



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Karolayne Santos De Azevedo

**Medida da Temperatura do Tungstênio no Estado de Incandescência**

PAU DOS FERROS/RN

2017

Karolayne Santos de Azevedo

**Medida da Temperatura do Tungstênio no Estado de Incandescência**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. José Wagner Cavalcanti Silva

Co-orientadora: Prof. Me. Veronica Maria Silva

PAU DOS FERROS/RN

2017

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas  
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the cataloging data provided by the author.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Karolayne Santos De Azevedo

## **Medida da Temperatura do Tungstênio no Estado de Incandescência**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 16 / 10 / 2017.

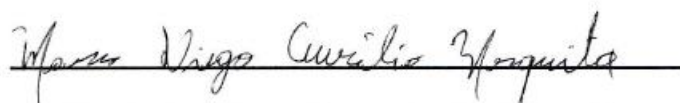
### **BANCA EXAMINADORA**



Prof. Me. José Wagner Cavalcanti Silva  
Presidente



Prof. Dr. Cláudio Rogério Cruz de Sousa  
Membro Examinador



Prof. Me. Marco Diego Aurélio Mesquita  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Deus todo poderoso que, pela sua misericórdia, contribuiu diretamente com meu discernimento e dedicação a este trabalho de conclusão e ao longo de todo o período deste curso. Pela força e sabedoria concedida que me ajudou a vencer mais uma etapa tão importante na minha vida.

Agradeço aos meus pais que no empenho, dedicação e força concederam o exemplo para sempre acreditar na minha capacidade e ciência, pelas oportunidades e pela sua ajuda possibilitaram a conclusão deste curso. Pelo carinho e conforto que sempre esteve presente nas horas que mais necessitei e a que recorria. Aos meus irmãos Kaline Brena e Kayo Antônio que sempre estiveram torcendo por mim, bem como meus amados avós.

Aos meus amigos Lincoln Nunes e Camila Abrantes agradeço imensamente por todos os conselhos e companheirismo prestado ao longo desse caminho.

Agradeço aos meus amigos João Vitor Ricarte, Samara Barros, Moisés Barros, Daniel Douglas, Amanda Cristina, Ana Paula, Helena, Ana Isa, Vitor Lima, Marcilio Rômulo, Mauro Filho e aos meus amigos da sala quatro, Debora Moraes, Igor Ramon, Juarez Alexandre, Vanérica Alves, Rafael Abrantes, Bruno José, Artênio Moraes e Juan Carlos.. A Rosângela Paula e José Urbano, pelo apoio na dedicação e persistência deste curso. Agradeço imensamente por me acolherem e ajudar-me nessa experiência que tem sido muito gratificante e instrutiva para minha formação pessoal.

Agradeço imensamente ao meu grande orientador Msc. Jose Wagner Cavalcante, pela dedicação no processo de orientações e construção desse trabalho, bem como toda compreensão e conselhos ofertados ao longo desse período. A Msc. Veronica Lima por todo auxílio prestatividade e amizade durante este período. Aos professores Msc. Marco Aurélio e Dr. Helder agradeço imensamente por toda disponibilidade, empenho e dedicação que tiveram, saibam que auxiliaram bastante na construção e finalização do trabalho.

“Tudo tem seu tempo determinado, e há tempo para  
todo proposito debaixo do céu. Há tempo de nascer, e  
tempo de morrer; tempo de plantar, e tempo de arrancar  
o                   que                   se                   plantou”  
(Eclesiastes 3. 1-2ª, Bíblia Sagrada)

## RESUMO

Na física, é de grande relevância o estudo e comportamento de corpos que se encontram em seu estado de incandescência. Neste sentido, como estes corpos encontram-se sob temperaturas elevadas, há uma dificuldade na medida direta desta grandeza. Diante desse contexto, a realização deste trabalho possibilitou a construção de um instrumento, cuja finalidade é realizar medições da temperatura do filamento de tungstênio em seu estado de incandescência. Conjuntamente, foi desenvolvida uma interface gráfica cuja finalidade foi abstrair o usuário dos processos utilizados para aferição final dos dados como também, promover uma maior acessibilidade indo de encontro com a proposta geral da pesquisa.

**Palavras-chave:** Temperatura, Medição, Arduino.

## **ABSTRACT**

In physics, the study and behavior of bodies that are in their state of incandescence is of great relevance. In this sense, as these bodies are under high temperatures, there is a difficulty in the direct measurement of this greatness. In view of this context, the realization of this work enabled the construction of an instrument, whose purpose is to perform measurements of the temperature of the tungsten filament in its state of incandescence. In addition, a graphical interface was developed whose purpose was to abstract the user from the processes used for final measurement of the data, as well as to promote greater accessibility, in keeping with the general proposal of the research.

**Keywords:** Temperature, Measurement, Arduino.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Espectro Eletromagnético .....                                                                    | 18 |
| Figura 2: Modelo Físico de um corpo Negro .....                                                             | 19 |
| Figura 3: Relação entre temperatura e cor.....                                                              | 20 |
| Figura 4:Relação entre comprimento de onda e temperatura. ....                                              | 21 |
| Figura 5:Intensidade da radiação de corpo negro em função do comprimento de onda. ....                      | 25 |
| Figura 6:Comportamento entre dados experimentais com as previsões teóricas entre as teorias estudadas. .... | 26 |
| Figura 7:Arquitetura do Arduino UNO. ....                                                                   | 28 |
| Figura 8:Resposta Espectral do LDR .....                                                                    | 31 |
| Figura 9:Resposta espectral do LDR de acordo com o material que o constitui.....                            | 32 |
| Figura 10:Comportamento dos dados em relação aos pinos RX/TX. ....                                          | 34 |
| Figura 11:Localização dos pinos e leds referentes à RX/TX. ....                                             | 36 |
| Figura 12:Visão geral da arquitetura geral do sistema. ....                                                 | 37 |
| Figura 13:Arquitetura real do sistema .....                                                                 | 38 |
| Figura 14:Interação entre classes utilizadas na interface.....                                              | 40 |
| Figura 15:Interface Gráfica do Usuário.....                                                                 | 41 |
| Figura 16:Lâmpada em série com resistência.....                                                             | 44 |
| Figura 17: Esquema do Circuito Detecção. ....                                                               | 48 |
| Figura 18:Ajuste não linear para a resistência elétrica do LDR em função da irradiância .....               | 50 |
| Figura 19:Comportamento dos valores de temperatura e Irradiância.....                                       | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Tipos de Arduino .....                                                 | 29 |
| Tabela 2: Valores de Temperaturas obtidos por meio da eq. 7.1 .....              | 45 |
| Tabela 3 Valores de irradiância obtidos através da equação 7.7. ....             | 48 |
| Tabela 4: Valores de irradiância estimados através da eq. 7.10. ....             | 50 |
| Tabela 5: Valores obtidos e calculados referente à lâmpada calibradora. ....     | 54 |
| Tabela 6: Valores obtidos e calculados referente à lâmpada não calibradora. .... | 54 |

## SUMÁRIO

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                    | 15 |
| 2 . CONCEITOS GERAIS SOBRE RADIAÇÃO .....             | 17 |
| 2.1 RADIAÇÃO TÉRMICA .....                            | 17 |
| 2.2 DEFINIÇÃO DE CORPO NEGRO .....                    | 18 |
| 2.3 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO .....                     | 19 |
| 2.4 DESLOCAMENTOS DE WIEN.....                        | 22 |
| 2.5 RAYLEIGH-JEANS.....                               | 22 |
| 2.7 MAX PLANCK .....                                  | 23 |
| 2.8 Stefan-Boltzmann .....                            | 27 |
| 3. ARQUITETURA GERAL DO INSTRUMENTO .....             | 28 |
| 3.1 Arduino .....                                     | 28 |
| 3.1.1 Algumas Placas Microcontroladores.....          | 29 |
| 3.2 LDR .....                                         | 30 |
| 4. COMUNICAÇÃO SERIAL .....                           | 33 |
| 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA COMUNICAÇÃO SERIAL..... | 33 |
| 4.1.1 Norma EIA-RS-232.....                           | 33 |
| 4.1.2 Dispositivo/Protocolo UART .....                | 34 |
| 5. ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA.....                  | 37 |
| 5.1 INTERFACE GRÁFICA.....                            | 38 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.1 Linguagem utilizada para desenvolvimento da interface ..... | 38 |
| 5.1.2 Conceito de Programação Modular .....                       | 39 |
| 5.1.3 Conceitos Básicos referentes à Interface Gráfica.....       | 39 |
| 5.2 BIBLIOTECAS RXTX.....                                         | 39 |
| 5.2.2 Ide BetBeans .....                                          | 40 |
| 5.3 COMPORTAMENTO GERAL ENTRE AS CLASSES DEPENDENTES. ....        | 40 |
| 5.4 INTERFACE DESTINADA PARA O USUÁRIO.....                       | 41 |
| 6. METODOLOGIA.....                                               | 42 |
| 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                   | 43 |
| 7.1. CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO .....                              | 43 |
| 7.2 CIRCUITO DE DETECÇÃO .....                                    | 47 |
| 7.3 AFERIÇÕES DO INSTRUMENTO .....                                | 53 |
| 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                     | 55 |
| 9. REFERÊNCIAS .....                                              | 57 |

## 1. INTRODUÇÃO

A medição de temperatura é fonte de interesse e estudo não apenas para ciência, como também, é um fator de grande relevância no setor econômico, tornando-se uma das grandezas da física mais medida e conseqüentemente importante Anacleto (2007).

De forma generalizada, encontra-se uma série de obstáculos na obtenção dos valores dessa grandeza, principalmente quando se trata de um corpo no estado de incandescência. Diante desses aspectos, o estudo experimental desses materiais nos laboratórios didáticos de física, torna-se dificultoso, visto que os instrumentos capazes de realizar diretamente estas medidas possuem custo elevado.

Uma das maiores dificuldades encontrados no processo ensino-aprendizagem da física está relacionada à aplicação e inserção de técnicas e instrumentos que permitam realizar a associação com o conteúdo teórico ministrado. Neste sentido, a abordagem experimental de temas como a potência luminosa irradiada por corpos em estado de incandescência viria a proporcionar uma aprendizagem mais sólida sobre este assunto.

Para um corpo entrar em estado de incandescência a sua temperatura deverá ser elevada. Neste trabalho, o corpo incandescente usado para o estudo da potência irradiada na forma de ondas eletromagnéticas é o filamento de tungstênio de lâmpadas incandescentes. Como o filamento de tungstênio está encapsulado não há como medir sua temperatura por contato. Uma possível forma de realizar a medida da sua temperatura é pela radiação emitida por ele.

Nesse aspecto, foi proposta a construção de um instrumento de baixo custo que possibilite medir temperaturas elevadas de corpos em estado de incandescência, além de aparelhar os laboratórios didáticos, visa, também, a inclusão do aluno no processo de construção dessa ferramenta.

A integração do aluno neste processo permite que ele possa ter a oportunidade de aplicar os conhecimentos teóricos estudados. Com base no que foi exposto, a construção do instrumento de medição da temperatura do filamento de tungstênio, utilizando dispositivos de

baixo custo, como o arduino e o LDR, possibilita ao estudante e ao professor aplicar vários conceitos e teorias estudados dentro de sala de aula.

A utilização do arduino como dispositivo de comunicação entre o circuito desenvolvido e o PC proporciona a aquisição de dados experimentais de maneira simples e dinâmica. Para completar o processo de comunicação, pode-se utilizar uma linguagem de programação peculiar desse dispositivo. Esta é baseada nas linguagens de programação C/C++. Para garantir portabilidade, optou-se pelo uso da linguagem Java para implementação de uma interface gráfica com o usuário.

Diante desse cenário, a proposta de trabalho científica, a qual resultou a construção do instrumento que possibilita realizar a medição da temperatura do filamento de tungstênio, é de caráter teórico e experimental. Na pesquisa foram empregados softwares como Maple versão 14 e o Excel para o tratamento estatísticos dos dados, nas técnicas de regressão linear e não linear e interpolação por Spline.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: o primeiro capítulo descreve a respectiva introdução, no qual efetuou o enquadramento e discussão referente ao tema, bem como a relevância do mesmo para ciência. O capítulo dois engloba os aspectos da física que darão embasamento e fundamento para os resultados obtidos.

O capítulo três, intitulado arquitetura geral do instrumento, descreve os elementos usados na construção do mesmo. Na sequência, tem-se o capítulo quatro, onde foram explanados os aspectos que descrevem e esclarecem o processo da comunicação serial, tanto na perspectiva de hardware quanto em relação a software. O capítulo cinco, explica e expõe de maneira visual, como os elementos de hardware e software se comportam perante o olhar do usuário.

Na sequência, tem-se o capítulo seis, onde é apresentada a metodologia adotada no processo de construção do instrumento. O capítulo sete, refere-se aos resultados e discussão, onde apresentamos os dados, adquiridos através do equipamento, possibilitando realizar discussões e comparações referentes aos resultados aferidos. Por fim, tem-se o último capítulo, onde são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras do trabalho.

## 2 . CONCEITOS GERAIS SOBRE RADIAÇÃO

Como a estimativa da temperatura do filamento de tungstênio da lâmpada incandescente é um elemento fundamental no desenvolvimento da pesquisa, houve a necessidade do estudo de princípios e teorias da física moderna. Esta área da física oferece fundamentos que explicam o comportamento de elementos preponderantes da pesquisa, como do próprio filamento, que apresenta comportamento semelhante à de um corpo negro, conceito no qual será abordado, também, neste capítulo.

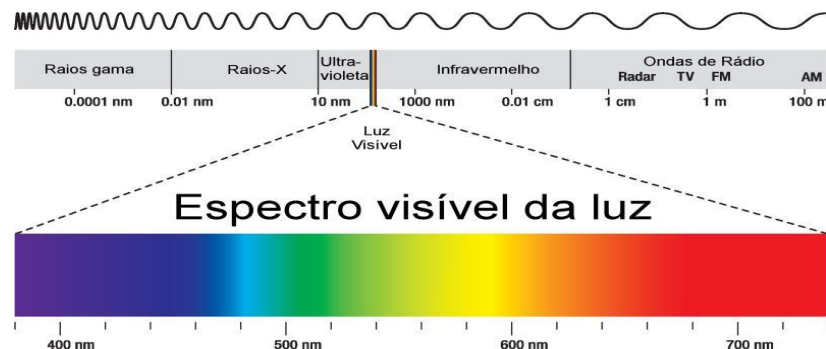
### 2.1 RADIAÇÃO TÉRMICA

Todo corpo aquecido, emite energia na forma de radiação eletromagnética. Sob a concepção da física ondulatória a radiação eletromagnética se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos elétrico e magnético. Bitencourt et al. (2014) define radiação como a energia propagada por ondas eletromagnéticas, as quais estão distribuídas em um espectro e são classificadas segundo o comprimento de onda ( $\lambda$ ) em unidades métrica. Se o mesmo apresentar uma temperatura suficientemente alta, esta energia poderá apresentar-se sob a forma de luz visível. Guimarães (1999). Serway et al. (2012) ainda enfatiza que a radiação consiste em uma distribuição contínua de comprimentos de onda de todas as partes do espectro eletromagnético.

Luz do sol, raios X, raios gamas são exemplos de radiações, cada qual possuem aplicações e efeitos diferentes e o que distinguem uns dos outros é o valor de sua frequência. Para os corpos nos quais apresentam temperatura ambiente, sua emissividade encontra-se na faixa entre 1 micrômetros e 1000 micrômetros. Vale ressaltar que nenhum objeto real é um perfeito emissor.

Para efeito de ilustração, a figura 2.1, representa faixa de luz do espectro de comprimento visível ao olho humano.

Figura 1: Espectro Eletromagnético



Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>

O espectro de radiação de um objeto, não depende apenas de sua temperatura, mas também de sua forma e sua composição. Porém, existe um determinado grupo, denominado corpos negros, que emitem seu espectro em caráter universal tendo como dependência, apenas a temperatura, Serway (2012). Assim, utiliza-se modelo de Corpo negro ideal, como também é conhecido, para entender a distribuição e comportamento dos comprimentos de onda emitidos por um corpo.

## 2.2 DEFINIÇÃO DE CORPO NEGRO

Eisberg, Resnick (1994) definiu que corpo negro como sendo um objeto capaz de absorver toda e qualquer radiação incidente sobre ele, independente de seu comprimento de onda ou direção de incidência. Ou seja, nenhuma parte da radiação, incidida sobre este corpo, é refletida ou transmitida.

Corpo negro é um conceito idealizado de um objeto que emite e absorve radiação térmica de maneira única possuindo comportamento de emissor e absorvedor perfeito.



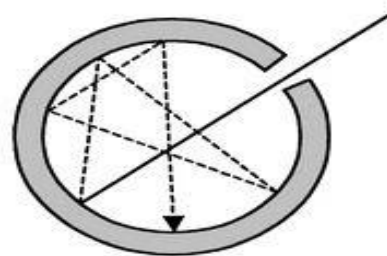
Halliday; et al (2012). Estes produzem radiação eletromagnética, ou também podem ser denominada como radiação térmica do corpo negro.

Para exemplificar e ilustrar de forma simples, um corpo negro, toma-se uma cavidade num objeto oco. Assim, qualquer radiação que entra por meio do orifício, será absorvida, gerando algumas reflexões em seu interior. É importante ressaltar, que a natureza da radiação que sai da cavidade do orifício, depende apenas, da temperatura na qual se encontra as paredes da cavidade e não do material do que ela é feito. Se este objeto for aquecido por uma fonte de calor em seu interior, ocorrerá a emissão de radiação pelo orifício.

Abaixo, a figura retrata o modelo físico de um corpo negro ideal, no qual possui uma abertura (orifício), dentro de um corpo oco, sendo um bom absorvedor.

Diante desse modelo descrito acima, o mesmo possui características peculiares como o fator de absorvidade e emissividade cujo valor é um.

Figura 2: Modelo Físico de um corpo Negro



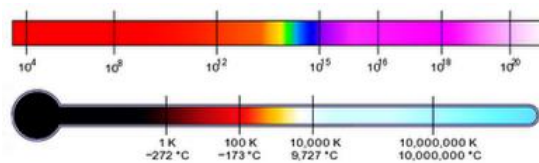
Fonte: <http://alexandremedeirosfisicaastronomia.blogspot.com.br/2011/10/fisica-no-dia-dia003-janelas-escuras-em.html>

## 2.3 RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Halliday, Resnick et al (2012) mostraram que, ao aumentarmos a temperatura de um corpo, gradativamente, o mesmo começa a emitir luz visível, passando por todos os comprimentos de onda. Inicialmente, tem-se a coloração vermelha, logo após amarela, verde, azul e a ultravioleta, no espectro eletromagnético, quando submetido a altas temperaturas.

Alcançando o equilíbrio radioativo. Assim, não haverá mudanças apenas na coloração do objeto, como também ocorrerá um aumento nos valores de radiação luminosa emitido pelo mesmo.

Figura 3: Relação entre temperatura e cor.



Fonte: <http://acquaticos.blogspot.com.br/2010/06/temperaturas-de-cor-na-escala-kelvin.html>

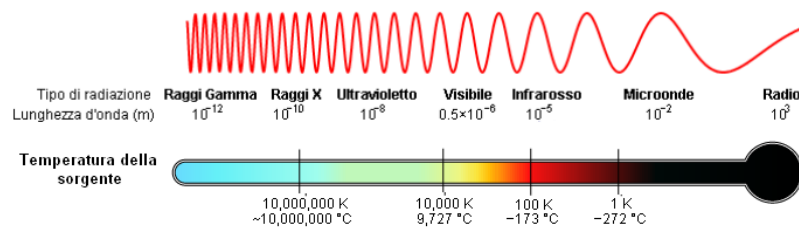
### CHIBENI (2012. P. 1)

A cada temperatura corresponde uma coloração da luz emitida, que resulta da mistura de radiações luminosas de diferentes frequências; cada frequência contribui na mistura em uma determinada proporção, fornecendo uma determinada parcela de energia à energia total irradiada pelo orifício. Essas proporções podem ser medidas experimentalmente.

Guimarães (1999) enfatiza que aumento da temperatura não muda apenas a coloração do objeto, como também altera seu brilho, tendo como exemplo o filamento de tungstênio no qual iremos abordar mais adiante, já que o mesmo possui características semelhantes à de um corpo negro e será o elemento essencial no trabalho.

Conforme a figura 2.3 observa-se que à medida que a temperatura sobe, o comprimento de onda da radiação máxima emitida diminui na mesma proporção. Logo, quando a temperatura diminui, o comprimento de onda da radiação máxima emitida, aumenta, também, na mesma proporção.

Figura 4: Relação entre comprimento de onda e temperatura.



Fonte: <http://www.climatemonitor.it/wpcontent/uploads/2010/05/00000128504a149d23cb0891007f00000000000>

[1.06 radiazioni e temperatura sorgente.png](#)

Tem-se então uma relação inversa entre a temperatura na qual o corpo se encontra, com o comprimento de onda emitido pelo mesmo. Esta relação é caracterizada pela lei de Wien ou lei do deslocamento de Wien, encontrando-se bem detalhada nos respectivos trabalhos de Almeida [sem data] e Moraconi [sem data] onde realizam todos os procedimentos matemáticos para obter todas as equações relacionadas.

## 2.4 DESLOCAMENTOS DE WIEN.

O deslocamento de Wien atenta para o fato de que a temperatura do corpo é diretamente proporcional a frequência e inversamente proporcional ao comprimento de onda.

Em termos gerais, esta análise, entre comprimento de onda da radiação máxima emitida, vezes a temperatura (kelvin) nos dar o valor da constante de Wien, em sumo, o pico da distribuição de comprimento de onda muda para comprimentos mais curtos á medida que a temperatura aumenta, sendo expressa na equação 2.1.

$$\lambda_{\text{máx}}.T = 2,898.10^{-3} m.K , \quad (2.1)$$

onde  $\lambda_{\text{máx}}$  é o comprimento de onda para o qual a curva apresenta um pico e T é a temperatura absoluta na qual o corpo emite radiação.

É importante lembrar que a lei de Wien não é coerente para todos os espectros eletromagnéticos, porém é aplicada para altas frequências, nas quais possuem comprimentos de ondas pequenos.

## 2.5 RAYLEIGH-JEANS

Com a finalidade de explicar o comportamento para todos os espectros emitidos por um corpo em estado de incandescência, Rayleigh-Jeans se apoiou em teorias clássicas da radiação de corpos negros, como o teorema de equipartição de energia para as vibrações eletromagnéticas na cavidade, na tentativa de explicar o comportamento dos comprimentos de onda, obtendo a seguinte equação:

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} , \quad (2.2)$$

$\rho(\lambda)$  é a densidade de energia emitida em função do comprimento de onda.

Serway (2012) argumenta que a teoria de Rayleigh-Jeans também é expressa em termos de intensidade ou potencia emitida por unidade de área,  $I(\lambda, T)$ , descrita na equação 2.3:

$$I(\lambda, T) = \frac{2ck\pi T}{\lambda^4}, \quad (2.3)$$

onde  $I$  é a intensidade ou potência por unidade de área, emitido para um dado comprimento de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $c$  é a velocidade da luz,  $T$  é a temperatura absoluta e  $k$  é a constante de Boltzmann. A teoria clássica usada, mostra que a energia média para cada comprimento de onda é proporcional a  $kT$ .

Ao confrontar os dados teóricos com os experimentais obtidos, Rayleigh-Jeans observou que, para grandes comprimentos de onda (baixas frequências) havia uma concordância entre a teoria e os dados empíricos, porém para pequenos comprimentos de ondas, o mesmo observou grande discrepância entre os dados teóricos com os obtidos experimentalmente.

Para altas frequências a densidade de energia tendia ao infinito. Este fato ficou conhecido na história da física como catástrofe do ultravioleta.

## 2.7 MAX PLANCK

A fim de solucionar os problemas encontrados pelos modelos propostos por Wien e Rayleigh-Jeans, Max Planck procurou obter um modelo teórico que melhor se ajustasse aos resultados experimentais. Para isso, utilizou-se de teorias encontradas na época como a do eletromagnetismo, termodinâmica e a mecânica estatística.

Caruso e Predazzi [sem data] retrata que, inicialmente Planck supôs que um corpo radiante era formado por cargas aceleradas, nas quais se comportavam como osciladores harmônicos simples de frequência  $\nu$ . Assim, cada oscilador pode absorver ou emitir energia da radiação em uma quantidade proporcional a  $\nu$ , até atingir o equilíbrio termodinâmico entre os osciladores e a radiação.

Planck apresentou duas suposições ousadas e controversas referentes à natureza dos osciladores nas paredes da cavidade nas quais considerou que:

Se o corpo negro estiver em equilíbrio termodinâmico, podemos igualar esta potência àquela fornecida ao oscilador por um campo de radiação com densidade de energia espectral obtendo a equação abaixo:

$$u_\nu(T) = \left(\frac{8\pi}{c^3}\right) f^2 \bar{E} \quad , \quad (2.4)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz e  $\bar{E}$  é a energia média do conjunto de osciladores dado por  $\bar{E} = KT$ , Sendo  $K$  a constante de Boltzmann.

Aplicando a função  $F$  oriunda da lei de Wien temos que:

$$F(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{KT}{f^3} \quad . \quad (2.5)$$

Max Planck fez uma proposta que ele considerou desesperadora, mas que revelou-se revolucionária. Ele mostrou que a lei de Rayleigh-Jeans não ajustava a curva espectral em toda a faixa de comprimentos de onda, porque Rayleigh e Jeans admitiam que os osciladores irradiavam qualquer quantidade de energia. Planck impôs uma restrição, isto é, os osciladores só podiam emitir energia em determinadas quantidades. Mais precisamente, em quantidades inteiras de  $hf$ , onde  $h$  passou a ser chamada de constante de Planck, e  $f$  é a frequência da radiação emitida. Esta suposição é hoje conhecida como quantização da energia

Assim, Max Planck postulou que radiação eletromagnética é emitida de forma descontínua, em pequenos “pacotes” de energia, chamados quanta. A energia destas oscilações foi limitada por múltiplos inteiros de energia fundamental  $E$  proporcional a frequência de oscilação. Medeiros (2010).

$$E = hf \quad , \quad (2.6)$$

onde  $h$  é a constante de Planck.

Outra medida atribuída por Planck foi à substituição da média sobre uma variável continua, por uma média discreta para a energia do oscilador, obtendo um novo método para o

cálculo energia média ( $\bar{E}$ ). Caruso e Predazzi. Por meio da ideia de quantização de energia, foi possível realizar uma soma geométrica dos termos resultando na equação de intensidade específica monocromática (energia por unidade de comprimento de onda, por segundo, por unidade de área, e por unidade de ângulo sólido) de um corpo que tem uma temperatura uniforme  $T$  e está em equilíbrio termodinâmico com seu próprio campo de radiação:

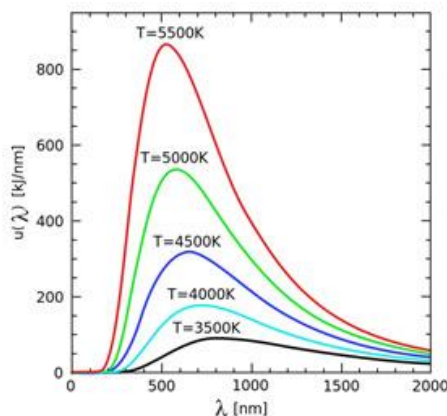
$$F(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}, \quad (3.7)$$

em que  $F(\lambda)$  é a intensidade específica monocromática do corpo negro de temperatura  $T$ ,  $K$  é a constante de Boltzmann,  $c$  é a velocidade da luz e  $h$  é a constante de Planck.

A figura 2.4.1 mostra o gráfico da intensidade em todos os comprimentos de onda, aumenta fortemente com o aumento da temperatura, e o pico de intensidade máxima se desloca para comprimentos de onda menores.

Figura 2.5: Intensidade da radiação de corpo negro em função do comprimento de onda

Figura 5: Intensidade da radiação de corpo negro em função do comprimento de onda.



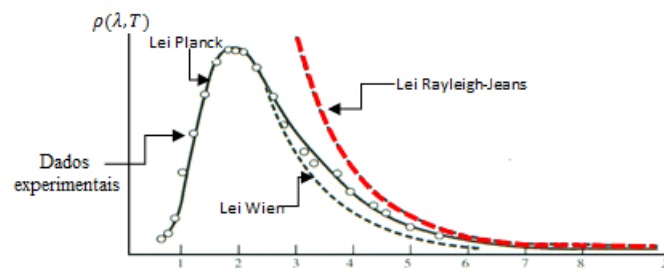
Fonte: <http://fisicanodiaadia.blogspot.com.br/2012/02/lei-de-rayleigh-jeans.html>

Como foi abordado na seção (2.4), tem-se a lei do deslocamento de Wien que satisfazia o comportamento do corpo para comprimentos de ondas mais curtos e temperaturas elevadas. Tem-se esse exemplo para temperaturas em torno de 5500 K e aproximadamente 500 ( $\text{nm}$ ) correspondendo a região do visível como aborda Serway (2012). Em suma a lei de

Planck ajusta-se satisfatoriamente aos dados experimentais para todos os comprimentos de onda irradiado pelo corpo, inclusive para os valores de 3500 K como mostra no gráfico acima.

Partindo da função de Planck, na qual descreve com um bom grau de exatidão os resultados experimentais, podemos fazer uma comparação entre todos os modelos estudados por meio da figura abaixo. Com a lei de Planck pode-se estudar as situações limites para baixas frequências (comprimentos de onda elevados) e altas frequências (comprimentos de onda baixos) como observado no gráfico abaixo.

Figura 6: Comportamento entre dados experimentais com as previsões teóricas entre as teorias estudadas.



Fonte : Adaptado de <http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-18/aula-18.html>

A figura 4 ilustra os dados obtidos experimentalmente a respeito do comportamento do corpo negro, representado pelas bolinhas brancas. A linha tracejada na cor cinza representa a lei de deslocamento de Wien. A linha tracejada, na cor vermelha, representa a lei de Rayleigh-jeans e a linha contínua representa a teoria de Max Planck. O gráfico acima ilustra a densidade de energia emitida pelo corpo negro em função do seu comprimento de onda emitida pelo corpo de acordo com sua temperatura. Note que à medida em que se tem um crescimento comprimento de onda, a curva que melhor se ajusta aos valores experimentais é a lei de Planck. A linha tracejada cinza, se ajusta perfeitamente para valores de comprimentos de onda pequenos e temperaturas elevadas, conhecida como lei de Wien, discutida na seção (2.4). Por sua vez, a linha tracejada vermelha, apresenta um bom comportamento para comprimentos de onda longos, Serway (2012), apresentando uma concordância com os dados experimentais. Porém, para pequenos comprimentos de onda a teoria de Rayleigh-Jeans nos mostrou que a irradiância do corpo tende o infinito, apresentando então, conflitos com a teoria clássica. Este fato ficou conhecido como *catástrofe do ultravioleta*, descrito na seção (2.6).



## 2.8 Stefan-Boltzmann

A radiância total emitida por um corpo negro pode ser obtida integrando-se a função de Planck em todo o domínio de comprimento de onda:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc / \lambda kT) - 1]} d\lambda \quad (2.8)$$

Como a radiação emitida por um corpo negro é isotrópica, a irradiância por ele emitida será:

$$R_T = \sigma T^4, \quad (2.9)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

Em linhas gerais a lei de Stefan-Boltzmann no diz que a energia total emitida por unidade de área superficial de um corpo negro na unidade de tempo (radiação do corpo negro) é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura termodinâmica.

### 3. ARQUITETURA GERAL DO INSTRUMENTO

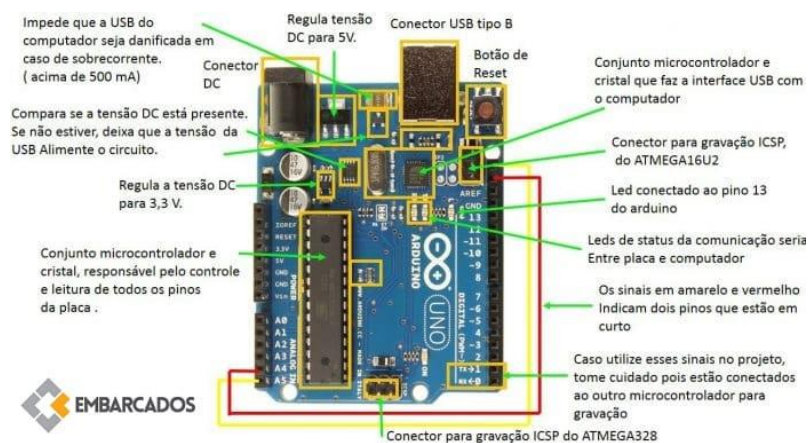
Neste capítulo, abordamos de maneira geral, os utensílios físicos preponderantes na construção do equipamento como o arduino e o LDR. Onde o arduino atuou como sendo nossa placa de aquisição de dados. O LDR, por sua vez, operou como sendo o sensor utilizado por capturar a irradiação oriunda da lâmpada incandescente.

#### 3.1 Arduino

Arduino é uma plataforma física de prototipagem eletrônica simples, de baixo custo e portátil baseado numa placa microcontroladora, de oito bits da Série AVR AT Mega da Atmel, com portas de entradas e saídas, digitais e analógicas (input/output) capaz de criar, modificar e aperfeiçoar projetos interativos, como aborda Araújo et al (2014).

Kamogawa (2013) salientou o fato de essa placa possuir um ambiente de desenvolvimento livre e de fácil manipulação cujo código fonte é aberto. Em relação ao ambiente de desenvolvimento. A linguagem utilizada para realizar as instruções e as tarefas atribuídas à placa é baseada nas linguagens de programação C e C++, a qual possui funções e comandos de fácil compreensão.

Figura 7:Arquitetura do Arduino UNO.



Fonte: <http://www.hardware.com.br/artigos/arduino/>

### 3.1.1 Algumas Placas Microcontroladores

A tabela abaixo apresenta três tipos de placas microcontroladoras (arduino), nas quais englobam características como quantidade de memória ou processamento e número de pinagem. Observa-se que o arduino Mega apresenta uma maior quantidade de memória e pinos, sendo utilizada para projetos mais elaborados.

Tabela 1:Tipos de Arduino

| <b>Placa</b>            | <b>Uno</b> | <b>Duemilanove</b> | <b>Mega</b> |
|-------------------------|------------|--------------------|-------------|
| Microcontrolador        | ATmega328  | ATmega168          | ATmega1280  |
| Tensão de funcionamento | de 5V      | 5V                 | 5V          |
| Tensão de entrada       | 6-20V      | 6-20V              | 6-20V       |
| E/S Digitais            | 14         | 14                 | 54          |
| Entradas analógicas     | 6          | 6                  | 16          |
| Flash Memory            | 32k        | 16k                | 128k        |
| Clock                   | 16Hz       | 16Hz               | 16Hz        |

Fonte : [https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/rodrigues\\_v25\\_n4.pdf](https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/rodrigues_v25_n4.pdf)

A placa microcontroladora UNO foi à escolhida para realizar a aquisição dos sinais. No nosso projeto, estes sinais foram referentes aos valores de tensão sobre o resistor R, no qual faz parte do circuito de detecção que será detalhado no capítulo sete seção 7.1. Estes valores foram obtidos por meio de uma das portas analógicas existentes no arduino, o qual

será descrita abaixo. É importante mencionar, que o arduino UNO, foi escolhido para este fim, já que não foi trabalhado com uma grande quantidade de dados e diversidade de componentes eletrônicos não exigindo uma grande necessidade de processamento.

### 3.2 LDR (Light Dependent Resistor)

O LDR (Light Dependent Resistor), também conhecido como fotoresistor é um componente eletrônico no qual apresenta sensibilidade quando exposto a luz visível, tendo sua resistência elétrica alterada proporcionalmente, a figura ilustra um componente LDR

Figura 3.2:LDR.



Fonte: <http://www.amazon.in/LDR-Light-Dependent-Register-resistor/dp/B018LJPI76>

É fabricado a partir de matérias semicondutores como o sulfato de Cádmio (CdS), Silício (Si), Germânio (Ge) entre outros, utilizando ainda um substrato cerâmico isolante. GUTIERRE et al (2016), aponta que todo semicondutor possui uma pequena quantidade de portadores de energia quando exposto a temperatura ambiente. Ao aumentarmos a fração de luz incidida sobre o LDR, ocorre consequentemente o aumento de energia/ fótons. Se esta energia for maior que a energia de gap o elétrons presentes no material semicondutor, passam da banda de valência para banda condutora, diminuindo assim a resistência elétrica do componente. Logo, sua resistência depende diretamente da irradiância  $I_{LDR}$  do feixe de luz.

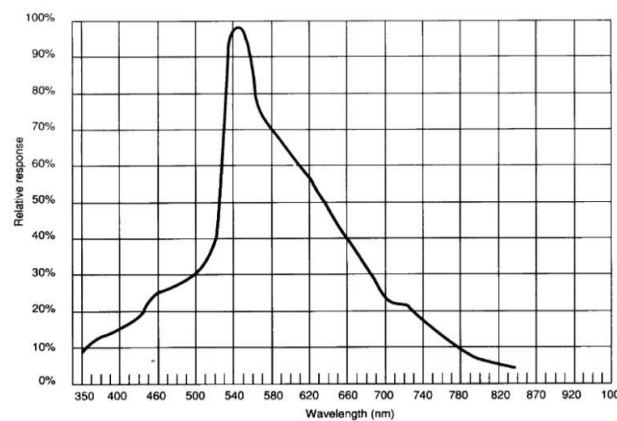
A equação 3.1 descreve como a resistência desse dispositivo varia de acordo com o fluxo luminoso que nele incidente, temos assim:

$$R = A \cdot I^B, \quad (3.1)$$

em que  $I$  é a irradiância,  $A$  e  $B$  são coeficientes que serão obtidos através de uma regressão não linear.

O gráfico 3.2.2 se refere ao comportamento do LDR para os vários comprimentos de onda do espectro visível, obtida por meio do datasheet fornecido pelo fabricante do dispositivo.

Figura 8:Resposta Espectral do LDR

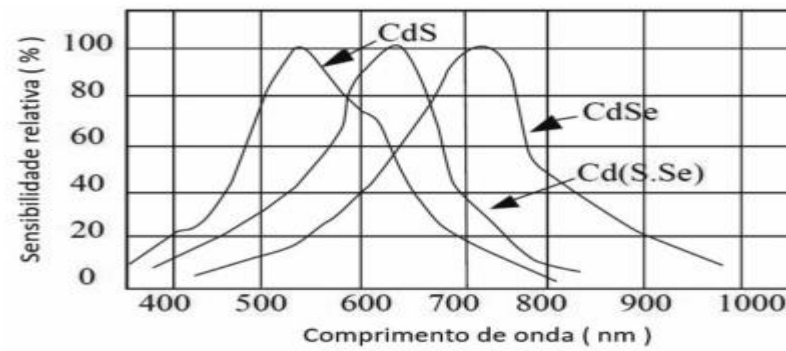


Fonte: <http://www.sunrom.com/p/ldr-5mm-light-dependent-resistor>

É notório que o LDR possui uma maior excitabilidade para regiões compreendidas entre 540nm e 560nm. Este fenômeno é explicado pelo fato do dispositivo ter sido fabricado para apresentar uma maior sensibilidade na região do visível simulando a sensibilidade do olho humano.

Gutierre et al (2016) enfatiza que o comprimento de onda da luz para o qual o LDR apresenta maior sensibilidade dependerá do material do qual ele é construído, como mostra o gráfico abaixo.

Figura 9:Resposta espectral do LDR de acordo com o material que o constitui.



Fonte: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v39n3/1806-1117-rbef-39-03-e3501.pdf>

## 4. COMUNICAÇÃO SERIAL

Nesta seção são discutidas as características e elementos que atuam no processo da comunicação entre o arduino, a placa de aquisição dos dados e o computador, onde realizou-se o tratamento dos dados para aferirmos os valores finais de temperatura.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA COMUNICAÇÃO SERIAL.

Protocolos são utilizados em muitas áreas tecnológicas, pois possibilitam o transporte de informação entre dispositivos, estabelecendo regras e convenções que regem o funcionamento de diferentes comunicações. Essa comunicação pode ser **serial** ou **paralela**, e a transmissão **síncrona** ou **assíncrona**. Para fins da pesquisa será tratado apenas da comunicação serial e assíncrona, já que trabalhamos com uma quantidade pequena de dados.

Em linhas gerais, a comunicação serial se dá através da transferência ou transmissão de dados bit a bit, ou seja: um bit por vez entre dois dispositivos por meio de apenas um canal de comunicação. Assim, a mensagem de tamanho  $n$  é subdividida em bits menores os quais são reorganizadas, ao alcançarem o destino final, dando origem a mensagem inicial. Dizemos que nossa transmissão é assíncrona, pois a mesma não apresenta sinais de *clock*, para realizar o sincronismo entre receptor e transmissor.

#### 4.1.1 Norma EIA-RS-232

Pode-se dizer que EIA-RS-232 é uma norma ou um padrão responsável por definir e padronizar parâmetros e características que, auxiliem no processo da comunicação serial, mencionado no trabalho de Canzian (2002). Este padrão foi desenvolvido para conexões ponto a ponto, estabelecendo parâmetros como as especificações elétricas, conectores, bem como, suas descrições, envolvidas neste tipo de comunicação. Em sumo, esta norma define o modo de troca de sinais de controle e de dados, entre os terminais e o canal que realiza o transporte das informações. Canzian (2012) atenta para o fato que, o “terminal de dados, deve

providenciar a serialização dos dados, para que o projeto do canal de transmissão seja independente do comprimento e da codificação dos mesmos”.

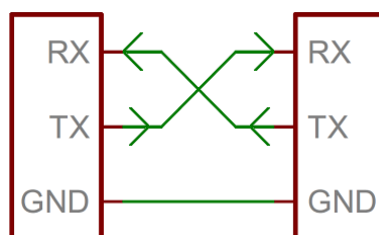
#### 4.1.2 Dispositivo/Protocolo UART

UART “Transmissão e Recepção Assíncrona Universal” é um dispositivo de *hardware*, que auxilia na comunicação serial, descrita na norma EIA-RS-232.

Uma UART implementa a Camada Física e algumas funções da Camada de Enlace da comunicação.

Encontrado, também, nas placas dos microcontroladores, este dispositivo transmite dados para outro dispositivo (computador, por exemplo) por meio de três canais de comunicação, TX (transmissão), RX (recepção) e Ground como mostra a figura.

Figura 10: Comportamento dos dados em relação aos pinos RX/TX.



Fonte: <https://www.robocore.net/tutoriais/comparacao-entre-protocolos-de-comunicacao-serial.html>

A utilização de dois fios para a comunicação é justificada pelo fato de cada fio/pino receber ou transmitir apenas uma sequência de dados.



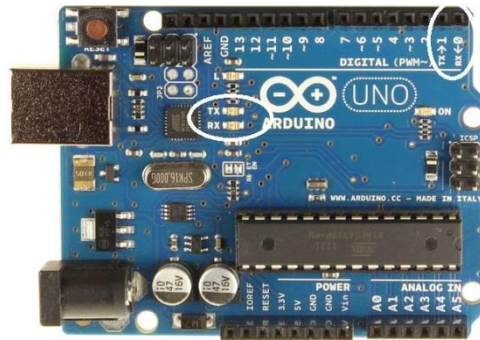
As configurações da comunicação serial variam de dispositivo para dispositivo e devem ser a mesma tanto no transmissor como no receptor. Os parâmetros configuráveis na interface serial são **Baud rate**, **Data Bits**, **Stop Bits** e **Paridade**.

- **Baud rate:** É a taxa de transmissão ou a velocidade com que a serial vai se comunicar com o outro dispositivo e indica quantos bits são transmitidos por segundo.
- **Data Bits :**Indica quantos bits de dados serão enviados Esse número não precisa necessariamente ser 8 (um *byte* completo). Em algumas situações, podemos escolher entre o envio de 5, 7 ou 8 *bytes* de cada vez.
- **Stop Bits :** Bits de parada, indica o fim da transmissão de um pacote de dados. Pode ter o valor de 1, 1.5 ou 2. É utilizado para fins de sincronização entre os dispositivos.
- **Paridade:** Também utilizado para fins de sincronização e verificação da integridade dos dados após a transmissão.

#### 4.1.2 Comunicação serial na placa arduino

No experimento em questão, utilizou-se o arduino UNO como o dispositivo que irá se comunicar com o computador. Esta comunicação é feita através de uma entrada USB que está em conjunto com um microcontrolador que irá processar os dados adquiridos. Na placa desse microcontrolador também estão conectados dois leds: TX e RX. O led TX indica o envio de dados da placa para o computador, enquanto o led RX indica o envio de dados do computador para a placa, como destacados na figura abaixo. O uso dos leds TX e RX permite uma avaliação rápida para diagnóstico de problemas de comunicação entre o aparato desenvolvido e computador. Vale enfatizar a existência dos pinos 0 e 1 que realizam também a comunicação, como mostra figura 4.1.2.1.

Figura 11:Localização dos pinos e leds referentes à RX/TX.



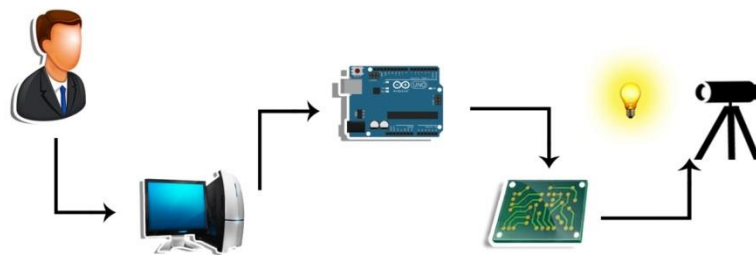
Fonte: <http://www.instructables.com/id/Using-GSM-Shield-to-Switch-on-and-off-multiple-bul/>

A taxa de transferência para comunicação entre os dispositivos é definida tanto na interface gráfica (DATA\_RATE = 9600), quanto no código que será executado no arduino. A biblioteca padrão do arduino disponibiliza métodos convenientes para configuração da comunicação serial `Serial.begin(9600)`. Cada dado adquirido é então enviado do arduino para o computador usando uma representação ASCII com um caractere de final de linha (*linefeed*) como separador entre os dados. A biblioteca padrão também disponibiliza métodos convenientes para envio no formato descrito (`Serial.println`).

## 5. ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA

A figura abaixo representa, em linhas gerais, as relações e dependências existentes entre os elementos que compõem o sistema, perante o olhar do usuário. Este terá acesso ao resultado que o instrumento mensura, por intermédio de uma interface gráfica, descrita na seção 5.4. Esta interface recebe os dados oriundos do arduino por intermédio da comunicação serial citada no decorrer do capítulo quatro, que por sua vez é responsável por realizar a aquisição dos valores de tensão proveniente do resistor que se encontra em série com o LDR. Salienta-se que um cabo USB viabiliza a transmissão. Este circuito é denominado por circuito de aquisição, exposto no capítulo sete seção (7.2) referente aos resultados e discussões. A lâmpada da imagem abaixo simboliza o nosso instrumento composto pela lâmpada incandescente, LDR e lupa, a qual será responsável por convergir os raios que incidem no LDR.

Figura 12: Visão geral da arquitetura geral do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A imagem seguinte refere-se ao instrumento construído, descrito no parágrafo anterior, sendo representado pela lâmpada e o cilindro sustento pelo aparado na figura 13.

Figura 13:Arquitetura real do sistema



Fonte: Própria Autoria

A lâmpada da imagem refere-se a nossa lâmpada calibradora utilizada para a aquisição dos dados. Dentro do cilindro de cor preta está localizado o nosso sensor, LDR, responsável por fazer as leituras dos valores de irradiância. No início do cilindro, foi colocado uma lente, cuja finalidade é convergir os raios oriundos da lâmpada.

## 5.1 INTERFACE GRÁFICA

### 5.1.1 Linguagem utilizada para desenvolvimento da interface

O uso da tecnologia de chips trouxe economia e acessibilidade para a área da computação facilitando aquisição dos mais variados produtos eletrônicas existentes no mercado. Em 1995 a Sun Microsystems desenvolveu a linguagem e plataforma de programação Java, de priori, com intuito de abranger pequenos dispositivos como tv's. A priori, esta acabou por conta, com considerável popularidade, como aborda Jesus (2016).

A linguagem Java é uma linguagem de programação orientada a objetos. Devido à sua popularidade, há uma larga gama de bibliotecas disponíveis, ampliando sua aplicabilidade, tornando-as mais eficientes, como aborda Deitel (2010). Além dessas peculiaridades, o artigo Evolução do java, Alex Buckley [sem data], relata o fato desta linguagem ser interoperável, operando em distintas plataformas e arquiteturas.

### 5.1.2 Conceito de Programação Modular

Pode-se dizer que a programação modular consiste na divisão do programa em porções menores, denominados módulos, com funções e especialidades bem definidas, afim der facilitar o entendimento e consequentemente a manutenção da aplicação, como explana Jesus (2016). As linguagens que fazem uso de módulos oferecem bibliotecas, serviços e dependências que englobam as características acima, bem como, um melhor reaproveitamento de funcionalidade e interação com o usuário.

Nas linguagens orientadas por objetos, o menor módulo possível é representado por uma classe, pois, essa é a menor parte compilável separadamente de um aplicativo construído nesse tipo de linguagem.

### 5.1.3 Conceitos Básicos referentes à Interface Gráfica

As interfaces gráficas são responsáveis por realizar a interação entre homem e maquina determinando o modo como às pessoas as operam. Fialho e Schulenburg (2012). A linguagem Java de programação oferece recursos que possibilitam a criação de interfaces. Estas são conhecidas como Interface Gráfica com Usuário (*Graphical User Interface – GUI*), apresentadas em modo gráfico, estão agrupadas em dois grandes pacotes: java.awt (pacote do núcleo) e java.swing (pacote de extensão)(RIGO ,2004).

## 5.2 BIBLIOTECAS RXTX

A biblioteca javacomm, disponível para a plataforma de desenvolvimento Java, implementa uma API que permite comunicação serial entre dispositivos. Entretanto, o desenvolvimento e suporte da biblioteca javacomm foi abandonado. Devido à necessidade de comunicação serial entre o computador e o aparato desenvolvido, buscou-se uma alternativa para uma biblioteca que permitisse comunicação serial e fosse portátil. Para este trabalho, optou-se pelo uso da biblioteca RXTX por ter uma comunidade ativa de desenvolvedores e usuários e por oferecer suporte à múltiplas plataformas, como para Linux, Windows e MacOS. Por ser baseada na javacomm, RXTX pode ser usado como um substituto direto.

### 5.2.2 Ide NetBeans

O NetBeans IDE é um ambiente de desenvolvimento integrado gratuito e de código aberto para desenvolvedores de software. O IDE é executado em muitas plataformas, como Windows, Linux, Solaris e MacOS. É fácil de instalar e usar oferecendo aos desenvolvedores todas as ferramentas necessárias para criar aplicativos profissionais de *desktop*. A Plataforma NetBeans contém APIs que simplificam o tratamento de janelas, ações, arquivos e muitos outros itens típicos em aplicações

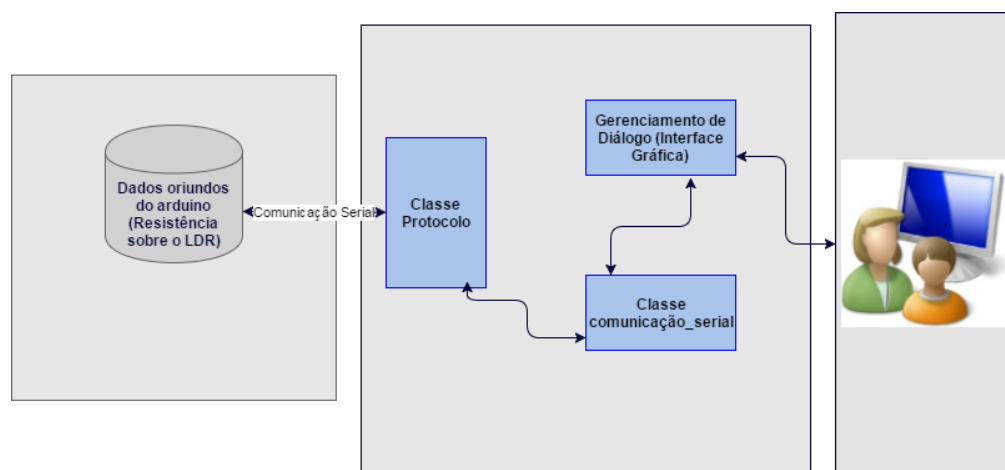
Por utilizar uma linguagem modular, esta IDE possibilita a agregação de vários recursos que corroboram com o processo de criação e otimização da aplicação central, originando *frameworks* completos e intuitivos.

### 5.3 COMPORTAMENTO GERAL ENTRE AS CLASSES DEPENDENTES.

O esquema abaixo retrata de forma clara e sucinta a interação entre a interface gráfica e as classes principais que as compõem.

Os dados oriundos da comunicação serial são recebidos e “manipulados” na classe protocolo. Em termos gerais, a classe Comunicação\_serial é responsável por realizar a escrita e leitura, dos dados advindos da classe Protocolo, num arquivo TXT, bem como verificar se, de fato, a comunicação serial ocorreu.

Figura 14: Interação entre classes utilizadas na interface.



#### 5.4 INTERFACE DESTINADA PARA O USUÁRIO.

Abaixo, tem-se a interface gráfica implementada na linguagem Java com auxílio da ferramenta netBeans. Esta interface é responsável por apresentar os valores de temperatura e irradiância para o usuário. No campo *Porta Arduino*, os botões de seleção COM1, COM2...COM5 tem finalidade de selecionar a porta do arduino na qual estará conectado. O usuário deverá realizar selecionar apenas uma opção e clicar no botão *verificar*. Neste botão, existe um laço de seleção que verifica qual o campo escolhido pelo usuário, assim a função *iniciaSerial* realiza a busca. Se a porta escolhida pelo usuário corresponder a porta “real” conectada, aparecerá “*Conexão OK*” na caixa de diálogo, se não, aparecerá “*NÃO CONECTADO*”. O botão *Acionar*, é responsável por iniciar a serial, este botão irá chamar o método *serialEvent*, responsável pela escrita dos dados advindos da serial. O botão *Parar* tem como função encerrar a comunicação serial. O campo *Distancia*, o usuário irá digitar a distância na qual a lâmpada está do LDR. O botão *Habilitar Temperatura* é responsável por chamar a função que irá realizar o cálculo da temperatura do filamento, o valor deste botão irá aparecer na caixa de diálogo do lado, como mostra a figura 5.4.1.

Figura 15:Interface Gráfica do Usuário.



Fonte: Pelo Autor.

Para oferecer uma melhor praticidade e portabilidade gerou-se o executável desta interface. Assim o usuário final, não necessitará dispor em seu computador, de nenhum programa para gerar os resultados finais. Porém, salienta-se a necessidade da máquina, que irá rodar essa aplicação, conter o pacote *JDK*.

## 6. METODOLOGIA

O laboratório de física de eletricidade e magnetismo da Universidade Federal Rural do Semiárido campus Pau dos Ferros foi o espaço escolhido para o desenvolvimento da pesquisa, pelo fato de apresentar uma estrutura suficiente para construção e calibração do instrumento.

Preliminarmente, realizou-se uma revisão bibliográfica a respeito de conceitos físicos e computacionais relevantes para o desenvolvimento do trabalho tais como: radiação térmica emitida por um corpo negro, teoria e construção de circuitos elétricos, linguagem de programação para desenvolvimento da interface gráfica e comunicação serial, responsável pela aquisição e conversão dos dados obtidos pelo arduino. Para este estudo, utilizaram-se livros e artigos nos quais corroboraram com a pesquisa bibliográfica.

Concomitantemente a revisão bibliográfica foram realizadas várias visitas ao laboratório de eletricidade e magnetismo com o propósito de coletar dados para a calibração do instrumento. Após o tratamento estatístico dos dados coletados foi iniciado o estudo da estrutura lógica do código fonte gravado no microcontrolador que compõe o arduino.

Em seguida foi iniciado o desenvolvimento e testes da interface responsável pela comunicação serial entre o arduino e o computador. Nesses testes todas as equações que descrevem os fenômenos físicos foram implementadas para o cálculo da temperatura do filamento de tungstênio e comparadas com as previsões teóricas.



## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1. CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO

Em seu trabalho, Anacleto (2007) menciona que o processo de calibração consiste na comparação de um instrumento com outro. Por vez, este instrumento possuirá uma maior precisão, tomado como padrão, outro instrumento, que por sua vez foi calibrado à custa de outro padrão de ordem superior .

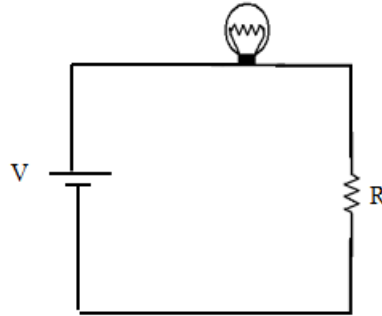
Para realizar a calibração do nosso instrumento é necessário realizar a medição da temperatura do filamento de tungstênio. Pelo fato de não termos acesso a um instrumento que possibilite realizar a medida direta da temperatura do filamento, temos que medi-la indiretamente através da seguinte equação:

$$T = T_0 \left( \frac{R}{R_0} \right)^\varepsilon, \quad (7.1)$$

onde  $T_0$ ,  $R$  e  $R_0$  são, respectivamente, as temperaturas ambientes, a resistência do filamento quando submetido a uma diferença de potencial e a resistência do filamento à temperatura ambiente. O valor do expoente foi obtido por Desai (1984) e seu valor foi estimado  $\varepsilon = 1/1,20$ .

Como discutido no trabalho de Cavalcante (2005) a medida de  $R_0$  não pode ser feita diretamente com um multímetro. Este fato pode ser explicado devido à corrente advinda do instrumento, poder modificar o valor da resistência do filamento, já que o mesmo encontra-se na ordem de ohm, Rego (2015), alterando o resultado final da temperatura calculada pela Eq.(7.1). Uma forma de contornar este problema é conectar a lâmpada em série com uma resistência muito maior do que a resistência do filamento. O esquema do circuito está ilustrado na figura abaixo:

Figura 16:Lâmpada em série com resistência.



Medindo a tensão sobre a lâmpada e a corrente que flui pelo circuito calcula-se a resistência elétrica do filamento através da expressão abaixo, aplicando valores de tensão e corrente.

$$R = \frac{V}{i} . \quad (7.2)$$

A partir dos dados de corrente e resistência pode-se realizar uma regressão linear e fazer uma extrapolação para o valor de  $R$  quando a corrente é nula. Isso equivale a tomar a estimativa do coeficiente linear da reta de regressão. Este valor representa a resistência do filamento na temperatura ambiente.

Dessa forma quando conectarmos a lâmpada diretamente na fonte de tensão é possível calcular a temperatura do filamento através da Eq.(7.1), pois, a sua resistência para determinados valores de tensão e corrente pode ser calculada pela Eq.(7.2).

É preciso enfatizar que todo processo de medida possui uma incerteza associada. Assim, a temperatura calculada através da Eq.(7.1) possui uma incerteza que pode ser calculada pela equação de propagação de incerteza dada por:

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial T_0}\right)^2 \sigma_{T_0}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R}\right)^2 \sigma_R^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R_0}\right)^2 \sigma_{R_0}^2} , \quad (7.3)$$

em que  $\sigma_{T_0}^2$ ,  $\sigma_R^2$  e  $\sigma_{R_0}^2$  são, respectivamente, as incertezas da temperatura ambiente e das resistências do filamento quando submetido a uma diferença de potencial e a temperatura ambiente. A incerteza  $\sigma_{T_0}^2$  é a própria incerteza do instrumento utilizado para medir a temperatura. Já as incertezas  $\sigma_{R_0}^2$  e  $\sigma_R^2$  são incertezas propagadas. A primeira delas é obtida com base no desvio padrão associada à estimativa do coeficiente linear da reta de regressão e a segunda é calculada com base na propagação das incertezas nas medidas da tensão e corrente da Eq.(7.2) através da expressão:

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 \sigma_V^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial i}\right)^2 \sigma_i^2}, \quad (7.4)$$

onde  $\sigma_V^2$  e  $\sigma_i^2$  são as incertezas dos instrumentos usados nas medidas da tensão e da corrente elétrica respectivamente. Dessa forma, levando em conta a Eq.(7.3) temos que a incerteza na medida da resistência é:

$$\sigma_R = \frac{1}{i} \sqrt{\sigma_V^2 + V^2 \sigma_i^2} \quad (7.5)$$

Substituindo (7.5) em (7.3) obtemos:

$$\sigma_T = \left(\frac{R}{R_0}\right)^\varepsilon \sqrt{\sigma_{T_0}^2 + \varepsilon^2 T_0^2 \left(\frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2} + \frac{\sigma_R^2}{R^2}\right)}, \quad (7.6)$$

A lâmpada incandescente foi conectada a uma fonte de tensão contínua, com regulagem de zero a trinta volts, e submetida à diferentes tensões de modo que obtemos os seguinte valores para a temperatura do filamento e suas respectivas incertezas:

Tabela 2: Valores de Temperaturas obtidos por meio da eq. 7.1

| <b>T (K)</b> | <b><math>\sigma_T</math> (K)</b> |
|--------------|----------------------------------|
|--------------|----------------------------------|

|         |       |
|---------|-------|
| 1205,77 | 58,59 |
| 1278,28 | 57,92 |
| 1343,18 | 57,42 |
| 1394,48 | 57,00 |
| 1447,49 | 56,67 |
| 1502,82 | 56,31 |
| 1542,98 | 56,05 |

Fonte: Própria Autoria,

É importante ressaltar que para o nosso estudo, coletou-se essa quantidade de dados, devido ao espaço onde foi realizada a calibração do instrumento. Este lugar possui uma grande quantidade de objetos como: vidros, azulejos e os próprios instrumentos do laboratório. O material que compõem estes objetos, em sua maioria, possui uma superfície com alto índice reflexão. Ao aumentarmos os valores de tensão, a luminosidade da lâmpada aumentava e havia um grande índice de raios luminosos refletidos na direção do detector. Dessa forma a irradiância sobre o LDR não é equivalente à radiância da lâmpada e por conseguinte a temperatura medida pelo instrumento será falseada por este fenômeno.

Para cada valor de temperatura adquiridos através da equação (7.1), calculou-se sua respectiva incerteza, no qual apresenta uma variação para mais ou para menos de acordo com o valor obtido na equação 7.6.

Para a nossa realidade, os intervalos de incertezas advindos da equação (7.6), foram pequenos quando comparado aos valores e a maneira como estas medidas foram obtidas. Se realmente quiséssemos verificar se essas valores foram consideradas bons, teríamos que utilizar um instrumento que nos fornecesse medidas mais precisas. Esse instrumento detém,

também, de uma faixa de incerteza, assim poderíamos verificar se os valores obtidos pelas nossas medidas estariam dentro do intervalo de confiança desde equipamento. Em sumo, os parâmetros que de fato, determinarão se os valores dessas incertezas foram elevados ou não, será o contexto nas quais as mesmas serão direcionadas.

Os valores de temperatura, contidos na tabela (7.1), foram substituídos na função de Planck, apresentada no capítulo três seção (7.7). Assim, realizou-se a integração desta equação, tendo como limites os intervalos do comprimento de onda no qual o LDR melhor responde, obtendo a irradiância detectada pelo LDR, como mostra a equação abaixo.

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) f(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad , \quad (7.7)$$

em que  $F(\lambda)$  corresponde a função de Planck, onde descreve o comportamento espectral da curva do corpo negro. A função  $f(\lambda)$  descreve como o LDR se comporta de acordo com os comprimentos de onda emitidos através da irradiação da lâmpada e foi obtida usando o método de interpolação por Spline. A função  $\varepsilon(\lambda)$  descreve a emissividade do tungstênio, descrita abaixo.

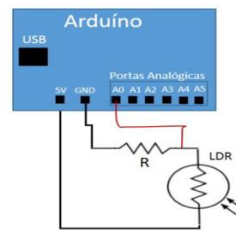
$$\varepsilon = 0,571 - 2,32 \cdot 10^5 \cdot \lambda + 3,28 \cdot 10^{10} \cdot \lambda^2 \quad (7.8)$$

Por não se tratar de um corpo negro perfeito, cujo valor de emissividade é igual a um, tem-se a necessidade da equação acima. Salienta-se que esta medida depende diretamente do comprimento de onda emitido pelo filamento.

## 7.2 CIRCUITO DE DETECÇÃO

O circuito elétrico usado para a detecção da radiação, proveniente da lâmpada incandescente é composto apenas por uma resistência e um LDR conectados em série. No que segue temos o esquema do circuito elétrico em conjunto com o arduíno.

Figura 17: Esquema do Circuito Detecção.



Fonte: Própria Autoria

Quando a radiação incidir sobre LDR a resistência total do circuito será modificada e a tensão sobre cada componente será proporcional a corrente que flui pelo circuito e as suas respectivas resistências.

A leitura feita pela porta analógica A0 do arduino é da tensão sobre o resistor com resistência de valor fixo  $R$ . Com base nas leis de Kirchhoff é possível mostrar que a resistência do LDR é dada por:

$$R_{LDR} = \frac{(5 - V_R)R}{V_R} \quad (7.9)$$

A Eq. (3.1) nos fornece a informação de como a resistência do LDR se modifica com a irradiância. Expondo o LDR a radiação emitida pela lâmpada e medindo sua resistência elétrica, podemos inferir os parâmetros da equação abaixo, apresentada na seção 3.2.1, através de uma regressão não linear.

Os dados coletados estão expostos na tabela que segue. É importante observar, que conforme ocorreu o aumento nos valores de irradiância, a resistência do LDR diminui com o aumento da irradiância como exposto no capítulo três seção 3.2.1 Entretanto, para o quarto valor da tabela, observou-se um aumento considerável na resistência do LDR.

Tabela 3 Valores de irradiância obtidos através da equação 7.7.

| $I(\text{W/m}^2\text{Sr})$ | $R_{LDR}(\text{K}\Omega)$ |
|----------------------------|---------------------------|
|----------------------------|---------------------------|

|       |       |
|-------|-------|
| 0,67  | 33,30 |
| 1,72  | 19,80 |
| 3,80  | 11,99 |
| 6,70  | 7,93  |
| 11,58 | 5,66  |
| 19,74 | 4,27  |
| 28,44 | 3,24  |

Fontes: Própria Autoria

Podemos reescrever a Eq.(3.2.1) da seguinte forma:

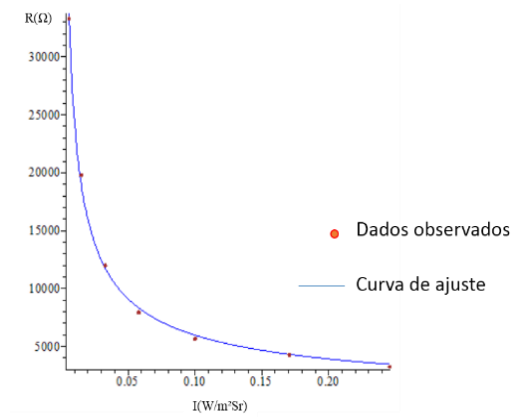
$$I = \left( \frac{R_{LDR}}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (7.10)$$

A partir dos dados de irradiância Eq. (7.7) exposto na tabela 3 e os respectivos valores de resistência pode-se estimar os coeficientes da Eq.(3.2.1). Aplicando o método de regressão não linear aos dados, obtemos os seguintes resultados para os parâmetros A e B da equação anterior.

$$I = \left( \frac{R_{LDR}}{1469,43} \right)^{-\frac{1}{0,609}} \quad (7.11)$$

A figura que segue ilustra o gráfico de dispersão e a curva que melhor se ajusta aos dados observados. Note que a medida que a resistência diminui ocorre um aumento nos valores de irradiância.

Figura 18: Ajuste não linear para a resistência elétrica do LDR em função da irradiância



Com o valor da resistência  $R_{LDR}$  calculada através da Eq.(7.9) a partir da leitura da tensão sobre o resistor fixo, podemos calcular a irradiância da lâmpada pela Eq.(7.11).

Os dados de irradiância e temperatura estão expostos na tabela abaixo:

Tabela 4: Valores de irradiância estimados através da eq. 7.10.

| <b>I(W/m²Sr)</b> | <b>T (K)</b> |
|------------------|--------------|
| 0,67             | 1205,77      |
| 1,72             | 1278,28      |
| 3,80             | 1343,18      |
| 6,70             | 1394,48      |
| 11,58            | 1447,49      |



|       |         |
|-------|---------|
| 19,74 | 1502,82 |
| 28,44 | 1542,98 |

Fonte: Própria Autoria

Por meio da tabela, constata-se que, à medida em que ocorre o aumento da temperatura do filamento, consequentemente ocorrerá, também, um aumento nos valores de irradiância que o mesmo emite, explicada pela teoria de radiação de corpos negros expostos no capítulo dois, seção 2.3.

Aplicando o método de regressão não linear tomando como modelo uma função do tipo:

$$T = \frac{\alpha}{\omega^\beta} I^\beta, \quad (7.12)$$

em que  $\alpha$  e  $\beta$  são os parâmetros livres que iremos inferir e  $\omega$  é ângulo sólido que é calculado por:

$$\omega = \frac{\pi r^2}{d^2}, \quad (7.13)$$

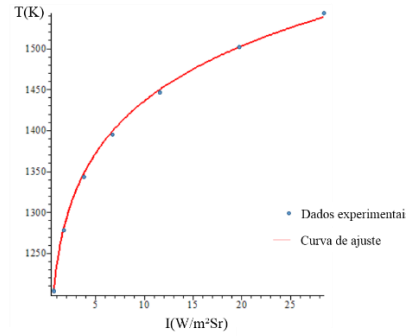
em que  $r$  é o raio do lente e  $d$  é a distância entre a lâmpada e a lente.

Portanto, realizando a regressão não linear obtemos:

$$T = 1233,21I^{0,065} \quad (7.14)$$

O gráfico de dispersão e a curva de ajuste estão ilustrados na figura que segue. Note que a medida que os valores de temperatura aumenta, ocorre um aumento nos valores de irradiância, indicando que estas duas grandezas são diretamente proporcionais.

Figura 19: Comportamento dos valores de temperatura e Irradiância



Com a Eq.(7.14) é possível medir a temperatura do filamento com base na irradiância sobre o LDR que é obtida pela Eq.(7.11).

A incerteza na medida do ângulo sólido é dada por:

$$\sigma_{\omega} = \frac{2\pi r^2}{d^2} \sqrt{\frac{\sigma_r^2}{r^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2}} \quad (7.14)$$

Levando em conta as Eqs.(7.8), (7.9), (7.11), (7.14) e a regra de propagação de incertezas, podemos mostrar que a incerteza na medida da temperatura realizada pelo instrumento é dada por:

$$\sigma_{T_{Instrumental}} = \frac{\alpha\beta}{\omega^\beta} \left[ \frac{(5-V_R)R}{V_R} \right]^{\frac{\beta}{B}} \sqrt{\frac{1}{B^2} \left[ \frac{25\sigma_{V_R}}{(5-V_R)^2 V_R^2} + \frac{\sigma_R^2}{R^2} \right] + \frac{\sigma_{\omega}^2}{\omega^2}} \quad (7.15)$$

em que  $\sigma_{V_R}$  é a incerteza na medida da tensão sobre o resistor que fica em série com o LDR. Essa incerteza é obtida tomando uma amostra de dados de tensão e calculando o desvio padrão amostral das medidas. Realizando tal procedimento obtemos em que  $\sigma_{V_R}$  é a incerteza na medida da tensão sobre o resistor que se encontra em série com o LDR. Essa incerteza é obtida tomando uma amostra de dados de tensão e calculando o desvio padrão amostral das medidas. Realizando tal procedimento obtemos  $\sigma_{V_R} = 0,01 \text{ V}$ .

### 7.3 AFERIÇÕES DO INSTRUMENTO

Para aferirmos o nosso instrumento podemos submetê-lo a dois procedimentos: realizar medidas de temperatura da lâmpada calibradora em valores que não foram observados e realizar medidas de temperatura para uma lâmpada que não foi utilizada no processo de calibração. Ao realizar estes processos, estaremos verificando a exatidão do nosso instrumento. Esta exatidão está relacionada com a capacidade do instrumento em reproduzir ou aproximar-se ao máximo, dos valores previstos pela Eq.(7.1).

Outro parâmetro que devemos aferir no nosso instrumento é a sua precisão. Este parâmetro está relacionado com a capacidade de repetitividade de uma medida realizada pelo instrumento, ou seja, o quanto estas medidas estão “próximas” uma das outras. A aferição da precisão pode ser estimada tomando uma amostra de dez dados e calcular o desvio padrão amostral. Lembrando que o desvio padrão nos fornece uma dimensão da variabilidade dos dados.

Dessa forma, o resultado final da medida deve ser acompanhado da incerteza associada ao processo de medição. Pelo que temos discutido até agora, podemos perceber que temos a incerteza na temperatura propagada pela Eq.(7.6) e a incerteza dada pelo desvio padrão do conjunto de medidas repetidas. Podemos combinar estas incertezas através da seguinte relação:

$$\sigma_{T_{Medida}} = \sqrt{\sigma_{Instrumental}^2 + \sigma_{Estatístico}^2} \quad (7.14)$$

Na tabela 5 e 6 os valores de temperatura na primeira coluna são referentes à previsão feita pela Eq. (7.1), respectivamente acompanhados de sua incerteza. A terceira coluna apresenta os valores de temperatura adquiridos através do processo de medição, juntamente com suas incertezas calculados através da Eq.(7.15)

Tabela 5: Valores obtidos e calculados referente à lâmpada calibradora.

| <b>Temperatura<br/>Prevista (K)</b> | <b><math>\sigma_T</math><br/>(K)</b> | <b>Temperatura<br/>Medida (K)</b> | <b><math>\sigma_{T_{Medido}}</math><br/>(K)</b> | <b>Erro<br/>Percentual</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
| 1253,94                             | 40,58                                | 1231,46                           | 6,78                                            | 1,79%                      |
| 1315,22                             | 40,17                                | 1308,76                           | 7,32                                            | 0,49%                      |
| 1365,74                             | 39,82                                | 1365,46                           | 7,75                                            | 0,02%                      |
| 1415,09                             | 39,50                                | 1423,87                           | 8,36                                            | 0,62%                      |
| 1530,31                             | 38,80                                | 1535,86                           | 10,04                                           | 0,36%                      |
| 1602,50                             | 38,39                                | 1601,01                           | 11,74                                           | 0,09%                      |

Fonte: Própria Autoria

Assim como na tabela (5), a tabela (6) também apresenta a mesma quantidade de variáveis. Porém, estes dados, são referentes aos valores de uma lâmpada distinta da lâmpada utilizada no processo de calibração. Ressalta-se, que a mesma, também, foi submetida às mesmas condições da lâmpada calibradora.

Tabela 6: Valores obtidos e calculados referente à lâmpada não calibradora.

| <b>Temperatura<br/>Prevista (K)</b> | <b><math>\sigma_T</math><br/>(K)</b> | <b>Temperatura<br/>Medida (K)</b> | <b><math>\sigma_{T_{Medido}}</math><br/>(K)</b> | <b>Erro<br/>Percentual</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
| 1263,13                             | 52,27                                | 1251,78                           | 6,79                                            | 0,90%                      |
| 1343,37                             | 52,21                                | 1341,04                           | 7,34                                            | 0,17%                      |

|         |       |         |       |       |
|---------|-------|---------|-------|-------|
| 1446,60 | 54,27 | 1451,55 | 8,18  | 0,34% |
| 1506,22 | 53,80 | 1513,49 | 8,83  | 0,48% |
| 1551,82 | 53,40 | 1554,85 | 9,34  | 0,19% |
| 1617,90 | 52,94 | 1616,09 | 10,56 | 0,11% |

Fonte: Própria Autoria.

Para ambas as tabelas, observa-se que os valores das incertezas referentes aos valores da temperatura medida obtidos através das Eq. (7.14) apresentam valores baixos quando comparado as incertezas relacionadas a temperatura calculada (7.1). Esse fato é compreensivo, já que a equação utilizada nos cálculos das temperaturas prevista trata-se de uma equação empírica, na qual depende de diversos fatores, que também possuem sua incerteza.

Em relação aos valores dos erros percentuais, pode-se dizer que se obteve valores baixos, o que indicam que as medidas obtidas pelo instrumento, estavam muito próximas das obtidas pelo valor teórico.

Os erros percentuais nas tabelas referem-se à comparação entre os valores pontuais previstos e medidos. Porém, podemos perceber que a incerteza no valor da temperatura prevista absorve o valor medido pontual medido pelo o instrumento e a sua incerteza, o que poder gerar um aumento no seu valor final.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os aspectos abordados durante o desenvolvimento do trabalho, percebe-se a necessidade de implantação de técnicas, espaços e instrumentos que auxiliem o processo de ensino-aprendizado, especificamente no ensino de física.

Diante do que foi apresentado, a construção de um instrumento de baixo custo que possibilite realizar medições da temperatura do filamento de tungstênio da lâmpada incandescente, além de aparelhar os laboratórios didáticos, visa à inclusão do aluno no processo de construção e calibração instrumental.

Ao analisarmos os resultados de temperatura obtidos por intermédio do nosso instrumento, percebemos uma grande proximidade com os valores de temperatura adquiridos através da equação (7.1). O cálculo do erro percentual entre essas duas medidas, resultou em valores bem pequenos, demonstrando coerência e confiabilidade nas medições advindas do instrumento. Os valores de incertezas também servem como parâmetros para atestar sua credibilidade, já que se obteve intervalos pequenos. O cuidado no processo de construção, linearização das equações e tratamento dos dados foram fatores preponderantes e imprescindíveis para a obtenção dos bons resultados.

Além de proporcionar uma melhor compreensão com relação ao processo de construção, medição e aferição dos dados, o desenvolvimento da interface gráfica, viabilizou o estudo mais a fundo da comunicação serial entre o hardware e o software, tanto em relação a biblioteca que interpreta e trata os dados oriundos da serial, como também o protocolo que está por trás desse processo.

Este trabalho serve como base para futuros aprimoramentos do instrumento, pois, uma das dificuldades sentidas nesse processo foi o alinhamento do feixe luminoso sobre o LDR. Uma proposta de implementação, seria a elaboração de um circuito alinhador cuja finalidade seria a verificação se de fato o feixe luminosos da lâmpada, estaria sobre o LDR, garantido resultados ainda mais apurados.

O estudo mais detalhado dos recursos dispostos pelas bibliotecas e protocolos que auxiliam no processo da comunicação é bastante significativo para aperfeiçoamento do trabalho, bem como a realização de outras atividades que envolvam esse tipo de comunicação. Assim, encontraríamos maneiras mais simples, dinâmicas e acessíveis de estabelecer a comunicação entre o arduino e o PC como por exemplo, o uso dos módulos wifi, ESP8266, disponíveis para microcontroladores. Ainda seguindo esta vertente, poderíamos transformar a interface gráfica numa aplicação Android, utilizando também a comunicação wifi como mecanismo de sincronização entre o celular e arduino.

## 9. REFERÊNCIAS

ANACLETO, Alcinta. **Temperatura e sua medição**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física para o ensino)- Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.

GUIMARÃES, P. S; **Radiação de Corpo Negro**; Revista Brasileira de Ensino de Física, v.21,n.2, Jun.1999.

JR, John W. Jewett; SEWAY, Raymond. A. **Física para cientistas e engenheiros: Luz, óptica e Física Moderna**. 8.ed. V.4. 2012.

EISBERG, Robert. RESNICK, Robert. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 9.ed. 1994.

HALLIDAY, David; RESNICK, Roberto; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 4: óptica e Física Moderna**. 9.ed. 2012.

ALMEIDA, Luiz Carlos. **Determinação matemática da lei de wien, seu significado físico e suas relações com a lei de planck na determinação da radiação espectral**. The General Science Journal [sem data]. Disponível em: <http://gsjournal.net/Science-Journals/Essays-Mechanics%20/%20Electrodynamics/Download/5100>. Acesso em: 16 jun, 2017.

Moriconi, Luca. ” **As leis de stefan-boltzmann e wien**”. Apostila de Física. UFRJ. Instituto de Física. (Luca Mariconi). [Sem data]. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/~moriconi/MecEst/corpo-negro.pdf>.

MEGGIOLARO, G. P.; BETZ, M. E. M. **Ensino da radiação do corpo negro em sala de aula**. Caxias do Sul. Anais do IX Anped Sul Seminário de Pesquisa em Educação da Região Sul. Caxias do Sul, 2012.

CARUSO, Francisco. PREDAZZI, Enrico. **Sobre o Nascimento e Surgimento da Física Quântica**. Disponível em: <http://www.cbpf.br/~caruso/fcn/publicacoes/pdfs/49-QUANTICA.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

MENDONÇA, Wanderley Honorio. **Primórdios da Física Quântica: Radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico**. 2010. Monografia apresentada Universidade Federal de Rondônia para obtenção do grau de licenciado em Física.

Kamogawa, Marcos Y. **Uso de hardware de código fonte aberto “arduino” para acionamento de dispositivo solenoide em sistemas de análises em fluxo**. Química Nova. Piracicaba – SP. Vol. 36, No. 8, 1232-1235, jun/jul. 2013.

GUTIERRE, Henrique et al . **Sistema fotodetector econômico para utilização em laboratórios de ensino e pesquisa**. Revista Brasileira de Ensino de Física. V.39, n.1, e3501 Dez.2016.

PERALTA, Luis; REGO, Florbela. **Deteção da radiação térmica emitida por um filamento de tungstênio aquecido**. Revista Brasileira de Ensino de Física. V.38, n.1, 1503, Out.2015.

CAVALCANTE, Marisa. A; HAAG, Rafael. **Corpo negro e determinação da constante de Planck**. Revista Brasileira de Ensino de Física. V.27 n. 3, p. 343 - 348, Set.2005.

DEITEL, Paul ;DEITAL, Harvey. Java: **Como programar**. 8.ed.2010.

FIALHO, Francisco. A. P; SCHULENBURG, Haro. R. W. **Interface gráfica, interatividade e suas contribuições através de uma abordagem semiótica**. Revista Travessias ,V.6, Nº1.2012.

RIGO, Wanderson. **Componentes da Interface Gráfica da Linguagem Java**. Programa de educação tutorial ciências da Computação. Universidade federal de santa Catarina Florianópolis.2004.

JESUS, kênia. F. **Os mandamentos da programação modular em java**. Mografia apresentada na Universidade Federal de Minas Gerais Instituto de Ciências Exatas Departamento de Ciências da Computação.2016.

CANZIAN, Edmur. Comunicação Serial–RS232. **São Paulo: Editora da Escola Técnica CNZ de Cotia**, 2002.