



UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
FÍSICA-LICENCIATURA**

JOSÉ ROBERTO DE JESUS SILVA

**CONFECÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL COM ARDUÍNO, PARA ESTUDO
DE CONCEITOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR E INTRODUÇÃO AOS
CONCEITOS BÁSICOS DE CORPO NEGRO**

Caruaru
2018

JOSÉ ROBERTO DE JESUS SILVA

**CONFECÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL COM ARDUÍNO, PARA ESTUDO
DE CONCEITOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR E INTRODUÇÃO AOS
CONCEITOS BÁSICOS DE CORPO NEGRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso de Física-Licenciatura
do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE,
como requisito necessário à conclusão do
curso.

Área de concentração: Ensino de física.

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas

Caruaru
2018

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 – 1242

S586c

Silva, José Roberto de Jesus.

Confecção de aparato experimental com Arduino para estudo de conceitos de transmissão de calor e introdução aos conceitos básicos de corpo negro. / José Roberto de Jesus Silva. - 2018.

78 f. il. : 30 cm.

Orientador: João Francisco Liberato de Freitas

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Licenciatura em Física, 2018.

Inclui Referências.

Calor - Transmissão. 2. Física – Estudo e ensino. 3. Radiação. 4. Física experimental. I. Freitas, João Francisco Liberato (Orientador). II. Título.

371.12 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-256)

JOSÉ ROBERTO DE JESUS SILVA

**CONFECÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL COM ARDUÍNO, PARA ESTUDO
DE CONCEITOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR E INTRODUÇÃO AOS
CONCEITOS BÁSICOS DE CORPO NEGRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso de Física-Licenciatura
do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE,
como requisito necessário à conclusão do
curso.

Aprovado em: 20/11/2018

BANCA EXAMINADORA

prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas (Orientador)
Núcleo Interdisciplinar de Ciências Exatas e da Natureza – UFPE-CAA

prof. Dr. Jehan Fonseca Nascimento (Segundo Examinador)
Núcleo Interdisciplinar de Ciências Exatas e da Natureza – UFPE-CAA

prof. Dr. Augusto César Lima Moreira (Terceiro Examinador)
Núcleo Interdisciplinar de Ciências Exatas e da Natureza – UFPE-CAA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, em especial, a minha esposa Ivaneide Alves, sem a qual a conclusão dessa graduação nunca teria acontecido.

Dedico também este trabalho aos meus pais, Edite Severina e Manuel Pedro (in memoriam), pois, apesar das dificuldades enfrentadas sempre nos ofereceram a oportunidade de estudar, enquanto eles próprios não a tiveram .

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Ivaneide Alves pelo seu apoio incondicional em todos os momentos no decorrer desse curso, a força na hora das reprovações, o apoio financeiro na hora do aperto e a sua infindável paciência nas horas de mau humor.

Agradeço também ao meu orientador o Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas por acreditar nesse projeto e pelo apoio para que o mesmo fosse realizado.

E por fim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra, contribuíram para que esse momento acontecesse, aos professores do CAA, aos meus colegas do curso, de turma e de outros cursos.

RESUMO

Com o objetivo de fornecer ao professor de física uma ferramenta que possibilitasse ao aluno “ver” em tempo real os fenômenos referentes ao calor, sua propagação e também conceitos referentes a radiação de corpo negro, foi confeccionado um aparato experimental usando *Arduino* e *Python*, esse instrumento possibilita a obtenção, em tempo real, das curvas de aquecimento e resfriamento de duas placas de alumínio pintadas de diferentes cores, uma de branco e a outra de preto, que isoladas numa caixa de madeira fechada, podem se comportar como um corpo negro e um corpo não-negro. Assim, é possível ao aluno compreender os referidos conceitos sem que seja necessário um nível de abstração bem desenvolvido. No decorrer deste trabalho buscou-se mostrar a adequação de nosso aparato experimental como ferramenta de ensino de física, onde foram realizadas as comparações entre os dados coletados e o referencial teórico usado, buscou-se portanto a coerência necessária com o referencial teórico, que atestará a sua adequação ou não, como uma ferramenta útil ao ensino de física.

PALAVRAS CHAVE: Transmissão de calor, radiação do corpo negro, Arduino, física experimental, ensino de física.

ABSTRACT

In order to provide, the physics teacher with a tool that would enable the student to "see", in real time the phenomena related to heat, its propagation and also concepts related to black body radiation, an experimental apparatus was made using Arduino and Python. This instrument obtain, in real time, the curves of heating and cooling of two aluminum plates painted in different colors, one white and the other black, which can behave as a black body and a non-black body, which are isolated in a closed box. So, it is possible for the student to understand the concepts without a well-developed level of abstraction. In the course of this work, sought to show the adequacy of our experimental apparatus as a physics teaching tool, there were comparisons between the data collected and the theoretical framework used. Therefore, it was asserved a necessary consistency with the theoretical framework to certify their suitability or not as a useful tool in physics teaching.

KEYWORDS: Heat transfer, blackbody radiation, Arduino, experimental physics, physics teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Observação da taxa de variação de temperatura por interação térmica de um objeto com o ambiente ao seu redor	18
Figura 2 –	A tonalidade da radiação emitida depende da temperatura	21
Figura 3 –	Tipo de corpo negro ideal utilizado em laboratórios que consiste em uma cavidade ligada ao exterior por um minúsculo orifício.....	23
Figura 4 –	Curvas da radiância em função da frequência para $T = 1000\text{ K}$, 1500 K e 2000 K	24
Figura 5 –	Relação entre o comprimento de onda onde a radiância é máxima e a temperatura (Lei do deslocamento de Wien).....	27
Figura 6 –	Aparato experimental desenvolvido.....	31
Figura 7 –	Esquema de ligação dos componentes do aparato experimental.....	32
Figura 8 –	(a) Termopar tipo K modelo WRX(31) com modulo adaptador MAX31855 para Arduíno, (b) placa Arduíno Uno com microcontrolador Atmega 328, utilizado para aquisição de dados em tempo real no experimento.....	33
Figura 9 –	Materiais para a montagem do aparato experimental e o aparato experimental em funcionamento.....	34
Figura 10 –	Obtenção de dados de temperatura versus tempo e confecção das curvas do aquecimento das duas placas em tempo real pelo programa em Python.....	35
Figura 11 –	O programa em Python mostrando a tabela e as curvas das variações de temperatura nas duas placas, já próximo ao final do experimento....	35
Figura 12 –	Curvas de aquecimento das placas referentes as Tabelas 1 e 2.....	40
Figura 13 –	Curva da queda das temperaturas das placas no tempo referentes aos dados das Tabelas 3 e 4.....	41
Figura 14 –	Curvas de ajustes aos pontos experimentais do aquecimento das placas.....	42
Figura 15 –	Ajuste usando a lei do resfriamento de newton para o resfriamento das placas.....	42
Figura 16 –	Ilustração do interior da caixa, contendo as duas placas e os termopares, a lâmpada não é vista na figura.....	44
Figura 17 –	Tela do computador mostrando em tempo real a construção dos gráficos e tabelas durante a realização do experimento.....	45
Figura 18 –	Gráfico do experimento gerado e salvo no computador pelo programa escrito em Python.....	45
Figura 19 –	Gráfico gerado pelo programa em Python mostrando as curvas das temperaturas das paredes da caixa.....	47
Figura 20 –	A energia irradiada que chega à uma área qualquer, decai com o quadrado da distância entre a fonte emissora e a superfície.....	48

Figura 21 –	Energia se propagando de forma esférica dentro da caixa.....	49
Figura 22 –	Filamento visto como uma sequência de pequenas esferas.....	53
Figura 23 –	Esfera que representa uma amostra das esferas do filamento.....	54
Figura 24 –	Medida do raio da esfera imaginária no filamento da lâmpada usando o Tracker.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	CAPACIDADE TÉRMICA DOS CORPOS.....	14
2.2	LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON.....	17
2.3	RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO.....	19
2.4	A LEI DE STEFAN-BOLTZMANN.....	25
2.5	A LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN.....	26
2.6	EMISSIVIDADE ε DE UM CORPO REAL.....	27
3	O APARATO EXPERIMENTAL.....	31
3.1	O NOSSO APARATO EXPERIMENTAL.....	31
4	RESULTADOS OBTIDOS E COMENTÁRIOS.....	37
4.1	CALOR, CAPACIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO E SUA RELAÇÃO COM O APARATO EXPERIMENTAL.....	37
4.2	NOSSO EXPERIMENTO E A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON.....	38
4.3	A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO E O NOSSO APARATO EXPERIMENTAL.....	43
4.4	OUTROS CONCEITOS RELEVANTES DE CORPO NEGRO E A SUA RELAÇÃO COM O APARATO EXPERIMENTAL.....	46
4.4.1	O aparato experimental e a constante de Stefan-Boltzmann.....	46
4.4.2	O aparato experimental e a lei do deslocamento de Wien.....	50
4.4.3	Nosso aparato experimental e o cálculo da emissividade ε para um corpo real.....	51
4.5	RESUMO DE ATIVIDADES.....	56
5	CONCLUSÕES.....	58
5.1	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	ANEXO A – INSTALANDO O <i>PYTHON</i> NO <i>WINDOWS</i>.....	62
	APÊNDICE A – RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL QUE MODELA A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON.....	65
	APÊNDICE B – CÓDIGO EM <i>PYTHON</i> USADO PARA A CAPTAÇÃO DOS DADOS RECEBIDOS ATRAVÉS DA PORTA SERIAL DO COMPUTADOR.....	68
	APÊNDICE C – CÓDIGO USADO PELA PLACA <i>ARDUÍNO</i> PARA A CAPTAÇÃO E O ENVIO DOS DADOS ATRAVÉS DA PORTA SERIAL DO COMPUTADOR.....	72
	APÊNDICE D – TUTORIAL BÁSICO DE INSTALAÇÃO E USO DO <i>PYTHON</i> NO <i>WINDOWS</i> E NO <i>LINUX</i> PARA RODAR O CÓDIGO <i>PYTHON</i>.....	74

APÊNDICE E – TUTORIAL BÁSICO DE USO DO <i>PIP</i> PARA INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS NECESSÁRIOS PARA RODAR O CÓDIGO <i>PYTHON</i>.....	77
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Por ser a física em geral, e em particular a física moderna, consideradas de difícil compreensão, os conceitos de física moderna necessitam de um nível de abstração muito bem desenvolvido para um perfeito entendimento. No entanto, não se afirma aqui neste texto, que a física clássica também não necessite desse bom nível de abstração. Portanto, essa observação é também compartilhada por alguns autores que discutem esse tema. Entre eles, um artigo que debate sobre o ensino de física moderna no ensino médio, segundo Ostermann e Moreira (2000, p. 2): *“Física moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata; [...] além da física clássica ser também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreendê-la.”*

Sabe-se que, no ensino médio e também nos períodos iniciais dos cursos universitários, o nível de abstração ainda não está totalmente desenvolvido, ou ainda, pode ser observado que existe pouco ou nenhum tipo de abstração por parte dos alunos. Então, surge a pergunta: como introduzir conceitos de física moderna para alunos que ainda não têm as ferramentas necessárias para entendê-los?

O uso de experimentos para “materializar” os conceitos que foram vistos, ou mesmo, que serão ainda vistos teoricamente nos livros didáticos, pode ser a chave para libertar o aluno da necessidade de imaginar o fenômeno, exigindo dele um nível de abstração que o mesmo ainda não possui. Ou seja, dando-lhe a oportunidade de poder fazer a ponte entre o conceitual e a prática real, assim como enfatizam Rocha, Maranghello e Lucchese (2013, p. 3): *“[...] é através das atividades experimentais que o aluno é estimulado a não permanecer somente no mundo dos conceitos e das ‘linguagens’, pois tem a oportunidade de relacionar esses dois mundos com o empírico”.*

Ou seja, o uso de um experimento traz a oportunidade do aluno fazer a relação do que foi exposto teoricamente pelo professor em sala com o que está ocorrendo experimentalmente de forma imediata.

Entre os professores de física, o uso de experimentos como ferramenta de ensino, seja em um laboratório de física básica ou mesmo em sala, é algo que mesmo não sendo a prática de muitos é quase uma unanimidade, como afirma Filho (2000, p. 2): *“A aceitação tácita do laboratório didático no ensino de física é quase um dogma, pois dificilmente encontraremos um professor de física que negue a necessidade do laboratório”.*

Apesar de não negar e reconhecer a necessidade de uma prática experimental como ferramenta auxiliar na introdução dos conceitos de física em sala de aula, poucos professores fazem uso dessa ferramenta, havendo uma dissonância entre discurso e a prática. Isso porque o papel do laboratório de física e o uso de experimentos como ferramentas de ensino de física, talvez ainda não

esteja bastante claro entre os professores e os que planejam o ensino, como complementa Filho (2000, p. 2): *“Esta falta de ressonância entre o discurso e a prática pedagógica é tolerada pela comunidade de educadores, pois a função ou papel do laboratório didático ainda não está bem compreendido no processo de ensino-aprendizagem”*.

Assim, até a data de publicação desse artigo e segundo a nossa compreensão, essa opinião de Filho (2000) mantêm-se contemporânea. Para tentar provocar nos professores de física, a percepção da importância do laboratório de física na introdução aos conceitos de física tanto no ensino médio quanto na graduação, apresentamos esse trabalho como um incentivo ao uso de experimentos como ferramentas de ensino.

Por acreditarmos que o uso de experimentos em sala de aula ajuda o aluno a “visualizar” o que está sendo explicado, de uma maneira que não necessite de um nível de abstração muito desenvolvido, elaboramos um aparato experimental com capacidade para observação direta dos fenômenos de propagação de calor, sua absorção e difusão em placas metálicas, o mesmo ainda pode ser readequado de forma prática para o estudo da lei de Stefan-Boltzmann.

Este trabalho tem a finalidade de comprovar a adequação do nosso projeto experimental como uma ferramenta adequada ao ensino de física, tanto no ensino médio quanto nos cursos de graduação. Neste trabalho, será discutida a coerência dos dados experimentais coletados por meio do aparato experimental, com todo o arcabouço teórico dos conceitos que podem ser estudados ou ilustrados em sala de aula com o mesmo.

No capítulo 2, serão enumerados todos os conceitos físicos que podem ser estudados ou ilustrados em sala de aula, e também em laboratórios de física básica com o nosso aparato experimental. No capítulo 3, será apresentado o nosso projeto experimental. Também será explicado o seu funcionamento, o processo de construção, materiais usados e algumas imagens do mesmo em funcionamento. Finalmente no capítulo 4, com a finalidade de comprovar a adequação do aparato experimental como uma ferramenta de ensino de física, será feita a relação dos dados experimentais coletados, com referencial teórico presente no capítulo 2.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pretende-se no decorrer deste capítulo, realizar uma abordagem de todo o arcabouço conceitual que se pretende estudar com o aparato experimental elaborado por nós, com objetivo de verificar a adequação do mesmo como uma ferramenta auxiliar de ensino de física em sala de aula e em laboratórios didáticos de física básica.

2.1 CAPACIDADE TÉRMICA DOS CORPOS

A definição de calor encontrada em Young e Freedman (2003, p. 113) afirma que “*A transferência de energia produzida apenas por uma diferença de temperatura denomina-se transferência de calor, e a energia transferida deste modo denomina-se calor.*”.

Cabe aqui uma observação: a definição acima pode ser entendida como válida unicamente quando o fluxo de energia térmica se deve ao fato de haver uma diferença de temperatura entre os sistemas, já que a energia térmica pode também ser transferida por meios mecânicos. Como por exemplo: o trabalho mecânico que é realizado por um motor de geladeira, que retira o calor do interior da geladeira e o lança no ambiente.

Desta forma, podemos enunciar a segunda lei da termodinâmica:

O fluxo espontâneo de calor entre dois corpos se dará sempre do de maior temperatura para o de menor temperatura.

O calor sempre se refere a uma transferência de energia térmica entre dois sistemas em razão de uma diferença de temperatura. Portanto ele nunca deve ser entendido como indicação da quantidade de energia contida num sistema, o calor deve sempre ser visto como sendo um fluxo de energia, ou energia térmica em transito.

Como pode ser encontrado em textos de quase todos os livros didáticos de física básica, os mecanismos de transferência de calor são três, “[...] *a condução, a convecção e a radiação.*”(YOUNG e FREEDMAN 2003, p. 121).

Na condução, o calor é transferido por meio do contato do sistema de maior temperatura com o sistema com temperatura mais baixa, podendo ser duas superfícies em contato, como um corpo em contato com uma chama ou um corpo em contato com o ambiente.

Na convecção, a transferência também se dá por contato, mas nesse caso, o contato é entre um corpo sólido que se encontra numa determinada temperatura e um fluido qualquer numa temperatura menor. Logo, o calor cedido pelo corpo sólido, faz aumentar a temperatura da parte do fluido que se encontra em contato com o corpo. Essa parte do fluido que está em contato com a

superfície se expande e fica menos densa que o restante do fluido mais frio e sobe, enquanto o restante do fluido com temperatura menor e portanto mais denso, toma o seu lugar. Esse ciclo se repete até que ambos os sistemas estejam em equilíbrio térmico.

A transferência de calor por radiação ocorre devido a existência das ondas eletromagnéticas, como a luz, as ondas infravermelhas e ultravioletas que transportam energia. Um bom exemplo de transmissão de calor por radiação é o calor que é transferido do sol até a superfície do planeta Terra. Na transferência de calor por radiação, não é necessário que haja um contato físico entre os sistemas, sendo possível assim a transferência de calor no vácuo. Dito isso, pode-se usar o aparato experimental em sala ou num laboratório de física básica, para mostrar ao aluno que a transferência de calor que aquece as placas do nosso aparato experimental se dá por: radiação eletromagnética fornecida pela lâmpada incandescente; transferência de calor por convecção devido as correntes de convecção do ar aquecido pela lâmpada dentro da caixa; e condução por causa do contato das placas com as paredes da caixa.

Como dito anteriormente, quando o calor é transferido de um sistema para o outro, o sistema que recebe a energia térmica tem sua temperatura aumentada de T_i para T_f , e a quantidade de calor Q necessária para fazer variar a energia interna de um sistema e consequentemente aumentar a sua temperatura, é proporcional a sua massa e a variação de sua temperatura, o que pode ser descrito por.

$$Q = \Delta E_{\text{interna}} = C \Delta T = C (T_f - T_i), \quad (1)$$

onde a constante de proporcionalidade C , é chamada de capacidade térmica, definida como a variação da energia interna necessária para aumentar em um grau a temperatura de uma amostra.

A capacidade térmica C , é proporcional à massa total do sistema, já que a mesma trata de uma variação da energia interna do sistema como um todo, sendo que a quantidade de calor transferida, que é igual a variação da energia interna de um determinado sistema, depende da massa total do sistema, quanto maior for o sistema, maior é a sua massa e maior será a quantidade de calor necessária para elevar a sua temperatura em um ΔT .

A capacidade térmica C depende das propriedades de cada material. Assim, a capacidade térmica de uma barra de alumínio de massa m e comprimento L , é diferente da capacidade térmica de uma barra de ferro de mesma massa m e mesmo comprimento L .

A capacidade térmica específica denotada por c , também chamada de calor específico, é a capacidade térmica em relação a uma unidade de massa, conforme explica Halliday,

Resnick e Walker (2009, p. 191): “Assim é conveniente definir uma ‘capacidade térmica por unidade de massa’, ou calor específico c , que se refere não a um objeto, mas a uma massa unitária do material de que é feito o objeto.”. Dessa forma, pode-se entender o calor específico c como sendo a quantidade de calor por unidade de massa, ou a variação da energia interna por unidade de massa, que varia a temperatura de um determinado sistema em um grau. Sendo assim, pode-se apresentar o calor específico matematicamente conforme a seguinte equação:

$$c = \frac{C}{m} . \quad (2)$$

Pela equação 2, pode-se então agora expressar a quantidade de calor em termos de massa e calor específico. Ou seja,

$$\begin{aligned} Q &= \Delta E_{\text{interna}} = mc \Delta T = mc (T_f - T_i) \quad \therefore \\ Q &= mc (T_f - T_i) . \end{aligned} \quad (3)$$

A unidade para o calor no SI (Sistema Internacional de Unidades), é o Joule, já que o calor é uma transferência de energia. Para a capacidade térmica, que é definida como sendo a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um sistema em um grau, a unidade no SI é, unidade de calor (Joule), por unidade de temperatura (Celsius ou Kelvin), e a unidade do calor específico é Joule por unidade de massa multiplicada por unidade de temperatura (Celsius ou Kelvin). O valor do calor específico, assim como o valor da capacidade térmica, também é diferente para cada material.

2.2 LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON

O resfriamento de corpos foi historicamente estudado por Sir. Isaac Newton em 1701 quando tinha quase 60 anos. Ele observou empiricamente as taxas de variação de temperatura em corpos fora do equilíbrio termodinâmico com o ambiente. De modo que a equação para essas taxas de variações de temperatura passa a ser denominada de lei de resfriamento de Newton. Porém, sabe-se que ela se aplica também em casos de corpos sendo aquecidos, ou seja, basta termos um fluxo de calor (positivo ou negativo) para um corpo que podemos utilizar a lei de resfriamento. Esta lei, é importante em diversas áreas da ciência e tecnologia. Por exemplo, em engenharias para estudos de troca de calor, em tecnologias de motores a combustão, trocadores de calor de caldeiras, resfriamentos de circuitos elétricos e outros.

Para o estudo da lei do resfriamento de Newton é necessário que se imagine um sistema em uma temperatura constante e uniforme, (um sistema pode ser qualquer corpo numa determinada temperatura inicial T_0 , um bloco cerâmico, uma xícara de café quente, um dissipador de calor, entre outros), exposto num ambiente com temperatura T_a , sendo que o sistema esteja recebendo ou transmitindo calor do, (ou para o ambiente), modificando assim a sua temperatura para T .

Na situação descrita acima, o fluxo de energia térmica se dará sempre do sistema que está a uma temperatura maior para o sistema em uma temperatura menor. Sendo assim, a lei do resfriamento de Newton diz que a taxa temporal desse fluxo de energia térmica e consequentemente, a taxa de variação no tempo da temperatura, é diretamente proporcional a diferença de temperatura entre os dois sistemas. Logo, segundo o enunciado dessa lei em, Bronson e Costa (2008, p. 63), tem-se: *“A lei do resfriamento de Newton, igualmente aplicável ao aquecimento, determina que taxa de variação temporal da temperatura de um corpo, é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e o meio circundante”*. Ou seja, a quantidade de calor transferida do sistema mais quente para o mais frio é uma função do tempo $T(t)$ e é proporcional à diferença de temperatura $(T - T_a)$ entre o corpo e o ambiente que o cerca. Como a temperatura do corpo T é considerada uniforme e é uma função do tempo, para uma mesma área exposta, quanto maior for a diferença de temperatura do corpo, mais rápida será a variação de temperatura $T(t)$.

A lei do resfriamento de Newton, conforme enunciado, pode ser modelada da seguinte forma:

$$\frac{dT}{dt} = k (T - T_a), \quad (4)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade positiva, conforme a explicação dada em Bronson e Costa (2008, p. 63) “Escolhendo k como sendo positivo, torna-se necessário o sinal de menos na lei de Newton, a fim de tornar dT/dt negativo em um processo de resfriamento, quando $T > T_m$, e positivo em um processo de aquecimento, quando $T < T_m$ ”.

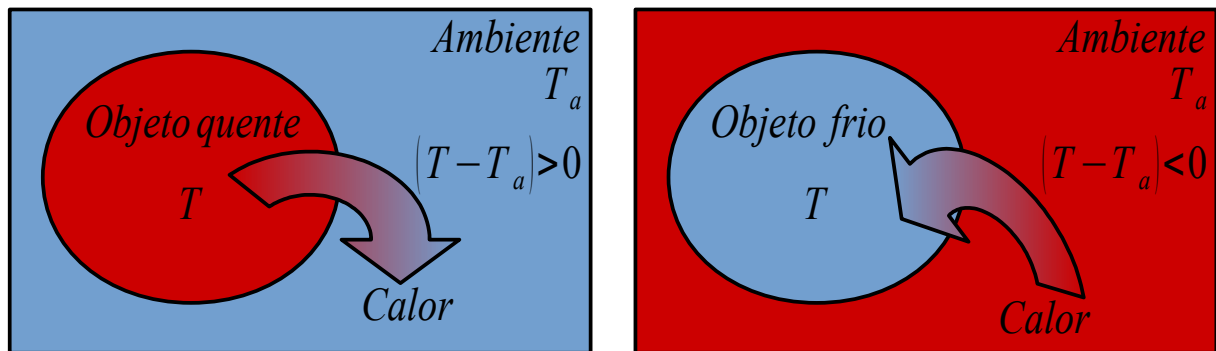


Figura 1 - Observação da taxa de variação de temperatura por interação térmica de um objeto com o ambiente ao seu redor.

De acordo com o foi dito acima, o que define se o sistema está recebendo ou cedendo calor é a diferença de temperatura dada na Equação 4, quando $T > T_a$, $(T - T_a)$ será positivo, mas o sistema se encontra em um processo de resfriamento, quando $T < T_a$, $(T - T_a)$ será negativo, sendo que nesse caso, o sistema se encontra em um processo de aquecimento e por isso se faz necessário que a Equação 4 receba o sinal negativo, para que usando a mesma equação sejam modeladas as duas situações, aquecimento e resfriamento. A Figura 1 ilustra as situações de aquecimento e resfriamento expostas acima, onde o sistema interage com o ambiente.

Dessa forma, a Equação 4 agora pode ser reescrita da forma a seguir.

$$\frac{dT}{dt} = -k (T - T_a), \quad (5)$$

onde: dT/dt é a taxa de variação da temperatura com o tempo, T é a temperatura inicial do corpo em $t = 0$, T_a é a temperatura do meio que cerca o corpo, k é uma constante positiva de proporcionalidade que depende das características físicas do sistema e do ambiente que cerca o corpo conforme pode ser visto em Sias (2004, p. 1): “ k representa um coeficiente de

proporcionalidade, que dependerá da superfície exposta, do calor específico do corpo e também é função de características do meio ambiente.”.

Um texto consultado na página da *internet* MATH24, ainda é mais específico quando afirma que a taxa de resfriamento (o texto fala de resfriamento mas o mesmo também é válido para o aquecimento), é dependente da constante k e ela é dependente das características físicas do sistema e ambiente. Ainda no texto do MATH24, a taxa de resfriamento depende do parâmetro $k=\alpha A/C$, e, com o aumento do parâmetro k (por exemplo, dobrando a área da superfície), o resfriamento é mais rápido, onde A é a área exposta, C a capacidade térmica e α é o coeficiente de transferência de calor, sendo que este último parâmetro depende da geometria do corpo, estado da superfície, modo de transferência de calor entre outros fatores.

Como observação, a resolução passo a passo da equação 5 é apresentada no apêndice APÊNDICE A deste documento, sendo aqui exposto somente a solução da equação diferencial conforme pode ser observado a seguir:

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) e^{-kt}. \quad (6)$$

A equação que rege a lei do resfriamento de Newton é a Equação 6. Pela Equação 6 pode-se perceber que a temperatura varia exponencialmente com o tempo e é proporcionalmente dependente das características físicas do sistema, ou seja, da área exposta, do calor específico do sistema e das características do ambiente, se este possui correntes de ar ou outros fatores que possam influenciar no tempo de resfriamento, todos esses fatores são representados na Equação 6 pela constante de proporcionalidade k .

A Equação 6 sugere ainda que o seu respectivo gráfico seja uma curva exponencialmente decrescente, quando $(T_0 - T_a) > 0$, e crescente para $(T_0 - T_a) < 0$, o que é denotado pelo sinal negativo na exponencial. Essa equação diz que quando o tempo vai ao infinito a temperatura do sistema tende ao equilíbrio térmico com o meio.

2.3 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

A definição de radiação que se encontra em Çengel (2009, p. 27) diz que “*Radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas.*”, ou seja, a energia emitida por um corpo é o resultado da emissão de fótons pelos elétrons que compõem os átomos quando estes “saltam” de uma órbita de energia maior para uma de menor energia.

Uma propriedade que todos os corpos possuem é a capacidade de emitir e absorver radiação eletromagnética, é o que afirma Brehm e Mullin (1989, p. 75) em uma tradução livre do texto original “*Uma propriedade comum a todos os objetos é a capacidade de emitir e absorver radiação eletromagnética.*”.

Ainda segundo esse mesmo autor, o fenômeno é chamado de radiação térmica, (que é a radiação emitida pela matéria devido à sua temperatura não nula), porque envolve uma interação entre a energia de radiação presente no campo eletromagnético que envolve o corpo e a energia térmica devida ao movimento das partículas dentro do objeto, “*O fenômeno é chamado de radiação térmica Porque envolve um intercâmbio entre a energia de radiação contida no campo eletromagnético em volta do objeto e a energia térmica devida ao movimento das partículas dentro do objeto.*” (BREHM e MULLIN 1989, p. 75). Ou seja, todos os corpos emitem e absorvem radiação térmica de e para o meio que os cerca independentemente da sua composição.

É devido a interação dos elétrons presentes nas partículas dos átomos que compõem a matéria, com os campos eletromagnéticos presentes em todos os lugares, a responsável pelo aumento da temperatura dos corpos. Existem corpos reais claros, opacos, escuros e cinzentos, existe também um modelo de corpo ideal para fins de estudo, que é denominado de corpo negro, o qual será tratado mais adiante. Quando a radiação eletromagnética incide sobre um corpo real, parte dessa radiação é absorvida e parte é refletida, o percentual de absorção e reflexão depende das características do corpo, os corpos de cores mais claras refletem a maior parte da radiação incidente sobre ele, enquanto os corpos de cores mais escuras absorvem a maior parte da radiação eletromagnética incidente.

A radiação absorvida pelo corpo aumenta a energia cinética dos átomos que o compõem fazendo-os vibrar mais intensamente aumentando a temperatura do corpo, pois essa depende da energia cinética dos átomos conforme explica Tipler e Llewellyn (2014, p. 77), “*Como a temperatura de um corpo é determinada pela energia cinética média dos átomos, a absorção da radiação faz a temperatura do corpo aumentar.*”, portanto quanto maior for a incidência da radiação eletromagnética sobre um corpo qualquer, maior será a temperatura desse corpo, até que o mesmo atinja o equilíbrio térmico com a fonte de radiação ou mude o seu estado físico.

É devido a essa propriedade que os objetos têm de refletir a radiação eletromagnética que o ser humano consegue vê-los, “*A temperaturas usuais a maior parte dos corpos é visível para nós, não pela luz que emitem, mas pela luz que refletem. Se nenhuma luz incidir sobre eles, não os podemos ver.*” (EISBERG e RESNICK 1979, p. 20), ora, a radiação eletromagnética também pode ser chamada de luz, assim como pode ser chamada também de infravermelho, ultravioleta, micro-

ondas ou ainda raios X, a diferença entre uma e outra é a sua frequência, portanto a luz que é refletida pelos objetos é também radiação eletromagnética.

Há uma relação entre a frequência da radiação eletromagnética emitida por um corpo qualquer, a sua composição, cor e a temperatura em que esse corpo se encontra, quando se coloca um objeto metálico ou um pedaço de carvão no fogo, conforme a sua temperatura aumenta, este passa a emitir radiação eletromagnética em uma determinada frequência para uma temperatura específica, essa radiação eletromagnética é a radiação térmica emitida pelo corpo quente e sua frequência está relacionada com a composição e a temperatura do corpo, sendo assim, sejam dois determinados corpos de composições diferentes em uma mesma temperatura, cada corpo vai emitir radiação térmica em uma frequência diferente e as luzes vistas nessa situação terão tonalidades diferentes para cada corpo.

Considere-se um único corpo em temperaturas baixas, o corpo emite radiação térmica em frequências muito baixas e comprimentos de ondas maiores que aqueles que estão dentro do espectro de luz visível pelo ser humano, conforme a temperatura do corpo aumenta, a quantidade de energia emitida também aumenta, assim como a frequência do espectro da radiação emitida também aumenta e o corpo passa a emitir radiação dentro do espectro visível, aí já se pode ver uma cor avermelhada surgindo do objeto, conforme a temperatura aumenta, há uma variação no espectro das cores visíveis no objeto, indo do vermelho a um branco azulado em altas temperaturas, isso pode ser observado na figura abaixo.



Figura 2 - A tonalidade da radiação emitida depende da temperatura.

A Figura 2 mostra objetos metálicos em diferentes temperaturas emitindo radiação térmica em intervalos de frequências diferentes em função da temperatura em que cada objeto se

encontra, (evidenciado pelas diferentes tonalidades da radiação emitida), esses espectros de radiação em particular se encontram em um intervalo de frequência para a luz visível que está entre $4,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ e $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$, mas os corpos também emitem essa radiação em intervalos de frequência que não se encontram nesse intervalo.

Todo corpo real ao mesmo tempo reflete e absorve energia por meio da radiação eletromagnética. Da potência total de radiação que incide por unidade de área sobre um objeto real opaco em uma determinada frequência ν e temperatura T , parte dessa radiação é absorvida pelo corpo e parte é refletida, essas quantidades obedecem a igualdade abaixo.

$$\rho_T(\nu) + \alpha_T(\nu) = 1, \quad (7)$$

Onde de acordo com Brehm e Mullin (1989, p. 75), $\rho_T(\nu)$ e $\alpha_T(\nu)$ são respectivamente a reflectância espectral e a absorbância espectral da energia total incidente que pode ser refletida ou absorvida pelo corpo, diz o texto, *“A energia incidente pode ser refletida ou absorvida, e assim duas quantidades incidentes separadas são especificadas para uma frequência ν e temperatura T , a reflectância espectral $\rho_\nu(T)$ e a absorbância espectral $\alpha_\nu(T)$.”*.

Como foi dito acima, todo corpo real absorve e reflete a radiação incidente sobre ele, mas existe para fins de estudo uma idealização de um corpo ideal que absorve toda a radiação incidente, *“Um corpo que absorve toda a radiação incidente é chamado de corpo negro ideal.”*(TIPLER e LLEWELLYN 2014, p. 78), ou seja, existe um modelo teórico de um corpo perfeito cuja absorbância $\alpha_\nu(T) = 1$. Esse corpo hipoteticamente absorveria toda a radiação que incidisse sobre ele, o corpo negro é um modelo idealizado pelos físicos com o intuito de estudar o comportamento dos outros corpos, tendo como padrão o comportamento desse modelo de corpo ideal, portanto um corpo ideal que absorve toda a radiação incidente, só existe teoricamente, no mundo real todo corpo absorve e reflete radiação.

Um exemplo de corpo negro utilizado em experiências de laboratórios consiste de um corpo qualquer oco todo fechado, que tenha um minúsculo orifício que é a única ligação da cavidade interior do objeto com o ambiente exterior, dessa forma, a radiação exterior que entra pelo orifício, tem uma chance ínfima de sair pelo mesmo lugar antes que seja totalmente absorvida pelas paredes do corpo, sendo assim, a radiação que entra é refletida inúmeras vezes nas paredes do corpo, enquanto as reflexões acontecem, parte dessa energia é absorvida pelas paredes do corpo, até que após sucessivas reflexões a energia é totalmente absorvida pelas paredes do objeto, elevando assim a sua temperatura, esse tipo de corpo é ilustrado na Figura 3.

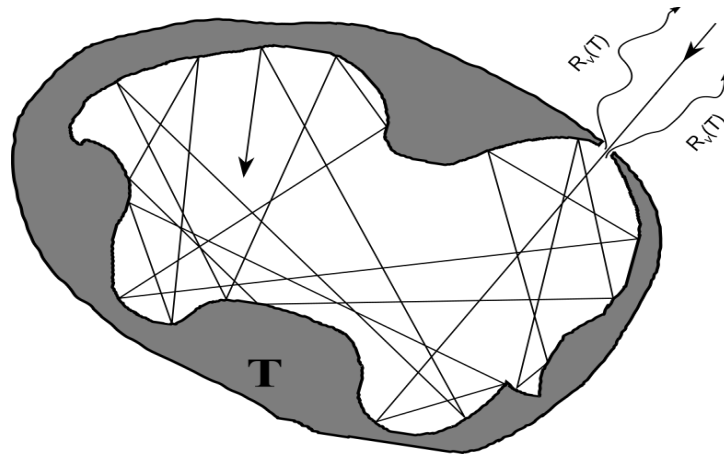


Figura 3 - Tipo de corpo negro ideal utilizado em laboratórios que consiste em uma cavidade ligada ao exterior por um minúsculo orifício.

O corpo ilustrado na Figura 3 é o exemplo clássico de um corpo negro idealizado pelos cientistas para estudar a radiação contida na cavidade, a radiação que é absorvida pelas paredes do corpo após sucessivas reflexões, faz com que a temperatura T das paredes aumentem e estas também passem a emitir radiação térmica que vai preencher o interior do objeto (cavidade), essa radiação vinda do interior da cavidade vai atravessar o orifício, como toda a radiação incidente no exterior do orifício foi absorvida, o orifício se comporta como se fosse a superfície de um corpo negro, o qual absorve toda a radiação que incide sobre ele, dessa forma a radiação que sai pelo orifício tem o espectro da radiação de um corpo negro assim como também a radiação existente no interior da cavidade, como pode ser visto em Eisberg e Resnick.

[...] Portanto este atua como um emissor de radiação térmica. Como ele deve ter as propriedades da superfície de um corpo negro, a radiação emitida por ele deve ter um espectro de corpo negro; mas como o orifício está simplesmente nos dando uma amostra da radiação existente dentro da cavidade, é claro que a radiação presente dentro dela deve também ter um espectro de corpo negro. (EISBERG e RESNICK 1979, p. 23)

Como foi dito anteriormente, a frequência do espectro da radiação emitida por um corpo comum depende da temperatura e da composição do corpo. No entanto todo corpo negro emite um espectro de radiação com frequência igual para uma mesma temperatura, independente da sua composição, “No entanto a experiência nos mostra que há um tipo de corpo quente que emite espectros térmicos de caráter universal. Esses corpos são chamados corpos negros, [...]” (EISBERG e RESNICK 1979, p. 23). Essa distribuição da radiação espectral de um corpo negro para uma mesma temperatura dentro de um intervalo de frequência $[\nu, \nu + d\nu]$, chama-se radiância espectral $R_\nu(\nu) d\nu$ e é definida como sendo a potência da radiação emitida por unidade de

área dentro de um determinado intervalo de frequência. Essa quantidade também pode ser expressa em função do comprimento de onda λ como $R_T(\lambda) d\lambda$ que é a radiância espectral em função do comprimento de onda dentro de um intervalo de comprimento de onda $[\lambda, \lambda+d\lambda]$.

A potencia total da energia irradiada por um corpo negro em uma determinada temperatura para todas as frequências, é obtida integrando-se de zero ao infinito a radiância espectral $R_T(\nu) d\nu$, dessa forma a área abaixo da curva será a potencia total irradiada pelo corpo negro por unidade de área para uma temperatura específica, também conhecida como radiância R_T dada pelas Equações 8 ou 9:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu ; \quad (8)$$

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\lambda) d\lambda . \quad (9)$$

As curvas obtidas com a Equação 8 para três temperaturas diferentes 1000 K , 1500 K e 2000 K estão representadas na Figura 4, onde observa-se que a radiância cresce muito rápido para cada temperatura e com o aumento da frequência, chega a um máximo para uma determinada frequência e depois decresce também muito rapidamente conforme a frequência aumenta, observa-se ainda que as frequências onde a emissão de radiação, a radiância é máxima, cresce linearmente com cada temperatura, fato esse constatado pelo deslocamento para a direita das cristas das curvas no gráfico conforme a temperatura aumenta.

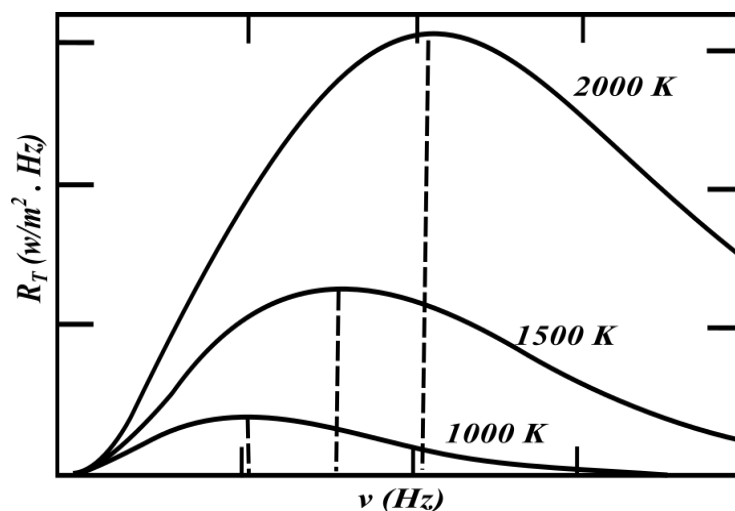


Figura 4 - Curvas da radiância em função da frequência para $T = 1000\text{ K}$, 1500 K e 2000 K .

Pode-se dizer que a integração da Equação 8 em todos os comprimentos de onda é igual $R_T = \sigma T^4$ que é chamada Lei de Stefan-Boltzmann a ser discutida mais a frente nesse documento. Observa-se pela Lei de Stefan-Boltzmann que a potência por unidade de área da energia emitida por um corpo negro R_T , só depende da sua temperatura e que R_T representa a rapidez com que o corpo negro irradia a energia. De acordo com Tipler e Llewellyn (2014, p. 78): “*Observe, também que R representa a rapidez com a qual o corpo emite energia.*”, isso significa que se a temperatura do corpo for incrementada por um fator n , a quantidade de energia emitida pelo corpo em um mesmo intervalo de tempo será acrescentado de n^4 , ou seja, a “rapidez” com que o corpo emitirá energia será incrementada em uma potência de 4.

Um fato importante a ser observado é que para todo corpo, seja ele negro ou não, no equilíbrio, a energia total incidente é igual a energia total emitida pelo corpo, caso contrário, a temperatura do corpo iria ao infinito. Para um corpo comum, não negro, essa quantidade total incidente é dada pela Equação 7, onde da quantidade total incidente parte é refletida e parte absorvida, sendo assim, a emissão total de radiação desse corpo no equilíbrio também é igual a quantidade total de radiação incidente, só que, da radiação total emitida pelo corpo, parte é emitida por reflexão e o restante por emissão.

Para um corpo negro onde toda a radiação incidente é absorvida, a quantidade total da radiação incidente dada pela Equação 7 se resume a absorbância $\alpha_T(\nu) = 1$, como todo bom absorvedor é também um bom emissor segundo Brehm e Mullin (1989, p. 75): “*Este irradiador ideal é também um emissor perfeito e é chamado de corpo negro.*”, no equilíbrio, a taxa de emissão de energia por unidade de área por unidade de tempo, ou radiância para um corpo negro, é igual a taxa com que essa energia incidente é absorvida pelo corpo, ou seja, a “rapidez” com que a energia entra é a mesma “rapidez” com que a energia sai.

2.4 A LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

“*Em 1879 Josef Stefan, descobriu uma relação empírica entre a potência por unidade de área irradiada por um corpo negro e a temperatura*” (TIPLER e LLEWELLYN 2014, p. 78). Essa afirmação acima descreve um resultado imaginado pela primeira vez por Stefan daquilo que viria a ser uma lei, a mesma ficou conhecida como Lei de Stefan e foi anunciada em forma de uma equação empírica:

$$R_T = \sigma T^4. \quad (10)$$

Ludwig Boltzmann cinco anos mais tarde em 1884, usando as leis da termodinâmica clássica demonstra teoricamente que a afirmação de Stefan está correta, de acordo com Brehm e Mullin (1989, p. 76), apenas para o caso de um corpo negro: “*Em 1884 Boltzmann provou teoricamente essas conjecturas, mas unicamente no caso de um corpo negro.*”. Ainda segundo esses mesmos autores, Boltzmann expressou sua equação como se fosse o resultado da Equação 8, que dá a potência irradiada por unidade de área por um corpo negro em função da frequência por meio de uma integral. Com isso, a lei de Stefan-Boltzmann foi expressa de acordo com a Equação 11.

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu = \sigma T^4. \quad (11)$$

“Com $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$ como o valor da constante de Stefan-Boltzmann.” (BREHM e MULLIN 1989. p. 76). Como foi dito, essa lei ficou conhecida mais tarde por Lei de Stefan-Boltzmann e expressa conforme a Equação 10.

2.5 A LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN

A lei do deslocamento de Wien relaciona a radiância máxima emitida por um corpo negro a um determinado comprimento de onda ou a uma frequência específica para uma determinada temperatura. Sendo que, esse comprimento de onda que representa o ponto onde a emissão de energia térmica, ou radiância é máxima em uma temperatura específica, é inversamente proporcional à temperatura e a frequência, pois como se sabe, quanto maior for a frequência, menor será o comprimento de onda. Essas relações são de acordo com a equação abaixo:

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T} \quad \text{ou} \quad \nu_{max} \propto T, \quad (12)$$

onde λ_{max} é o comprimento de onda para o qual a radiância é máxima para uma temperatura específica. Isso implica dizer que, quanto maior for a temperatura, o comprimento de onda para o qual a radiância é máxima será menor e se desloca para a esquerda, como é mostrado na Figura 5. Tal fato é uma consequência direta do que é observado na Figura 4, quando a temperatura T cresce, a frequência ν_{max} onde a radiância é máxima também cresce e o comprimento de onda λ_{max} diminui. Observa-se que dizer que “a radiância é máxima”, não implica dizer necessariamente que a luz que é visível é mais brilhante, ou mesmo que há luz visível, mas que a taxa de emissão de energia é

máxima para esse comprimento de onda e para essa temperatura, ou para essa frequência e temperatura, se a temperatura onde a radiância for máxima, ou seja, for alta o suficiente para se ter uma frequência dentro da faixa de luz visível, aí sim, poderá ser vista a luz nas mais variadas frequências, ou, dito de outra forma, nos mais variados comprimentos de onda.

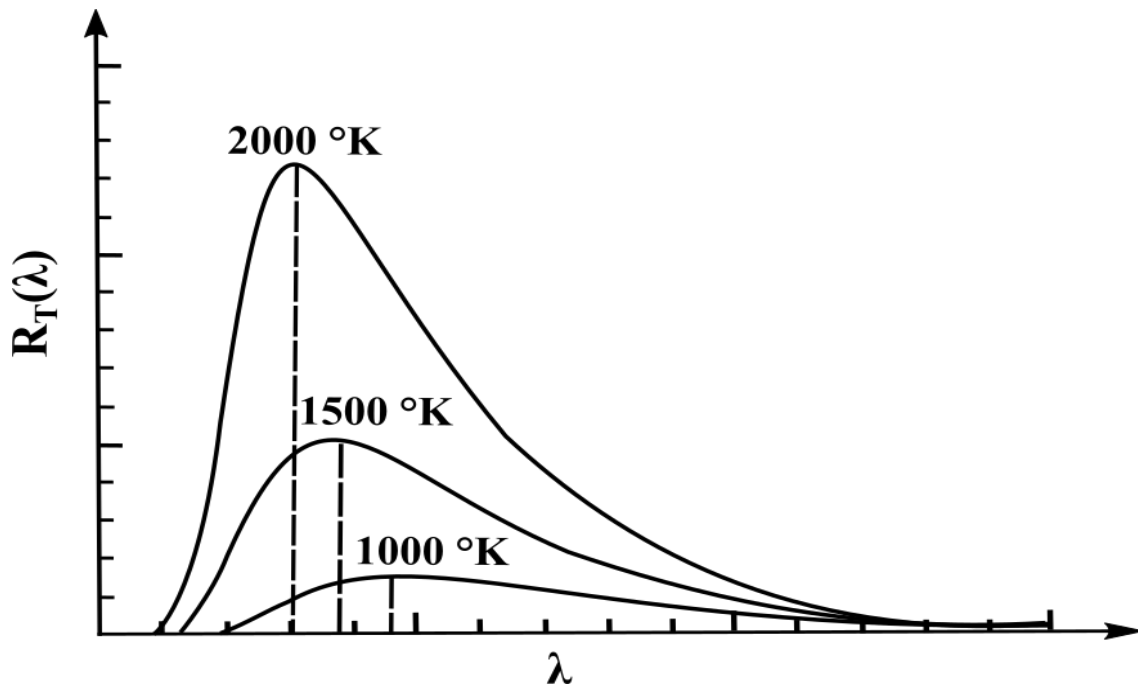


Figura 5 - Relação entre o comprimento de onda onde a radiância é máxima e a temperatura (Lei do deslocamento de Wien).

A Equação 13 é a Lei do deslocamento de Wien em homenagem ao físico alemão Wilhelm Jan Wien (1864-1928)¹ que obteve esse resultado pela primeira vez, “[...] foi obtido pela primeira vez por Wien em 1893” (TIPLER e LLEWELLYN 2014, p. 78).

$$\lambda_{max} T = constante = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K , \quad (13)$$

onde $2,898 \times 10^{-3} m K$ é chamada de *constante de Wien*.

2.6 EMISSIVIDADE ε DE UM CORPO REAL

Sabe-se das discussões anteriores que a radiação é a energia emitida pela matéria como consequência dos “saltos” dos elétrons de uma órbita de maior energia para uma de energia menor com uma subsequente emissão de um fóton. Toda matéria é constituída de átomos ou

¹ - Wilhelm Jan Wien (1864-1928) Físico alemão que recebeu o prêmio nobel de física de 1911 por suas descobertas com relação às leis da radiação térmica.

moléculas cada uma contendo diferentes quantidades de elétrons que podem realizar esses “saltos”. A abundância de elétrons presentes em um corpo está relacionado à qualidade desse corpo como um emissor de radiação, como afirma Incropera (2008, p. 6): *“Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria”*. Nessa seção será definida uma quantidade que compara o poder de emissão de uma superfície real com um corpo negro, essa quantidade é a emissividade da superfície que define a qualidade da superfície como um emissor de radiação.

Foi dito anteriormente que pela lei de Stefan-Boltzmann, a potência da energia por unidade de área emitida por um corpo negro só depende da sua temperatura. Para um objeto real, essa potência, ou rapidez com que a energia é emitida depende da temperatura e também de outros fatores, como a composição e a cor, conforme explica Tipler e Llewellyn (2014):

Os objetos que não são corpos negros, irradiam energia por unidade de área com uma rapidez menor que um corpo negro à mesma temperatura; o valor exato depende de outros fatores além da temperatura, como a cor e a composição da superfície. O efeito global de todos esses fatores é representado por um parâmetro denominado emissividade, [...] (TIPLER e LLEWELLYN 2014, p. 78).

Pode-se concluir com o que foi dito acima, que um corpo real nunca vai emitir radiação com a potência de um corpo negro, mesmo porque um corpo negro é uma idealização para fins de estudo, um corpo negro ideal possui emissividade ε com valor igual a um, $\varepsilon = 1$, sendo que para um corpo totalmente refletor o valor da emissividade é zero, $\varepsilon = 0$, e portanto, os valores da emissividade para todos os corpos está entre zero e um, $0 \leq \varepsilon \leq 1$. No entanto existem corpos reais que se comportam aproximadamente como um corpo negro com emissividade constante em todos os comprimentos de onda e com valores próximos ao de um corpo negro, $\varepsilon \approx 1$, esses são chamados de corpos cinzentos. Um exemplo de corpo cinzento é um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente, igual a que foi usada em nosso aparato experimental.

Portanto a emissividade ε é um fator que irá indicar o quanto um corpo real é bom ou mal emissor de radiação em comparação ao corpo negro ideal ($\varepsilon = 1$), e que ao contrário da emissividade do corpo negro, a emissividade de um corpo real não é constante, *“ela varia com a temperatura, comprimento de onda e com a direção das radiações emitidas”* (ÇENGEL 2009, p. 680). Também em Çengel (2009) são definidas vários tipos de emissividades que levam em consideração alguns fatores que influenciam na emissão de radiação por superfícies reais, são elas:

- A emissividade espectral direcional $\varepsilon_{\lambda, \theta}$, que é definida como sendo *“[...] a razão entre a intensidade da radiação emitida pela superfície em um determinado comprimento de onda*

em uma determinada direção e a intensidade da radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura no mesmo comprimento de onda.”(ÇENGEL 2009, p. 680), dada por:

$$\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda, S}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda, CN}(\lambda, T)}. \quad (14)$$

- A emissividade total direcional ε_{θ} que é “definida de forma semelhante, usando intensidades totais (intensidades integradas em todos os comprimentos de onda)”(ÇENGEL 2009, p. 680), escrita como:

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) = \frac{I_S(\theta, \phi, T)}{I_{CN}(T)}. \quad (15)$$

- A emissividade espectral hemisférica ou apenas emissividade espectral ε_{λ} , que é a emissividade da superfície em todas as direções dada pela equação a seguir:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{R_T(\lambda, T)}{R_{T, CN}(\lambda, T)}, \quad (16)$$

onde a radiância espectral $R_T(\lambda, T)$, (tanto para o corpo negro quanto para o objeto real), é dada pela distribuição de Planck, vista na Equação 17.

$$R_T(\lambda, T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1} \quad (17)$$

A Equação 16 diz que a emissividade de uma superfície em um mesmo comprimento de onda varia com a temperatura. Visto que, segundo Çengel (2009 p. 681): “[...] a distribuição espectral das radiações emitidas (e, portanto, a quantidade de radiação emitida em um determinado comprimento de onda) muda com a temperatura”. Dito de outra forma, as quantidades de radiação térmica emitidas em um mesmo comprimento de onda, mas em temperaturas distintas são diferentes.

- A emissividade hemisférica total ou emissividade média ε , que: “é definida em termos da energia de radiação emitida em todos os comprimentos de onda em todas as direções”(ÇENGEL 2009, p. 681). É dada como pode ser vista na Equação 18.

$$\varepsilon(T) = \frac{R_T(T)}{R_{T,CN}(T)}. \quad (18)$$

Levando-se em conta a definição da radiância dada pela Equação 9 e a definição da emissividade espectral dada pela Equação 16 e, sabendo-se ainda que a integração da Equação 17 em todos os comprimentos de onda dá a lei de Stefan-Boltzmann, Equação 10, a emissividade média, Equação 18 pode ser então expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon(T) = \frac{R_T(T)}{R_{T,CN}(T)} \Rightarrow \varepsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) R_{T,CN}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}. \quad (19)$$

Uma maneira de se calcular a emissividade espectral de um objeto real é comparar a sua radiância espectral real medida com o auxílio de uma ferramenta específica para este fim, com a radiância espectral padrão emitida por um corpo negro que é uma idealização útil que pode ser empregada como um padrão para medir a emissividade espectral de um objeto real. Em uma tradução livre do que dizem Brehm e Mullin (1989, p. 75): “*Nós podemos usar essa quantidade fictícia fundamental para definir a emissividade espectral.*”. A quantidade fictícia fundamental a que os autores se referem é a radiância espectral de um corpo negro expressa por $R_{T,CN}(\lambda, T)$, que também é obtida com a Equação 17 em um determinado comprimento de onda. A radiância de um corpo real é $R_T(\lambda, T)$, a emissividade espectral pode ser calculada pela Equação 16.

A Equação 16 mede a qualidade do objeto real como emissor de radiação térmica em torno de um comprimento de onda λ , ou seja, mede a eficiência de emissão radiativa de um objeto real para determinados comprimentos de onda e para uma temperatura específica. Como afirma ainda Brehm e Mullin (1989, p. 76), se referindo a uma razão equivalente à Equação 16: “*Esta razão fornece então uma medida da eficiência de irradiação para um objeto real [...]*”, essa medida é diferente para objetos diferentes como dito anteriormente, já que essa medida depende de fatores geométricos como o tamanho da superfície e das propriedades dos materiais com que os objetos foram construídos e do acabamento das suas superfícies.

3 O APARATO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado o nosso aparato experimental, seu funcionamento, sua construção e esquemas de ligação. Será enfatizado nesse capítulo, o funcionamento deste aparato experimental, sua finalidade, os programas desenvolvidos para serem usados com o mesmo e cada parte que compõe o nosso aparato experimental.

3.1 O NOSSO APARATO EXPERIMENTAL

Com o intuito de auxiliar os professores do ensino médio e de cursos de graduação, fornecendo-lhes uma ferramenta com capacidade de facilitar o seu trabalho de transmissão dos conceitos de emissão e absorção de radiação aos seus alunos, seja em sala de aula ou em um laboratório de física básica, desenvolvemos um aparato experimental, que visa a introdução de forma “visual”, aos conceitos de propagação de calor, radiação de corpo negro, emissão e absorção de energia térmica por radiação entre outros conceitos de fenômenos relevantes no ensino de física. As Figuras 6 e 7 ilustram esquematicamente esse aparato experimental.

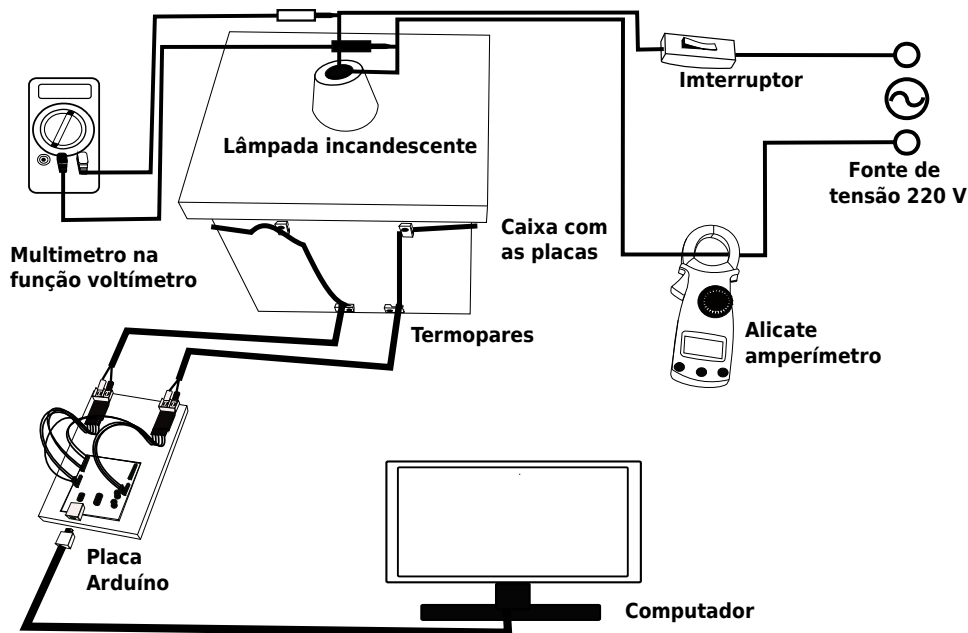


Figura 6 - Aparato experimental desenvolvido.

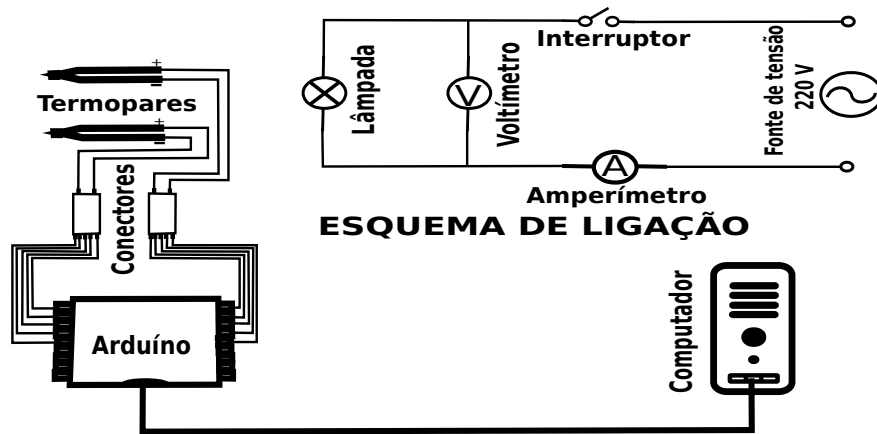


Figura 7 - Esquema de ligação dos componentes do aparato experimental.

A Figura 6 mostra um desenho do aparato experimental, contendo seus componentes e suas conexões, observa-se que o aparato experimental é composto por:

- Uma caixa de madeira de dimensões, largura 20 cm, comprimento 20 cm e altura 21 cm;
- Duas placas de alumínio, (358 cm²) pintadas, uma de branco e outra de preto;
- Uma lâmpada incandescente, que é a fonte de radiação térmica;
- Dois sensores termopares tipo K (com faixa de trabalho de 0-600 °C, sensibilidade de 0,1 °C e modelo WRX-31(K)), trabalhando em conjunto com um módulo adaptador MAX31855 para Arduino. Esses termopares são responsáveis pela coleta das medições de temperaturas nas placas e por enviá-las para o Arduino Uno. Esses termopares são transdutores, quando há uma variação de temperatura em seus terminais, é gerada uma diferença de potencial proporcional à variação da temperatura, como ilustra a Figura 8(a);
- Uma placa Arduino uno (com microcontrolador Atmega328), responsável por captar os dados de temperatura dos termopares e enviá-los ao computador, como mostra a Figura 8(b) ;

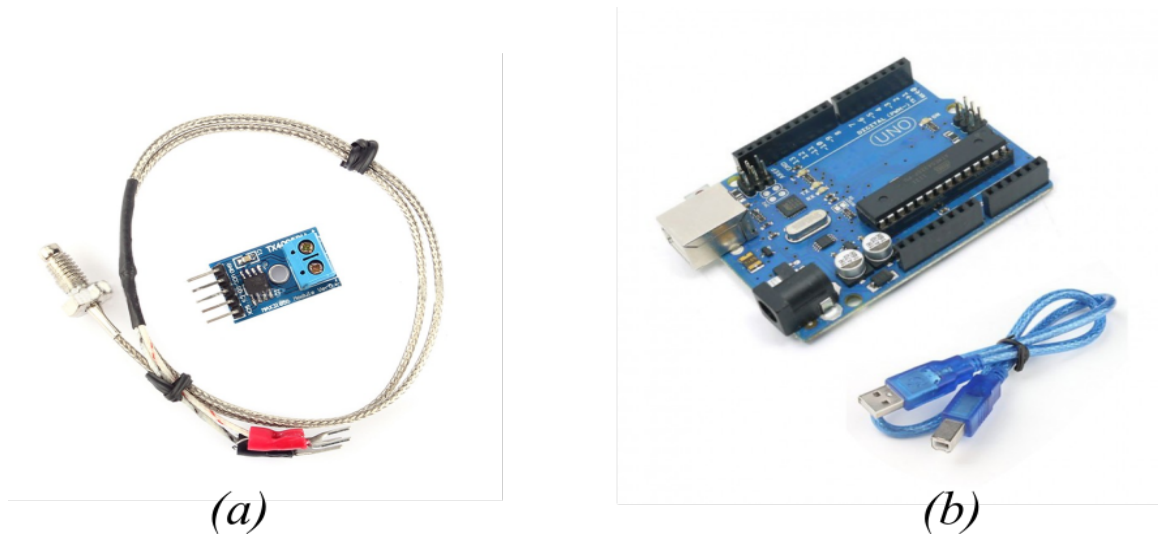


Figura 8 - (a) Termopar tipo K modelo WRX(31) com modulo adaptador MAX31855 para Arduino, (b) placa Arduino Uno com microcontrolador Atmega 328, utilizado para aquisição de dados em tempo real no experimento.

- Um computador para captar os dados do Arduino e gerar os gráficos;
- Um multímetro digital para mensurar a diferença de potencial na lâmpada;
- Um interruptor para ligar e desligar a lâmpada;
- Um alicate amperímetro para mensurar a corrente alternada na lâmpada. É importante dizer que tentou-se usar um multímetro digital comum mas não deu certo por causa da corrente que é alternada. Portanto, optou-se usar o alicate amperímetro que é o instrumento adequado para medir esse tipo de corrente;

O esquema de ligação dos componentes é mostrado na Figura 7. Como pode ser visto nessa figura, as ligações dos dois blocos são independentes, ou seja, o circuito de ligação da lâmpada na rede elétrica não interfere no circuito que liga os termopares ao Arduino e nem este ao computador.

A montagem do aparato experimental é simples, no sentido de não exigir por parte de seu construtor qualquer habilidade especial. Além disso, todos os materiais são de fácil aquisição, ou seja, podem ser encontrados com facilidade em lojas de comércio locais ou em sites na internet. A Figura 9 mostra todos os elementos necessários para montagem do aparato experimental e o mesmo em funcionamento.



Figura 9 - Materiais para a montagem do aparato experimental e o aparato experimental em funcionamento.

O aparato experimental ilustrado nas Figuras 6 e 7 tem o seu funcionamento da seguinte forma:

- i. a caixa de madeira funciona como um isolante térmico da lâmpada incandescente com o meio ambiente e está ligada em uma fonte de tensão monitorada pelo voltímetro $V_{lâmpada}$, ajustado para uma tensão de ~ 220 V e sua corrente de consumo $I_{lâmpada}$ é monitorada pelo alicate amperímetro. Essa configuração é usada para obtermos de forma dinâmica, a potência real dissipada na lampada incandescente $P_{dissipada}$, assim pela lei de Ohm podemos fazer:

$$P_{dissipada} = V_{lâmpada} I_{lâmpada} \quad (20)$$

- ii. gradualmente, com a lampada ligada, a temperatura no interior da caixa de madeira aumenta. Em seguida, monitoramos, nos intervalos de tempos fixos Δt , as temperaturas nas placas metálicas, T_P para a preta e T_B para a branca, pelos termopares instalados nelas e conectados a um microcontrolador Arduíno programado para transmitir as informações de tempo e temperatura para a porta serial de um computador.
- iii. desenvolvemos um *software*, em linguagem *Python*, para coletar os dados advindos da porta serial. esses dados são então tratados em tempo real num monitor e em gráficos dinâmicos de temperatura versus tempo conforme ilustra a Figura 10.



Figura 10 - Obtenção de dados de temperatura versus tempo e confecção das curvas do aquecimento das duas placas em tempo real pelo programa em Python.

- iv. as medidas de temperaturas são tomadas até considerarmos que o sistema dentro da caixa encontra-se em equilíbrio térmico, ou seja, as temperaturas medidas nas placas tem variações desprezíveis ao longo do tempo.
- v. no instante que consideramos o equilíbrio térmico, a lampada é desligada e a partir dai podemos observar o resfriamento no interior da caixa. Tanto a curva de aquecimento, e posteriormente, a de resfriamento são consideradas no experimento para demonstrar princípios físicos importantes, como por exemplo, a capacidade térmica e leis de aquecimento/resfriamento de Newton, como ilustra a Figura 11.

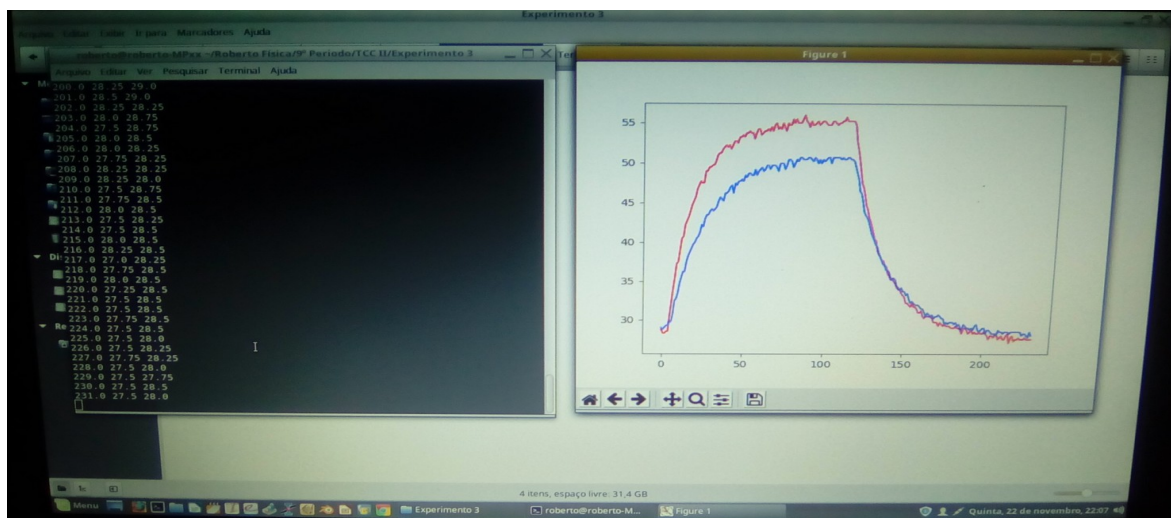


Figura 11 - O programa em Python mostrando a tabela e as curvas das variações de temperatura nas duas placas, já próximo ao final do experimento.

Como demonstrado nas Figuras 10 e 11, com a realização do experimento dentro da sala de aula, o professor pode projetar a tela do seu computador com o auxílio de um equipamento multimídia. Assim, o aluno poderá “ver” e diferenciar os comportamentos físicos de aquecimento/resfriamento das placas branca e preta devidos a capacidade térmica de cada uma, diagnosticar cada uma das situações, por exemplo, de absorção/emissão de energia, situação de equilíbrio térmico.

Não é necessário que o professor seja um programador especialista em Python ou em Arduino, os códigos usados com o aparato experimental podem ser consultados no APÊNDICE B e APÊNDICE C deste trabalho.

Para automação via o Arduino Uno com o adaptador MAX31855 (para os termopares), foi utilizada a interface Arduino IDE com sua linguagem própria em conjunto com a biblioteca de funções MAX6675 para o adaptador MAX31855. Os *softwares* usados para comunicação via porta serial, armazenamento dos dados e levantamento do gráfico das temperaturas versus tempo foi desenvolvido em linguagem de programação *Python*. Gostaríamos de ressaltar que todos as bibliotecas de códigos e *softwares* utilizados em nosso trabalho são de domínio público e distribuídos via Licença Publica Geral (GNU General Public License). Assim, os podemos usar como desejarmos sem problemas de “copyright”.

Utilizamos esses *softwares* em plataforma *Linux/Ubuntu*, mas os mesmos estão também disponíveis em diversas outras plataformas como o *Windows* e *MacOs*. O ANEXO A desse trabalho e também o APÊNDICE D, são os tutoriais que ensinam como instalar os *softwares* necessários para o funcionamento do experimento. O APÊNDICE E ensina a instalar e usar o instalador de pacotes *Python pip* no *Linux* e *Windows*.

Com o uso desse aparato experimental em sala de aula ou em um laboratório básico de física, espera-se que além de introduzir “visualmente” o conceito de radiação de corpo negro, sejam também introduzidos outros conceitos por meio da obtenção de dados na realização do experimento, entre esses, a observação da capacidade térmica dos corpos e a lei do resfriamento de Newton.

Em nível de ensino superior podemos também, fazendo pequenas modificações experimentais, observar de forma empírica a lei de Stefan-Boltzmann e alguns conceitos básicos de radiação no corpo negro.

4 RESULTADOS OBTIDOS E COMENTÁRIOS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos experimentalmente com a realização dos experimentos. Esses resultados serão comparados com os resultados teóricos previstos no capítulo 2 a fim de verificar a adequação ou não, do nosso aparato experimental como uma ferramenta auxiliar no ensino de física, tanto em salas de aula quanto em laboratórios de física básica. A adequação do aparato experimental se dará com a coerência dos resultados experimentais com os resultados teóricos.

4.1 CALOR, CAPACIDADE TÉRMICA, CALOR ESPECÍFICO E SUA RELAÇÃO COM O APARATO EXPERIMENTAL

As placas de alumínio usadas no aparato experimental ilustrado na Figura 6, teriam teoricamente o calor específico, segundo Young e Freedman (2003, p. 115), no valor de $c = 910 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$, mas como as mesmas foram pintadas com cores diferentes tiveram suas propriedades alteradas e consequentemente também o valor de seu calor específico, que agora é desconhecido. Sabe-se empiricamente que o valor do calor específico c para a placa pintada de preto é menor que o calor específico da placa pintada de branco, visto que a placa preta sofre uma variação de temperatura maior para uma mesma quantidade de calor fornecida pela lâmpada incandescente em ambas as placas.

Com os resultados obtidos acima, julga-se portanto o aparato experimental em questão, adequado para o ensino em sala de aula ou em laboratórios de ensino de física, dos conceitos expostos acima referentes a transferência de calor, quantidade de calor, capacidade térmica, calor específico e mecanismos de transferência de calor.

Poderia ser proposto teoricamente aos alunos em sala de aula, um experimento para a determinação dos novos valores de calor específicos das placas, usando o aparato experimental. Sendo que, para isso seria necessário conhecer o valor da quantidade de calor fornecida pela lâmpada incandescente em um mesmo intervalo de variação de temperatura ΔT . Para conseguir esse valor experimentalmente, substituir-se-ia as placas pintadas por placas de alumínio sem pintura, cujo valor do calor específico é conhecido e assim saber-se-ia a quantidade de calor fornecida pela lâmpada incandescente para uma mesma variação de temperatura ΔT . Esse valor seria substituído na Equação 3 para a obtenção dos novos valores de calor específico.

O que há de errado com o experimento proposto acima? O referido experimento não forneceria os novos valores de calor específico das placas, mas sim os valores já conhecidos, ou

seja, o experimento proposto acima resultaria nos valores de calor específico do alumínio, já que os valores usados para o cálculo seriam os mesmos fornecidos pelo experimento com as placas sem pintura, a mesma quantidade de calor Q e a mesma variação de temperatura ΔT . E se a quantidade de calor usada fosse calculada de forma diferente? Por exemplo, a quantidade de calor poderia ser calculada usando a potência fornecida pela lâmpada como sendo a quantidade de calor fornecida por unidade de tempo (J/s). Mesmo assim o resultado não seria verdade, pois a quantidade total de calor que as placas absorvem não é só calor vindo direto da lâmpada sobre as placas, mas é também calor refletido pelas paredes da caixa, é também o calor devido às correntes de convecção do ar aquecido dentro da caixa, e, no caso da placa preta, além dos casos anteriores, absorve também o calor refletido pela placa branca, que absorve uma parte do calor que incide sobre ela e reflete a outra. Portanto, não se pode determinar experimentalmente a quantidade de calor absorvida por cada placa e consequentemente não se pode determinar os novos valores de calor específico delas usando o nosso aparato experimental e o experimento proposto.

A discussão anterior é para enfatizar que, apesar do equipamento experimental ser adequado para ser usado como uma ferramenta de ensino de física, ele tem algumas limitações, e que essas limitações também devem ser usadas como ferramentas de ensino, elaborando situações em que o aluno seja incentivado a pensar, o que de uma forma ou de outra favorece o desenvolvimento dos processos cognitivos e a apreensão do conteúdo.

4.2 NOSSO EXPERIMENTO E A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON.

Com o nosso aparato experimental podemos ter duas situações em relação as placas metálicas inseridas na caixa:

1. Podemos iniciar o experimento com temperatura inicial do meio externo (temperatura ambiente, por de volta de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$), com o fechamento da caixa e a lâmpada incandescente ligada, temos um aquecimento interno das placas e assim podemos estudar este aumento de temperatura até o instante em que considerarmos as variações temporais das temperaturas nas placas desprezíveis. Ou seja, as temperaturas das placas estão em estado estacionários.

2. Após o aquecimento das placas, pelo simples fato de desligarmos a lâmpada, podemos continuar as medidas de temperatura e observar o resfriamento das placas ao longo do tempo. Podemos estudar este resfriamento térmico até um novo estado estacionário, ou seja, o instante em que considerarmos que as variações temporais das temperaturas mais uma vez sejam desprezíveis.

Com a lei do resfriamento de Newton também é possível verificar processos de aquecimento. A lei chama-se “Lei do resfriamento” por razões históricas, pois Newton a formulou quando estudava o resfriamento de corpos. Usando os dados coletados com o nosso aparato experimental para o aquecimento das placas, foram construídas tabelas e gráficos com o intuito de estudar o comportamento das curvas de aquecimento com o auxílio da Equação 6. As tabelas construídas com os dados iniciais e finais do aquecimento podem ser consultadas abaixo.

Tabela do aquecimento das placas					
Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)
0	26,5	26,5	11	39	33,25
1	26,25	26,25	12	39,75	34
2	27	26,75	13	40	34,25
3	28,75	27,25	14	41	35
4	30	28	15	42	35,5
5	32	28,75	16	42,5	36,25
6	33	30	17	43	36,75
7	34,25	30,5	18	43,75	37,5
8	36	31	19	44,5	38
9	37	32,25	20	44,5	38
10	38	32,5	21	45,5	38,75

Tabela 1 - Dados do começo do aquecimento das placas de 0 a 21 min.

Tabela do aquecimento das placas					
Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)
91	55,25	49	102	55,5	49
92	55,75	49	103	55,75	49
93	55,25	48,75	104	55,5	48,75
94	55,75	49	105	55,75	48,5
95	55,75	48,75	106	55,75	49
96	55,75	49,25	107	55,75	49
97	56	48,5	108	55,75	48
98	55,75	48,5	109	55	48,5
99	56	48,75	110	55	48,75
100	56	48,75	111	55,5	49,25
101	55,25	48,75	112	55,75	49

Tabela 2 - Dados do final do aquecimento das placas de 91 a 112 min.

Optou-se por exibir apenas parte dos dados obtidos com o experimento como visto nas Tabelas 1 e 2, pois a quantidade de dados coletada foi muito grande e ocuparia muito espaço neste documento sem necessidade. Com esses dados experimentais foi construído um gráfico com as curvas do aquecimento das placas com o objetivo de estudar o comportamento da transferência de energia térmica da lâmpada incandescente para as placas, como ilustra a Figura 12.

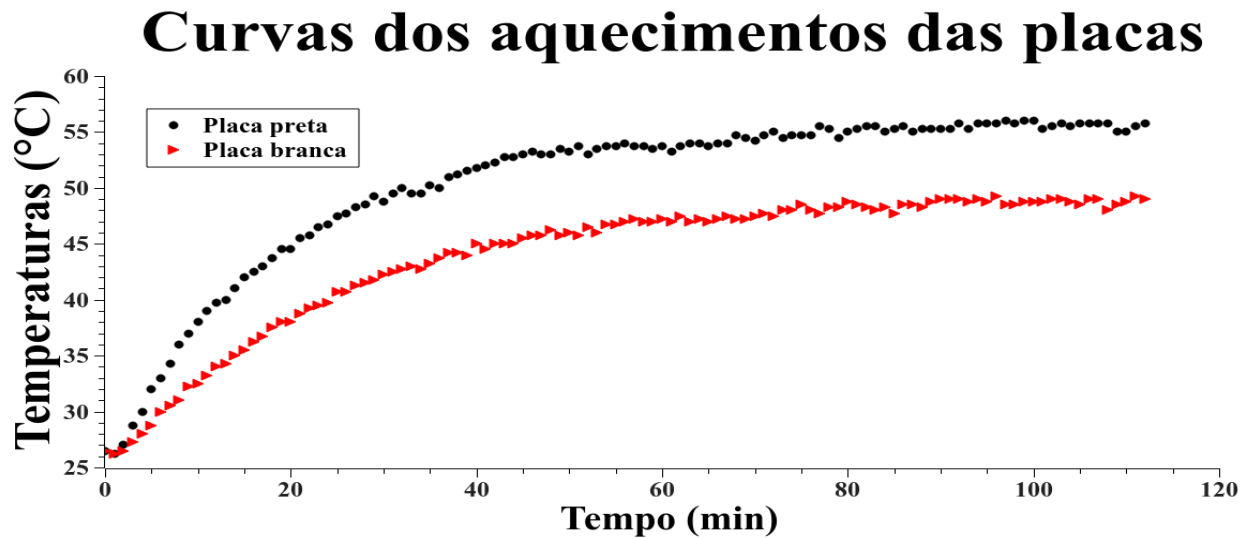


Figura 12 - Curvas de aquecimento das placas referentes as Tabelas 1 e 2.

O gráfico da Figura 12 mostra as curvas de aquecimento das placas a partir da temperatura ambiente, quando a lâmpada incandescente é ligada em $t = 0 \text{ min}$ até o momento em que as placas individualmente estabilizam suas temperaturas, em $t = 112 \text{ min}$ e o sistema como um todo entra em equilíbrio térmico. Ou seja, a quantidade de energia térmica fornecida pela lâmpada é igual a quantidade de energia térmica dissipada pelo sistema.

Semelhante ao caso anterior, para o estudo do resfriamento do sistema usando a lei do resfriamento de Newton, foram selecionados apenas os dados referentes a queda das temperaturas dos dados colhidos a partir da realização do experimento. Ou seja, as temperaturas das placas começam a cair assim que a fonte de calor, a lâmpada incandescente é desligada, alguns desses dados estão expostos nas tabelas abaixo.

Tabela da queda das temperaturas das placas					
Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)
1	55,75	49	11	45	43
2	56	49	12	44,25	43,25
3	56,25	49	13	43,5	42,25
4	55,25	48,5	14	42,75	41,5
5	53,75	48	15	41,75	41
6	51,5	47,25	16	40,75	40,5
7	50	46	17	40	40,25
8	48,75	45	18	39,75	39,25
9	47	44,5	19	39	38,75
10	46,25	43,75	20	38,75	39

Tabela 3 - Dados do início da queda das temperaturas de 1 a 20 min.

Tabela da queda das temperaturas das placas					
Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Tempo (min)	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)
106	26,25	26,75	116	26	26,25
107	26,25	26,75	117	26	26,75
108	26,25	26,25	118	25,75	26,25
109	26,25	26,25	119	25,5	26,75
110	26	26,75	120	25,75	26,25
111	26	27	121	26	26,25
112	25,75	26,25	122	26,25	26,25
113	26,25	27	123	25,5	26,75
114	26	27,25	124	25,75	26,25
115	26	27	125	26	26,75

Tabela 4 - Dados do final da queda das temperaturas de 105 a 125 min.

Com os dados coletados, foi construído um gráfico apenas das curvas de queda das temperaturas afim de estudar o comportamento das curvas dos resfriamentos das placas, esse gráfico pode ser visto na Figura 13.

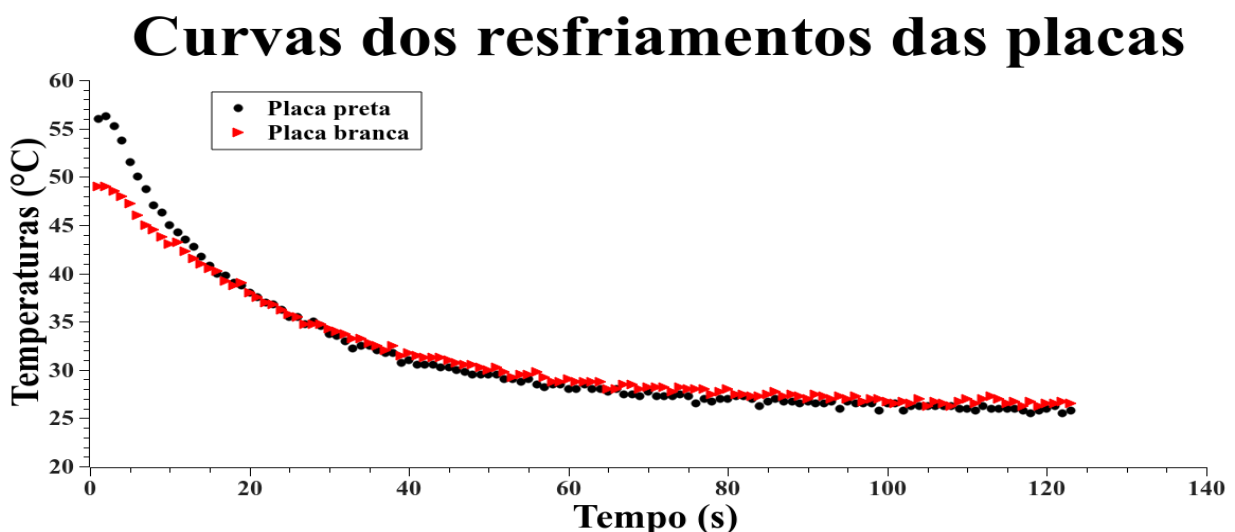


Figura 13 - Curva da queda das temperaturas das placas no tempo referentes aos dados das Tabelas 3 e 4.

Na figura 13, os pontos em preto representam as variações das temperaturas no tempo da placa de cor preta, enquanto que os pontos em vermelho representam as variações de temperaturas no tempo da placa de cor branca, daí já se nota que a temperatura da placa de cor preta cai mais rápido que a temperatura da outra placa num mesmo intervalo de tempo.

Afim de verificar se os dados coletados experimentalmente se comportam como o previsto teoricamente, realizou-se um ajuste da função aos pontos experimentais utilizando a Equação 6. Como o esperado teoricamente, as curvas teóricas se ajustaram muito bem aos pontos experimentais, confirmando que a lei do resfriamento de Newton também é válida para processos

de aquecimento e que além disso, o nosso aparato experimental é adequado para estudá-lo. O ajuste feito é mostrado na figura 14.

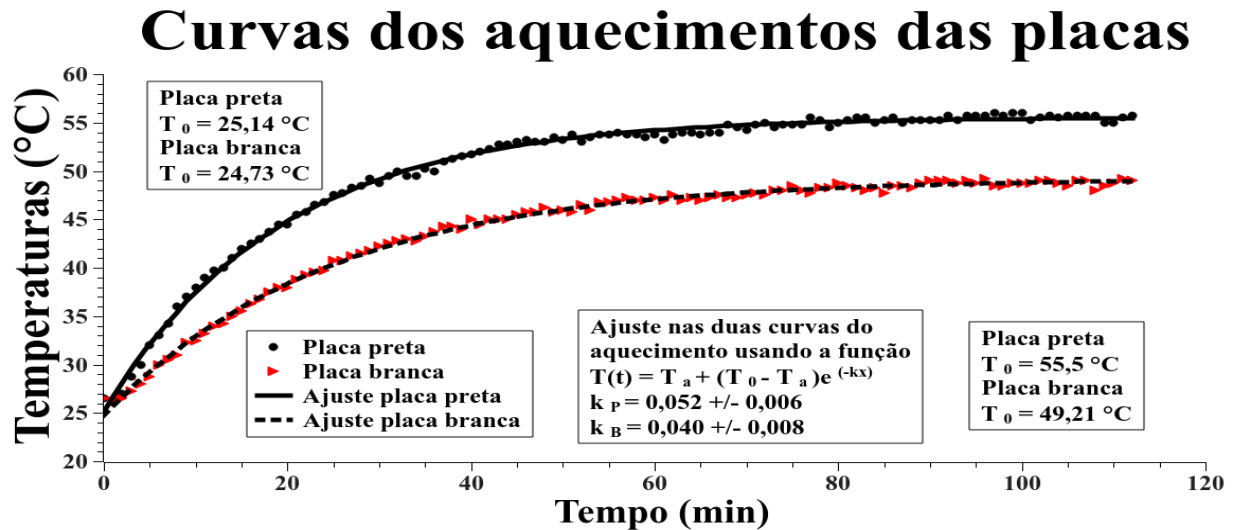


Figura 14 - Curvas de ajustes aos pontos experimentais do aquecimento das placas.

Assim como na situação de aquecimento, realizou-se um ajuste da função aos pontos experimentais expostos no gráfico da Figura 13, fazendo uso da Equação 6, com esse ajuste, observa-se que o aparato experimental é adequado para o estudo da referida lei em salas de aula e em laboratórios de física básica. O resultado dos ajustes feitos pode ser observado na figura 15.

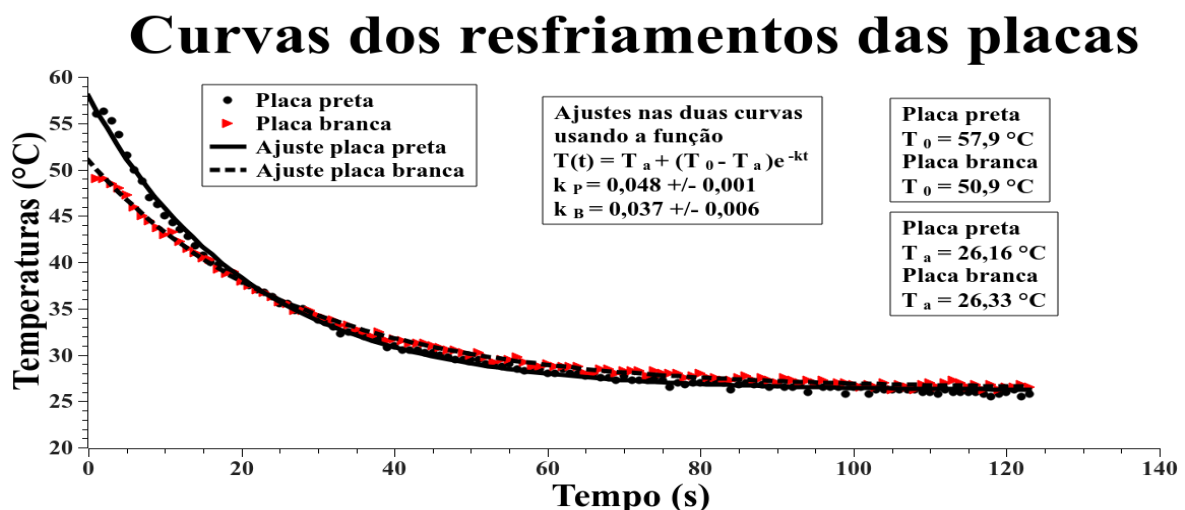


Figura 15 - Ajuste usando a lei do resfriamento de newton para o resfriamento das placas.

A observação dos gráficos nas Figuras 14 e 15 demonstra claramente que as curvas dos ajustes obtidos com a Equação 6, se ajustam muito bem aos dados obtidos com a realização do

experimento para os dois casos, o aquecimento e o resfriamento, confirmando a nossa observação inicial de que os pontos experimentais correspondem a lei do resfriamento de Newton e que a referida lei é também válida para estudar tanto o aquecimento quanto o resfriamento. Além disso, pode-se ainda perceber que as constantes de proporcionalidade obtidas com os ajustes são diferentes para as duas placas, sendo que a constante de proporcionalidade da placa preta k_P é maior que a respectiva constante da placa branca k_B , como esperado teoricamente para as duas situações.

Como dito acima, era esperado que as constantes de proporcionalidade das placas tivessem valores diferentes, apesar de que ambas são de alumínio e teoricamente teriam as mesmas propriedades térmicas, mas ambas foram pintadas com cores diferentes e esse fato, como foi dito no tópico referente a capacidade térmica dos objetos, altera suas propriedades, entre elas, o valor do calor específico das placas, como foi visto teoricamente, a constante de proporcionalidade k depende também da capacidade térmica dos materiais assim, quanto maior for a capacidade térmica das placas, menor será o valor de k , confirmando mais uma vez o que é previsto pela teoria e que o uso do aparato experimental é adequado para o ensino e estudo de alguns fenômenos físicos referentes a transferência de calor e especificamente nesse caso, ao estudo e ensino dos conceitos referentes a transferência de energia térmica (calor) usando a lei do resfriamento de Newton.

4.3 A RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO E O NOSSO APARATO EXPERIMENTAL

Um corpo negro ou quase negro, pode ser representado por qualquer corpo coberto com uma camada de pigmento preto, tal como o ferro coberto de fuligem, um pedaço de carvão ou uma placa de alumínio pintada de preto. Esse é o caso de uma das placas usadas em nosso aparato experimental, que teoricamente absorveria toda a radiação térmica incidente sobre ela fornecida pela lâmpada incandescente, o que resultaria em um aumento de temperatura grande em um intervalo pequeno de tempo, enquanto a outra placa de cor branca refletindo uma quantidade maior da radiação incidente teria um aumento de temperatura menor no mesmo intervalo de tempo, denotando assim que a energia absorvida por ela foi menor que a energia absorvida pela placa preta.

Um dos objetivos do nosso trabalho com esse aparato experimental é a introdução dos conceitos referentes a radiação de corpo negro em salas de aula e laboratórios de física básica. Esses conceitos são considerados de difícil entendimento por parte dos alunos necessitando que o professor use de certos artifícios para que o aluno consiga “ver” o fenômeno acontecendo. Um desses “artifícios” usados pelos professores seriam experimentos, sendo esse o principal objetivo desse trabalho, fornecer ao professor de física uma ferramenta eficaz, seja qualitativamente ou

quantitativamente, para introdução, ou ilustração, de alguns conceitos físicos por meio de experimentos em sala de aula, entre eles o conceito de radiação de corpo negro.

O aparato experimental foi elaborado para que o aluno consiga “ver” por meio de gráficos e tabelas em tempo real, o aquecimento e resfriamento das placas dentro da caixa e assim conseguir entender com o auxílio do professor, alguns conceitos referentes aos corpos negros. Para isso, foram introduzidas duas placas metálicas pintadas com cores diferentes dentro de uma caixa totalmente fechada, onde é ligada uma lâmpada incandescente que fornece energia térmica às placas, estas absorvem a radiação incidente e alteram as suas temperaturas, essas temperaturas são então captadas pelos dois termopares em contato com as placas e enviadas ao computador. O que foi descrito acima é ilustrado na Figura 16 que não mostra a lâmpada incandescente.

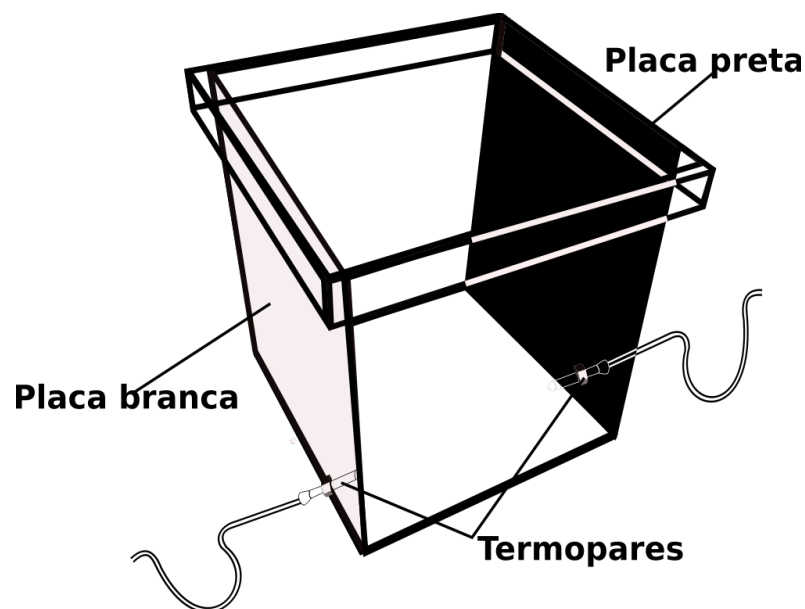


Figura 16 - Ilustração do interior da caixa, contendo as duas placas e os termopares, a lâmpada não é vista na figura.

A construção do gráfico e das tabelas referentes ao fenômeno de aquecimento e resfriamento das placas, acontece em tempo real, na tela do computador, a qual é projetada na sala pelo equipamento multimídia, possibilitando ao professor explicar aos alunos os fundamentos teóricos que regem tais fenômenos enquanto estes acontecem. A Figura 17 abaixo mostra a tela do computador enquanto o experimento é realizado.

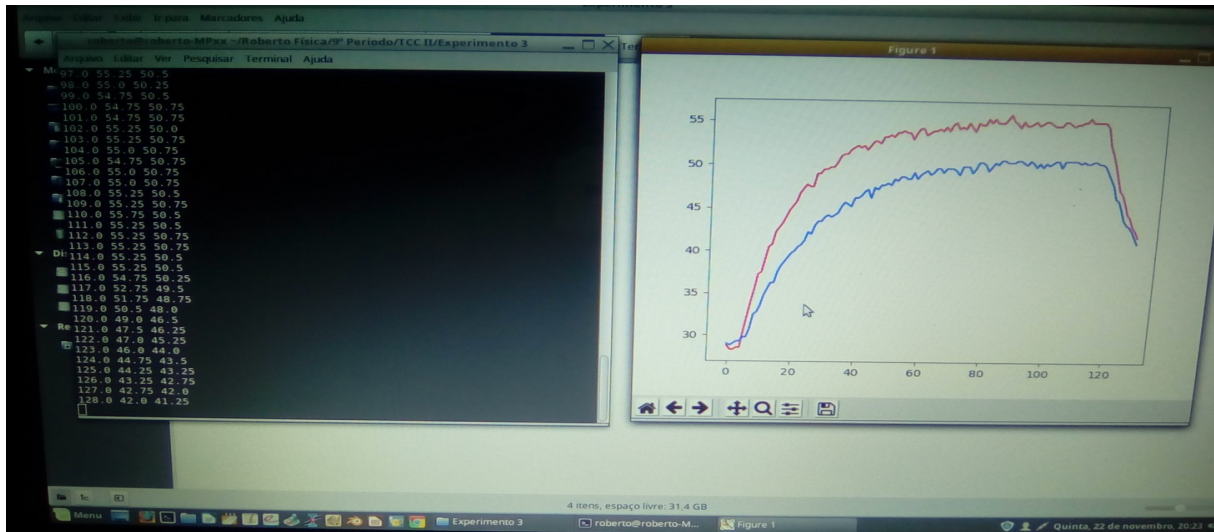


Figura 17 - Tela do computador mostrando em tempo real a construção dos gráficos e tabelas durante a realização do experimento.

O gráfico gerado no experimento junto com as tabelas, são salvos automaticamente no computador pelo *software* desenvolvido em *Python* cujo código está presente no apêndice . Com isso o professor pode posteriormente analisá-lo passo a passo junto com os alunos, reforçando assim o aprendizado dos conceitos referentes ao fenômeno. Um dos gráficos gerados com o aparato experimental pelo programa em *Python* pode ser visto na Figura 18.

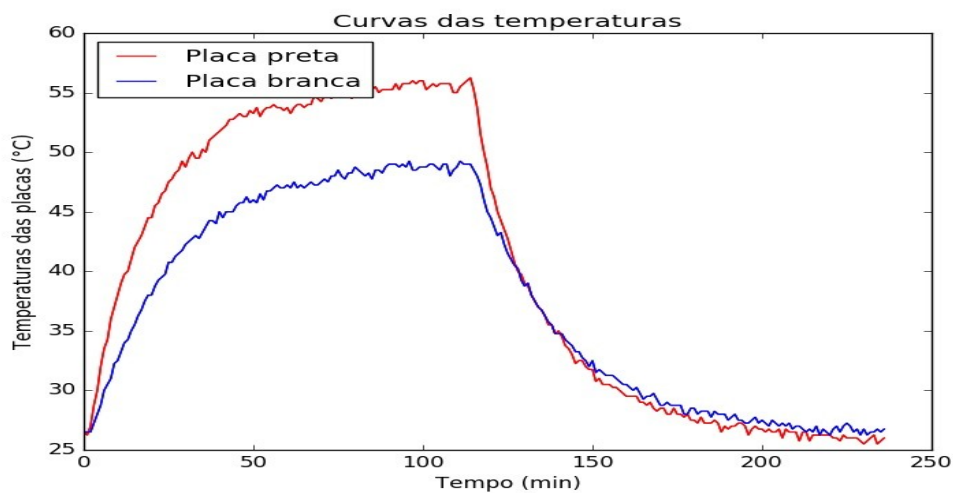


Figura 18 - Gráfico do experimento gerado e salvo no computador pelo programa escrito em *Python*.

Tudo o que foi exposto acima é na intenção de descrever de forma sequencial a utilização do aparato experimental em uma sala de aula. O gráfico exposto na Figura 18 tem a intenção de mostrar que o programa em *Python* (apesar de que ainda pode ser melhorado), cumpre

bem a sua tarefa como um gerenciador dos dados obtidos com o experimento. Dessa forma, considera-se que o aparato experimental se constitui em uma ferramenta importante para o ensino de física, tanto no ensino médio quanto em cursos de graduação em física.

4.4 OUTROS CONCEITOS RELEVANTES DE CORPO NEGRO E A SUA RELAÇÃO COM O APARATO EXPERIMENTAL

Há a possibilidade de se estudar mais alguns conceitos de corpo negro em sala ou laboratórios de física básica com o auxílio do aparato experimental e fazendo-se poucas modificações do mesmo, entre eles:

- A lei de Stefan-Boltzmann.
- O conceito de emissividade.
- A Lei do deslocamento de Wien.

Para o estudo dos conceitos citados, foram retiradas as placas da caixa, porque havia o objetivo obter, dentro da caixa, um ambiente homogêneo que pudesse representar um corpo negro, visto que no equilíbrio do sistema com as placas, haveria uma não-homogeneidade da radiação devido as taxas de absorções e emissões diferentes nas duas placas. Por esse motivo resolveu-se retirá-las, deixando só as paredes de madeira da caixa, o que possibilitaria uma emissão de radiação uniforme pelas paredes da caixa no equilíbrio térmico. Serão analisados e relacionados com o aparato experimental, os conceitos acima citados, um por vez e começando pela Lei de Stefan-Boltzmann.

4.4.1 O aparato experimental e a constante de Stefan-Boltzmann

Além de verificar a possibilidade de que o nosso aparato experimental possa ser usado como uma ferramenta eficiente no ensino de física em salas de aula e laboratórios de física básica, permitindo ao aluno “ver” o fenômeno enquanto esse acontece, facilitando assim o trabalho do professor dessa disciplina, outro grande objetivo nosso com esse trabalho, sempre foi verificar a coerência dos dados colhidos através do mesmo, com o que é descrito pelo arcabouço teórico visto nos referenciais que foram usadas nesse trabalho. Uma dessas medidas conhecidas é a constante de Stefan-Boltzmann que como visto acima tem um valor conhecido $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$. O objetivo aqui é conseguir uma boa verificação experimental desta constante σ , claro que com uma margem de erro imposta pela aquisição dos dados experimentais.

Com o intuito de conseguir experimentalmente a constante de Stefan-Boltzmann, como já foi explicado, retirou-se as placas do aparato e realizou-se mais uma vez o experimento na intenção de se obter as temperaturas das paredes de madeira da caixa com o sistema em equilíbrio, dessa vez as duas temperaturas coletadas pelo *software* seguem praticamente juntas durante todo o tempo da realização do experimento, como pode ser observado no gráfico gerado pelo programa em *Python* e salvo no computador, o qual é mostrado na Figura 19.

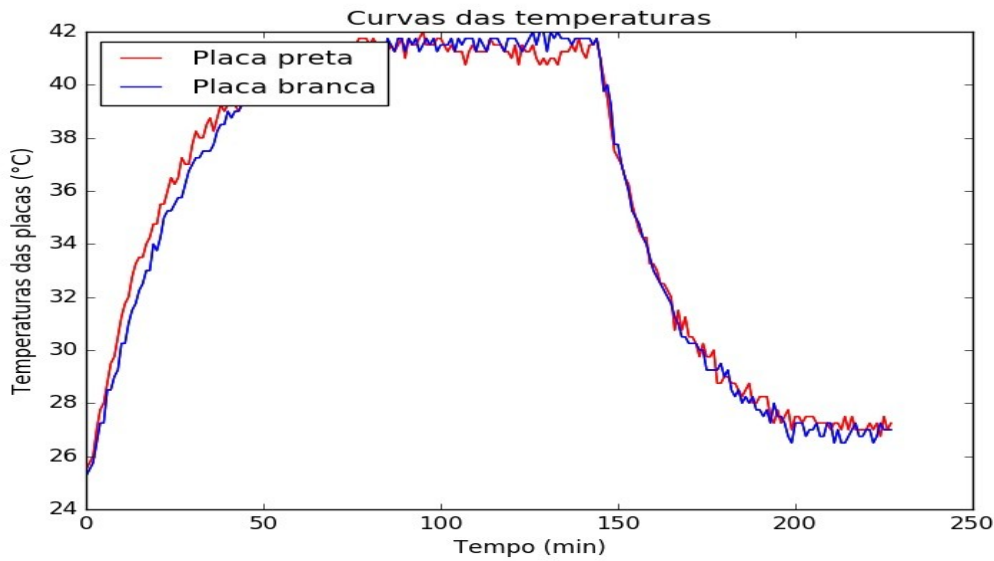


Figura 19 - Gráfico gerado pelo programa em *Python* mostrando as curvas das temperaturas das paredes da caixa.

As temperaturas médias das paredes no equilíbrio, ou seja, no momento em que a lâmpada foi desligada era $T = 41,75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para a realização do cálculo da constante de Stefan-Boltzmann, foi utilizada a Equação 10 com a radiância $R_T = P/A$ como visto na Equação 21.

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4, \quad (21)$$

onde explicitando-se σ temos

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \Rightarrow \sigma = \frac{P}{A T^4},$$

chegando a equação que fornece o valor da constante de Stefan-Boltzmann, que é:

$$\sigma = \frac{P}{A T^4}, \quad (22)$$

onde A é a área de uma esfera imaginária, com centro na lâmpada e raio R que é a distância do centro da lâmpada à parede da caixa. Pois como se sabe, a radiação emitida por uma fonte emissora se propaga radialmente em todas as direções como se fosse uma esfera. Sabe-se que a energia irradiada por um corpo, é proporcional a área da superfície que emite a radiação e sabe-se também que a quantidade da energia irradiada que chega a uma determinada superfície decai com o quadrado da distância entre a fonte emissora e a superfície receptora, porque um raio maior significa uma esfera maior e consequentemente uma área da esfera também maior, como a área emissora continua do mesmo tamanho, a quantidade de energia irradiada continua a mesma e tem que ser distribuída por toda a área receptora que tem um aumento do seu tamanho proporcional ao aumento da distância entre a mesma e a fonte emissora elevado ao quadrado $A \propto R^2$, por esse motivo diz-se que a energia decai com o quadrado da distância $U \propto 1/R^2$. Essa situação é ilustrada na Figura 20.

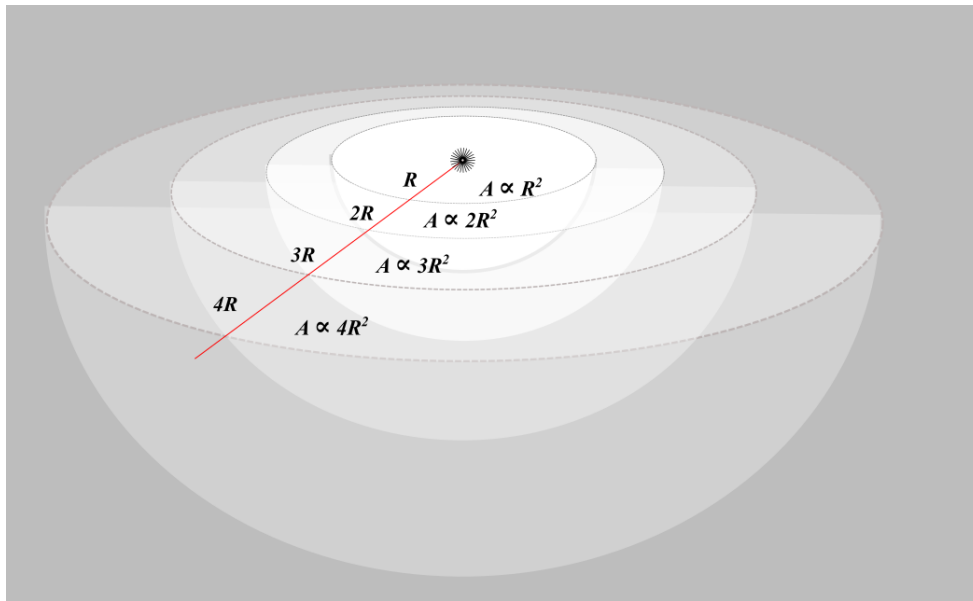


Figura 20 - A energia irradiada que chega à uma área qualquer, decai com o quadrado da distância entre a fonte emissora e a superfície.

De acordo com o que foi discutido acima, se imaginou dentro da caixa a radiação emitida pela lâmpada se espalhando como se fosse uma esfera de radiação com centro na lâmpada conforme é ilustrado na Figura 21.

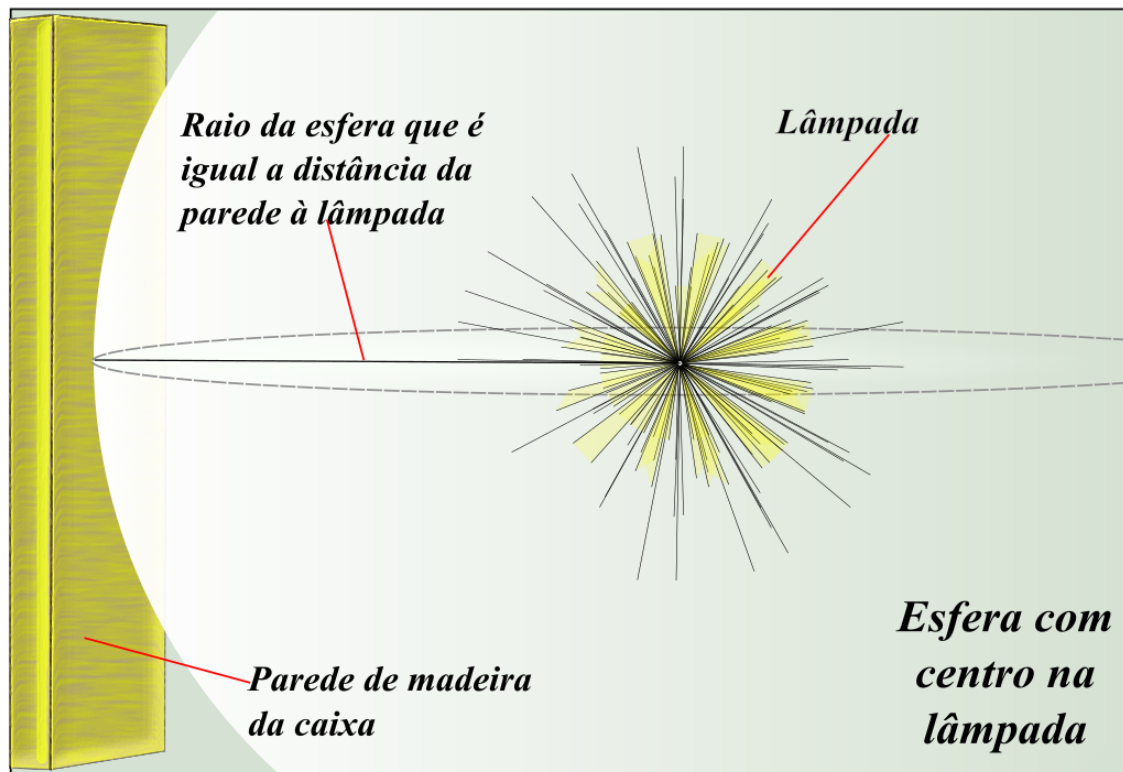


Figura 21 - Energia se propagando de forma esférica dentro da caixa.

onde a área da esfera é $A = 4\pi R^2$, o raio da esfera que é a distância entre a lâmpada e as paredes é $R = 7,55 \times 10^{-2} \text{ m}$, com a temperatura das paredes naquele momento iguais a $T = 315 \text{ K}$, esses valores foram substituídos na Equação 22 e achou-se para o valor experimental da constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,69 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4. \quad (23)$$

Como pode ser visto na Equação 23, o erro foi da ordem de 10^{-2} , esse resultado confirma definitivamente que, considerando as limitações de nosso aparato experimental, o mesmo se mostrou adequado para ser usado como uma ferramenta de ensino de física, pois todos os resultados obtidos foram coerentes, dentro da margem de erro com os conceitos aqui discutidos.

4.4.2 O aparato experimental e a lei do deslocamento de Wien

O aparato experimental pode ser usado pelo professor para relacionar as temperaturas contidas nas tabelas que são geradas pelo programa *Python*, com as frequências onde a emissão de radiação pelas placas ou pelas paredes da caixa é máxima. Pode explicar aos alunos o porque não se pode ver a emissão de luz pelas placas ou paredes da caixa para tais temperaturas, justificando que as mesmas são muito baixas para que as frequências da radiação emitida estejam dentro do intervalo de frequência da luz visível. Também pode-se usar as temperaturas fornecidas pelo experimento para fazer com que os alunos calculem o comprimento de onda λ_{max} e a frequência ν_{max} onde a emissão de radiação do aparato experimental é máxima, usando a Lei do deslocamento de Wien que é dada pela Equação 13.

Com o auxílio dessa lei o professor pode fazer com que o aluno relacione a temperatura com o comprimento de onda λ_{max} e com a frequência ν_{max} onde a emissão de radiação por unidade área e por unidade de tempo é máxima, usando-se a velocidade da luz no vácuo para fazer essa relação, como pode ser visto na Equação 24.

$$c = \nu \lambda \Rightarrow \nu_{max} = \frac{c}{\lambda_{max}} \quad (24)$$

Das temperaturas experimentais fornecidas pelo nosso equipamento experimental, usou-se três delas para exemplificar o que foi proposto acima, calcular os comprimentos de onda e as frequências para os quais a emissão de radiação por unidade de área para as paredes da caixa é máxima. Utilizou-se um valor de temperatura do início do aquecimento, um segundo valor entre as duas temperaturas extremas para o aquecimento e um último valor para o momento em que o sistema se encontrava em equilíbrio térmico. Usou-se para fins de cálculo a Equação 13 para o comprimento de onda e a Equação 24 para relacionar os comprimentos de onda com as suas respectivas frequências. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 5.

Lei do deslocamento de Wien		
Temperatura (°C)	λ_{max} (m)	ν_{max} (Hz)
25,50	9,71E-06	3,09E+13
35,50	9,39E-06	3,19E+13
41,75	9,21E-06	3,26E+13

Tabela 5 - Cálculo do comprimento de onda e frequência para algumas temperaturas obtidas experimentalmente.

A Tabela 5 mostra os cálculos dos comprimentos de onda e das frequências equivalentes para três temperaturas obtidas com a realização de um dos nossos experimentos, onde as placas do aparato experimental foram retiradas afim de se obter um sistema homogêneo. O objetivo foi observar mais uma vez a coerência de nossos resultados experimentais com o esperado teoricamente. Nota-se que para as temperaturas analisadas onde a emissão de radiação é máxima, que essa radiação é emitida em frequências e comprimentos de onda cujos valores se encontram fora do intervalo de valores de frequências e comprimentos de onda teóricos para a luz visível, cujos intervalos são $4,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ e $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ para a frequência e $4,0 \times 10^{-7} \text{ m}$ e $7,5 \times 10^{-7} \text{ m}$ para o comprimento de onda, estando os valores da Tabela 5 na região de emissão do infravermelho.

Os resultados mostrados na Tabela 5 poderiam ser usados por um professor em suas aulas de física, para mostrar ao aluno a relação do comprimento de onda com a frequência da luz que o mesmo pode ver, da relação entre a temperatura, a frequência e a cor que se ver para um corpo em determinada temperatura e ainda poderia mostrar ao aluno que sabendo-se a frequência da radiação emitida por um corpo, é possível calcular a sua temperatura, favorecendo assim todo um processo de aquisição cognitiva sobre os fenômenos relacionados acima.

Os resultados obtidos com o uso do nosso equipamento experimental, comparados com o que é descrito pelo referencial teórico, confirma mais uma vez a sua potencialidade como uma ferramenta de ensino de física, que pode e deve ser usada, não só em nível básico, mas também em cursos de graduação, auxiliando o professor no seu trabalho docente e ao aluno em seus processos internos de apreensão dos conteúdos discutidos em sala de aula.

4.4.3 Nosso aparato experimental e o cálculo da emissividade ϵ para um corpo real

Como dito no capítulo 2 não existe um corpo negro real, mas existem corpos que se comportam aproximadamente como um corpo negro, entre eles os corpos cinzas. Com o nosso aparato experimental é usada uma lâmpada incandescente que possui um filamento de tungstênio que é classificado como sendo um corpo cinza, ou seja, tem um comportamento de emissão de radiação próximo ao de um corpo negro emitindo uma taxa constante de radiação para todos os comprimentos de onda. Com isso, é possível com os dados obtidos experimentalmente e com o auxílio da Equação 18, calcular a emissividade média das paredes da caixa, da lâmpada e das placas usadas nos experimentos para determinadas temperaturas. Visto que o cálculo da emissividade espectral dada pela Equação 16 não pode ser realizado, pois depende de dados que não são fornecidos pelo aparato experimental, como por exemplo, a radiância espectral e o respectivo comprimento de onda.

Para fazer uso da Equação 18 é necessário conhecer as radiâncias das superfícies e do corpo negro nas proximidades das mesmas, a radiância do corpo negro é dada pela intensidade da energia fornecida pela lâmpada (o corpo negro) nas proximidades da superfície, $R_{T,CN} = I_{CN} = P_{CN}/A_{CN}$, onde A_{CN} é a área de uma esfera imaginária de energia emitida pelo corpo negro que se encontra a uma distância R das superfícies.

Sabe-se que todos os corpos emitem e absorvem radiação, as superfícies usadas com o aparato experimental também emitem e absorvem radiação que obedece as mesmas leis que regem a radiação de um corpo negro. Por isso, é correto afirmar que a radiação emitida pelas superfícies também chegam à superfície da lâmpada e também podem ser expressas como a intensidade da energia nas proximidades da lâmpada como $R_{TS} = I_S = P_S/A_S$, assim a Equação 18 pode ser reescrita como:

$$\varepsilon(T) = \frac{R_T(T)}{R_{T,CN}(T)} \Rightarrow \varepsilon(T) = \frac{I_S(T)}{I_{CN}(T)} \Rightarrow \varepsilon(T) = \frac{\frac{P_S(T)}{A_S}}{\frac{P_{CN}(T)}{A_{CN}}},$$

como as superfícies imaginárias de energia A_S e A_{CN} têm o mesmo raio, consequentemente têm o mesmo tamanho, elas se cancelam na equação, dessa forma a emissividade total será dada por:

$$\varepsilon(T) = \frac{P_S(T)}{P_{CN}(T)}, \quad (25)$$

onde P_S e P_{CN} são as potências das superfícies e do corpo negro respectivamente e que podem ser calculadas pela Equação 26:

$$P = \sigma A T^4. \quad (26)$$

A Equação 26 é a potência dada pela lei de Stefan-Boltzmann, esta equação afirma que a potência da radiação emitida por uma superfície é diretamente proporcional à área da superfície emissora.

Para calcular a potência real da lâmpada utilizando a Equação 26, será necessário calcular a temperatura de seu filamento. Existem alguns métodos para se calcular a temperatura de

um filamento de uma lâmpada, o que foi escolhido nesse trabalho usa a lei de Stefan-Boltzmann. Por isso, para calcular a temperatura do filamento de tungstênio da lâmpada, (o nosso “corpo negro”), imaginou-se o filamento como sendo uma sequência de esferas de raios R . Pois, como se sabe, a radiação emitida por uma fonte se propaga de forma esférica, cada pequena esfera que compõe o filamento é uma fonte individual de radiação, as emissões ocorrem a partir do centro de cada esfera que se encontram a uma mesma temperatura, pois todas as esferas imaginárias são parte de um mesmo corpo, o filamento como um todo, conforme pode ser visto na Figura 22.

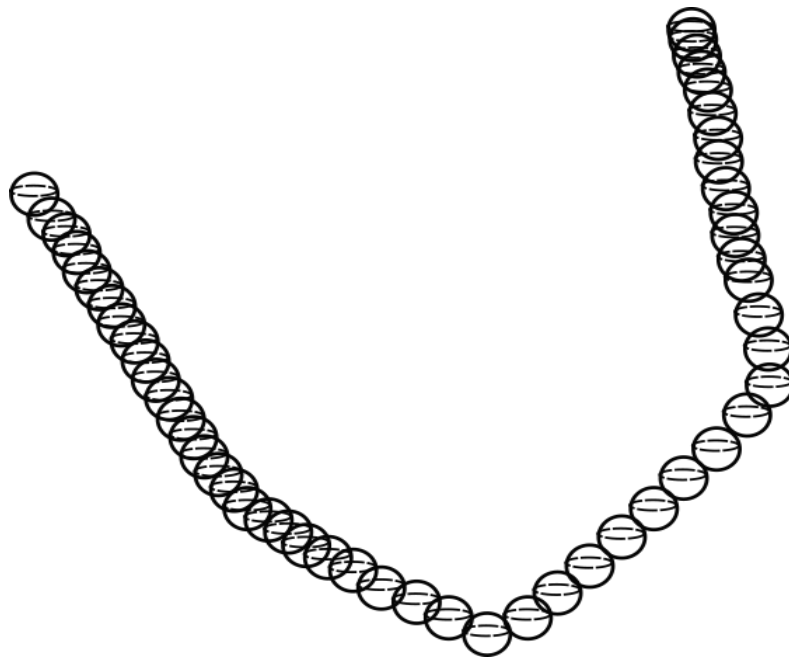


Figura 22 - Filamento visto como uma sequência de pequenas esferas.

Calcular a temperatura do filamento, significa querer saber essa temperatura logo acima da superfície da esfera. Considerando que todas as esferas vistas na Figura 22 se encontram à mesma temperatura, pode-se dessa forma tomar somente uma esfera e calcular a sua temperatura, que se obtém a temperatura de todo o filamento, já que a esfera analisada é uma amostra do filamento. A Figura 23 ilustra uma esfera tomada dentre as esferas vistas na Figura 22, a área que se pretende calcular a temperatura é um pouquinho acima da sua superfície, exatamente na fronteira entre a esfera e o vácuo.

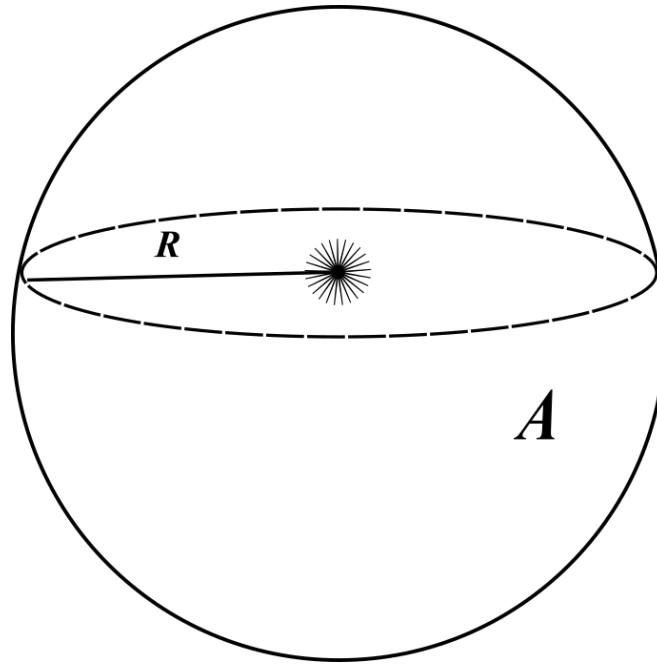


Figura 23 - Esfera que representa uma amostra das esferas do filamento.

Na Figura 23, A é a área de uma esfera imaginária de raio R , dada por $A = 4\pi R^2$, pois, como se sabe da discussão anterior quando foi analisada a lei de Stefan-Boltzmann, a radiação emitida por uma fonte emissora se propaga radialmente em todas as direções como se fosse uma esfera e que a energia recebida por uma superfície qualquer a uma distância R da fonte decai com o quadrado dessa distância a partir do centro da fonte emissora.

Para saber a largura do filamento e assim conseguir o diâmetro da esfera imaginária, usou-se um *software* de análise de vídeo de código aberto chamado *Tracker*, onde foi utilizada uma foto do filamento e o programa já informou o raio de uma pequena esfera imaginária da largura do mesmo. O raio encontrado foi $R = 6,86 \times 10^{-4} \text{ m}$. A Figura 24 mostra a medida do raio da esfera imaginária sobre o filamento no *Tracker*.

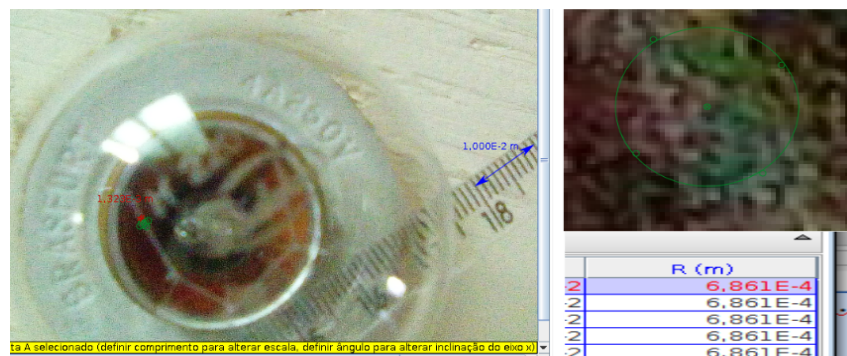


Figura 24 - Medida do raio da esfera imaginária no filamento da lâmpada usando o Tracker.

Partindo da Lei de Stefan-Boltzmann dada pela Equação 21 onde foram feitas manipulações algébricas...

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \Rightarrow \frac{P}{4 \pi R^2} = \sigma T^4 \Rightarrow T^4 = \frac{P}{4 \pi R^2 \sigma},$$

chegou-se a equação 27, que foi usada para calcular a temperatura do filamento.

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{4 \pi R^2 \sigma}}. \quad (27)$$

Substituindo-se na Equação 27 os valores, $A = 4\pi R^2$, com $R = 6,86 \times 10^{-4} \text{ m}$, a potência da lâmpada calculada com os dados obtidos experimentalmente $P = 40 \text{ W}$ e a constante de Stefan-Boltzmann que é conhecida como $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$, calculou-se a temperatura do filamento de tungstênio da lâmpada usada no aparato experimental, onde foi encontrado o valor $T = 3,3 \times 10^3 \text{ K}$.

Fez-se uso da Equação 25 onde admitiu-se o corpo negro como sendo o filamento da lâmpada, a potência do corpo negro é então a potência real dissipada pela lâmpada, $P_{CN} = 40 \text{ W}$. Utilizou-se a Equação 26 para os cálculos das potências das energias emitidas pelas superfícies P_s , por fim calculou-se as emissividades experimentais das superfícies e da lâmpada, os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 6.

Emissividade para todos os comprimentos de onda em uma temperatura			
Superfície	$P_{CN} \text{ (W)}$	$P_s \text{ (W)}$	ϵ_s
Placa Preta	40	22,7	0,568
Placa Branca	40	20,9	0,523
Paredes	40	19,1	0,477
Lâmpada	40	39,8	0,994

Tabela 6 - Cálculo das emissividades experimentais das placas, paredes e da lâmpada.

Não se pode afirmar com exatidão que os valores encontrados experimentalmente são exatos, visto que foi usada como padrão a potência dissipada pelo filamento que como foi dito antes, não é um corpo negro. No entanto, observando a Tabela 6, nota-se que os valores encontrados são coerentes com a teoria, no caso das placas, onde o valor da emissividade

encontrado para a placa preta é maior que o encontrado para a placa branca e, mais uma vez, deduz-se empiricamente que a madeira emite radiação com uma potência menor que a potência das placas. Tal fato decorre de que as mesmas demoraram mais para chegar ao equilíbrio durante a realização do experimento e que a temperatura de equilíbrio foi menor que as temperaturas das duas placas. A emissividade experimental da lâmpada vista na Tabela 6 confirma a nossa expectativa de que a mesma se comporta como um corpo negro, pois o valor encontrado é aproximadamente 1, por esse motivo pode-se dizer que as medidas conseguidas com os dados obtidos com o aparato experimental são coerentes com a teoria, confirmando mais uma vez o mesmo pode ser usado como uma ferramenta de ensino de física.

4.5 RESUMO DE ATIVIDADES

Na Tabela 7, mostra-se um resumo de alguns conceitos físicos referentes ao calor e a radiação de corpo negro que podem ser ilustrados ou estudados em sala de aula ou em um laboratório de física básica com o auxílio de nosso aparato experimental, que foram abordados neste trabalho.

CONCEITOS QUE PODES SER ESTUDADOS OU ILUSTRADOS COM O APARATO EXPERIMENTAL.	
CAPACIDADE TÉRMICA	A capacidade térmica e o calor específico foram relacionados com as diferentes cores das placas e diferentes velocidades de aquecimentos delas para um mesmo intervalo de tempo.
TRANSFERÊNCIA DE CALOR	Os métodos de transferências de calor também foram estudados enfatizando-se as diferentes troca de calor dentro da caixa.
LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON	A lei do resfriamento de Newton foi estudada com base nas curvas de aquecimento e resfriamento das placas. Tendo como confirmação da sua coerência com os dados experimentais, o ajuste da função aos pontos experimentais feitos com o auxílio de um <i>software</i> de análise de dados.
RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO	A radiação de corpo negro foi estudada qualitativamente, observando-se as curvas de aquecimento e resfriamento das placas dentro da caixa. Outros conceitos de radiação de corpo

	negro também foram estudados quantitativamente por meio de dados coletados experimentalmente, tais como: Lei de Stefan-Boltzmann, Lei do deslocamento de Wien e a emissividade de corpos reais.
--	---

Tabela 7 - Resumo das atividades desenvolvidas com o aparato experimental neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Desde o começo desse trabalho, buscou-se demonstrar a adequação de nosso aparato experimental como uma ferramenta adequada ao ensino de física em salas de aula e laboratórios de física básica, seja em nível médio ou superior, com a finalidade de fornecer uma ferramenta útil aos professores dessa disciplina, para que os mesmos ao usá-la possam enriquecer as suas aulas de física, fornecendo aos alunos um instrumento capaz de mostrar visualmente e em tempo real, os conceitos referentes ao calor, sua transferência, propagação e também alguns conceitos referentes a radiação de corpos negros, auxiliando os alunos na sua compreensão sem que os mesmos necessitem de um nível de abstração bem desenvolvido para compreendê-los.

Verificou-se experimentalmente ao longo desse trabalho, conceitos relevantes ao estudo dos fenômenos físicos referentes ao calor, métodos de transferência, condução, convecção e radiação. Falou-se também de conceitos como quantidade de calor, capacidade térmica, calor específico e deu-se uma atenção especial ao estudo da radiação de corpos negros. Desse tema foram estudados alguns conceitos como a lei de Stefan-Boltzmann, inclusive com a obtenção experimental da constante de Stefan-Boltzmann com um valor muito próximo do valor conhecido, estudou-se também a lei do deslocamento de Wien com obtenção experimental dos comprimentos de onda onde a emissão de energia emitida pelas superfícies era máxima e por fim, foi estudado o conceito de emissividade, que é a comparação de um corpo real como emissor de radiação em relação a um corpo negro e mais uma vez obteve-se as medidas experimentais dos conceitos estudados, nesse caso a emissividade das superfícies usadas com o aparato experimental e que também mais uma vez foram coerentes com as previsões teórica.

Viu-se por meio deste trabalho, o potencial da utilização do *Arduíno* na elaboração de ferramentas de automação de coleta de dados experimentais, visto que o mesmo utiliza uma linguagem de programação simples que pode ser usada para implementar várias tarefas e da variedade de componentes de coleta de dados que podem ser usados com o *Arduíno*, a potencialidade de utilização do mesmo pode ser multiplicada principalmente quando usada em conjunto com outras linguagens de programação como o *Python* por exemplo, conforme foi usada em nosso trabalho, o *Python* como foi visto é uma linguagem de programação poderosa e de código aberto podendo ser usada sem nenhuma restrição.

A comprovação da adequação do nosso aparato experimental como uma ferramenta útil no ensino de física fica assim comprovada, através da coerência dos dados coletados experimentalmente com a carga conceitual abordada no decorrer desse trabalho, além do fato de que

a utilização do aparato experimental em sala de aula pode favorecer os processos cognitivos dos alunos na apreensão dos conceitos referentes aos temas discutidos nesse trabalho e facilitar o trabalho do professor na introdução desses conceitos.

5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como sugestão de trabalhos futuros, há a possibilidade de se estudar as variações nas capacidades térmicas, color específico e emissividades das placas para diferentes pigmentos. Ou seja, várias placas de alumínio seriam pintadas com cores diferentes e, uma de cada vez, introduzidas na caixa (onde já tem uma placa de alumínio sem pintura). No passo seguinte seriam realizados os experimento com as duas placas dentro da caixa, uma placa pintada e a placa sem pintura, onde seriam analisadas as curvas de aquecimento e resfriamento de cada experimento afim de estudar os conceitos acima enumerados para diferentes cores.

REFERÊNCIAS

ARDUÍNO. Disponível em: <https://www.arduino.cc/> Acesso em: 15 jun. 2017.

BREHM, John J.; MULLIN, William J. **Introduction to the structure of matter: A course in modern physics**. New York: Editora J. Wiley, 1989.

BRONSON, Richard; COSTA, Gabriel B. **Equações diferenciais** [recurso eletrônico]. Tradução: Fernando Henrique Silveira. 3ª ed. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Editora Bookman, 2008.

CAVALCANTE, Marisa Almeida; TAVOLARO, Cristiane Rodrigues Caetano; MOLISANI, Elio. **Física com Arduino para iniciantes**. Rev. Bras. Ensino Fís. 2011, vol.33, pp.4503-4503. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000400018&lng=en&nrm=iso.ISSN18061117. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018>.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa : uma abordagem prática**. tradução: Luiz Felipe Mendes de Moura; revisão técnica: Kamal A. R. Ismail. 3ª ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2009.

DOWNLOAD THE ARDUINO IDE.

Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> Acesso em: 15 jun. 2017.

EISBERG, Robert Martin; RESNICK, Robert. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Tradução: Paulo Costa Ribeiro; Enio Frota da Silveira; Marta Feijó Barroso. 28ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 1979.

FILHO, José de Pinho Alves. **Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 17, n. 2, ago. 2000. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=2ahUKEwiTutq62qvcAhWCmlkKHSe2BroQFjADegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fperiodicos.ufsc.br%2Findex.php%2Ffisica%2Farticle%2Fdownload%2F9064%2F9118&usg=AOvVaw1RE-6R-vWAorklwOBwvIVr> Acesso em: 19 de jul. 2018.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física, volume 2: Gravitação, ondas e termodinâmica**. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi. 8ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009

INCROPERA, Frank P. et. al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução: Eduardo Mach Queiroz; Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

INSTALANDO O PYTHON NO WINDOWS. Disponível em: <https://python.org.br/instalacao-windows/> Acesso em: 05 jun. 2018.

GNU, Licença Pública Geral. Disponível em: <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.pt-br.html> ou https://pt.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License Acesso em: 05 ago. 2018.

MAX6675-library. Disponível em: <https://github.com/adafruit/MAX6675-library> Acesso em: 02 mai. 2018.

MATH24, Differential Equations. (2018) Newton's law of cooling. Disponível em: <https://www.math24.net/newtons-law-cooling/> Acesso em: 7 ago. 2018.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. **Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”**. Investigações em Ensino de Ciências – V5(1), pp. 23-48, 2000.

PYTHON. Disponível em: <https://www.python.org/> Acesso em: 10 jun. 2017.

PIP INSTALLATION. Disponível em: <https://pip.pypa.io/en/stable/installing/> Acesso em: 12 jun. 2017.

ROCHA, Fábio Saraiva da; MARANGHELLO, Guilherme Frederico; LUCCHESI, Márcia Maria. **Acelerômetro eletrônico e a placa Arduíno para ensino de física em tempo real**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 31, n. 1, p. 98-123, nov. 2013. ISSN 2175-7941. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2014v31n1p98> . Acesso em: 27 nov. 2017.

SIAS, Denise Borges. (2004) **Resfriamento de um corpo**. Disponível em: <http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/denise/caloretemperatura/resfriamento.pdf> Acesso em: 7 ago. 2018.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física moderna**. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros – Volume 1 – Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**. Tradução e revisão técnica: Paulo Machado Mors. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física II – Termodinâmica e ondas**. Tradução e revisão técnica: Adir Moysés Luiz. 10ª ed. São Paulo: Editora Addison Wesley, 2003.

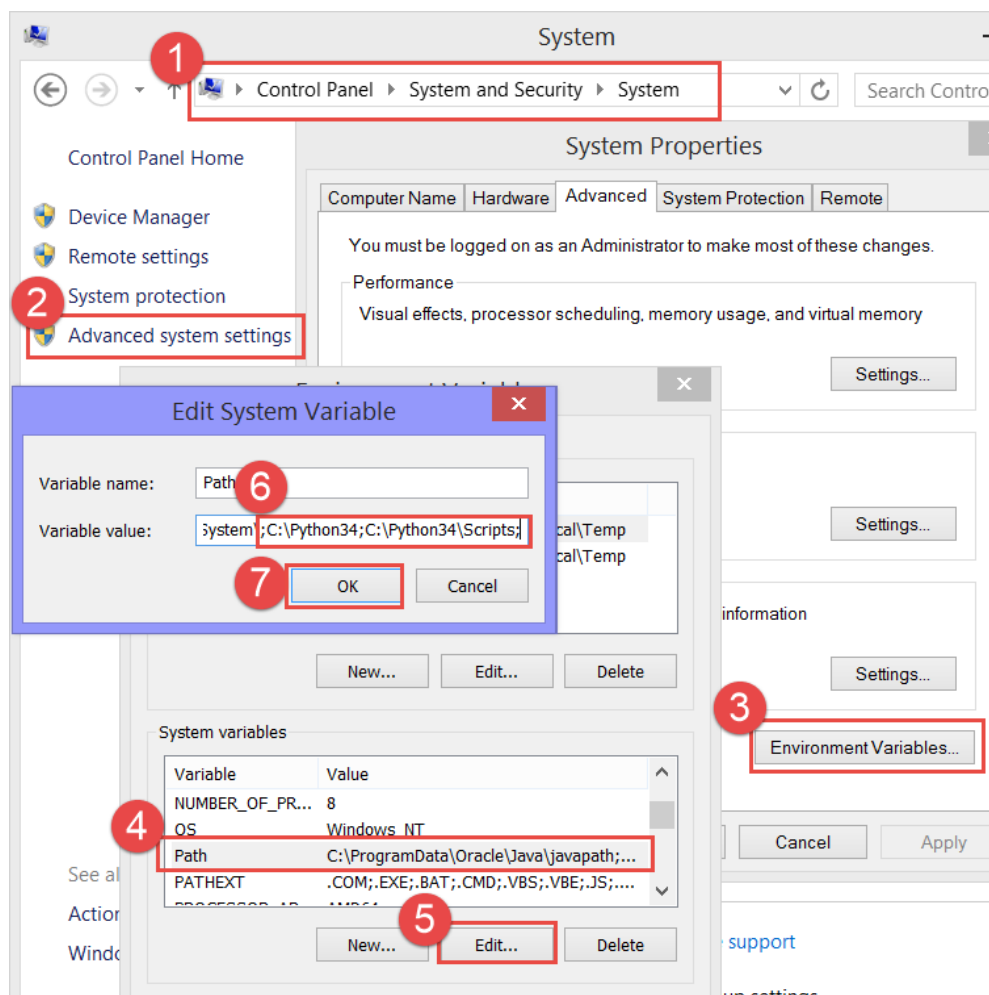
ANEXO A – INSTALANDO O PYTHON NO WINDOWS

Para instalar o Python em Windows, baixe o instalador do site oficial. **Dê preferência ao Python 3.x**, já que a versão 2.x é mantida por compatibilidade com códigos antigos e será descontinuada em 2020.

Rode o instalador baixado para instalar o python no sistema e ao finalizar a instalação siga os passos para adicionar o python no path do sistema, ou ignore esta etapa caso a versão do instalador que você baixou possua a opção de configurar o path para você.

Adicionando o Python no path

Para que você consiga rodar o Python pela linha de comando é necessário adicioná-lo no path do sistema que pode ser feito seguindo os passos a seguir:



Abra o painel de controle e navegue até as configurações de sistema

Selecione as configurações avançadas do sistema

Clique em variáveis de ambiente

Procure nas variáveis do sistema pela variável Path

Clique em editar

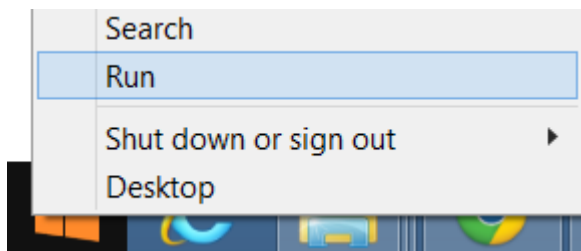
Verifique se os valores C:\Python34 e C:\Python34\Scripts existem no campo de valor da variável, caso não exista adicione ao final dos valores separando cada valor com ;. O Python34 neste exemplo é referente a pasta onde o Python foi instalado no seu sistema, este valor pode ser diferente caso esteja instalando outra versão do Python por exemplo se for a versão 2.7 o valor será Python27. Verifique o destino da sua instalação e substitua por este valor.

Clique em OK

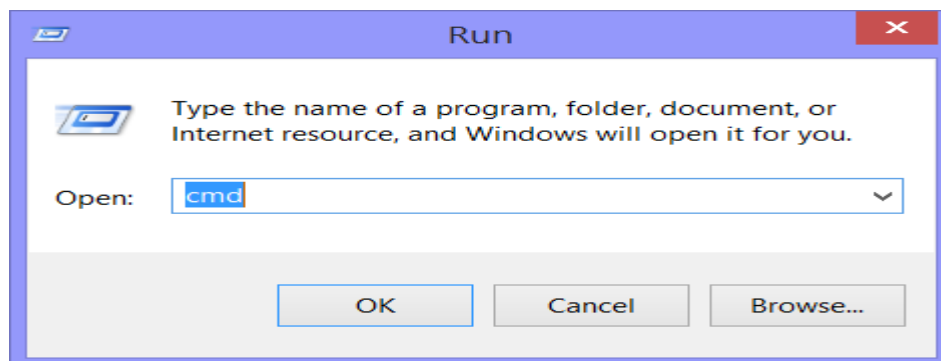
Instalando o pip

Para que você consiga instalar os pacotes do Python é necessário que você tenha o pip instalado no sistema. Este procedimento funciona com Python 2.7.9 ou versões superiores e Python 3.x.

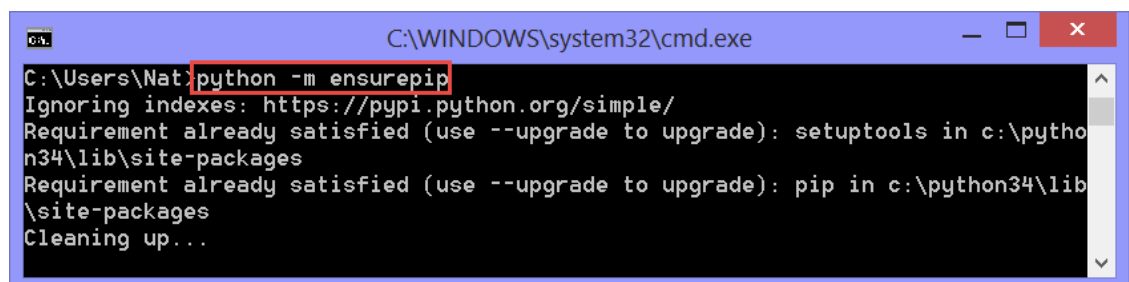
Clique com o botão direito no ícone do Windows e selecione **executar**:



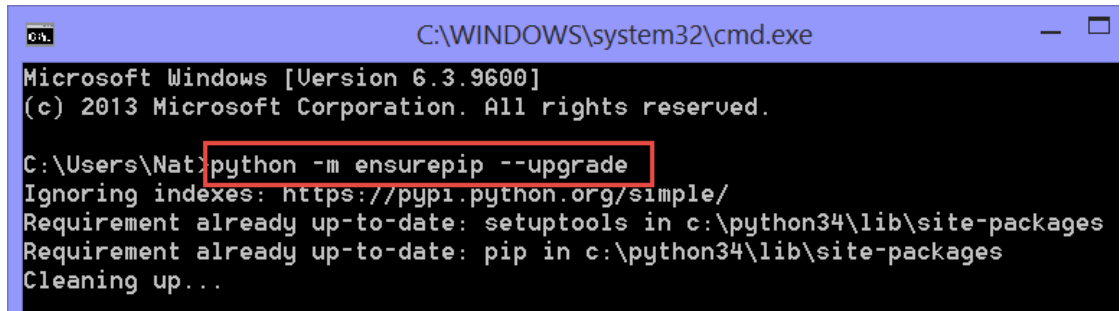
Digite cmd e clique em ok:



Na linha de comando rode Python -m ensurepip:



Se o comando retornar dizendo que os requisitos já estão satisfeitos rode `python -m ensurepip --upgrade`:



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Nat>python -m ensurepip --upgrade
Ignoring indexes: https://pypi.python.org/simple/
Requirement already up-to-date: setuptools in c:\python34\lib\site-packages
Requirement already up-to-date: pip in c:\python34\lib\site-packages
Cleaning up...
```

APÊNDICE A – RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL QUE MODELA A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON

RESOLUÇÃO DA EDO QUE MODELA A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON

Seja a equação diferencial que modela a lei do resfriamento de Newton dada pela equação 5.

A equação 5 se trata de uma EDO separável de primeira ordem, essa equação diferencial pode ser resolvida pelo método da separação de variáveis.

$$\begin{aligned}\frac{dT}{dt} &= -k(T - T_a) \Rightarrow dT = -k(T - T_a) dt \\ \Rightarrow \frac{dT}{(T - T_a)} &= -k dt .\end{aligned}\tag{28}$$

Integrando os dois lados da equação 28...

$$\begin{aligned}\int \frac{dT}{(T - T_a)} &= \int -k dt \Rightarrow \int \frac{dT}{(T - T_a)} = -k \int dt \Rightarrow \ln[(T - T_a)] + C_1 = -k t + C_2 \\ \ln[(T - T_a)] &= -k t + C_2 - C_1\end{aligned}$$

A subtração de uma constante por outra continua sendo uma constante, assim...

$$C_2 - C_1 = C_3$$

substituindo...

$$\ln[(T - T_a)] = -k t + C_3 \Rightarrow (T - T_a) = e^{-kt + C_3}$$

Usando as propriedades dos logaritmos...

$$e^{-kt + C_3} = e^{-kt} \cdot e^{C_3} \quad \therefore \quad e^{C_3} = C$$

A exponencial de uma constante também é uma constante, agora pode-se substituir na equação para achar a solução.

$$T - T_a = C \cdot e^{-kt} .\tag{29}$$

Sendo que T é a temperatura do corpo em um tempo t qualquer, chega-se à função que é a solução da equação 5.

$$T(t) = T_a + Ce^{-kt}. \quad (30)$$

Em $t = 0$, a temperatura inicial do corpo é T_0 , ou seja, $T(0) = T_0$, substituindo esse valor na equação 30, pode-se achar o valor da constante C .

$$T(t) = T_0 = T_a + Ce^{-kt} \Rightarrow T_0 = T_a + Ce^{-k \cdot 0} \therefore e^{-k \cdot 0} = 1 \Rightarrow T_0 = T_a + C \Rightarrow T_0 - T_a = C$$

Substituindo a constante C pelo seu valor na equação 30, acha-se a solução da equação diferencial que modela a lei do resfriamento de Newton (equação 5) dada pela equação 6, para um tempo t qualquer, sendo T_0 a temperatura inicial do sistema.

A equação 6 é a equação que rege a lei do resfriamento de Newton, essa equação só é válida em casos em que a temperatura do corpo não é muito diferente da temperatura do ambiente que o cerca. Quando a temperatura do corpo é muito alta em relação à temperatura do ambiente, a radiação térmica passa a ser importante e deve ser levada em consideração, nesse caso, a lei do resfriamento de Newton assume uma forma generalizada.

$$\frac{dT}{dt} = -k(T_0 - T_a) - k'(T_0^4 - T_a^4). \quad (31)$$

A equação 31 só pode ser resolvida numericamente por meio de um computador.

A constante de proporcionalidade k em um tempo t qualquer pode ser calculada usando-se a equação 6 e fazendo-se algumas manipulações algébricas.

$$\begin{aligned} T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} &\Rightarrow T(t) - T_a = (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad \frac{T(t) - T_a}{(T_0 - T_a)} = e^{-kt} \\ \Rightarrow -kt = \ln \left[\frac{T(t) - T_a}{(T_0 - T_a)} \right] &\Rightarrow -k = \frac{\ln \left[\frac{T(t) - T_a}{(T_0 - T_a)} \right]}{t} \Rightarrow -k = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{T(t) - T_a}{(T_0 - T_a)} \right] \end{aligned}$$

A constante k será o módulo da equação...

$$\left| -k = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{T(t) - T_a}{(T_0 - T_a)} \right] \right|. \quad (32)$$

APÊNDICE B – CÓDIGO EM *PYTHON* USADO PARA A CAPTAÇÃO DOS DADOS RECEBIDOS ATRAVÉS DA PORTA SERIAL DO COMPUTADOR

#Programa em python que pega os dados da placa Arduíno via serial e plota os dados em tempo real, gravando uma tabela de dados e um #gráfico em disco

#Autor: José Roberto de Jesus Silva

#Supervisão: Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas

#Dezembro de 2017

#Para que o programa rode, é necessário que esteja instalado no computador o Python 3 ou maior, com os módulos pyserial, python3-tk, python3-matplotlib e python3-numpy

##*-coding: utf-8 -*- #usado para garantir que não haverá erro de codificação de caracteres

import matplotlib.pyplot as plt #Importação do módulo matplotlib necessário para plotar os gráficos

import numpy as np #importação do módulo numpy necessário para operações com vetores e matrizes

import time #Importação do módulo time, necessário para criar os temporizadores

import serial #importação do modulo serial necessário para ler a porta serial

tempo = []

leitura1 =[] #Declaração das listas que receberão os dados vindos da serial do Arduíno

leitura2 =[]

fig, ax = plt.subplots() #cria a janela onde será plotado o gráfico

ser = serial.Serial('/dev/ttyACM0',9600) #abre porta serial ttyACM0

time.sleep(3) #Tempo Para esperar a conexão com a serial

Arquivo = open('Tabela.dat', 'w') #Cria um arquivo para escrita chamado 'Tabela.dat'

while True: #loop para ler a serial, 'True' é sempre verdadeiro, para parar o loop implementa-se a exceção 'try: e except KeyboardInterrupt:'

try:

while (ser.inWaiting()==0): #caso não haja dados na serial sai do loop
pass

dadoslinha = ser.readline().decode("utf-8") #Ler o que vem da serial em uma linha

Arquivo.write(dadoslinha) #Escreve o que vem da serial no arquivo

dados = dadoslinha.split("\t") #Separa os valores que vem da serial e estão separados por '\t' e os coloca na lista 'dados'

T = float(dados[0])

Temp1 = float(dados[1])#Converte os valores separados em dados para float e os armazena em cada variável

Temp2 = float(dados[2])

print (T,Temp1,Temp2)#Imprime os valores no terminal

leitura1.append(Temp1)

leitura2.append(Temp2)#Adiciona os valores às listas que serão plotadas

tempo.append(T)

ax.clear() #Serve para limpar os eixos

ax.plot(tempo,leitura1,"r") #plota os dados da lista 'tempo' e 'leitura1' na cor vermelha

ax.plot(tempo,leitura2,"b") #plota os dados da lista 'tempo' e 'leitura2' na cor azul

plt.pause(.000001)#Pausa para atualização da figura (gráfico)

except KeyboardInterrupt: #Interrompe o programa com a combinação "ctrl + C"

break #Sai do loop

Arquivo.close()#Fecha o arquivo

ser.close()#Fecha a conexão com a serial

Arquivo = open('Tabela.dat', 'r')#Abre o arquivo para leitura

```

tempoG = []
leitura1G =[] #Declaração das listas que receberão os dados vindos da leitura do
arquivo
leitura2G =[]

for line in Arquivo:#Laço para leitura linha por linha do arquivo
    try:#Tratamneto de erro, porque depois que ler a última linha o for retornará uma
lista vazia o que produzirá um erro de conversão

        line = line.strip()#Retira o '\n' da linha lida
        Linha = line.split('\t')#Separa cada valor que está tabulado por '\t'
        TG = float(Linha[0])
        Temp1G = float(Linha[1])#Atribui cada valor à sua variável convertendo a
string para um float, aqui seria gerado o erro de conversão mencionado acima
        Temp2G = float(Linha[2])
        tempoG.append(TG)
        leitura1G.append(Temp1G)#Nessa etapa cada valor é adicionado à sua
respectiva lista
        leitura2G.append(Temp2G)
    except:
        break#Aqui Sai do loop quando o erro de conversão for detectado
Arquivo.close()#Fecha o arquivo

plt.plot (tempoG,leitura1G,'r' , label = 'Placa preta')#Plota os valores da placa preta
no tempo
plt.plot(tempoG,leitura2G,'b',label= 'Placa branca')#plota os valores da placa branca
no tempo
plt.title ("Curvas das temperaturas")#Título do gráfico
plt.xlabel("Tempo (min)")#Legenda do eixo 'x'
plt.ylabel("Temperaturas das placas (°C)")#Lengenda do eixo 'y'
plt.legend(loc = 'upper left')#Coloca as legendas das curvas no canto superior
esquerdo
plt.savefig("Gráfico.jpg")#Salva o gráfico no arquivo com o nome 'Gráfico.jpg'

```

```
plt.show()#Mostra o gráfico
```


APÊNDICE C – CÓDIGO USADO PELA PLACA *ARDUÍNO* PARA A CAPTAÇÃO E O ENVIO DOS DADOS ATRAVÉS DA PORTA SERIAL DO COMPUTADOR

```

// Programa adaptado de um exemplo da biblioteca max6675
// Disponível em: www.ladyada.net/learn/sensors/thermocouple ou em
https://github.com/adafruit/MAX6675-library
// Por: José Roberto de Jesus Silva
// Supervisão: Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas
// Dezembro de 2017

#include "max6675.h" // Inclusão da biblioteca responsável pelo funcionamento dos
sensores

#define DELAY 60000 //Definindo um tempo para ser usado no delay e na variável
tempo

float Tempo = 0; //Varivel para enviar o tempo para a serial
int thermoDO = 11;
int thermoCS = 12; // Variáveis para ativar os pinos usados pelos termopares
int thermoCLK = 13;
int thermoDO2 = 8;
int thermoCS2 = 9;
int thermoCLK2 = 10;

MAX6675 termopar(thermoCLK, thermoCS, thermoDO); // Cria os objetos dos
termopares

MAX6675 termopar2(thermoCLK2, thermoCS2, thermoDO2);

int vccPin = 3; //Para alimentar o segundo termopar
int gndPin = 2; //Terra do segundo termopar

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    // Ativa os pinos 2 e 3 como terra e 5V respectivamente
    pinMode(vccPin, OUTPUT); digitalWrite(vccPin, HIGH);

```

```
pinMode(gndPin, OUTPUT); digitalWrite(gndPin, LOW);
```

```
delay(500); // Espera a estabilização do chip MAX por meio segundo
}
```

```
void loop() {
```

```
float temperatura; // Cria as variáveis que receberão as leituras
```

```
float temperatura2;
```

```
temperatura = termopar.readCelsius();
```

```
temperatura2 = termopar2.readCelsius();// Lê as temperaturas e as armazena nas
```

variáveis

```
Serial.print(Tempo);
```

```
Serial.print("\t");
```

```
Serial.print(temperatura); // Imprime tempo e temperaturas na serial separadas por
```

tabulação

```
Serial.print("\t");
```

```
Serial.println(temperatura2);
```

```
Tempo += (DELAY/1000)/60.0;//A cada loop o tempo acrescido de 60 segundos ou
```

60/60 min

```
delay(DELAY); // Tempo para repetição e impressão de cada leitura
```

```
}
```

APÊNDICE D – TUTORIAL BÁSICO DE INSTALAÇÃO E USO DO *PYTHON* NO *WINDOWS* E NO *LINUX* PARA RODAR O CÓDIGO *PYTHON*

instalando o python no windows e no linux

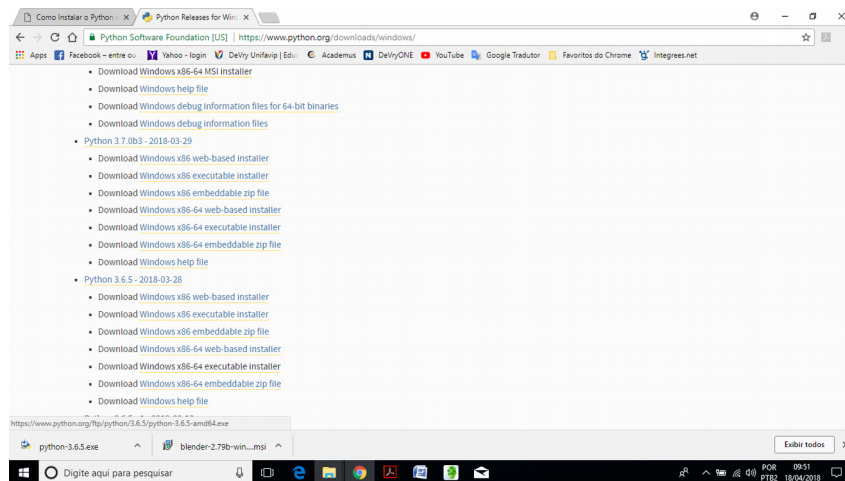


Figura 1 – Baixando o Python para Windows

Escolha opção 86 ou 64 bits conforme a sua arquitetura, eu escolhi a opção x86_64, depois vá no diretório onde baixou o arquivo e clique duas vezes sobre ele.

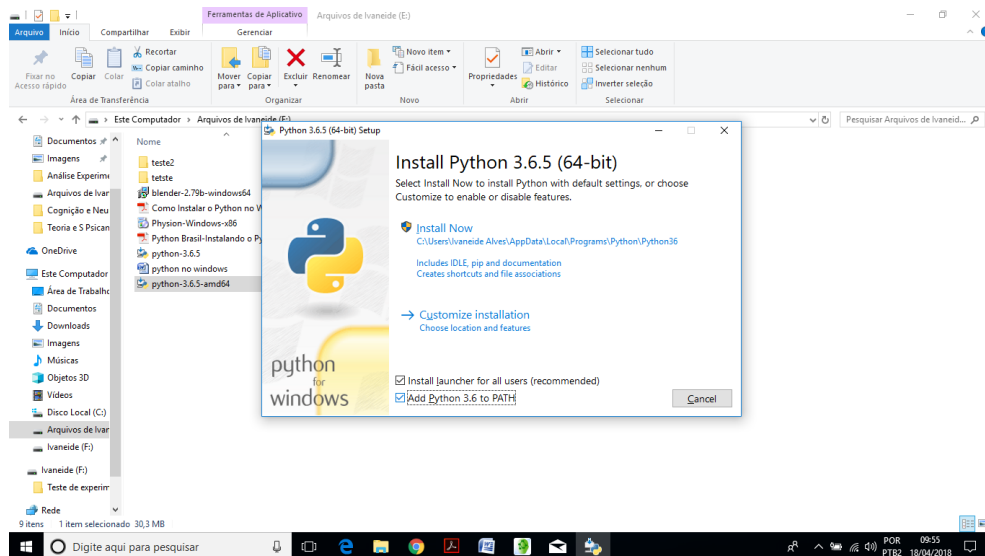


Figura 2 – Instalação do Python

Na caixa que se abre marque também a opção “add python 3.6 to path” para não ter que fazer o processo depois.

Clique em “install now” e o instalador instalará todos os componentes do python na sua máquina inclusive a idle que é a interface do Python e o pip, necessário para instalar os módulos que serão usados nos códigos.

Para abrir digite na caixa de pesquisa “python” que aparece as opções. Escolha “Idle Python” e será aberta a interface de linha de comando do Python

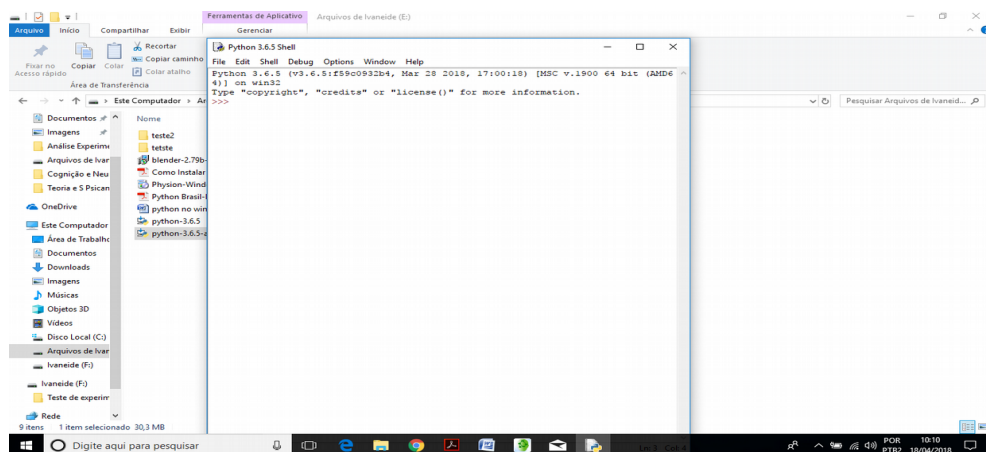


Figura 3 – Executando o programa pela interface gráfica

Você pode também usar o cmd para iniciar o python, digite na caixa de pesquisa do Windows “cmd” e escolha “prompt de comando”

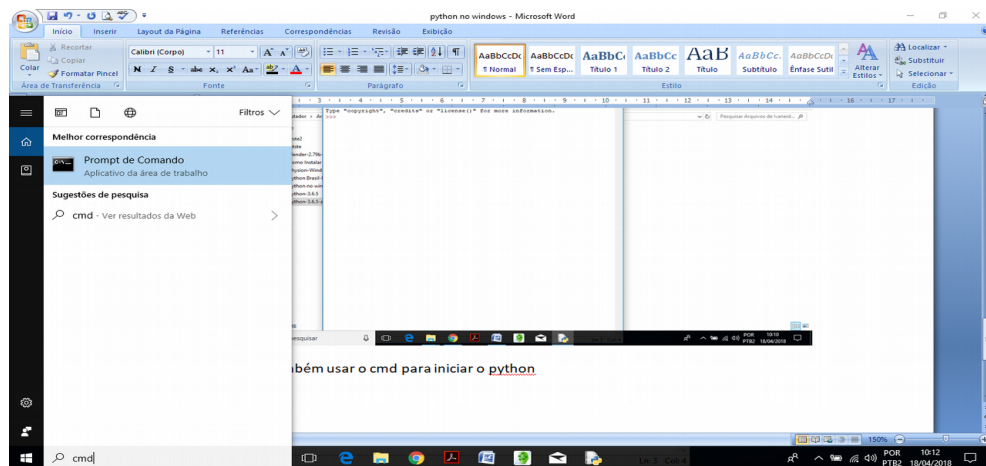


Figura 4 – Executando o Python pelo prompt de comandos do Windows

Quando abrir digite no prompt “python” e o Python será carregado semelhante foi carregado no Idle, só que agora no prompt “janela preta”

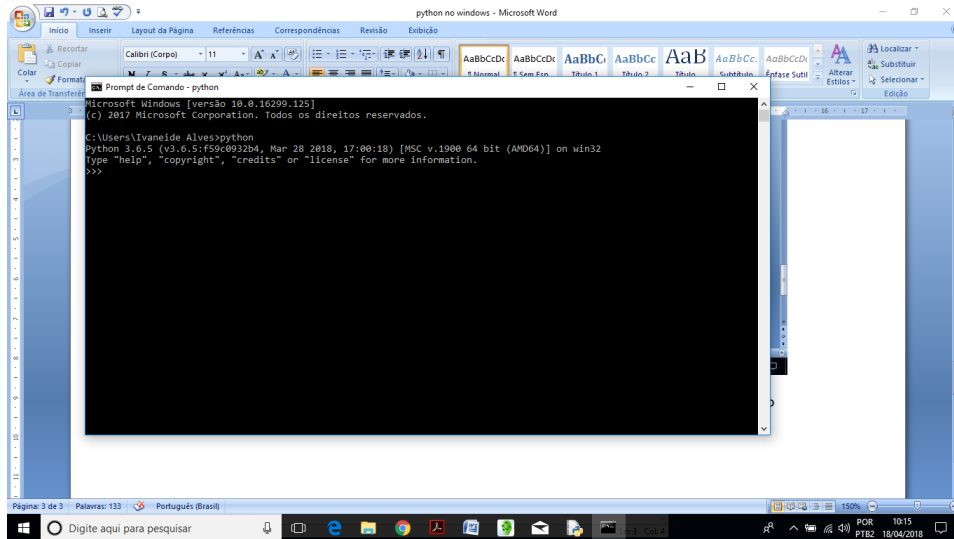


Figura 5 – Execução do Python no prompt de comandos do Windows

Para instalar e usar o Python no Linux, basta usar o apt-get, para quem usa o Ubuntu e seus derivados, para quem usa outras distros Linux, procure por tutoriais na internet para a distro adequada, a seguir será dada uma sequência de comandos que deverá ser digitada no terminal do seu Linux:

sudo apt-get install python3 – Para instalar uma versão do Python maior que 3.

sudo apt-get install python3-pip – Caso o pip não seja instalado com o python.

sudo apt-get install idle-python3.5 – Para instalar a interface gráfica do Python, note que é preciso especificar a versão do Python, caso contrário dá um erro de comando, para saber a versão do Python digite no terminal:

`python3 --version`

Para executar o Python, digite no terminal:

`python3`

Para rodar um código Python no Linux ou no Windows, abra o terminal ou o prompt de comandos, navegue até a pasta que contém o código com o comando “**cd “endereço do diretório”**”, para ver o que há na pasta digite **ls** no Linux ou **dir** no Windows, em seguida para rodar o código digite:

python “nome do arquivo.py” - prompt do Windows

python3 “nome do arquivo.py” - terminal do Linux

Esse pequeno tutorial é baseado na minha experiência de usuário dos dois sistemas e em pesquisas ao longo dos anos pela internet.

APÊNDICE E – TUTORIAL BÁSICO DE USO DO *PIP* PARA INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS NECESSÁRIOS PARA RODAR O CÓDIGO *PYTHON*

instalando e usando pip com python 3

Esse tutorial é uma adaptação e uma tradução livre do guia do usuário do PIP disponível no site oficial do pip na internet.

O pip já estará instalado se você estiver usando o Python 2.7.9 ou o Python 3.4 ou uma versão maior baixado diretamente do site oficial do Python em <https://www.python.org/> ou se você estiver trabalhando em um Ambiente Virtual criado por virtualenv ou pyenv. Apenas certifique-se de atualizar o pip.

Para atualizar o pip no Windows abra o prompt de comandos do Windows e digite:

```
python -m pip install --upgrade pip
```

Para atualizar o pip no Linux abra o terminal e digite:

```
pip install --upgrade pip
```

Para verificar se o pip já está instalado no seu Linux, digite no terminal:

```
pip --version
```

Para verificar se o pip já está instalado no seu Windows, digite no prompt de comando:

```
pip --version
```

A saída em ambos os casos deve ser algo assim:

```
pip 18.0 from /home/"seu usuário"/.local/lib/python3.5/site-packages/pip (python 3.5)
```

se você estiver usando a versão 3.5 do Python.

Para instalar os módulos Python através do pip, os comando são semelhantes tanto para Windows quanto para Linux, bastando apenas adicionar o número '3' na frente do "pip" no Linux, instalaremos os seguintes módulos:

```
pyserial, matplotlib e numpy
```

No Linux, digite no terminal, um comando por vez.

```
pip3 install pyserial
```

```
pip3 install matplotlib
```

```
pip3 install numpy
```

No Windows, digite no prompt de comandos (cmd), um comando por vez.

```
pip install pyserial
```

```
pip install matplotlib
```

```
pip install numpy
```

Em ambos os casos, o pip irá baixar os pacotes do repositório e instalá-los no sistema.

Tanto no Windows quanto no Linux, os pacotes instalados podem ser listados com o comando:

```
pip list – Windows
```

```
pip3 list – Linux
```

Para desinstalar um módulo via pip digite:

```
pip uninstall “nome do módulo”
```

Este é um tutorial básico de uso do pip, caso queira aprender mais, visite o link:

https://pip.pypa.io/en/stable/user_guide/