura de transição vítrea de 155 °C (BRUNELLE, 2005). A haste metálica aquecida, durante os testes, fica à temperatura de 650 °C, causando o derretimento do PC e posterior perfuração da lente. Em contraste com o PC, o vidro apresenta temperatura de transição vítrea acima de 1200 °C e por isso permanece intacto.

A Figura 43 ilustra duas lentes de policarbonato danificadas após a realização do ensaio de inflamabilidade, enquanto a Figura 44 ilustra uma lente de vidro que permaneceu intacta após os procedimentos do teste.

Figura 43. Lentes de policarbonato danificadas após o ensaio de inflamabilidade.

Figura 44. Lente de vidro permaneceu intacta após o teste de inflamabilidade.

Como resultado, nenhuma das lentes testadas se inflamou durante ou após o teste, nem continuou a derreter após cessar o contato com a haste metálica aquecida.

3.2.2 HASTES

Os resultados obtidos para as 48 hastes testadas foram semelhantes. A haste de metal aquecida derreteu parte das hastes dos óculos durante os ensaios. Entretanto, nenhuma haste sofreu ignição em momento algum ou continuou a derreter após o término do procedimento.

A Figura 45 exibe duas hastes de policarbonato após a realização do teste de inflamabilidade.

Figura 45. Hastes de policarbonato danificadas após o procedimento do ensaio de inflamabilidade.

Dessa forma, todas as amostras de óculos de sol estão em conformidade com os requisitos da NBR 15111 para o teste de inflamabilidade e não são inflamáveis.

4 CONCLUSÃO

As conclusões deste estudo foram separadas em dois itens: o primeiro descreve os objetivos alcançados com o protótipo desenvolvido e o segundo discorre sobre as conclusões dos ensaios de inflamabilidade realizados.

4.1 PROTÓTIPO

O equipamento desenvolvido para avaliar a inflamabilidade em óculos de sol apresentou-se eficiente para a realização dos ensaios e ainda tornou-se um sistema de simples utilização para o usuário. O protótipo atendeu a todas as recomendações da NBR 15111, bem como os requisitos de performance, como precisão da aferição e controle da temperatura no interior do forno elétrico.

Segundo a NBR, a aferição de temperaturas no interior do forno elétrico deve apresentar uma precisão mínima $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à temperatura de trabalho de $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. O protótipo desenvolvido atende esse requisito com uma precisão na aferição de $\pm 3,95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Outro requisito imposto pela norma cita os limites de temperatura da haste metálica aquecida. Para execução dos testes, a temperatura mínima da haste aquecida deve ser de $630\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que a temperatura máxima permitida é de $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo assim, a temperatura pode oscilar dentro de intervalo de $650\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. O resultado obtido com o protótipo satisfaz essa condição inclusive durante a realização de vários ensaios consecutivos. O tempo de aquecimento para ligar o equipamento e realizar o primeiro ensaio é em 22 minutos, sendo possível realizar testes consecutivos em intervalos de apenas 7 minutos.

Além disso, o equipamento pode ser facilmente operado e apresenta interface com usuário tanto no painel de controle do protótipo quanto no *software* desenvolvido em *LabView*

4.2 ENSAIOS DE INFLAMABILIDADE

No total, foram realizados ensaios de inflamabilidade em 48 amostras de óculos de sol: cada amostra teve uma lente e uma haste testada. Das 48 lentes avaliadas, 47 eram de policarbonato enquanto apenas uma era de vidro. As hastes eram de policarbonato em sua totalidade. As 48 amostras de óculos foram selecionadas aleatoriamente dentro de um universo

de 369 óculos disponíveis (sendo que dos 48 óculos 45 eram de economia informal – contrabando – e 3 óculos de economia formal).

Todos os óculos avaliados estavam em conformidade com a norma NBR 15111 e apresentaram resistência à ignição, nenhuma amostra se inflamou. Das lentes, as 47 constituídas de policarbonato assim como as 48 hastes sofreram apenas derretimento do polímero na região de contato com a haste aquecida durante o teste. Após cessar o contato da haste aquecida com a amostra, suspendeu-se imediatamente o derretimento. Em nenhum momento dos ensaios foi observado chamas. Conclui-se que o policarbonato, principal componente dos óculos de sol testados é extremamente resistente à inflamabilidade.

Dadas as ocorrências de incêndios e acidentes ocasionados pela inflamabilidade de óculos supracitadas, é notável a importância de efetuar o ensaio de inflamabilidade nas hastes e lentes dos óculos. O procedimento do teste apresenta um papel fundamental para garantir e assegurar saúde e segurança ao consumidor, evitando que danos secundários sejam causados decorrente do uso de óculos.

4.3 SÍNTESE

O sistema que foi desenvolvido atende a todos os requisitos para testes de inflamabilidade em óculos de sol, desde características para o teste quanto a recomendação de performance dos instrumentos, conforme discutido anteriormente.

A contribuição deste trabalho vai além da construção de um equipamento no Brasil que possa realizar os testes de inflamabilidade em óculos de sol exigidos pela norma brasileira NBR15111, sendo possível averiguar a qualidade dos óculos de sol vendidos no Brasil quanto ao quesito inflamabilidade contido na norma. Devido aos tipos de materiais que compõem as lentes e armações atualmente, verifica-se que tanto os óculos de economia informal, em sua maioria feitos de materiais reciclados, quanto os de economia formal são resistentes à ignição. Porém, o teste ainda é necessário e mantido nas normas brasileiras e internacionais devido à constante mudança e surgimento de novos materiais para confecção dos óculos de sol.

O link abaixo exhibe o vídeo do ensaio de inflamabilidade em uma lente e uma haste de policarbonato utilizando o equipamento desenvolvido.

<http://youtu.be/jEoww1W03L0>

5 REFERÊNCIAS

BRUNELLE, D. J. Advances in Polycarbonates: An Overview. In: (Ed.). **Advances in Polycarbonates**: American Chemical Society, v.898, 2005. p.1-5. (ACS Symposium Series).

Cellulose Nitrate Spectacles. **The MusEYEum**, 2014. Disponível em: < http://www.college-optometrists.org/en/college/museyeum/online_exhibitions/spectacles/cellulose-nitrate-spectacles.cfm >. Acesso em: 01/mar.

COLE, B. L. Should sunglasses be required to comply with the sunglass standard? **Clinical and Experimental Optometry**, v. 86, n. 2, p. 74-76, 2003. ISSN 1444-0938. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03065.x> >.

CORRAL, D. C. **Desenvolvimento de sistema para teste de inflamabilidade em lentes solares**. 2011. 86 (Graduação). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-29032012-084253/>.

DAIN, S. J. Sunglasses and sunglass standards. **Clinical and Experimental Optometry**, v. 86, n. 2, p. 77-90, 2003. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03066.x> >.

INMETRO. **Relatório sobre Análise em Óculos de Sol**. Rio de Janeiro: Inmetro 2009.

KULLAVANIJAYA, P.; LIM, H. W. Photoprotection. v. 52, n. 6, p. 937-958, 2005. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0190962204022674> >.

MADRZYKOWSKI, D.; STROUP, D. W. **Flammability Hazard of Materials**. National Fire Protection Assoc., Quincy, MA, -1, 2008

OGATA, K. **Modern control engineering (3rd ed.)**. Prentice-Hall, Inc., 1997. 997 ISBN 0-13-227307-1.

PAIN, P. **FLAMMABILITY TESTING OF MATERIALS CURRENTLY USED IN AUSTRALIA FOR INDUSTRIAL AND COSMETIC EYEWEAR***

The Australian Journal of Optometry Volume 58, Issue 4. The Australian Journal of Optometry. 58: 124-128 p. 1975.

RINGVOLD, A. Corneal epithelium and UV-protection of the eye. **Acta Ophthalmologica Scandinavica**, v. 76, n. 2, p. 149-153, 1998. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1034/j.1600-0420.1998.760205.x> >.

ROGERS, C. S. et al. The effects of sub-solar levels of UV-A and UV-B on rabbit corneal and lens epithelial cells. v. 78, n. 5, p. 1007-1014, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014483504000090> >.

ROSENTHAL, F. S. et al. The Effect of Sunglasses on Ocular Exposure to Ultraviolet Radiation. **American Journal of Public Health**, v. 78, n. 1, p. 72-74, 1988. ISSN 00900036. Disponível em: < <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=s3h&AN=4686303&lang=pt-br&site=ehost-live> >.

_____. Ocular and facial skin exposure to ultraviolet radiation in sunlight: a personal exposure model with application to a worker population. **Health physics**, v. 61, n. 1, p. 77-86, 1991. Disponível em: < <http://europepmc.org/abstract/MED/2061052> >.

SLINEY, D. H. Photoprotection of the eye – UV radiation and sunglasses. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 64, n. 2-3, p. 166-175, 11/15/ 2001. ISSN 1011-1344. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134401002299> >.

_____. Intraocular and Crystalline Lens Protection From Ultraviolet Damage. **Eye & Contact Lens-Science and Clinical Practice**, v. 37, n. 4, p. 250-258, Jul 2011. ISSN 1542-2321. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000292128300012 >.

SLINEY, D. H.; FREASIER, B. C. EVALUATION OF OPTICAL RADIATION HAZARDS. **Applied Optics**, v. 12, n. 1, p. 1-24, 1973. ISSN 0003-6935. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1973O452900001 >.

WANG, S. Q.; BALAGULA, Y.; OSTERWALDER, U. Photoprotection: a Review of the Current and Future Technologies. **Dermatologic Therapy**, v. 23, n. 1, p. 31-47, 2010. ISSN 1529-8019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8019.2009.01289.x> >.

6 APÊNDICE

6.1 CÓDIGO FONTE – VERSÃO 1.0 - MICROCONTROLADOR PIC 18F4550

```
#include <18F4550.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

//Configurando um cristal de 12MHz para operar a 48MHz
#fuses
HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL3,CPUDIV1,VREGEN
#use delay(clock=48000000)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,Stop=1)

#include <usb_cdc.h>

//Define os LEDS
//LED de conexão (LED1): pino D2
//LED de controle (LED2): pino B2
#define LED1 PIN_D2
#define LED2 PIN_B2

//Define quando se liga ou desliga o led (low acende, high apaga)
#define LED_ON output_low
#define LED_OFF output_high

//Variáveis globais
int1 ON=0;
int8 i=0;
int16 dutyON,dutyON2,dutyOFF,dutyOFF2;
float duty;
char c,dados[4];

//Função que calcula startcounter0
int16 tduty(float duty_cycle){
    return(((int16)floor(((65535-(46875*(duty_cycle/100)))+0.4999))));
    //floor(n+0.4999) arredonda para o inteiro mais próximo
}

//Interrupção do TIMER0
#int_TIMER0
void TIMER0_isr()
{
    if (ON){
        LED_OFF(LED2);
        ON=0;
        set_timer0(dutyOFF2);
    }
}
```

```

    else{
        ON=1;
        dutyON2=dutyON;
        dutyOFF2=dutyOFF;
        LED_ON(LED2);
        set_timer0(dutyON2);
    }
}

#define BUFFER_SIZE 32
BYTE buffer[BUFFER_SIZE];
BYTE next_in = 0;
BYTE next_out = 0;

#int_rda
void rda_isr() {
    int t;

    buffer[next_in]=getc();
    t=next_in;
    next_in=(next_in+1) % BUFFER_SIZE;
    if(next_in==next_out)
        next_in=t;      // Buffer cheio !!
}

#define bkbhit (next_in!=next_out)

BYTE bgetc() {
    BYTE c;

    while(!bkbhit);
    c=buffer[next_out];
    next_out=(next_out+1) % BUFFER_SIZE;
    return(c);
}

//Programa principal
void main()
{
    usb_cdc_init();
    usb_init();

    enable_interrupts(INT_USB);
    enable_interrupts(INT_TIMER0);
    enable_interrupts(int_rda);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    LED_ON(LED1);
    delay_ms(300);
    LED_OFF(LED1);
    delay_ms(300);
}

```

```

LED_ON(LED2);
delay_ms(300);
LED_OFF(LED2);
duty=50.0;
dutyON=tduty(duty);
dutyOFF=tduty(100.0-duty);
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_256);
set_timer0(18660); //1 s antes de entrar na primeira interrupção

while(1)
{
    usb_task();
    if(usb_cdc_kbhit())
    {
        c=usb_cdc_getc();
        if(c==0x61)
        {
            for (i=0;i<=3;i++)
            {
                dados[i]=usb_cdc_getc();
            }
            duty=atol(dados)/10;
            //Prevenção de erros na comunicação!
            if ((duty>=0)&&(duty<=100.0)){
                dutyON=tduty(duty);
                dutyOFF=tduty(100.0-duty);
            }
        }
        while(bkbhit){
            usb_cdc_putc(bgetc());
            LED_ON(LED1);
        }
        LED_OFF(LED1);
        delay_ms(150);
    }
}

```

6.2 CÓDIGO FONTE – VERSÃO 2.0 - MICROCONTROLADOR ARM CORTEX M0

```
#include "mbed.h"
#include "PinDetect.h"

// *****
// *****
//   Configurações de Hardware da placa Freescale KL25Z
// *****
// *****

// Configura o LED RGB do Kit ARM usando um PWM
PwmOut ledred(LED_RED);
PwmOut ledgreen(LED_GREEN);
PwmOut ledblue(LED_BLUE);

// Configura LEDs da interface no painel do equipamento
DigitalOut ledverde(PTD5);
DigitalOut ledamarelo(PTD0);

// Configura Botão Verde do painel do equipamento
PinDetect botao(PTA13);

// Configura porta para o PWM Forno (controle de potência)
// PWM_pin=1 -> desligado; PWM_pin=0 -> ligado
// Acionamento é feito em nível lógico baixo!!!
DigitalOut PWM_pin(PTB0);

// Configura Portas para o Driver do Motor de Passo
// Driver DRV8825
// SLEEP (Barrado) - porta PTA5 - Nível Alto p/ funcionar
// STEP - PWM porta PTA4 - Rising Edge dá um Step
// DIR - porta PTA12 - 0: sentido horário, 1: sentido antihorário
DigitalOut SLEEP(PTA5);
PwmOut STEP(PTA4);
DigitalOut DIR(PTA12);

// Configura Tickers (Timers) que geram o PWM Forno
// timer0 - período de 1 segundo
// timer1 - período variável de acordo com Duty Cycle
Ticker timer0;
Ticker timer1;

// Configura timers pra controle do motor
// timer_motor - período de 3120 ms (tempo de descida ou subida)
// timer_teste - período de 5 s (tempo de contato da haste com amostra)
Ticker timer_motor;
Ticker timer_teste;
```



```

// Config. Serial - USB CDC (Comunicação com PC)
// TX -> USBTX; RX -> USBRX
Serial pc(USBTX, USBRX);

// Config. Serial - Sinal de Temperatura
// TX -> PTE0; RX -> PTE1
Serial termometro(PTE0,PTE1);

// *****
// *****
//      Listagem das funções e rotinas desenvolvidas
// *****
// *****

// Rotina de interrupção serial - sinal de temperatura
// Quando a serial do termometro interrompe, essa rotina
// armazena os dados (caracteres) recebidos em um buffer
// para que seja enviado depois pela função envia_buffer()
void serial_interrupt(void);

// Rotina que envia buffer recebido pela serial_interrupt()
// por meio da serial USB (dados de temperatura)
void envia_buffer(void);

// Rotina de interrupção serial USB que recebe os valores do PWM
// Para melhorar e evitar erros na execução, seria interessante
// receber os dados em um buffer e depois tratá-los no main()
void serial_usb_interrupt(void);

// Limpa todos os caracteres que estão no buffer de entrada das
// comunicações seriais (pc e termometro). Joga fora o lixo!
void freeBUFFER(void);

// Rotina de interrupção do timer0. Chamada a cada 1 segundo,
// recebe os valores do PWM
void timer_interrupt0(void);

// Rotina de interrupção do timer1. Recebe os valores de Duty Cycle
void timer_interrupt1(void);

// Função que calcula o período do Duty Cycle para ser usado no
// timer_interrupt1() a partir do valor de PWM recebido
float calcula_duty_period(float PWM);

// Função que controla duas flags que ajustam o PWM Forno: ON e timer1_flag
// ON=1 (desligado) - quando PWM=0;
// ON=0 (ligado) - quando 0<PWM<=100;
// timer1_flag=0 (timer1 desativado) - quando PWM=0 ou PWM=100
// timer1_flag=1 (timer1 ativado) - quando 0<PWM<100
void flags_timer(float periodo);

```

```

// Rotina de interrupção do botão verde do painel após debounce
void botao_hit_callback(void);

//Rotinas do motor de passo
void desce_haste(void);
void sobe_haste(void);
void motor_passo(void);

void timer_motor_interrupt(void);
void timer_teste_interrupt(void);

// *****
// *****
//      Definição das constantes e variáveis
// *****
// *****

// Buffer circular da rotina de interrupção serial (termometro)
const int buffer_size = 32;
char buffer[buffer_size];

// Ponteiros do buffer circular (termometro)
volatile int next_in=0;
volatile int next_out=0;

// Volatile: usado para variáveis usadas em rotinas, funções e no main.
volatile bool desce=0;
volatile bool sobe=0;
volatile bool botaoverde=0;

// Flag de recebimento dos dados da serial (termometro)
bool lido=0;

// Inicialização das flags (boolean) utilizadas na função flags_timer()
// ON=1 (forno desligado) e timer1_flag=0 (timer1 desligado)
bool ON=1;
bool timer1_flag=0;

// Valores relacionados ao PWM recebido via USB
float PWM_recebido=0.0;
float duty_period=0.0;

// *****
// *****
//      Programa Principal
// *****
// *****

int main()

```

```

{
  // Configura o período do PWM do LED RGB
  ledred.period(0.01);
  ledgreen.period(0.01);
  ledblue.period(0.01);

  // Acende o LED Verde. O PWM vai de 1 (0%) a 0 (100%)
  ledred=1;
  ledgreen=0.8;
  ledblue=1;

  // Configura LEDs do painel do equipamento
  ledverde=0;      /*Apaga led verde e acende o amarelo*/
  ledamarelo=1;

  // Configura Portas do Microcontrolador
  // Desliga a saída do PWM Forno
  PWM_pin=1;

  //Configura Portas do Driver DRV8825
  SLEEP=0;
  STEP.period_ms(3);
  STEP=0.0;
  DIR=0;

  // Configura BAUD RATE = 9600 do termometro
  termometro.baud(9600);

  // Configura rotina de Interrupção Serial do Termômetro
  termometro.attach(&serial_interrupt, Serial::RxIrq);

  // Configura rotina de Interrupção da Serial via USB
  pc.attach(&serial_usb_interrupt, Serial::RxIrq);

  // Configura rotina de Interrupção do timer0 (Período = 1 s)
  timer0.attach(&timer_interrupt0, 1);

  // Limpa buffers de entrada das seriais: pc e termometro
  freeBUFFER();

  // Configura botão verde do painel do equipamento
  // Modo PullUp
  botao.mode(PullUp);
  // Configura rotina de interrupção do botão
  botao.attach_deasserted(&botao_hit_callback);
  // Começa amostragem da porta do botão usando interrupções
  botao.setSampleFrequency(1000);

  // Após configurações iniciais, apaga o LED verde.
  ledgreen=1;

```

```

// Loop principal
while (true) {

    // Envia buffer recebido pela serial termometro para a
    // serial pc se lido=1
    if (lido == 1) {
        envia_buffer();
    }

    if (botaoverde == 1) {
        motor_passo();
    }

    if (desce == 1) {
        desce_haste();
    }

    if (sobe == 1) {
        sobe_haste();
    }

    // Período do Duty Cycle é calculado sempre no loop
    // principal utilizando o PWM_recebido pela serial USB
    duty_period = calcula_duty_period(PWM_recebido);

    // Utilizando o Período do Duty Cycle calcula as flags
    // dos timers 0 e 1 para criar sinal PWM Forno
    flags_timer(duty_period);

    // O loop é executado a cada 100 ms
    wait(0.100);
}
}

// *****
// *****
//          Funções e Rotinas Desenvolvidas
// *****
// *****

// Rotina de Interrupção Serial - Termômetro
void serial_interrupt(void)
{
    // Recebe dados da serial e armazena no buffer
    // Pára se o buffer encher
    while ((termometro.readable()) || (((next_in + 1) % buffer_size) == next_out)) {
        buffer[next_in] = termometro.getc();
        next_in = (next_in + 1) % buffer_size;
    }
}

```

```

    // Flag que indica quando há dados para serem enviados ao pc
    lido=1;
    return;
}

// Função que envia o buffer com a temperatura pela serial USB
void envia_buffer(void)
{
    char c;
    while (next_in != next_out) {
        c = buffer[next_out];
        pc.putc(c);
        next_out = (next_out + 1) % buffer_size;
    }
    // Zera a flag
    lido = 0;
    return;
}

// Rotina de Interrupção Serial - USB (pc)
void serial_usb_interrupt(void)
{
    char c, d[4];
    int j=0;

    // Durante a interrupção, se detecta o caractere "a"
    // espera por mais 4 caracteres com o valor do PWM
    // Seria melhor armazenar tudo em um buffer e depois
    // no main() tratar esses dados!!!
    while (pc.readable()) {
        c = pc.getc();
        if (c == 0x61) {
            for (j=0; j<=3; j++) {
                d[j]=pc.getc();
            }
            PWM_recebido = (atof(d))/(10);
        }
        if (c == 0x64) { /*0x64 é 'd'*/
            desce=1;
        }
        if (c == 0x73) { /*0x73 é 's'*/
            sobe=1;
        }
    }
    return;
}

// Função que limpa buffer (tira o lixo!!!)
void freeBUFFER(void)
{

```

```

// limpa buffer serial pc
while (pc.readable()) pc.getc();

// limpa buffer serial termometro
while (termometro.readable()) termometro.getc();
return;
}

// Rotina de Interrupção do timer0 (periodo = 1 s)
void timer_interrupt0(void)
{
    PWM_pin = ON;
    ledred = ON;
    if (timer1_flag == 1) {
        PWM_pin = 0;
        ledred = 0;
        // Se timer1_flag=1, aciona timer1 com duty_period
        timer1.attach(&timer_interrupt1, duty_period);
    }
    return;
}

// Rotina de Interrupção do timer1 (periodo = duty_period s)
void timer_interrupt1()
{
    // Faz o TOGGLE nas portas de saída
    PWM_pin = !PWM_pin;
    ledred = !ledred;
    // Desativa timer1
    timer1.detach();
    return;
}

// Função que calcula o Período do Duty Cycle em segundos
float calcula_duty_period(float PWM)
{
    float d=0;
    if ((PWM > 0) && (PWM < 100)) {
        d = PWM/100;
    } else if (PWM >= 100) {
        d = 1;
    } else {
        d= 0;
    }
    return d;
}

// Função que calcula as flags dos timers 0 e 1
void flags_timer(float periodo)
{

```

```

// Flag ON - Valor inicial do timer0 (ON=1 é desligado!)
if (periodo == 0) {
    ON = 1;
} else {
    ON = 0;
}
// Flag timer1_flag - Aciona timer1
if ((periodo == 0)|| (periodo == 1)) {
    timer1_flag = 0;
} else {
    timer1_flag = 1;
}
return;
}

// Rotina de interrupção do botão verde do painel após debounce
void botao_hit_callback(void)
{
    ledverde = 1;
    botaoverde = 1;
}

// Rotina do motor de passo
void motor_passo(void)
{
    botaoverde=0;
    desce_haste();
    timer_teste.attach(&timer_teste_interrupt, 8.120);
}

// Sobe haste
void desce_haste(void)
{
    desce=0;
    SLEEP=1;
    DIR=0;
    STEP=0.5;
    timer_motor.attach(&timer_motor_interrupt, 3.120);
}

//Abaixa haste
void sobe_haste(void)
{
    sobe=0;
    SLEEP=1;
    DIR=1;
    STEP=0.5;
    timer_motor.attach(&timer_motor_interrupt, 3.120);
}

```

```
void timer_motor_interrupt(void)
{
    STEP=0;
    SLEEP=0;
    timer_motor.detach();
    ledverde=0;
}
```

```
void timer_teste_interrupt(void)
{
    timer_teste.detach();
    sobe_haste();
    botaoverde = 0;
}
```


6.3 PROCEDIMENTO DE USO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

6.3.1 MARCAÇÕES DE REFERÊNCIA

O protótipo desenvolvido apresenta algumas marcações de referência para o posicionamento inicial da haste metálica e do termopar, conforme exibido na Figura 46. A linha 1 é a referência localizada na extremidade inferior do cubo de alumínio que une o cabo de aço ao atuador linear para movimentação da haste metálica. Durante a descrição do procedimento de uso do equipamento o item 1 será referenciado apenas como linha de referência do cubo para efeito de simplificação. As linhas 2 e 3 são, respectivamente, a posição inicial e final do atuador linear durante o ensaio de inflamabilidade. A linha 4 é a referência para o termopar.

Figura 46. Marcações de referência para o posicionamento inicial da haste metálica e do termopar.

6.3.2 AJUSTAR POSIÇÃO INICIAL DA HASTE METÁLICA

Posicionar a linha de referência do cubo com a marcação da posição final do atuador linear conforme indicado na Figura 47. Essa posição ocorre durante o contato da haste metálica com a amostra.

Figura 47. Linha de referência do cubo alinhada com a linha de referência da posição final do atuador linear.

Observe o posicionamento da extremidade inferior da haste metálica na região do suporte de fixação da amostra como exibido na Figura 48.

Figura 48. Haste metálica na posição de contato com a amostra no suporte de fixação.

Afaste as extremidades do suporte de fixação da amostra e posicione o pino guia de latão na direção da haste metálica. Ver Figura 49.

Figura 49. Pino guia de latão alinhado com a haste metálica no suporte de fixação da amostra.

Posicione a linha de referência do cubo alinhada com a posição inicial do atuador linear conforme Figura 50.

Figura 50. Atuador linear configurado em sua posição inicial.

Note que a extremidade superior da haste metálica deve ficar ligeiramente para fora do forno elétrico, como mostrado na Figura 51.

Figura 51. Haste metálica em sua posição inicial para o teste de inflamabilidade.

6.3.3 AJUSTAR POSIÇÃO INICIAL DO TERMOPAR

Ajustar posição inicial do termopar de acordo com o indicado na Figura 52.

Figura 52. Termopar ajustado em sua posição inicial.

Para colocação e fixação do termopar na posição correta, utilize o parafuso mostrado na Figura 53.

Figura 53. Parafuso de fixação do termopar.

6.3.4 INICIAR O SISTEMA

6.3.4.1 Ligar o Termômetro Digital

Primeiro ligar o termômetro digital apertando o botão verde. Em seguida, pressione o botão amarelo (SHIFT) e depois o botão HOLD (RS232) para ativar o envio dos dados de temperatura via serial RS-232 para o microcontrolador. A temperatura deve ser exibida no visor do termômetro digital e no canto superior direito deve aparecer o texto “PC”, como exibido na Figura 54.

Figura 54. Visor do termômetro digital em funcionamento.

6.3.4.2 Conectar o Equipamento ao PC Via Cabo USB

Verifique no painel de controle a porta mini-USB para conectar o cabo USB ao computador. A Figura 55 exibe a porta mini-USB no painel de controle do protótipo.

Figura 55. Porta mini-USB do painel de controle do equipamento.

Conecte o cabo USB na porta do painel de controle e a outra extremidade na porta USB do computador. Ao conectar o cabo no PC, o LED amarelo do painel de controle deve se acender, como mostra a Figura 56.

Figura 56. LED amarelo aceso no painel de controle após a conexão USB com o computador.

No interior do painel de controle, as luzes da placa do microcontrolador devem se acender conforme mostrado na Figura 57. Um LED azul se acender junto com o LED verde, este pisca toda vez que recebe um dado de temperatura proveniente do termômetro digital.

Figura 57. Interior do painel de controle do equipamento em funcionamento.

6.3.4.3 Conectar o Equipamento à Tomada

Deve-se então ligar o equipamento à rede elétrica, utilizando uma tomada de 220 VAC. As ventoinhas serão ligadas. Uma luz vermelha se acenderá na caixa de componentes eletrônicos na parte inferior do equipamento.

6.3.4.4 Abrir o Software Desenvolvido em Ambiente *LabView*

Ao abrir o software desenvolvido em *LabView*, primeiro deve-se selecionar a porta de comunicação utilizado conforme exibido na Figura 58.

Figura 58. Botão para selecionar a porta de comunicação utilizada.

Após a seleção da porta de comunicação, clique no botão RUN, indicado na Figura 59.

Figura 59. Botão para iniciar o programa desenvolvido em LabView.

A Figura 60 exibe o software efetuando o controle do equipamento.

Figura 60. Painel de controle em LabView do equipamento funcionando.

6.3.5 DESLIGAR O SISTEMA

Para desligar o sistema, basta desconectar o equipamento da tomada, retirar o cabo USB do painel de controle e desligar o termômetro digital. Para desligar o termômetro, primeiro aperte a tecla amarela (SHIFT) seguido do botão HOLD (RS232). Por fim aperte o botão verde para desligar.

Para fechar o software em *LabView* no computador aperte o botão STOP e feche a janela do programa.