

**Instituto de Física**

**Licenciatura Noturna de Física**



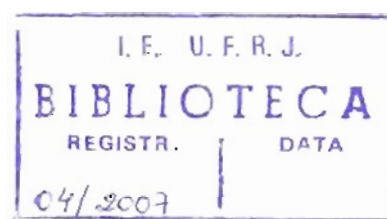
**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO**

# **UMA AULA PRÁTICA DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO**

**Aluno: Márcio Luís Barbosa Machado**

**Orientador: Prof. Adir Moysés Luiz**

**DEZEMBRO DE 2007**



## **AGRADECIMENTOS**

**AGRADEÇO À MINHA FAMÍLIA, AOS MEUS AMIGOS E, ANTES  
DE TUDO, A DEUS.**

## RESUMO

Este trabalho contém uma proposta para orientar professores de física no ensino médio a darem algumas aulas incluindo diversos tópicos de mecânica quântica. Destina-se a alunos de licenciatura em física, bem como aos profissionais da área do ensino médio, com a intenção de levar os alunos a compreender melhor o conceito da quantização da energia através de uma sugestão de aula baseada em uma experiência minuciosamente descrita em seus aspectos técnicos, teóricos e didáticos.

A parte teórica desse trabalho dedica-se a analisar a gênese da física moderna, definições de alguns conceitos básicos relacionados à descoberta do quantum de energia a partir do estudo da radiação do corpo negro, que nos leva a fazer uma recapitulação de diversos conceitos do eletromagnetismo. A seguir, para ilustrar a radiação do corpo negro, descrevemos uma experiência tecnicamente fácil de fazer e, no final do trabalho, apresentamos anexos para auxiliar o tratamento de dados experimentais com os alunos.

## SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO-----	1
1.1.MOTIVAÇÃO DA MONOGRAFIA-----	1
1.2.ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO-----	4
2-TEORIA E HISTÓRIA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO-----	6
2.1-BASES GERAIS-----	6
2.2-HISTÓRICO-----	8
2.3-RESUMO DA TEORIA -----	13
3-METODOLOGIA-----	17
3.1-DESCRIÇÃO DO PROJETO-----	18
3.2- COMO FAZER A EXPERIENCIA COM OS ALUNOS -----	20
4-COLETA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS-----	22
4.1-COMO OBTER MEDIDAS DE TEMPERATURA ?-----	22
4.2-COMO OBTER MEDIDAS DE POTÊNCIA TOTAL DE ENERGIA IRRADIADA ?-----	27
4.3-DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS-----	28
4.4-COMO ABORDAR O TRATAMENTO DE DADOS COM OS ALUNOS-----	31
5-CONCLUSÕES-----	33
ANEXOS-----	35
ANEXO 1-COMO USAR O MICROCAL ORIGIN 6.0-----	35
ANEXO 2-TABELA DA RESISTIVIDADE VERSUS TEMPERATURA PARA O TUNGSTÊNIO-----	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS-----	43

## 1-INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO DA MONOGRAFIA

O século XX é um período de grandes inovações tecnológicas: o aparecimento do computador, a medicina nuclear, as células que convertem a energia solar em energia elétrica, etc. É de conhecimento dos professores de Física que os princípios físicos que regem essas tecnologias são os princípios da Física Moderna. Apesar disso, continuam ministrando em suas aulas, somente, a física clássica, isto é, princípios físicos compreendidos até o século XIX.

Todo professor de Física sabe que a Física é uma das disciplinas mais indesejadas no ensino médio e que a dificuldade de sua assimilação é um dos fatores responsáveis. Contudo, a forma de abordar o conteúdo (muito sofisticado matematicamente) tem contribuído para o distanciamento entre a Física e o estudante, essa reflexão nos levou a pensar em uma nova proposta didática para o ensino de Física, que é baseada no estímulo da curiosidade do aluno no processo de ensino sendo baseado no conceito de zona de desenvolvimento proximal de Vygotsky [1].

A ideia é o aluno desenvolver o conhecimento no passo a passo, sendo o passo seguinte ao atual a zona de desenvolvimento proximal e se aplica na construção do saber físico através de realização de experimentos em sala de aula com elementos do cotidiano.

Também faz parte da proposta da monografia discutir o ensino de física moderna no ensino médio, utilizando as tecnologias e situações do cotidiano. Até porque os PCNs [2] incentivam um ensino de Física neste sentido.

Então qual é o porquê da resistência do ensino de Física Moderna no ensino médio, já que no cotidiano do mundo contemporâneo ela é tão presente quanto à Física Clássica?

Esta monografia é composta por cinco capítulos: 1 – Introdução, na qual procuramos fazer uma breve discussão sobre o ensino de Física Moderna no ensino médio, além de detalhar o projeto pedagógico; 2 – Teoria e história, neste capítulo fazemos comentários sobre a história da radiação do corpo

negro e as teorias envolvidas; 3 – Metodologia, neste capítulo descrevemos os objetos e recursos utilizados no experimento que verifica a validade da Lei de Stefan - Boltzmann em um filamento de tungstênio de uma lâmpada; 4 -Tratamento de Dados, no qual estão contidas os dados experimentais e os resultados; 5 – Conclusões, no qual apresentamos um resumo do que desenvolvemos neste trabalho e fazemos algumas considerações finais, Nas Referências Bibliografias estão contidas todas as publicações utilizadas nesta monografia e nos Anexos estão contidas informações detalhadas sobre recursos de informática utilizados no tratamento de dados, assim como dados tabelados importantes utilizados.

Por que ensinar a lei de Stefan - Boltzmann no ensino médio?

É comum ouvir dos alunos acerca de alguns conteúdos das disciplinas escolares: *“Por que temos que aprender isso?”*

Por isso, o professor para ser bem sucedido num projeto curricular é necessário considerar a seguinte afirmação de César Coll [3]:

*“Uma das tarefas do Projeto Curricular é proceder à análise, classificação, certificação e formulação das intenções que presidam o projeto curricular educacional”.*

Quando o professor ensinar a Lei de Stefan - Boltzmann deve deixar claro que ela é uma lei capaz de verificar se um determinado corpo pertence à classe de corpo negro o que tem grande aplicação em Astrofísica e Cosmologia. É aplicado ao estudo da evolução das estrelas e no estudo da história do universo, ou seja, o aluno pode ter mais contato com essas ciências. Mas é necessário que isso seja mais exposto de modo claro para o aluno. Um exemplo de aplicação é no cálculo da temperatura da superfície do Sol, que possui distribuição espectral de energia que se ajusta à uma distribuição espectral do corpo negro com uma temperatura de 5800 K. Com isso concluímos que o Sol pode ser considerado um corpo negro [4]. O aluno pode perceber que através da Lei de Stefan - Boltzmann podemos calcular a

temperatura das superfícies estelares. Temos, aqui, uma possibilidade de abordagem sobre Astrofísica para um aluno de ensino médio.

O professor, também, ao incluir a lei de Stefan - Boltzmann em seu projeto curricular, contribui para que o aluno do ensino médio possa ter a *clareza* da transição entre uma física conhecida com *Física Clássica* para uma *Física Moderna*, que se iniciou com o conceito de quantização de energia da radiação, idealizado por Planck. O conceito de quantização de energia ganhou status com a afirmação de que ela é característica de uma onda eletromagnética independente do seu sistema de origem, afirmado por Einstein. A partir dessa abordagem, o professor pode trazer à luz, a discussão sobre a crise da Física Clássica e mostrar que a Física Quântica está contida nas tecnologias modernas opto-eletrônicas como LED's, lasers e fotorresistores. Também, a Física Quântica está presente nas células solares, aparelhos de raios X, nos aparelhos radioterápicos e quimioterápicos, etc.

O professor pode utilizar alguns desses dispositivos em sala de aula para ensinar Física Moderna. Quando o professor ensinar a Lei de Stefan - Boltzmann deve deixar claro que ela poder ser o primeiro passo para compreender muitos conceitos envolvidos que estão relacionadas às tecnológicas e aos interesses científicos atuais.

Essa clareza poderá fazer com que o aluno se incline às áreas de pesquisa tecnológicas e às áreas de pesquisa em ciências básicas .

## 1.2 ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

Há uma tentativa atual em muitos países e em particular no Brasil, de inserir noções, conceitos, modelos e aplicações de Física Moderna em todos os níveis de escolarização. A Física ensinada no ensino médio está compreendida até o século XIX.

O século XX foi um século de grandes inovações tecnológicas, no qual houve desenvolvimento das tecnologias opto-eletrônicas tão utilizadas no mundo contemporâneo, assim como houve o desenvolvimento das tecnologias espaciais, tecnologias nucleares, tecnologias de comunicação à distância, etc.

A Física moderna está no cotidiano da escola, do aluno e do professor: quando assistimos TV por assinatura, realizamos uma atividade no computador, fazemos uma ligação via telefonia móvel, usamos a internet, Por que ignorar na sala de aula as fenomenologias que regem essas tecnologias?

Na III Conferência Internacional sobre Educação e Física (Rio de Janeiro, 2002), foi organizado um grupo de trabalho para discutir o ensino de Física Moderna. Na discussão, foram levantadas inúmeras razões para introdução de tópicos contemporâneos na escola média. Dentre elas destacam-se

*É do maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física;*

*Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata, porém resultados de pesquisas de ensino de Física tem mostrado que a Física Clássica o também é, logo concluiu-se que o nível de dificuldades para o aprendizado em Física Clássica é o mesmo que em Física Moderna;*

*Despertar a curiosidade dos estudantes e ajuda-lo a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próximo. [2].*

Os Parâmetros curriculares Nacionais desenvolvidos em Física nos dizem:



***Apesar de que o pensamento sobre o ensino de Física Moderna ser de grande apreço atualmente, o conservadorismo no uso de Física Clássica tem se mostrado inflexível à qualquer tentativa de mudança, ainda que essa mudança curricular permita que a Física se torne mais atraente. Contribui também para isto a fraca formação de grande parte dos professores nesta área [2].***

Conforme observação dos Parâmetros Curriculares Nacionais é necessário:

***“Compreender a Física presente no mundo vivencial e nos equipamentos e procedimento tecnológicos. Descobrir o “como funciona” de aparelhos” [2].***

## 2- TEORIA E HISTÓRIA DA RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

### 2.1 BASES GERAIS

Um corpo negro pertence a classe de corpos que ao serem aquecidos emitem radiação e ao se esfriarem permanecem escuros. Em meados do século XIX iniciou-se o processo de investigação sobre o comportamento da radiação proveniente de um corpo negro ao ser aquecido.

Hoje em dia, sabe-se que os átomos de corpos, quando aquecidos, interagem com as vibrações dos átomos vizinhos tornando-os mais energéticos. Com o retorno desses átomos aos estados de origem, produz-se radiação equivalente à energia acrescida das vibrações. Toda radiação que se origina através da energia térmica de um corpo negro é denominada de radiação do corpo negro.

A radiação do corpo negro é uma onda eletromagnética (figura 2.1). Como onda eletromagnética, possui as seguintes características:

- É originada a partir do movimento acelerado de cargas elétricas;
- Não depende de um meio para propagação;
- No vácuo se propaga com a velocidade da luz;
- Possui campos elétrico e magnético com componentes perpendiculares a direção de propagação e entre si;

As ondas mecânicas (figura 2.2) diferem das ondas eletromagnéticas por possuírem as seguintes características:

- Se originam a partir de vibrações de ordem mecânica;
- Dependem do meio para se propagarem;
- Possuem posição com no espaço tridimensional;
- A velocidade de propagação é muito menor que a da luz;

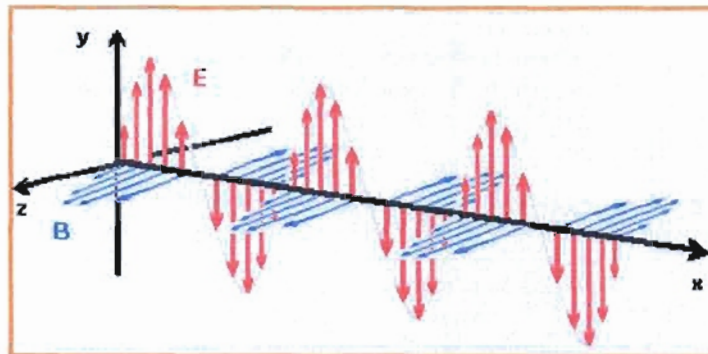


FIGURA 2.1 – A onda eletromagnética possui seus campos elétrico e magnético variando no tempo e no espaço.[4]

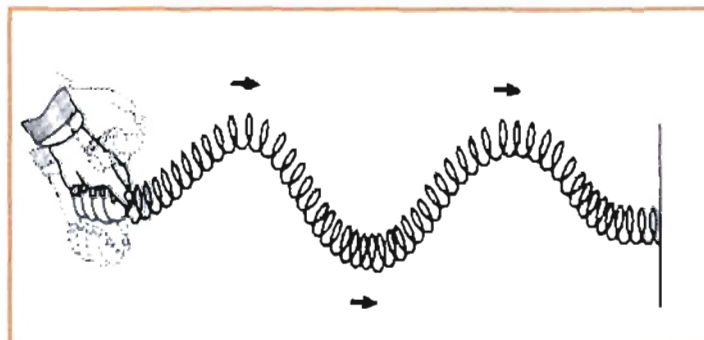


FIGURA 2.2 – Propagação de uma onda mecânica numa mola, que é produzida pela vibração de uma mão.[4]

## 2.2 HISTÓRICO

Antes de tratarmos em específico a questão da radiação do corpo escuro vamos relembrar a história que levou a descoberta das ondas eletromagnéticas permitindo então nosso estudo. Esta história começa na Grécia antiga onde o magnetismo já era conhecido desde as civilizações antigas. Tales, de Mileto, na Grécia já conhecia os efeitos de atração e repulsão de uma pedra de um tipo de óxido de ferro. Essa pedra recebeu o nome de magnetita (conhecido popularmente como imã), pois existia numa região grega chamada Magnesia. Também existem registros do fato de que se atritarmos um pedaço de âmbar com o pelo de um animal esse adquiria a propriedade de atrair pequenas partículas de pó.

Não ocorreram grandes avanços até a Idade Média na qual Petrus Peregrinus produziu uma obra chamada de 'Epistola de Magnete', na qual relatava experiências com o magnetismo, talvez este seja o primeiro trabalho, de que temos notícia, que buscava explicar os fenômenos magnéticos. Peregrinus não fazia, porém, distinção entre os diferentes tipos de atração: a magnética e a elétrica. Essa obra permaneceu ignorada até fins do século XVI. O próximo avanço importante veio com a definição do conceito de campo elétrico que é a força elétrica sofrida dividida pela carga do corpo que a sofre.

Mas por que estamos falando disso? Em muito devido à descoberta de Michael Faraday de que o campo elétrico pode ser gerado por cargas elétricas, pela variação do fluxo do campo magnético com o tempo, fluxo este que é entendido como integral de  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$  em uma superfície aberta (ao contrário da gaussiana do campo elétrico que é fechada) sendo que o campo elétrico induzido se opõe ao campo magnético que o gerou, devido ao princípio da conservação da energia.

Porém, os passos mais geniais dessa teoria foram dados por James Clerk Maxwell que observou por princípios de simetria que, se os campos elétricos eram induzidos pela variação de campos magnéticos o oposto também é verdade apesar de ser um efeito bem mais fraco, sendo então um

segundo motivo gerador para os campos magnéticos além das correntes elétricas (Experiência feita por André- marie Ampère)

Juntando-se as descobertas de Gauss, Ampère, Maxwell e Faraday obtemos o que se convencionou chamar de **equações de Maxwell**. Combinando-se estas equações obtemos a equação das ondas eletromagnéticas que mostram a oscilação entre um campo elétrico e um magnético tal como descrito na figura 2.1, e com velocidade constante só dependendo do meio por depender de constantes que variam com o meio que são a permissividade elétrica  $\xi$  e a permeabilidade magnética  $\mu$ . Porém, no vácuo, todas as ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma velocidade.

O físico alemão Kirchhoff, criou a espectroscopia e a ciência de espectroscopia de emissão. Kirchhoff utilizou a espectroscopia para mostrar que cada elemento, quando aquecido, produzia linhas de emissão com características próprias. Essa técnica foi responsável pela identificação do cério (1860) e do rubídio (1861). Também, na metade do século XIX, utilizando a técnica de espectroscopia obteve um gráfico com a densidade de energia espectral da radiação de um corpo negro  $u(\lambda, T)$  em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ). Um professor de física da Universidade de Viena Josef Stefan (1835-1893) com o auxílio de seu estudante, o físico austríaco Ludwig von Boltzmann, baseando-se nos espectros de radiação de corpo negro produzidos por Kirchhoff, mostrou, de modo empírico, que a potência total de energia irradiada ( $P_T$ ) por um corpo-negro se relacionava com a temperatura ( $T$ ), de acordo com a seguinte equação

$$P_T = bT^4 \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, a constante  $b$  é dada por:  $b = \sigma A$ , onde  $A$  é a área da superfície externa do corpo negro e  $\sigma$  é a constante de Stefan – Boltzmann. Esta relação é conhecida como **lei de Stefan – Boltzmann**. No SI o valor da constante  $\sigma$  é dado aproximadamente por  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ . Stefan

utilizou a equação (2.1) para calcular de modo aproximado a temperatura da superfície do Sol

O professor de Física e prêmio Nobel de Física de 1911, pelo trabalho sobre radiação térmica, o alemão Wilhem Wien teve a idéia de criar um corpo negro ideal, que poderia ser representado por um forno com um pequeno orifício. Esse orifício era a entrada da radiação que era espalhada e refletida dentro da cavidade, . Vendo que as características da radiação que saía pelo orifício eram muito parecidas com as de uma radiação do corpo negro correspondente à temperatura do forno em equilíbrio térmico em 1894 ele mostrou que os valores do comprimento de onda no ponto máximo ( $\lambda_m$ ) do gráfico  $u(\lambda, T)$  versus  $\lambda$  se relaciona com a temperatura ( $T$ ) de tal modo que

$$\lambda_m \propto T^{-1} \quad (2.2)$$

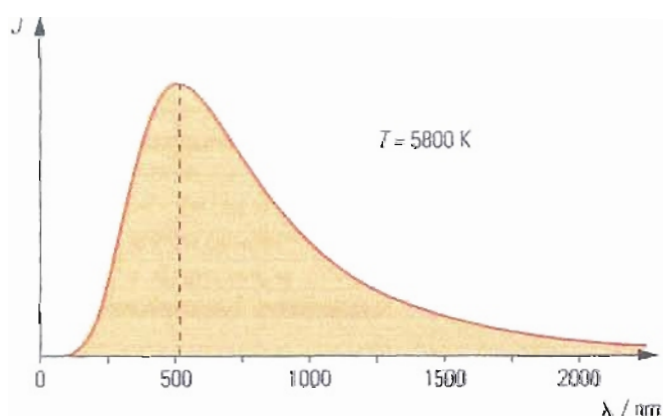


Figura 2.3 Grafico da lei de Wien

A relação (2.2) é conhecida como **Lei de Deslocamento de Wien**, e é bem sucedida somente para frequências muito elevadas ou comprimentos de onda pequenos.

No final do século XIX, o professor de matemática e física experimental em Cambridge, agraciado com o prêmio Nobel de Física de 1911 pela descoberta do argônio, o inglês John Rayleigh deduziu, de modo empírico, a seguinte expressão matemática que utilizou para ajustar a curva da densidade de energia espectral da radiação do corpo negro  $u(\lambda, T)$  versus  $\lambda$ .

$$\mu(\lambda, T) \propto \lambda^{-4} \quad (2.3)$$

Também no início do século XX, o físico inglês James Hopwood Jeans, baseado na teoria ondulatória clássica, formulou uma teoria que trouxe um significado físico para a expressão empírica de Rayleigh descrita no parágrafo anterior. A partir daí, essa expressão passou a ser chamada de **Lei de Rayleigh - Jeans**.

A equação de Rayleigh - Jeans se adapta bem para radiação na região de comprimentos de onda elevados, porém para valores pequenos dos comprimentos de onda é observado uma grande discrepância em relação à curva experimental  $u(\lambda, T)$  versus  $\lambda$ , produzida por Kirchhoff.

A Lei de Rayleigh - Jeans suscitou uma séria crise conceitual chamada de **catástrofe do ultravioleta**, pois predizia que a radiação aumentava indefinidamente para comprimentos de onda mais curtos. Assim, o corpo negro irradiaria uma quantidade infinita de energia. Esta afirmação é considerada inaceitável.

Na figura 2.3 ilustramos a comparação entre a lei de Rayleigh - Jeans e os dados experimentais; nesta figura o eixo vertical representa a energia total em função do comprimento de onda  $\lambda$  (no eixo horizontal).

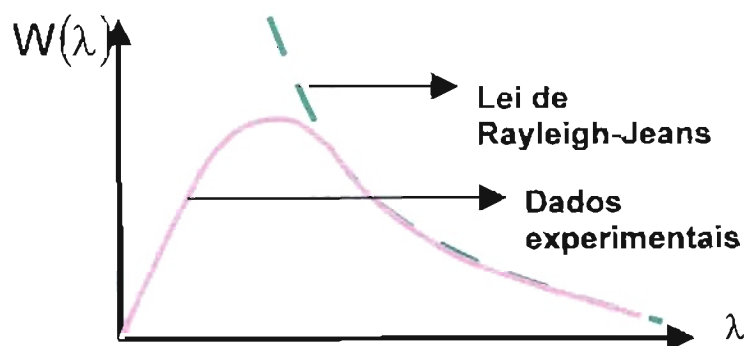


FIGURA 2.4 – Comparação entre a lei de Rayleigh e Jeans e os dados experimentais. Esta lei só vale para a região de grandes comprimentos de onda da radiação do corpo negro.

Em 1900, o professor de física teórica da Universidade de Berlim, prêmio Nobel de Física de 1918 pela descoberta do quantum de energia, o alemão Max Planck desejando deduzir uma expressão de  $u(\lambda, T)$  em função de  $\lambda$  de modo que se ajustasse a todos os dados experimentais para todos os comprimentos de onda, publicou o artigo que em português ficaria traduzido como 'sobre a lei de distribuição de energia' [6]. Neste trabalho, Planck fez a hipótese de que a energia seria emitida e absorvida pelo corpo negro, não de maneira contínua, mas na forma de pulsos discretos, chamados de *quanta de energia*. Cada quantum teria uma energia dada pela seguinte equação:

$$E = h\nu \quad (2.4)$$

Na equação 2.4,  $E$  é a energia do quantum,  $\nu$  é a frequência da radiação e  $h$  é uma constante de proporcionalidade, conhecida hoje como constante de Planck, cujo valor no SI é dado por  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s. Com essa hipótese, Planck obteve a expressão mencionada no parágrafo anterior e conseguiu explicar o comportamento da radiação do corpo negro para qualquer valor de comprimento de onda, além de introduzir uma nova abordagem em Física que passou a ser chamada de **Física Quântica**.

Através da expressão de  $u(\lambda, T)$  de Planck pode-se mostrar, para o corpo negro, que a lei de Stefan - Boltzmann é válida pra qualquer faixa de comprimento de onda. Para realizar essa demonstração é necessário usar recursos matemáticos que não estão ao alcance de um aluno pertencente ao Ensino Médio. O leitor interessado na demonstração da obtenção da lei de Stefan - Boltzmann a partir da fórmula de Planck pode consultar as referências [4] e [8] indicadas no final desta monografia. Na próxima seção mostramos como se pode deduzir a fórmula de Planck usando recursos matemáticos um pouco mais complicada ,mas útil para entender o que estamos fazendo.



## 2.3 RESUMO DA TEORIA

De acordo com os princípios da mecânica estatística, a temperatura é a energia média atribuída para cada grau de liberdade existente no sistema, porém o que são os graus de liberdade para o campo eletromagnético? Para simplificar, consideramos o corpo negro como uma cavidade cúbica de distância lateral  $L$ . Para um campo eletromagnético confinado nesse corpo negro, a condição de contorno impõe que só são permitidas as ondas que possuem um número de onda caracterizado pelo vetor  $k$  cujos componentes são dados por

$$k_x = \frac{2\pi l}{L}; \quad k_y = \frac{2\pi m}{L}; \quad k_z = \frac{2\pi n}{L} \quad (2.5)$$

Onde  $l$ ,  $m$  e  $n$  são números inteiros. O que significa que em cada uma das 3 direções as ondas devem ser inteiras.

Entretanto, no ponto de vista da equação de Maxwell, para dado vetor  $k$ , o campo eletromagnético pode oscilar como uma onda plana com qualquer valor da energia.

Quando um sistema destes está em equilíbrio a uma dada temperatura, a energia de excitação é determinada pela distribuição de Boltzmann o que significa que a probabilidade deste grau de liberdade ter a energia é proporcional a  $e^{-E/KT}$ , onde  $K$  é a constante de Boltzmann e o valor médio da energia para um dado número de onda fica sendo então:

$$\langle E \rangle = \frac{\int \langle E \rangle dE}{\int P(E) dE} \quad (2.6)$$

Por outro lado, usando a equação (2.5), como  $c = v\lambda$  e  $k = 2\pi/\lambda$ , vemos que a frequência  $v$  está relacionada com o módulo do vetor do número de onda  $k$  pela seguinte equação

$$\nu = \frac{c[k]}{2\pi} = \frac{c\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}{L} \quad (2.7)$$

Com a expressão (2.7), podemos calcular quantos estados de diferentes números de onda existem dentro do intervalo  $\{\nu, \nu + d\nu\}$ . Este número de estados é igual ao número de redes inteiras  $\{l, m, n\}$  dentro do intervalo; logo

$$\left(\frac{\nu L}{c}\right)^2 < l^2 + m^2 + n^2 < \left(\frac{(\nu + d\nu)L}{c}\right)^2 \quad (2.8)$$

A equação (2.8) fornece essencialmente o volume de uma camada esférica de raio interno  $R = \nu L/c$  e raio externo  $R + dR = (\nu + d\nu)L/c$ . Assim, obtemos:

$$N(\nu)d\nu = 4\pi R^2 dR = 4\pi \left(\frac{L}{c}\right)^3 \nu^2 d\nu = \frac{4\pi V \nu^2 d\nu}{c^3} \quad (2.9)$$

Na equação 2.9  $V$  é o volume da cavidade. Na verdade, para obter o número de estados do campo eletromagnético devemos multiplicá-lo por um fator extra 2 que vem do fato de que o campo eletromagnético tem dois estados independentes de polarização para cada vetor  $\mathbf{k}$ . A densidade de energia dentro deste intervalo de frequência fica então.

$$\mu R(\nu) = \frac{\langle E \rangle N(\nu)}{V} = \frac{8kT\nu^2}{c^3} \quad (2.10)$$

A expressão (2.10) é Igual ao resultado obtido por Rayleigh em 1900. O problema é que esta expressão só é válida para pequenas frequências já que nas altas frequências, a formula empírica de Wien reproduz os dados do

espectro, contudo no mesmo ano Planck desenvolveu uma fórmula que combina os trabalhos de Rayleigh e Wien em termos de uma constante  $h$  que permite ajustar a curva experimental. Partindo da equação (2.6) Planck obteve a seguinte equação para a densidade de energia

$$u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)} \quad (2.11)$$

A equação (2.11) obtida por Planck fornece como casos particulares a lei de Rayleigh - Jeans e a lei de Wien. Se Planck tivesse ficado satisfeito com este resultado não descobriria a Mecânica Quântica, mas não ficou e induziu a partir deste resultado a hipótese do quantum de energia. A seguir mostramos alguns passos da dedução feita por Planck.

A densidade de energia é dada por

$$U(\nu) = \frac{\langle E \rangle N(\nu)}{V} = \frac{8\pi \nu^2 \langle E \rangle}{c^3} \quad (2.12)$$

Para calcular o valor médio da energia Planck usou a equação 2.6 com a hipótese 2.4. Planck notou o seguinte

$$\sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx} = \frac{e^{-x}}{1 - e^{-x}} \quad (2.13)$$

Aplicando a informação ao que já vimos sobre o caso da radiação do corpo negro podemos afirmar que o valor médio da energia é dado por.

$$\langle E \rangle = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n h \nu e^{-\frac{n h \nu}{kT}}}{e^{-\frac{h \nu}{kT}}} \quad (2.14)$$

Se chamamos  $nh\nu$  de  $E_n$  vemos que se trata de uma expressão para a energia com base na probabilidade de uma distribuição de Boltzmann, isto implica que se os valores da energia do campo eletromagnético em sua relação com a frequência não podem mudar continuamente. Pois se a energia é  $E = nh\nu$  existe um quantum de energia  $Q$  dado por

$$Q = h\nu \quad (2.15)$$

O curioso é que Planck nunca teve muita certeza sobre essa sua teoria. Alguns historiadores afirmam que ele imaginava que ela fosse apenas um artifício de cálculo para ajustar os dados experimentais, em vez de uma hipótese fundamental. Porém, mais tarde, Einstein identificou a energia  $h\nu$  entre níveis de energia como sendo a energia de um fóton para explicar o efeito fotoelétrico e assim surgiu a **física quântica**. Conforme já dissemos, entre outras relevâncias, a equação de Planck (2.11) possibilita a dedução da formulação experimental de Stefan - Boltzmann (2.1).

### 3 – METODOLOGIA

Até o presente momento procuramos estabelecer as bases conceituais em Física. Agora, procuraremos estabelecer um projeto experimental sobre a radiação do corpo negro para fins didáticos em uma classe do 3º ano do ensino médio. Este projeto tem uma base pedagógica centrada na curiosidade e na construção de conhecimentos [6], ou seja, a partir de objetos cotidianos aplicados em sala de aula para que o aluno veja a aplicação de uma das leis da radiação do corpo negro existente no contexto desses objetos. Isso é uma tentativa de propor que o ensino de Física abandone a tendência pedagógica tradicional (caracterizado pelo caráter puramente pragmático e propedêutico), para poder assumir uma postura construtivista, que possibilita que o professor construa conceitos da Física com os alunos como sugeriu Vygotsky:

*"aquilo que é a zona de desenvolvimento proximal hoje será o nível de desenvolvimento real amanhã ou seja, aquilo que uma criança pode fazer com assistência hoje, ela será capaz de fazer sozinha amanhã."* [1]

Isso possibilita ao aluno perceber uma Física concreta e logo atraente pela capacidade de reproduzir esse conteúdo na construção desse conhecimento.

*É do maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física;*

*A Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata, porém resultados de pesquisas de ensino de Física tem mostrado que a Física Clássica o também é, logo concluiu-se que o nível de dificuldades para o aprendizado em Física Clássica é o mesmo que em Física Moderna;*

*despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-lo a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próximo.* [5]

### 3.1– DESCRIÇÃO DO PROJETO

Como vimos anteriormente, o projeto consiste numa proposta construtivista baseado na curiosidade e a utilização de objetos do cotidiano com o auxílio do professor. Indicaremos ao professor que peça aos alunos que verifiquem se um filamento de tungstênio de uma lâmpada obedece a Lei de Stefan - Boltzmann quando aquecida. As justificativas da escolha deste projeto estão baseadas com seguintes aspectos:

▣ a equação de Stefan - Boltzmann é uma equação relativamente simples, ou seja, pode ser entendida por qualquer aluno do Ensino Médio;

▣ utilizaremos lâmpada, fonte de tensão, multímetros e potenciômetro, que são objetos cotidianos de fácil acesso e que envolvem conceitos de correntes elétricas, resistências e geradores, cujo conteúdo está sendo utilizado pelo aluno do 3º ano do ensino médio. Esse experimento irá ajudar a solidificar ainda mais o conhecimento em eletrodinâmica;

▣ a dificuldade em produzir um experimento sobre a radiação do corpo-negro para o ensino médio é muito grande. Por causa da simplicidade do experimento que propomos, acreditamos que ele seja o mais adequado à um aluno de Ensino Médio para compreender sobre a radiação do corpo-negro;

▣ o Parâmetro Curricular Nacional recomenda que o Ensino de Física esteja associado às tecnologias e ao cotidiano;

▣ pelo equipamento experimental ser de baixo custo, exceto para um programa de ajuste de dados que indicaremos ao professor que utilize este projeto com os alunos;

Percebe-se que ao passar corrente elétrica num filamento de uma lâmpada, este passa a emitir luz e calor.

Para realizarmos a verificação da Lei de Stefan - Boltzmann, montamos um circuito elétrico conforme o esquema indicado na figura 3.1

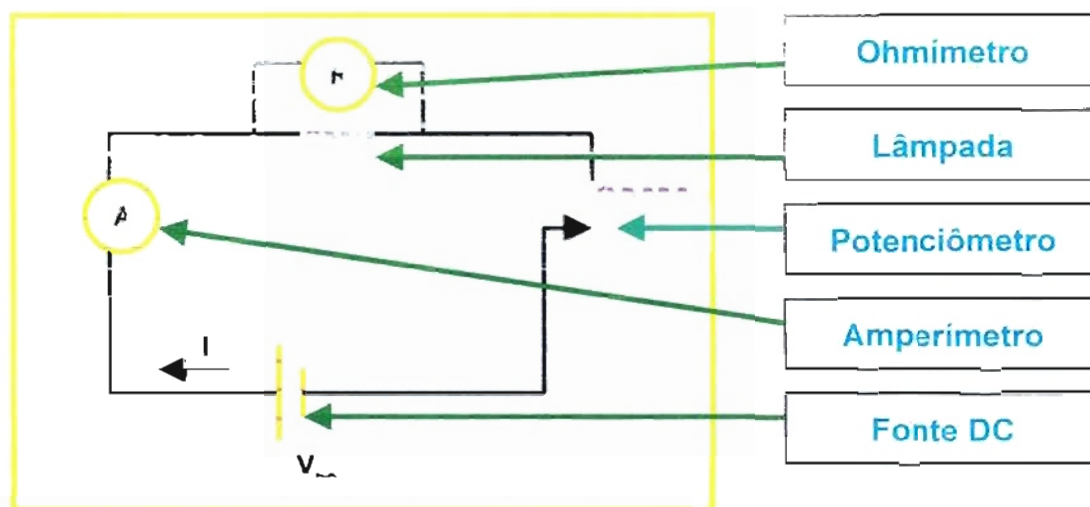


FIGURA 3.1 – Esquema do circuito elétrico referente ao experimento para a verificação da Lei de Stefan-Boltzmann

As informações necessárias para a verificação desta lei são obtidas através de medidas da resistência elétrica no filamento da lâmpada  $r$  e o seu valor de intensidade de corrente elétrica ( $I$ ) correspondente, e a partir daí, obter o valor da potência total de energia emitida e da temperatura correspondente.

A partir dessas informações, o professor auxiliará os alunos a obter valores de potência total de energia irradiada e da temperatura correspondente, que poderão ser verificadas através do comportamento da resistência do filamento da lâmpada.

A equação de Stefan - Boltzmann é um polinômio do 4º grau. É difícil manejar esses tipos de polinômios. Neste caso, a forma mais adequada de manejá-lo é aplicar as propriedades do logaritmo (de preferência na base 10 que é mais abordada no ensino médio) para que ele tenha um formato mais simples. Essa transformação não será difícil para o aluno do 3º ano do ensino médio, pois já entrou em contato com suas aplicações e com suas propriedades, então a partir do logaritmo da equação (2.1) obtemos:

$$\log (P_T) = \log (b) + 4 \log (T) \quad (3.1)$$

Onde  $b$  é a constante de proporcionalidade da lei de Stefan – Boltzmann indicada na equação (2.1). A equação 3.1 equivale à equação 2.1. A diferença é que a equação 3.1 tem o formato de uma equação do 1º grau, cujas variáveis são  $\log(P_T)$  e  $\log(T)$  e o valor do coeficiente angular é 4. Já que a lei de Stefan - Boltzmann diz que  $P_T$  é proporcional a  $T^4$ . Neste caso, o importante é o valor do coeficiente angular de um gráfico  $\log(P_T)$  versus  $\log(T)$ . Um coeficiente angular igual a 4, mostra que o filamento de tungstênio quando aquecido obedece a lei de Stefan - Boltzmann. Consideramos que essa forma de manejar dados de medidas experimentais seja adequada a um aluno pertencente ao ensino médio, pois obedece os seus limites cognitivos.

### 3.2 COMO FAZER A EXPERIÊNCIA COM OS ALUNOS

Visando tornar o ensino de Física mais concreto para os alunos do Ensino Médio, estaremos propondo ao professor o uso de objetos cotidianos. É uma forma de fazer que o aluno aperceba que os fenômenos físicos estão em sua realidade, reduzindo o distanciamento entre a Física e o aluno.

Na realização deste projeto utilizamos:

□ lâmpada de 6 V e 250 mA, utilizada em motos;

□1 fonte de tensão DC, estabilizada, de 9 V. Neste caso, utilizamos uma fonte DC de potência de 9 W. Também pode-se utilizar 6 pilhas alcalinas tipo A.

□1 resistência elétrica variável entre 0 -1 K $\Omega$ , 300 mA, modelo VRN 8129, Haiti;

□2 multímetros (aparelhos que medem várias grandezas físicas existentes em circuitos elétricos, tais como resistência, voltagem e corrente) digitais com número de dígitos igual a 3 ou superior. Utilizamos da Tektronix modelo DM250;



fios e pinos para conexões.

Montamos o circuito conforme indicado na figura 3.1 ficando como a figura 3.2.



FIGURA 3 2 – Foto do experimento

Também, o professor utilizará os recursos de informática, já que hoje em dia, o aluno de ensino médio possui grandes possibilidades de acesso ao computador. Na escola que possui computador, o professor deve motivar o aluno a utilizar esta ferramenta para aprender Física. Para esse fim, os dados coletados no experimento e apresentado na figura 3.1 deverão ser ajustados pelo aluno e encaminhados ao professor através do programa Excel com ajuda do professor na obtenção de dados de temperatura a partir dos dados de resistência com suporte do programa Microcal Origin ou de alternativas abertas. Este programa é específico para construção de gráficos, tratamento e ajuste de dados, maiores informações sobre este programa serão encontradas no anexo 1.

#### 4- COLETA E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

No Capítulo 3 (metodologia), mencionamos a necessidade do professor orientar os alunos a obter medidas de temperatura ( $T$ ) e de potência total de energia irradiada ( $P_T$ ) para verificar a Lei de Stefan - Boltzmann (3.1) em um filamento de tungstênio de uma lâmpada quando aquecida. Essas mediadas serão feitas de modo indireto; através do tratamento de dados de resistência elétrica ( $R$ ) de intensidade de corrente elétrica ( $I$ ) e da análise de uma tabela de resistividade do tungstênio.

##### 4.1- COMO OBTER MEDIDAS DE TEMPERATURA?

É fundamental que o professor conheça de que material o filamento da lâmpada é composto. Neste caso, a lâmpada do experimento que propomos para o experimento possui um filamento de tungstênio.

Conhecendo o tipo de material de que o filamento é composto, o professor deve adquirir uma tabela de resistividade ( $\rho$ ) do material em relação à temperatura. A partir desta tabela, o professor deve indicar aos alunos o ajuste desses valores à uma função polinomial e a partir daí, os alunos podem obter os valores de temperatura, de modo bem mais simples, através de medidas de resistividade do filamento da lâmpada. O aluno habitualmente relaciona medida de temperatura com um termômetro de bulbo de mercúrio. Ele deve imaginar que a medida da temperatura do filamento será através da introdução deste tipo de termômetro no filamento da lâmpada. Este projeto deixa claro que medidas de temperatura podem ser feitas de outras formas. A tabela de resistividade do tungstênio que propomos neste projeto para medir a temperatura se encontra no anexo 2.

Infelizmente, é muito complexo realizar medidas de resistividade em um filamento de uma lâmpada. Esse detalhe poderá ser resolvido, substituindo medidas de resistividade por medidas de resistência elétrica. Para isso o professor deverá estar atento às seguintes observações:

(1) A resistência elétrica está diretamente relacionada à resistividade pela seguinte equação:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.1)$$

Onde:

□  $L$  é o comprimento do filamento à uma determinada temperatura  $T$ ;

□  $A$  é a área da seção transversal do filamento à uma determinada temperatura  $T$

(2) Medir a temperatura no local onde será realizado o experimento e a resistência elétrica do filamento antes de montar o circuito elétrico. Esses valores servirão de base para cálculo da temperatura do filamento. Neste contexto, encontramos  $27^{\circ}\text{C}$  ( $300\text{K}$ ) para a temperatura local e  $(3,10 \pm 0,01)\Omega$  para resistência elétrica do filamento à essa temperatura, chamamos esse valor de  $R_{300}$ . É adequado usar a escala de temperatura em Kelvin, pois os dados tabelados se encontram nesta escala de temperatura.

(3) Quando o filamento de tungstênio é aquecido, este dilata-se linearmente e superficialmente segundo às equações de dilatação dos corpos. Essas equações poderão ser reescritas do seguinte modo:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha(T - 300) \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta A}{A_0} = 2\alpha(T - 300) \quad (4.3)$$

Onde:

□  $L_0$  é o comprimento do filamento da lâmpada a  $300\text{K}$  (temperatura local);

□  $A_0$  é a área da seção transversal a  $300\text{K}$ ;

□  $\Delta L$  é a variação do comprimento do filamento da lâmpada quando este é aquecido até a uma determinada temperatura  $T$ , em relação à  $L_{300}$ .

□  $\Delta A$  é a variação da área da seção transversal do filamento da lâmpada quando este é aquecido até a uma determinada temperatura  $T$ , em relação à  $A_{300}$ .

$\Delta L/L_0$  é a taxa relativa do aumento do comprimento do filamento da lâmpada função à sua dilatação à temperatura  $T$  (baseada na temperatura local);

$\Delta A/A_0$  é a taxa relativa do aumento da área da seção transversal em função à sua dilatação à temperatura  $T$  (baseada na temperatura local);

$\alpha$  é o coeficiente de dilatação do material. Neste caso, temos o valor de  $4,5 \times 10^{-6} K^{-1}$  para o tungstênio;

R. Edmonds [4] recomenda que a temperatura utilizada no experimento seja acima de 800 K para tornar desprezíveis efeitos de convecção que interferem nos resultados. Também é adequado que a temperatura máxima seja 1900 K para que a intensidade de corrente elétrica não seja superior à intensidade de corrente elétrica recomendada pelas normas técnicas do potenciômetro e da lâmpada;

(5) Tomando o logaritmo da equação (4.1) obtemos a (4.4) com algumas manipulações matemáticas.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} \quad (4.4)$$

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4.5)$$

(6) De acordo com a equação (4.4) e levando em conta as equações (4.2) e (4.3), mais o fato do coeficiente de dilatação ser constante nos leva concluir a equação (4.5)

$$\frac{R(T)}{R_{300}} \approx \frac{\rho(L)}{\rho_{300}} \quad (4.6)$$

Então o professor deveria perceber que é adequado utilizar dados tabelados de resistividade versus temperatura para tungstênio deveria produzir um gráfico de  $\rho(T)/\rho_{300}$  versus  $(T-300)$  para uma faixa de temperatura

compreendida entre 800K e 1900K. Caso a temperatura local seja diferente de 300K, então o professor deve fazer devidas adaptações como descritas na observação (2) do item 4.1.

O uso da informática, também, faz parte da proposta didática. O professor deve orientar o aluno como utilizar o programa Microcal Origin 6.0, cuja informações estão detalhados no anexo 1. Esse programa é grandemente utilizado para fazer gráfico e ajuste de seus dados. Através da utilização desses recursos o professor obterá os seguintes gráficos descritos na figura 4.1.

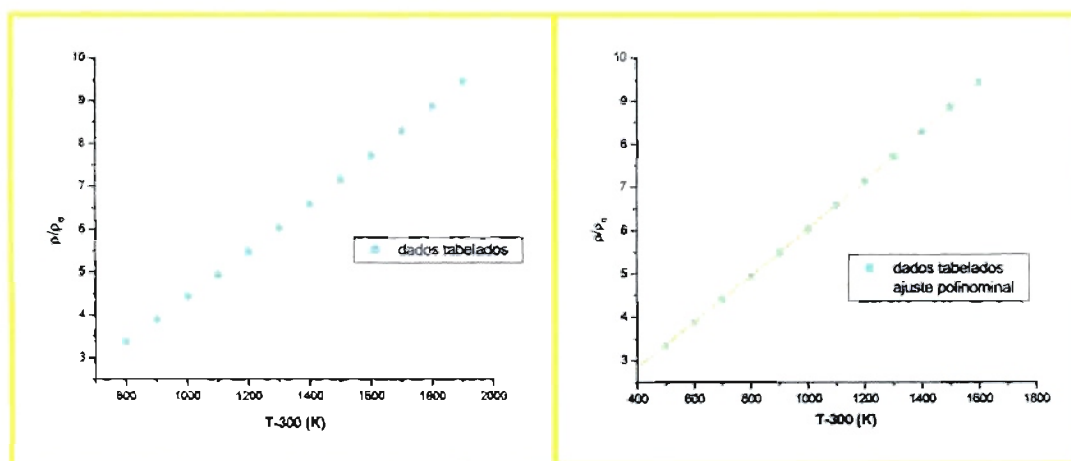


Figura 4.1– A esquerda temos somente dados plotados e à direita (em cor vermelha) temos o ajuste desses dados.

$$\frac{\rho(T)}{\rho_{300}} = C + B(T - 300) + A(T - 300)^2 \quad (4.7)$$

Usando o Microcal Origin para obter o ajuste conforme (4.5) conseguimos os resultados descritos na tabela 4.1

$\alpha(10^{-7}K^{-2})$	$B(10^{-3}K^{-1})$	C	qui-quadrado
$3,18 \pm 0,03$	$4,86 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,01$	1,0

Tabela 4.1 – Resultado do ajuste dos dados do gráfico 3.1B

A partir de (4.7), pode-se calcular diretamente a temperatura através da sua solução que é simples, pois é uma equação do 2º grau onde x é (T-300) Utilizado a fórmula de Baskara (foi abordada com os alunos no ensino fundamental) para resolvê-la o professor irá obter:

$$T = \frac{300 + B}{2^a \sqrt{\frac{1 + 4^a}{B^2 \left( \frac{R(T)}{R_{300} - C} \right) - 1}}} \quad (4.8)$$

O professor pode encaminhar a equação 4.8 aos alunos para que a demonstrem como um exercício.

#### 4.2-COMO OBTENIR MEDIDAS DE POTÊNCIA TOTAL IRRADIADA ?

Medidas de potência total da energia irradiada são obtidas somente através de dados de resistência e da intensidade de corrente elétrica, bem mais simples para obter que os dados de temperatura.

A potência total da energia irradiada equivale à potência elétrica no filamento da lâmpada, pois a energia elétrica do elétron no filamento é convertida em luz e calor. Então teremos a seguinte fórmula **para calcular a potência**.

$$P_T = R \cdot I^2 \quad (4.9)$$

R(Ω)	I(mA)	P <sub>T</sub> (W)	Log pt	T(K)	LOG T
3,1±0,01	8,95±0,01	2,523x10 <sup>-4</sup>	-3,6	0,334x10 <sup>3</sup>	2,52
3,2±0,01	15,7±0,1	7,937x10 <sup>-4</sup>	-3,1	0,339x10 <sup>3</sup>	2,53
3,3±0,01	22,5±0,1	0,002	-2,7	0,347x10 <sup>3</sup>	2,54
3,4±0,01	30,8±0,1	0,003	-2,52	0,353x10 <sup>3</sup>	2,55
3,9±0,01	43,9±0,1	0,008	-2,1	0,386x10 <sup>3</sup>	2,59
4,5±0,01	52,2±0,1	0,012	-1,92	0,424x10 <sup>3</sup>	2,69
6,3±0,01	62,7±0,1	0,025	-1,6	0,539x10 <sup>3</sup>	2,73
8,4±0,01	71,4±0,1	0,043	-1,37	0,675x10 <sup>3</sup>	2,83
9,1±0,01	78,6±0,1	0,057	-1,24	0,721x10 <sup>3</sup>	2,86
11,3±0,1	82,4±0,1	0,077	-1,11	0,854x10 <sup>3</sup>	2,93
12,7±0,1	89,6±0,1	0,102	-0,99	0,940 x10 <sup>3</sup>	2,96
13,9±0,1	100,0±0,1	0,139	-0,86	1,013 x10 <sup>3</sup>	3,01
16,1±0,1	120,9±0,1	0,235	-0,63	1,146 x10 <sup>3</sup>	3,06
18,2±0,1	138,6±0,1	0,350	-0,46	1,278 x10 <sup>3</sup>	3,11
19,6±0,1	151,5±0,1	0,450	-0,35	1,353 x10 <sup>3</sup>	3,13
20,5±0,1	158,6±0,1	0,516	-0,29	1,405 x10 <sup>3</sup>	3,15
22,3±0,1	176,4±0,1	0,694	-0,16	1,509 x10 <sup>3</sup>	3,18
23,6±0,1	187,0±0,1	0,825	-0,08	1,583 x10 <sup>3</sup>	3,20
24,5±0,1	196,0±0,1	0,941	-0,03	1,634 x10 <sup>3</sup>	3,21
25,4±0,1	205,5±0,1	1,073	0,03	1,685 x10 <sup>3</sup>	3,23
26,2±0,1	215,0±0,1	1,211	0,08	1,730 x10 <sup>3</sup>	3,24
26,7±0,1	220,0±0,1	1,292	0,11	1,758x10 <sup>3</sup>	3,25
27,7±0,1	230,0±0,1	1,465	0,17	1,813 x10 <sup>3</sup>	3,26

Tabela 4.2 – Dados experimentais de resistência e intensidade de corrente elétrica e resultados de temperatura e potência total de energia irradiada para o filamento de tungstênio da lâmpada. Para temperatura acima de 800K a célula se apresenta em cor cinza.



### 4.3 DADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

Quando o professor e os alunos montarem o experimento conforme a figura 3.1 devem tomar as seguintes precauções:

{1} O professor deve estar atento quanto às conexões: o local de entrada de entrada de corrente elétrica nos multímetros são entradas de cor **vermelha** e o local de saída de corrente elétrica são saídas de cor **preta**. Caso as conexões não sejam feitas adequadamente, o multímetro indicará valores negativos para intensidade de corrente elétrica;

{2} O multímetro que fará o papel de ohmímetro deve estar na escala de ohm, e o multímetro que funcionará como amperímetro deverá estar na escala de ampère .

{3} No potenciômetro há uma fenda lateral que ao girá-la varia o valor da resistência que está compreendida entre 0 e 1 k $\Omega$ . É adequado que se ajuste o potenciômetro para 1 k $\Omega$  ou próximo, para que a intensidade de corrente seja mínima.

{4} Então, o professor e os alunos poderão iniciar a coleta de dados. É adequado que os dados sejam coletados baseados nos valores de intensidade de corrente elétrica, cujo intervalo de medida não seja superior a 11mA. Isso favorecerá para que a quantidade de dados não seja pequena, dando maior precisão quanto aos resultados.

{5} Não deve produzir intensidade de corrente elétrica acima de 250mA para que não danifique a lâmpada e o potenciômetro como mencionamos em (4) do item 4.1.

Após as precauções mencionadas, o professor deve colher dados de resistência e intensidade de corrente elétrica para calcular os valores de temperatura (4.6) e de potência elétrica (4.9) correspondentes. Para evitar de calcular cada linha da planilha de T e P<sub>r</sub>, indicamos que o professor utilize um recurso do Microcal Origin 6.0 que calcula os valores de uma coluna através de fórmulas , de modo automático, partindo de valores de outras colunas.



Maiores informações se encontram em anexo 1.1. Então o professor deverá obter os seguintes resultados (porém para temperatura acima de 800 K, onde vale a lei de Stefan-Boltzmann, deixamos as células da tabela em destaque.

O professor deve tomar cuidado ao pautar o gráfico de potência total de energia irradiada versus temperatura, pois a escala deve ser logarítmica. A proposta é fazer um gráfico  **$\log(P_T)$  versus  $\log(T)$**  (é mais adequado escolher o logaritmo de base 10 porque é a base mais abordada no ensino médio). No anexo 5.1 mostramos como converter uma escala linear em logarítmica no Microcal Origin 6.0. Então obtivemos a figura 4.4.

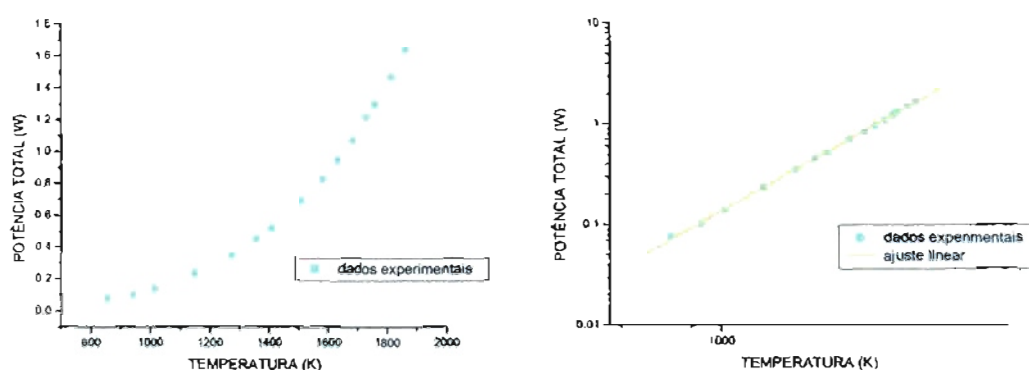


Figura 4.2 – A esquerda se encontra em escala linear, tem forma tipo parabólico enquanto à direita se encontra em escala logarítmica, que apresenta linearidade conforme a equação 3.1 prevê.

NO GRÁFICO DIREITO DA FIGURA 4.2 PODEMOS VER A LINEARIDADE QUE OS DADOS APRESENTAM COMO A EQUAÇÃO 3.1 PREVÊ. POR ISSO, DEVE-SE AJUSTAR ESSES DADOS A UMA FUNÇÃO LINEAR, ONDE O COEFICIENTE É LINEAR E O MICROCAL ORIGIN 6.0 NOS FORNECEU O SEGUINTE AJUSTE EXPLICITADO NA FIGURA 4.5.

Coeficiente angular ( $\alpha$ )	Coeficiente linear ( $\beta$ )	Chi-quadrado
3,979±0,026	-12,806±0,081	0,99972

TABELA 4.3– Resultado do ajuste linear do gráfico da figura 4.2 à direita.

Com o resultado da tabela 4.3 o professor e os alunos verificarão que  $P_T$  é proporcional a  $T^\alpha$ , tal que  $\alpha = (3,979 \pm 0,026)$ , . Logo  $\log(P_i) = \beta + \alpha \log(T)$ , sendo  $\alpha=4$ , o que torna o resultado consistente com a equação de Stefan-Boltzmann e o professor deve estar atento que o filamento de tungstênio se comporta como corpo negro somente para temperaturas acima de 800K .

O qui-quadrado é obtido somando-se a diferença ao quadrado entre as frequências observadas e as esperadas, dividido pelas frequências esperadas. Logo quanto mais o chi-quadrado se aproxima de 1 melhor está ajustada nossa função.

#### 4.4 COMO ABORDAR O TRATAMENTO DE DADOS COM OS ALUNOS

Finda a sua parte na experiência chegou a hora de integrar os alunos ao que ocorrerá na análise gráfica do processo , Temos quatro opções para fazê-lo

A primeira, tecnicamente melhor para nós professores é utilizar o microcal origin 6.0, digo isso tão somente tecnicamente, pois ensinar os alunos a utiliza-lo e ter de instalá-lo nos computadores do colégio (isso se os alunos não quiserem levar o trabalho para casa , o que torna a tarefa bem difícil) demanda um bom tempo que nossos dois tempos (quando os temos) com os alunos por semana não comportam, contudo para você que quer entender integralmente a experiência ou queira usar mais o microcal origin 6.0 nos anexos você encontrará mais informações sobre ele.

Outra opção que a principio parece ótima por dispensar o computador podendo ser passada facilmente para casa é usar o papel milimetrado para fazer o gráfico do logaritmo das grandezas relacionadas que eles encontrariam com a calculadora, mas que acaba não funcionando pois fica muito tedioso trabalhar com os números encontrados o que me levou a arquivar também a idéia do gráfico em papel log-log , que além do risco sobre sua confiabilidade demandaria um bom tempo de explicação sobre seu funcionamento aos alunos.

Logo a opção que me pareceu mais fácil e intuitiva e teve boa resposta no trabalho com os alunos é o uso do excel com o qual qualquer aluno obtém em dez minutos um gráfico como o da figura 4.6, sem que nós percamos tempo tentando mostrar ao aluno a maneira de se ajustar uma reta completando de maneira eficiente o nosso projeto. Eu pelo menos o recomendo.

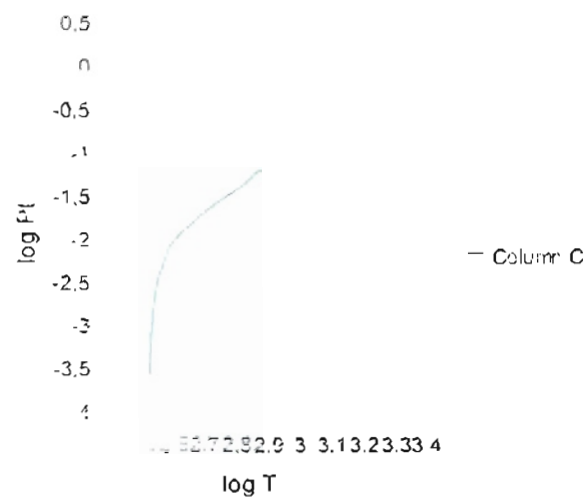


Figura 4.3 Resultados da experiência trabalhados no excel

## 5 – CONCLUSÕES

Esperamos que este projeto de instrumentação possa contribuir para o ensino de Física no ensino médio. Procuramos pautar este trabalho em construções pertinentes e adequadas à realidade brasileira e às dificuldades inerentes ao ensino nos dias atuais.

Sugerimos que a mudança na imagem que a Física apresenta como uma disciplina desinteressante poderá ser bem sucedida se o seu ensino for baseado em elementos do cotidiano, por causa da importância das inovações tecnológicas para a estrutura social da atualidade.

O modelo de ensino de Física da atualidade precisa sair do caráter puramente pragmático e propedêutico para adotar uma didática na qual os professores e os alunos construam juntos os saberes com o auxílio de elementos de seus cotidianos, diferente do ensino de Física tradicional. Acreditamos que essa proposta poderá fazer com que a Física seja uma disciplina bem mais apreciada.

Como conclusão vemos que é possível abordar a radiação do corpo negro no ensino médio sem ultrapassar os limites cognitivos desses alunos, além de ser uma possibilidade de abordar a crise na Física Clássica e, a partir daí, abordar o conceito de quantização de energia de Planck.

O projeto alcançou o seu objetivo que era elaborar uma proposta didática para o ensino da radiação do corpo negro baseada na curiosidade [2] e no conceito de zona de desenvolvimento proximal [1] com a utilização de objetos do cotidiano que possibilite um ensino de Física construtivista no ensino médio.

A metodologia, aqui utilizada procurou, em parte, tornar a Física mais descritiva e experimental, e utilizar recursos cotidianos como multímetro, lâmpada, fonte de tensão DC e potenciômetro e com a utilização da informática para fazer que o aluno perceba a Física em seu cotidiano, e a partir daí, possibilitando que ela seja assimilada de modo mais natural. Tivemos uma

preocupação de enquadrar essa metodologia nos Parâmetros Curriculares Nacionais [2].

Com recursos simples, baratos (exceto para o programa Microcal Origin 6.0) e de fácil acesso, o professor pode ensinar radiação do corpo-negro com o uso de uma matemática mais simples, respeitando os limites cognitivos de um aluno do 3º ano do ensino médio. Também contribui para solidificação de conceitos que teoricamente, já foram abordados anteriormente pois este trabalho se destina aos alunos pertencente ao 3º ano do ensino médio, como dilatação dos corpos e eletrodinâmica, além de oferecer ao professor a possibilidade de abordar a crise da Física Clássica para introduzir a Física Quântica de modo mais descritivo.

O programa Origin 6.0 é de custo alto, então sugerimos que o professor oriente os alunos a plotar em um papel milimetrados dados de  $\rho(T)/\rho_{300}$  versus  $(T-300)$  e a partir dos dados, possa esboçar a forma da curva e obter medidas de temperatura através do conceito de pontos cartesianos. Para encontrar o valor do coeficiente angular do gráfico  **$\log(P_T)$  versus  $\log(T)$**  sugerimos que utilize o papel log-log para plotar os dados  **$P_T$  versus  $T$**  e assim traçar a reta mais adequada e calcular o valor do seu coeficiente angular.

## ANEXOS

### ANEXO 1 – COMO UTILIZAR MICROCAL ORIGIN 6.0

Neste anexo iremos demonstrar passo a passo as etapas da obtenção do gráfico de logaritmo de potência versus logaritmo da temperatura, além do seu ajuste à uma função do primeiro grau, com o seu devido valor do coeficiente linear. O Microcal Origin 6.0 é considerado um dos melhores programas para ajustes de dados e no tratamento de dados.

#### 1.1– INTRODUZINDO DADOS

Ao abrir o Microcal Origin 6.0 aparecerá a seguinte janela como mostra a figura A.1. Com isso, o professor deve seguir o seguinte esquema para introduzir dados:

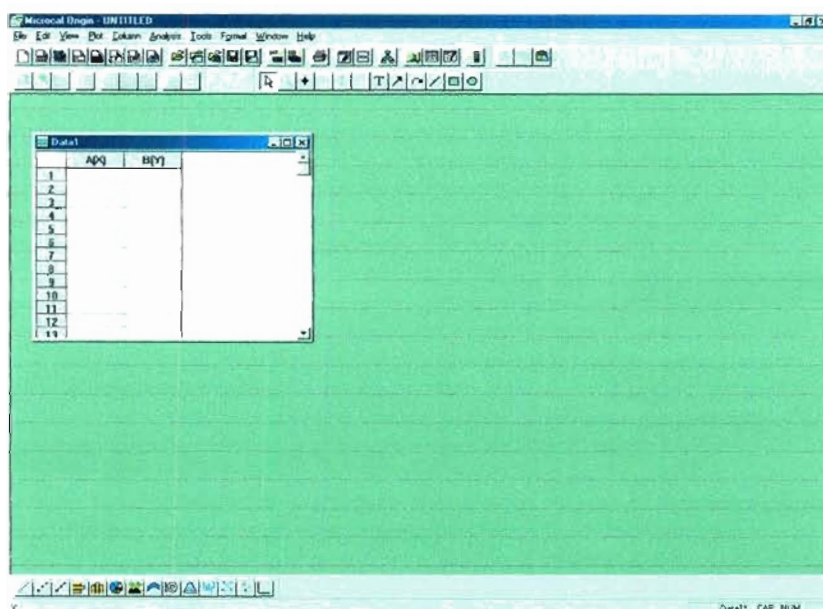


FIGURA A 1 – Interface do Microcal Origin 6.0

(1) Colocar valores na coluna A e na coluna B, que poderão ser renomeados clicando com botão esquerda do mouse onde aparecerá uma janela com a opção **Properties** e ao clicar nela aparecerá uma nova janela

com as características da coluna (nome da coluna, tipo de variável, etc) que poderão ser mudadas.

(2) Caso haja mais colunas, clique com o mouse esquerdo na parte branca que se encontra fora da tabela e aparecerá a opção **Add New Column** (figura A.2) basta só clicar. Repetir o procedimento para adicionar mais colunas. Neste caso, adicionamos 5 colunas: uma contendo valores de  $R/R_{300}$ , uma contendo valores de potência elétrica, uma contendo valores de temperatura e mais duas com os logaritmos de  $B_{300}$  e  $T$ .

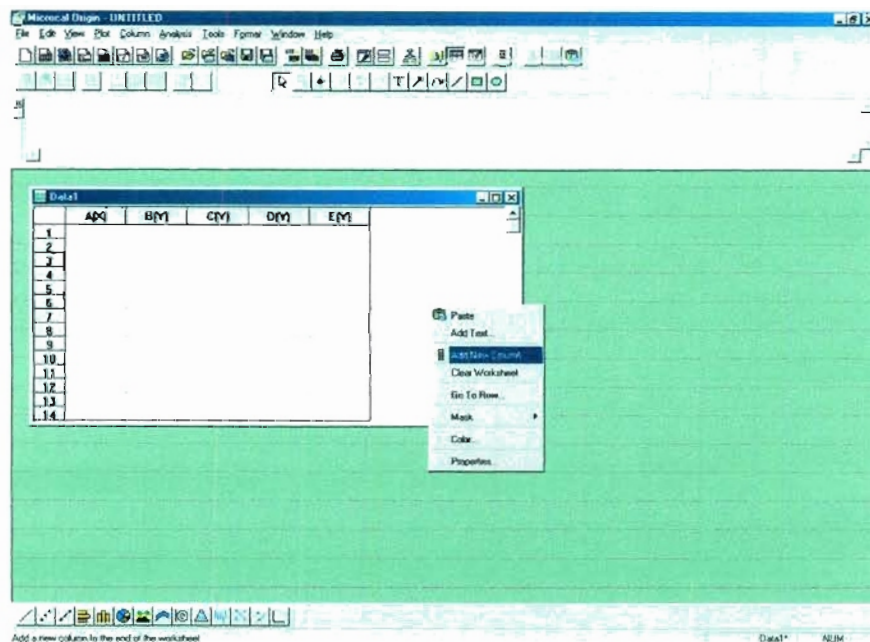


FIGURA A 2: Adicionando colunas no microcal origin 6.0

(3) Colocar o valores em cada coluna com seu respectivo parâmetro.

(4) Para calcular algum parâmetro de modo automático, como os valores da potência elétrica e da temperatura, basta clicar com o botão do mouse esquerdo em cima da coluna desejada e aparecerá a opção **Set Column Values** como mostra a figura A.3. Utilizamos esse recurso para calcular os valores da potência total de energia irradiada, da temperatura, de  $R/R_{300}$  e de  $p/p_{300}$ . O Microcal Origin 6.0 possui um linguagem de programação própria que pode ser encontrada na janela **Help**. No item 1.3 mostraremos a linguagem utilizada para cálculo da temperatura e da potência total de energia irradiada.



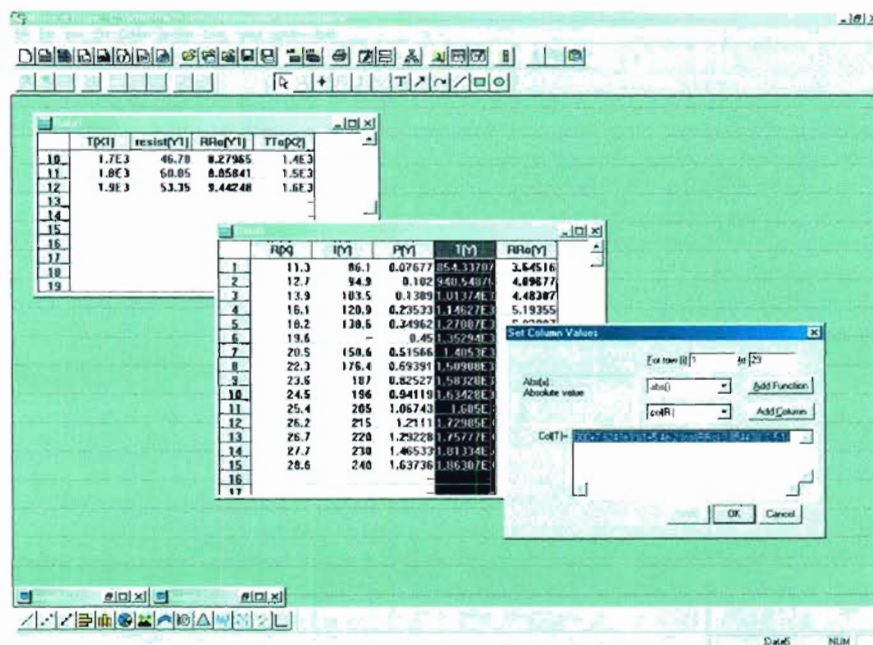


FIGURA A.3: Calculando os valores no microcal origin 6.0

(4) Após adicionar a expressão correspondente à coluna desejada, clicar OK

## 1.2– FAZENDO GRÁFICOS

Para fazer o gráfico o professor proceder da seguinte maneira:

(1) Selecione a worksheet (planilha) de interesse.

(2) Clique na janela **Plot**.

(3) Aparecerá uma nova janela que contém algumas opções como mostra a figura A.4. Em cada a opção mostra da forma como os dados estarão apresentados no gráfico. Neste caso, utilizamos a opção **Scatter** (formato em pontos).

(4) Então a parecerá uma listagem com os nomes das colunas correspondente e, portanto deverá escolher qual a coluna que representará a variável contida no eixo vertical do gráfico (eixo y) e também a que representará a variável contida no eixo horizontal (eixo x).

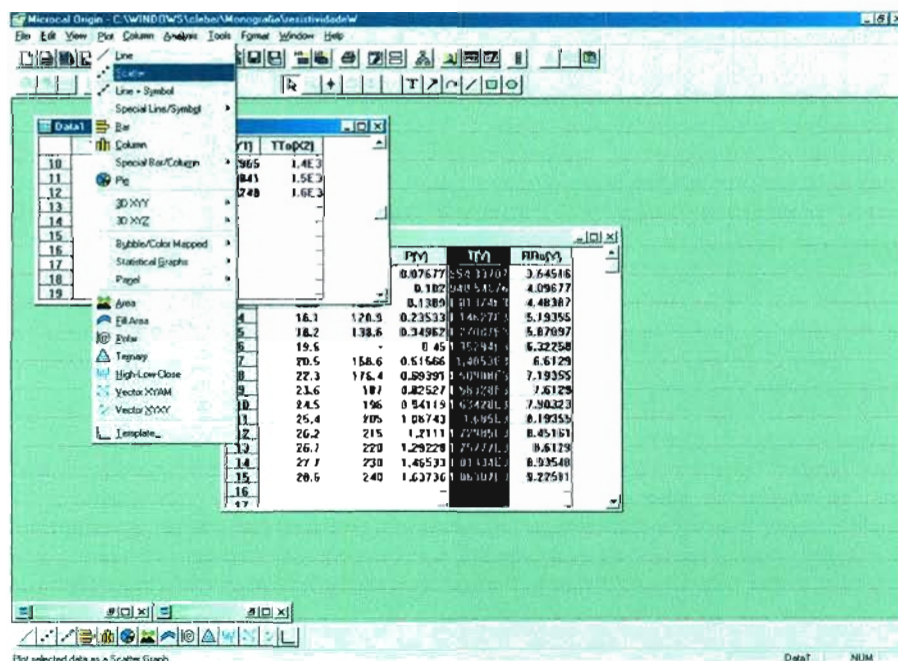


FIGURA A.4 opções de gráfico no microcal origin 6 0

(5) Clique **OK**

(6) Aparecerá um curva não-linear, conforme a figura 4.2 à esquerda. Isso significa que em escala linear a relação entre a potência elétrica e a temperatura tem essa forma. Queremos fazer o gráfico do logaritmo da

potência elétrica versus logaritmo da temperatura, conforme a equação 4.2B. Para as escalas x e y em formato logarítmico, deve-se clicar duas vezes com o botão direito do mouse em um dos eixos do gráfico.

(7) Aparecerá uma janela conforme a figura A.5. Nela tem as opções para os eixos vertical e horizontal como: intervalo de interesse, tipo de escala, número de divisões dos eixos, etc.

(8) Então deve configurar, principalmente, nos eixos vertical e horizontal com a opção **log10** e selecionar os intervalos para potência elétrica e temperatura utilizados.

(9) clique **OK**

(10) Então verificará que o gráfico adquirirá uma forma linear, conforme a figura 4.2 à direita.

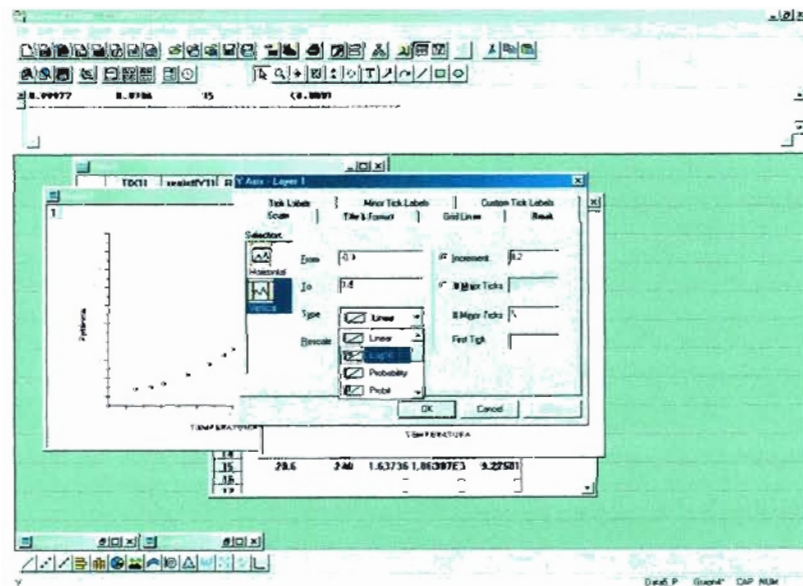


FIGURA A.5:configurando gráficos no microcal origin 6.0

### 1.3– AJUSTANDO DADOS

Para ajustar os dados, o professor deve proceder do seguinte modo:

(1) Selecionar o gráfico cujo dados deverão ser ajustados.

[2] Clicar na janela **Analysis**

[3] Clicar no tipo de ajuste, neste caso o ajuste é em relação a um polinômio do 1º grau, clique na opção **Fit Linear**, conforme a figura A.6. Para ajuste polinomial de outros graus, como utilizado para os dados da resistividade do tungstênio, clique na opção **Fit Polynomial**, depois digite o grau do polinômio e clique **OK**.

(4) Então verificará que no gráfico utilizado para o ajuste, aparecerá uma curva colorida sobrepondo aos dados conforme a figura A.7.

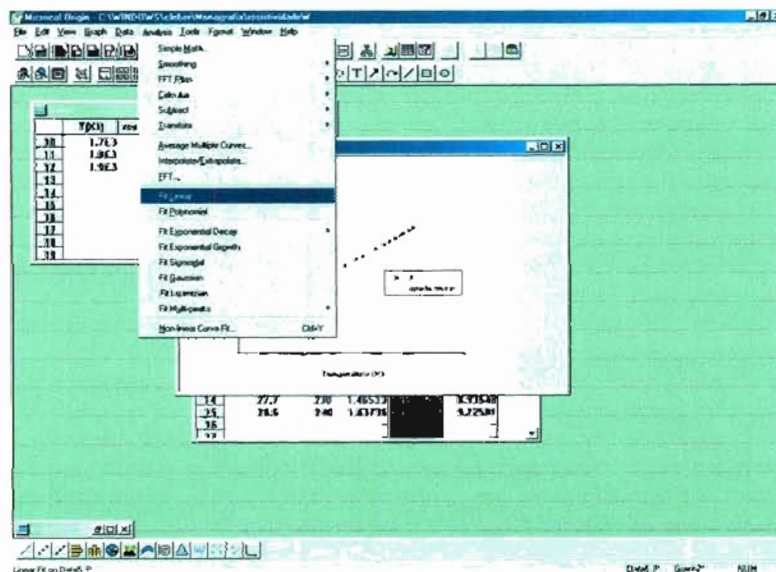
(5) Também, aparecerá uma nova janela com os dados do ajuste: o valor dos coeficientes do polinômio, o valor do chi-quadrado, números de ponto utilizados, etc.

(6) As equações utilizadas são :

$$\text{col}(C) = \text{col}(A) / R_{300} \quad (R / R_{300})$$

$$\text{col}(D) = \text{col}(A) * \text{col}(B)^2 \quad \text{col}(A) - \text{Resistência}(R)$$

$$\text{col}(E) = \log(\text{col } C) \quad \text{col}(B) - \text{corrente } (i)$$



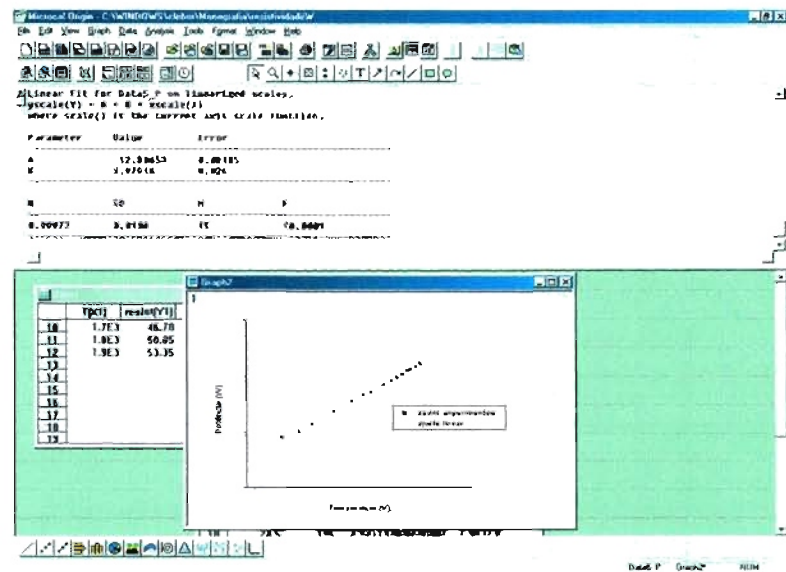


FIGURA A.7:Gráfico ajustado no microcal origin 6.0

#### 1.4 – LINGUEM MATEMÁTICA DO MICROCAL ORIGIN 6.0 UTILIZADA NO PROJETO

O Microcal Origin 6.0 possui uma linguagem própria para fórmulas e o professor pode dispor desses recursos para o cálculo da potência e da temperatura e de  $R/R_{300}$ . Existe a seguinte convenção: **Col( )** é a coluna onde contém os valores de um determinado parâmetro. Neste caso escolhemos: **Col(P)**, para os dados da Potência elétrica, **Col®**, para os dados da resistência, **Col(I)**, para os dados da corrente elétrica, **Col(RR300)**, para os dados de  $R/R_{300}$  e **Col(T)**, para os dados da temperatura.

Como aplicar para calcular a potência?

Basta escrever a seguinte expressão:

$$\text{Col(P)} = \text{Col}® \cdot \text{Col(I)}^{2/1E6} \quad (\text{A.1})$$

O fator 1E6 significa  $10^6$ , é utilizado para correção, pois a unidade da corrente elétrica está em miliampére.

Como aplicar para calcular a temperatura?

Basta escrever a seguinte expressão:

$$\text{Col(T)} = 300 + 7.6243E3 \cdot ((1 + 5.4E2 \cdot (\text{col(RR0)} - 0.85443))^{0.5} - 1) \quad (\text{A.2})$$

ANEXO 2 – Tabela de resistividade versus temperatura para o tungstênio[10]:

T(K)	$\rho(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	T(K)	$\rho(\mu\Omega \cdot \text{cm})$
300	5,65	2100	60,06
400	8,60	2200	63,48
500	10,56	2300	66,91
600	13,23	2400	70,39
700	16,09	2500	73,91
800	19,00	2600	77,49
900	21,94	2700	81,04
1000	24,93	2800	84,70
1100	27,94	2900	88,33
1200	30,98	3000	92,04
1300	34,08	3100	95,76
1400	37,19	3200	99,54
1500	40,36	3300	103,3
1600	43,55	3400	107,2
1700	46,78	3500	111,1
1800	50,05	3600	115,0
1900	53,35	3655	117,1
2000	56,67		



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]-VYGOTSKY, S LURIA, A .R. e LEONTIEV, A .N. "Linguagem, Desenvolvimento e Aprendizagem", editora da USP, (1988).
- [2]-MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio. Brasília, (1999).
- [3]-COLL, César. "Psicologia e Currículo: uma Aproximação Psicopedagógica à Elaboração do Currículo Escolar", editora Ática, (1996).
- [4]-TIPLER, Paul A. "Física". 3ª edição, Ao Livro Técnico e Científico Editora, (1995).
- [5]-OSTERMANN, Fernanda e MOREIRA, Marco Antônio. "Uma Revisão Bibliográfica sobre a Área de Pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio" ". Investigação em Ensino de Ciências – Instituto de Física/UFRGS, vol. 5, nº 1, (março/2000).
- [6]- MAX PLANCK, On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum". Annalen der Physik, vol.4, p.553ff, (1901).
- [7]-McDERMOTT. "Physics in Inquire", vol.1, John Wiley & Sons, Inc., (1996).
- [8]-EDMONDS, I. R. "Stefan - Boltzmann in Laboratory". American Journal Physics, vol.36, p. 845-846, (1968).
- [9]-SAMPAIO, José Luiz e CALÇADA, Caio Sérgio. Universo da Física. Vol. 2 e 3, editora Atual, (2001).
- [10]-REZENDE, Sérgio M. "A Física dos Materiais e Dispositivos Eletrônicos", 1ª edição, editora da Universidade Federal de Pernambuco, (1996).
- [11]-HALLIDAY, David, RESNICK, Robert e Walker, Jearl. "Fundamentos de Física", vol2, 4ª edição, Ao Livro Técnico e Científico Editora, (1996).
- [12]-"Handbook of Chemistry and Physics", 57ª edição, CRC Press, (1976-1977).

[13]--“Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Chamada de Artigo”. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, nº 4, (dezembro/2002).

[14]-GONSALVES, ELISA PEREIRA. “Iniciação à Pesquisa Científica”. 3ª edição, editora Alínea(2003).

[15]-MENEZES, L.C. “Uma Nova Física para o Novo Ensino Médio”, Física na Escola, vol.1, nº1, (outubro/2000).

[16]--“The MacTutor History of Mathematics Archive”. <http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/index.html>. School of Mathematics and Statistical of University of St Andrews(2004)

[17]-WEISSTEIN, Eric W. “World of Scientific Biography”. [http://scienceworld.wolfram.com/biography\(2002\)](http://scienceworld.wolfram.com/biography(2002))

[18]-GUIMARÃES Paulo Sérgio. “Radiação do Corpo Negro”. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, nº 2, (junho/2002).