

# *Revista da Graduação*

---

Vol. 5

No. 1

2012

18

---

**Seção: Faculdade de Física**

## **ESTUDO QUANTITATIVO DA CONVECÇÃO EMPREGANDO UM MODELO ACESSÍVEL AOS ALUNOS DE FÍSICA GERAL**

**Samuel Corvello Vilar**

Este trabalho está publicado na Revista da Graduação.

ISSN 1983-1374

<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/11415>

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE FÍSICA

SAMUEL CORVELLO VILAR

**ESTUDO QUANTITATIVO DA CONVECÇÃO EMPREGANDO UM MODELO  
ACESSÍVEL AOS ALUNOS DE FÍSICA GERAL**

Porto Alegre

2011

SAMUEL CORVELLO VILAR

**ESTUDO QUANTITATIVO DA CONVECÇÃO EMPREGANDO UM MODELO  
ACESSÍVEL AOS ALUNOS DE FÍSICA GERAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Licenciado pelo Programa de Graduação da Faculdade de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

**Orientador: Prof. Me. Délcio Basso**

**Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Me. Maria Emília Baltar Bernasiuk**

Porto Alegre

2011

SAMUEL CORVELLO VILAR

**ESTUDO QUANTITATIVO DA CONVECÇÃO EMPREGANDO UM MODELO  
ACESSÍVEL AOS ALUNOS DE FÍSICA GERAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Licenciado pelo Programa de Graduação da Faculdade de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Aprovada em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Eulália Pinto Tarragó – PUCRS

---

Prof. Dr. Airton Cabral de Andrade – PUCRS

---

Porto Alegre

2011

Dedico este trabalho de conclusão de curso à minha mãe, ao meu padrasto, ao meu irmão e a minha namorada que tanto me apoiaram e incentivaram o meu crescimento profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Mestre Délcio Basso e à Professora Mestre Maria Emília Baltar Bernasiuk pelas suas orientações, incentivos e oportunidade de aprendizado.

À Professora Mestre Maria do Carmo Lagreca pela sua ajuda e sugestão para realização deste trabalho.

À minha namorada Caroline, que compreendeu que a distância neste período da graduação era necessária para o meu crescimento profissional, sendo carinhosa, dedicada e amável.

À minha mãe, ao meu padrasto e ao meu irmão por terem me proporcionado uma base familiar sem a qual eu não seria a pessoa batalhadora que sou hoje.

Aos ex-colegas de serviço e amigos da manutenção, Sandro Fernandes Firmino, Maurício Nogueira Maciel da Silva, Fábio Borba Teresa Santos, Nalini da Silva Pereira, Douglas Guzinski, Maximiliano Santos da Rocha, Rodrigo Weber e André Accurso pela ajuda para realização deste trabalho.

Aos meus tios José Altair e Laura e à minha prima Paola, que me acolheram em sua casa como um filho e irmão, respectivamente, neste período de graduação.

E a todas as outras pessoas que me ajudaram a obter minha formação de nível superior.

## RESUMO

A modelagem matemática para os processos de transmissão de energia em forma de calor por radiação e por convecção é relativamente simples e dessa forma esses mecanismos de transferência de energia são abordados qualitativa e quantitativamente nos atuais livros textos destinados à graduação em Física. Já o processo de transferência de energia em forma de calor por convecção é frequentemente tratado apenas qualitativamente nestes mesmos livros e isto sugere que tal abordagem deve-se à grande dificuldade em se determinar o coeficiente de convecção, fator que contribui para a modelagem matemática complexa presente nos livros de fenômenos de transporte. Visando contemplar a modelagem da convecção de uma forma acessível aos alunos de Física Geral, este trabalho utiliza a construção de um aparato experimental (constituído, basicamente, de um cano de PVC envolvido por uma bobina feita de fio de cobre por onde passa uma corrente elétrica, termopares fixados na superfície do cano e um ventilador para forçar a passagem de ar por dentro do cano), juntamente com modelos consagrados no meio científico como meio de validação para um modelo matemático proposto por BASSO, onde é apresentada uma equação empírica para determinação do coeficiente de convecção.

**Palavras-Chave:** Convecção natural. Convecção forçada, Modelagem matemática da convecção.

## ABSTRACT

The mathematical modeling on the processes of energy transmission as heat by radiation and convection is relatively simple and thus these mechanisms of energy transfer are discussed qualitatively and quantitatively in current undergraduate physics textbooks. Since the process of energy transfer as heat by convection is often treated only qualitatively in these same books and this suggests that this approach is due to the great difficulty on determining the convection coefficient, a factor that contributes to this complex mathematical modeling in the books of transport phenomena. Seeks to include the modeling of convection in a accessible way to students of general physics, this work uses the construction of an experimental apparatus (consisting basically of a PVC pipe surrounded by a coil made of copper wire through which an electric current passes, thermocouples fixed on the surface of the pipe and a fan to force air flow inside the pipe), along with models established in the scientific community as a means of validation for a mathematical model proposed by BASSO, which is presented an empirical equation to determine the convection coefficient.

**Keywords:** Natural convection. Forced convection. Mathematical convection modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte de uma parede homogênea de espessura $\Delta x$ , ilustrando regime transitório e regime permanente. ....	12
Figura 2: Parede pela qual se dá o fluxo de calor .....	14
Figura 3: Cano de PVC com cortes. ....	22
Figura 4: Fio de cobre esmaltado parcialmente enrolado ao longo da parte central do cano de PVC. ....	23
Figura 5: Foto mostrando parte do enrolamento com fio de cobre envolvido com papel alumínio. ....	23
Figura 6: Foto dos medidores de temperatura utilizados. ....	24
Figura 7: Foto da montagem final do aparato experimental. ....	25
Figura 8: Foto do ventilador (cooler de computador). ....	25
Figura 9: Foto do ventilador acoplado na base de madeira juntamente com o favo no cano de plástico. ....	26
Figura 10: Foto do ventilador em funcionamento, fixado numa das extremidades do cano de PVC. ....	27
Figura 11: Foto do anemômetro digital utilizado para a calibração do ventilador. ....	28
Figura 12: Foto do aparato experimental para determinação do coeficiente de convecção. ....	28
Figura 13: Foto do termopar móvel acoplado na base de madeira, para medir a temperatura de saída do ar. ....	29
Figura 14: Gráfico de $\Delta T / (C + \Delta T)$ em função de $\Delta T$ para valores de C igual a 0,10°C, 0,20°C e 0,30°C. ....	31
Figura 15: Desenho da secção transversal do cano de PVC ilustrando 5 anéis circulares, cada qual delimitado por dois pontos com diferentes raios. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: velocidade do ar em função da tensão aplicada no ventilador. ....	27
Tabela 2: determinação empírica da constante C com valor de 0,10°C, 0,15°C, 0,20°C, 0,25°C e 0,30°C, considerando variações de temperatura de 0 à 10 °C, ao passo de 0,5°C. ....	32
Tabela 3: velocidade média do ar em função da tensão aplicada no cooler. ....	33
Tabela 4: temperatura da superfície em três pontos e temperatura média da superfície em função da velocidade média do ar. ....	34
Tabela 5: temperatura média de saída do ar em função da velocidade média do ar. ....	35
Tabela 6: variação de temperatura do ar, potência elétrica dissipada, potência removida pelo ar e percentual removido por convecção. ....	37
Tabela 7: valores do coeficiente de convecção do modelo em função da variação de temperatura e da velocidade média do ar. ....	38

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Objetivo .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Definição geral dos processos de transmissão de calor .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Regime de transmissão de calor .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Condução .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Radiação.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5 Convecção.....</b>	<b>17</b>
<b>2.6 O modelo proposto por Basso.....</b>	<b>19</b>
<b>3 MeTODologia .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Descrição do Aparato Experimental.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Calibração do ventilador .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Procedimento durante a coleta de dados.....</b>	<b>28</b>
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 Análise de livros textos destinados à graduação .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 . Comparação do modelo de BASSO com modelos já consagrados .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Determinação do valor da constante C inclusa na equação do modelo de BASSO .....</b>	<b>31</b>
<b>4.4 Resultados encontrados com o uso do aparato experimental .....</b>	<b>33</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos de transmissão de energia em forma de calor por radiação e por condução são geralmente apresentados de forma satisfatória nos livros textos adotados nas disciplinas de Física Geral, mesmo por que a modelagem matemática para tais processos é relativamente simples. No entanto, a abordagem da transmissão de calor por convecção costuma ser superficial e, frequentemente, apenas qualitativa, mesmo sendo esse o mecanismo de troca de calor predominante nas condições ambientais.

Consultando-se edições atuais de livros de Física Geral de autores consagrados, verificou-se que a transmissão de calor por convecção está sendo abordada apenas qualitativamente, embora em edições passadas a abordagem quantitativa desse fenômeno seja apresentada para diferentes situações. Por outro lado, autores que são considerados referências na área de transmissão de calor apresentam uma modelagem para o mecanismo de transmissão por convecção que, na maioria das vezes, só é estudada nas disciplinas que abordam Fenômenos de Transporte e que empregam uma matemática ainda não disponível aos alunos de Física Geral.

O presente trabalho é um aperfeiçoamento do Projeto de Iniciação Científica *Modelagem da Transmissão de Calor por Convecção: uma abordagem acessível aos alunos de Física Geral*, do qual o autor participou como bolsista PUC-BPA, no ano de 2010, sob orientação dos professores Délcio Basso e Maria Eulália Pinto Tarragó. Tal projeto partiu do modelo matemático elaborado previamente por Délcio Basso, em 1999, e concluiu com a construção de um aparato experimental que permite estudar o processo da convecção de calor. Neste TCC pretende-se medir os parâmetros que determinam o valor do coeficiente de convecção, validando, desta forma, o modelo proposto.

### 1.1 OBJETIVO

#### 1.1.1 Objetivo Geral

Aperfeiçoar um modelo de transmissão de calor por convecção, que foi desenvolvido previamente (BASSO, 1999), o qual permite determinar potências

térmicas transferidas por convecção natural e forçada usando um formalismo matemático mais acessível aos alunos iniciantes em Física Geral.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Com o propósito de contribuir para uma descrição da transmissão de energia em forma de calor por convecção, empregando um modelo teórico de complexidade mais adequada ao nível do conhecimento dos alunos de Física Geral, pretende-se:

- rever o surgimento da equação previamente proposta por BASSO (1999) para a transmissão de calor por convecção;
- verificar a influência de cada parcela da equação, a saber, a da convecção natural e a da forçada (ação do vento);
- comparar os valores obtidos com a equação proposta com aqueles obtidos através de modelos mais elaborados;
- investigar como se comportam os parâmetros temperatura, velocidade do vento e potência térmica no aparato experimental desenvolvido para o estudo experimental da transmissão de calor por convecção.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

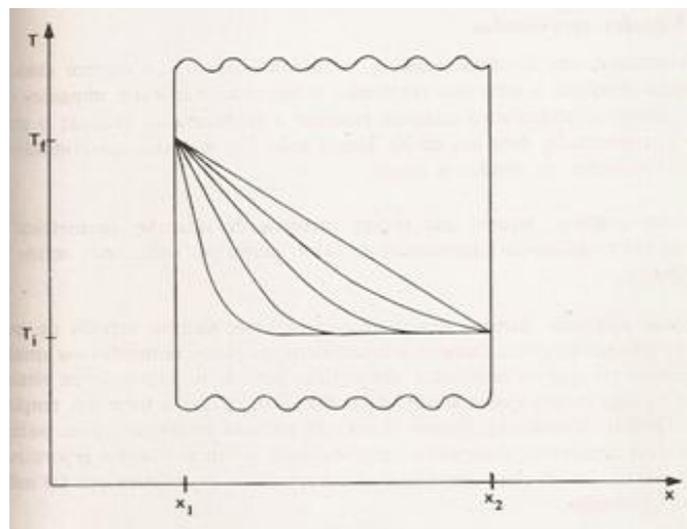
### 2.1 DEFINIÇÃO GERAL DOS PROCESSOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

Quando há uma diferença de temperatura entre regiões ou quando dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato ocorre uma transferência de energia. Esse processo é denominado transmissão de calor (ARAÚJO, 1978). Quando um material permite facilmente a transferência de energia por diferença de temperatura, este é chamado de condutor térmico, e quando um material dificulta essa transmissão, chamamos o mesmo de isolante térmico (YOUNG & FREEDMAN, 2008).

### 2.2 REGIME DE TRANSMISSÃO DE CALOR

Para melhor estudar o processo de transmissão de energia em forma de calor, vamos supor uma parede homogênea, no formato de um paralelepípedo, de comprimento  $\Delta X$ , em que suas faces estejam isoladas termicamente, exceto duas paralelas e opostas, como mostrado na Figura 1.

**Figura 1: Corte de uma parede homogênea de espessura  $\Delta x$ , ilustrando regime transitório e regime permanente.**



Fonte: ARAÚJO (1978)

Inicialmente estas faces encontram-se a uma mesma temperatura  $T_i$ , portanto, não há transmissão de energia em forma de calor entre as mesmas.

Num determinado instante de tempo  $t$ , a temperatura de uma das faces é subitamente elevada a uma temperatura  $T_f$ . Com isso, haverá um transporte de energia em forma de calor na direção da face de menor temperatura. Mantendo-se  $T_i$  e  $T_f$  constantes, em cada instante de tempo  $t$ , um determinado ponto  $P$  na secção reta da parede terá uma temperatura diferente. Com o passar do tempo, os pontos da secção reta não mais variarão suas temperaturas (ARAÚJO, 1978).

Através deste exemplo, é possível constatar dois regimes pelos quais ocorrem os modos de transferência de energia em forma de calor. Quando em um determinado ponto da parede ocorre alteração de sua temperatura com o passar do tempo, esta está em regime transitório. Já quando a temperatura de um determinado ponto da parede se conserva ao longo do tempo, diz-se que a parede está em regime estacionário ou permanente.

Segundo ARAÚJO (1978), as definições de regime estacionário e regime transitório se dão em termos de fluxo de calor. Quando o fluxo de calor no interior da parede é constante, o regime é estacionário, ou seja, o fluxo que entra é igual ao fluxo que sai. Já no regime transitório ocorre uma variação de fluxo de calor nas diferentes secções da parede, logo o fluxo de entrada é diferente do fluxo de saída.

A transferência de energia em forma de calor se dá através de três modos distintos: condução, radiação e convecção.

### 2.3 CONDUÇÃO

Neste processo a transmissão de energia térmica se dá de uma região de temperatura mais elevada para uma região de menor temperatura, devido à interação entre as moléculas. Como os átomos da região mais quente possuem em média uma energia cinética maior do que a energia cinética dos átomos da região mais fria, ocorrem colisões entre eles e parte da energia é transferida em forma de calor, sem apresentar deslocamento de massa (YOUNG & FREEDMAN, 2008).

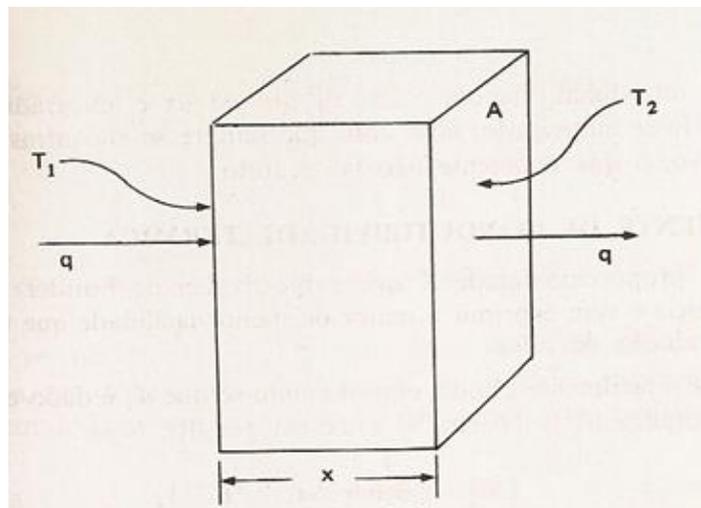
Deve-se ao cientista francês Jean-Baptiste Joseph *Fourier* a adequação do primeiro modelo matemático, contemplando o processo de transmissão de energia em forma de calor por condução. Fourier analisou o fluxo de calor que atravessava

uma parede de secção reta constante, com todas as faces isoladas termicamente, exceto duas paralelas e opostas (ARAÚJO, 1978).

Assim sendo, assegurou-se que o fluxo a ser medido experimentalmente se daria apenas em uma dimensão. Portanto, verificou que o fluxo de calor era diretamente proporcional à área e à diferença de temperatura entre as faces paralelas e opostas, sendo suas temperaturas mantidas constantes, e inversamente proporcional à espessura da parede.

A Figura 2 mostra o sentido do fluxo de calor, as dimensões da parede e a temperatura de cada face desta parede.

**Figura 2: Parede pela qual se dá o fluxo de calor**



Fonte: ARAÚJO (1978)

Portanto:

$$\left( \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) \propto \frac{A \Delta T}{x} \quad (1)$$

onde

$(\Delta Q/\Delta t)$  é a potência térmica transferida por condução;

$A$  é a área da secção reta da parede;

$\Delta T$  é a variação de temperatura das faces opostas da parede;

$x$  é a espessura da parede.

Observando o fenômeno com outros materiais e mantendo  $A$ ,  $\Delta T$  e  $x$  constantes, Fourier averiguou que o fluxo de calor mudava em cada material. Com essa observação ele introduziu um coeficiente característico de cada material representado por  $k$  e denominado coeficiente de condutividade térmica. Esse fator

de proporcionalidade indica se um material apresenta maior ou menor facilidade de conduzir calor. Com isso a equação 1 passou a ter a seguinte notação:

$$\left( \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \frac{kA\Delta T}{x} \quad (2)$$

A equação 2 é restrita a configuração geométrica em que a área, normal ao fluxo de calor, é constante. Para uma disposição em que a área não é constante, Fourier fez uso de uma área elementar  $dA$ , com espessura  $dx$  e temperatura  $dT$ . Dessa forma, a equação 2 assumiu uma nova ordenação:

$$\left( \frac{dQ}{dt} \right) = -kdA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

O sinal negativo introduzido nesta equação é referente ao fato de que o gradiente  $dT/dx$  é decrescente, ou seja, o fluxo de calor é positivo (ARAÚJO, 1978).

## 2.4 RADIAÇÃO

Na radiação o processo de transmissão de energia ocorre por meio de ondas eletromagnéticas de um corpo a alta temperatura para um corpo de temperatura mais baixa, estando estes corpos separados no espaço, mesmo que haja vácuo entre eles, até atingirem o equilíbrio térmico. O Sol, por exemplo, irradia energia para a Terra através do vácuo. Analogamente sentimos a energia em forma de calor proveniente das brasas de uma lareira. Essa forma de emissão de energia é comum a todos os objetos e a formação das ondas eletromagnéticas se deve à oscilação de cargas elétricas de átomos que os constituem (KNIGHT, 2009).

Qualquer corpo que esteja a uma temperatura acima do zero absoluto emite energia sob a forma de radiação eletromagnética. Em um corpo à temperatura ambiente, por exemplo, grande parte de sua energia é emitida como ondas infravermelhas em que seu comprimento de onda é maior que o comprimento de onda da luz visível. Já um corpo a  $800^{\circ}\text{C}$  emite radiação na faixa do visível, adquirindo luminosidade própria próximo ao vermelho. Desta forma, à medida que a temperatura de um corpo é elevada, este emite ondas eletromagnéticas com comprimentos de ondas de valores menores. O filamento de uma lâmpada incandescente, cuja temperatura fica em torno de  $3000^{\circ}\text{C}$ , emite radiação na faixa do visível, correspondente à luz branca (YOUNG & FREEDMAN, 2008).

Quando uma radiação eletromagnética incide sobre uma superfície, parte dessa radiação é absorvida, parte é refletida e outra parte, se houver, é transmitida. Assim sendo, baseado no princípio da conservação da energia, pode se afirmar que a soma das radiações absorvida, refletida e transmitida é igual à radiação incidente, o fluxo de calor total emitido por um determinado corpo será a soma do fluxo de calor gerado pela parcela absorvida por uma superfície próxima ao corpo, do fluxo de calor devido à reflexão sofrida pela radiação incidente e do fluxo de calor correspondente à parte que atravessa a superfície.

Portanto:

$$q_t = q_a + q_r + q_d \quad (4)$$

onde

$q_t$  é o fluxo de calor total emitido;

$q_a$  é o fluxo de calor gerado pela parcela absorvida;

$q_r$  é o fluxo de calor devido à reflexão;

$q_d$  é o fluxo de calor que atravessa a superfície .

Dividindo-se por  $q_t$  os termos da equação 4, chega-se a:

$$\frac{q_a}{q_t} + \frac{q_r}{q_t} + \frac{q_d}{q_t} = 1 \quad (5)$$

onde

$\frac{q_a}{q_t}$  é conhecida por absortividade e representada por  $\alpha$ ;

$\frac{q_r}{q_t}$  é denominada refletividade e representada por  $\rho$ ;

$\frac{q_d}{q_t}$  é conhecida por transmissividade e representada por  $\tau$ .

Desta forma, a equação 5 pode ser reescrita no seguinte formato:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (6)$$

Como na maioria dos materiais sólidos, que são opacos, é admitido que a transmissividade seja nula, e a equação 6 fica da seguinte forma:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (7)$$

Um corpo capaz de absorver todas as radiações incidentes sobre ele é chamado corpo negro, em que a absorvidade é unitária e, conseqüentemente, refletividade nula, baseado na equação 7. Por outro lado, quando um corpo absorver igualmente, mas não integralmente, todos os comprimentos de onda, ele é denominado corpo cinzento ou corpo cinza.

Na propagação de calor por radiação, a taxa de energia de uma superfície é diretamente proporcional à área e à quarta potência da temperatura absoluta. A quantidade de calor emitida no tempo também depende da natureza do corpo. Essa dependência é chamada de emissividade, que é a razão entre o poder de emissão de um corpo qualquer e o poder de emissão do corpo negro, que é um número adimensional compreendido entre 0 e 1, equivalente à absorvidade (ARAÚJO, 1978). Desta forma, a equação que representa este fenômeno é a seguinte:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (8)$$

onde

$(\Delta E/\Delta t)$  é a potência irradiada, em W;

$\varepsilon$  é a emissividade;

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ;

$A$  é a área, em  $\text{m}^2$ ;

$T$  é a temperatura, em K.

Como os corpos, além de emitirem, também absorvem a radiação emitida por corpos que o circundam e que estão a uma temperatura  $T_0$ , a taxa resultante com o qual o corpo irradia energia térmica é dada por:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (9)$$

onde

$(\Delta Q/\Delta t)$  é a potência absorvida, em W.

## 2.5 CONVECÇÃO

O processo de transmissão de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura chama-se convecção.

Neste processo a energia em forma de calor é transmitida devido ao movimento de massa entre regiões do fluido.

Em uma superfície que esteja a uma temperatura acima da temperatura do fluido envolvente, a transmissão de energia em forma de calor se dará, primeiramente por condução, da superfície para as partículas do fluido próximas à mesma. Após, estas partículas se deslocarão até uma região de menor temperatura (correntes de convecção), devido a forças de empuxo ocasionadas por diferença de densidade (se tratando de um mesmo material, as partículas mais quentes são menos densas que partículas menos quentes) ou por um agente externo, transferindo parte de sua energia para outras partículas do fluido. Esse fenômeno também é válido em situações onde essas partículas do fluido cedem energia em forma de calor.(KREITH, 1977).

Como recém dito, quando uma superfície sólida troca energia em forma de calor com um fluido, há combinação de condução e transporte de massa. Estando a superfície sólida mais aquecida que o fluido haverá troca de energia em forma de calor entre o sólido e as partículas fluidas. A energia adquirida por estas partículas neste processo causará uma movimentação no interior do mesmo. Visto que ocorrerá deslocamento do fluido, será conveniente conhecer a forma do escoamento deste (KREITH, 1977).

O escoamento é dito laminar quando o movimento do fluido é altamente ordenado, sendo possível identificar a direção em que as partículas fluidas se movem. Neste processo, se a temperatura de uma placa plana for diferente da temperatura do fluido, a troca de energia se dará somente por condução molecular no interior do fluido, bem como entre fluido e placa plana.

Outra forma é denominada escoamento turbulento, sendo caracterizado por uma movimentação altamente irregular, ocorrendo condução, mas agora auxiliada por inúmeros turbilhões, que possibilitam a mistura entre partículas com maior e menor energia.

Nesses mecanismos de transporte de energia, o movimento de um fluido pode ser induzido por dois processos. O primeiro é denominado de convecção natural, em que o gradiente de temperatura causa diferenças de densidade, originando um movimento de mistura (transporte de massa). Já quando o transporte de massa é induzido por agente externo, como por exemplo, um ventilador, chama-se o processo de convecção forçada.

A energia em forma de calor transferida por convecção, por unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido, pode ser calculada através da relação proposta por Isaac Newton, conhecida como lei de resfriamento de Newton.

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA\Delta T \quad (10)$$

onde

$H$  é a potência térmica transferida por convecção, em W;

$h$  é o coeficiente de convecção, em  $W/m^2\text{°C}$ ;

$A$  é a área da superfície, em  $m^2$ ;

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, em  $\text{°C}$  ou K.

A simplicidade desta equação é ilusória, pois não explicita as dificuldades envolvidas no estudo da convecção. A complexidade está na determinação do coeficiente de convecção, visto que este depende de um grande número de variáveis tais como inclinação, rugosidade e formato da superfície bem como viscosidade, densidade e movimento do fluido.

## 2.6 O MODELO PROPOSTO POR BASSO

Com o intuito de determinar a potência térmica transferida por convecção, natural e forçada, BASSO propôs previamente uma equação para a transmissão de energia em forma de calor por convecção baseada na equação dimensional dada por McAdams, citado em DUFFIE & BECKMAN (1974), que se refere à troca de calor entre um fluido e uma placa plana devido à incidência de vento - convecção forçada (equação 11).

$$h_{\text{vento}} = 5.7 + 3.8v \quad (11)$$

onde

$h_{\text{vento}}$  é o coeficiente de convecção do vento;

$v$  é a velocidade do vento.

BASSO também se baseou nos dados contidos no Quadro 1, que permitem calcular o coeficiente de convecção natural entre o ar e determinadas superfícies apresentados a seguir (SEARS & ZEMANSKY;1973).

**Quadro 1: coeficientes de convecção natural no ar a pressão atmosférica em função de diferentes  $\Delta T$  (°C), da forma da peça e da orientação da mesma.**

Peça	Coeficiente de convecção h (W/m <sup>2</sup> °C)
Chapa horizontal, voltada para cima	2,49 $(\Delta T)^{1/4}$
Chapa horizontal, voltada para baixo	1,31 $(\Delta T)^{1/4}$
Chapa vertical	1,77 $(\Delta T)^{1/4}$
Tubo horizontal ou vertical (diâmetro D, em cm)	4,19 $\left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{1/4}$

Fonte: Sears & Zemansky (1973), quadro adaptado pela mudança de unidades.

Assim, surgiu, inicialmente, a seguinte equação empírica:

$$h = 2.2(\Delta T)^{0.25} + 3.8v \quad (12)$$

onde

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, em °C ou K;

$v$  é a velocidade do vento, em m/s.

Em um primeiro momento pensou-se que a equação 11 poderia descrever o processo de convecção. Porém esta equação de fato não pode descrever um processo de troca de energia em forma de calor, pois esse pressupõe uma diferença de temperatura. Nesta equação percebe-se que mesmo quando  $\Delta T$  é nulo, ocorrerá a convecção, o que não é verdadeiro.

Então, buscando sanar tal dificuldade sem fugir ao propósito do modelo matemático proposto e baseando-se na equação 11 e nas expressões que permitem calcular o coeficiente de convecção natural do quadro 1, BASSO propõe a seguinte equação empírica:

$$h = 2,2(\Delta T)^{0,25} + F\left(\frac{\Delta T}{C + \Delta T}\right)v \quad (13)$$

onde

$h$  é o coeficiente de convecção, em  $W/m^2\text{°C}$ ;

$\Delta T$  é o módulo da diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, em  $\text{°C}$  ou  $K$ ;

$v$  é a velocidade do vento, em  $m/s$ ;

$F$  é uma constante, em  $J/m^3\text{°C}$ ;

$C$  é uma constante, em  $\text{°C}$  ou  $K$ .

A parcela  $\Delta T/(C + \Delta T)$  na equação 13 é para contemplar a diferença de temperatura inerente a qualquer processo de transmissão de calor. Dessa forma, se  $\Delta T$  for nulo, não haverá transmissão convectiva, e, portanto, o ajuste na equação 12 é válido. No entanto o valor de  $C$  precisa ser estimado.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1

Inicialmente, verificou-se a abordagem do fenômeno da convecção em alguns livros destinados à graduação em Física, em edições atuais e passadas. Após, determinou-se o valor da constante C inclusa na equação idealizada por BASSO (1999), em que o método utilizado foi o de tentativa e erro.

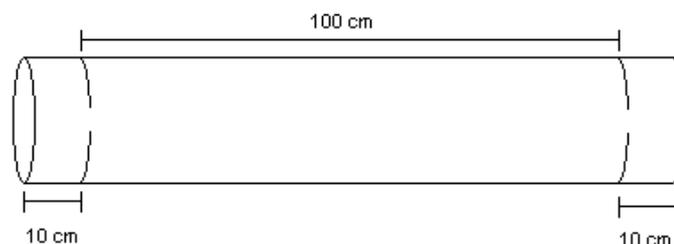
No decorrer do trabalho, aperfeiçoou-se o modelo de transmissão de calor por convecção natural e forçada, que já vinha sendo utilizado por BASSO, desde 1999. Para tanto, construiu-se um aparato experimental que permitiu estudar o processo da convecção.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Com o intuito de determinar a taxa de transferência de energia em forma de calor por convecção entre uma parede e o ar, foi confeccionado um aparato experimental composto, basicamente, por um cano de PVC, com 120 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro. A escolha da geometria cilíndrica se deve ao fato de que é a que mais se aproxima, considerando a distribuição de temperatura, de uma parede plana infinitamente grande.

Primeiramente foram feitos 3 cortes ao longo do perímetro transversal do cano de PVC, cada qual com 9,4 cm de comprimento, a 10 cm de distância de cada extremidade, para reduzir a transferência de energia em forma de calor por condução para a região do cano onde não havia a bobina. A Figura 3 ilustra parte de dois dos três cortes próximos a cada extremidade do cano:

**Figura 3: Cano de PVC com cortes.**



Fonte: O autor (2010)

Após, este cano foi envolvido com fio de cobre esmaltado, com 0,34 mm de diâmetro, ao longo de 100 cm do seu comprimento (parte central do cano), tendo aproximadamente 2900 espiras, com resistência elétrica em cerca de 190  $\Omega$ . A Figura 4 mostra a realização desta etapa.

**Figura 4: Fio de cobre esmaltado parcialmente enrolado ao longo da parte central do cano de PVC.**



Fonte: O autor (2010)

Os terminais do fio de cobre foram conectados numa fonte de tensão alternada de 127 V e, devido ao efeito Joule, o fio foi aquecido, elevando a temperatura do ar dentro do cano, iniciando a convecção.

Para determinar a potência térmica transferida por convecção foi tomada uma medida que minimizasse a perda de energia por radiação. Para tal propósito, utilizou-se papel alumínio envolvendo os 100 cm de comprimento do cano, por onde se enrolou o fio de cobre, visando minimizar a transmissão de calor por radiação para a parte externa do cano de PVC. A Figura 5 mostra parte deste processo.

**Figura 5: Foto mostrando parte do enrolamento com fio de cobre envolvido com papel alumínio.**



Fonte: O autor (2010)

A transferência de energia em forma de calor por radiação na superfície interna, devido à geometria cilíndrica, pode ser desprezada uma vez que as trocas por radiação ocorrem entre elementos de superfície opostos do cano, que emitem e absorvem a mesma potência de energia eletromagnética, não tendo variação em suas temperaturas por influência desse fenômeno.

Para medição da temperatura externa do cano utilizaram-se dois termopares, um fixado na metade do comprimento do cano e outro situado próximo a um dos cortes feitos no cano.

Com o objetivo de determinar a temperatura média interna, três termopares colocados na superfície foram fixados. Assim, um termopar foi fixado na metade do comprimento do cano e os outros dois foram colocados cerca de 11 cm de distância de cada extremidades, junto ao corte no cano, ou seja, numa posição onde havia a bobina na parte externa.

A Figura 6 mostra a foto dos medidores de temperatura em que os termopares foram conectados durante a coleta de dados.

**Figura 6: Foto dos medidores de temperatura utilizados.**



Fonte: O autor (2011)

Após, todo o conjunto, composto pelo cano de PVC de 120 cm de comprimento, pela bobina de fio de cobre e papel alumínio envolvendo-a, e termopares fixados na superfície externa, foi envolvido com fibra cerâmica de 2,5 cm (2 polegadas) de espessura e 0,50 m<sup>2</sup> de área, para isolar termicamente o aparato do ambiente.

A Figura 7 mostra a montagem final desse aparato experimental com os materiais de apoio, bem como todos os equipamentos utilizados para as coletas de dados.

**Figura 7: Foto da montagem final do aparato experimental.**



Fonte: O autor (2010)

Para originar um fluxo de ar forçado, acoplou-se um ventilador (cooler de computador) numa base feita de madeira, com o qual a velocidade do vento podia ser alterada. Para tal propósito, ligou-se esse ventilador numa fonte regulável de tensão contínua, em que o máximo de tensão aplicada foi 15 V. A Figura 8 mostra o ventilador utilizado.

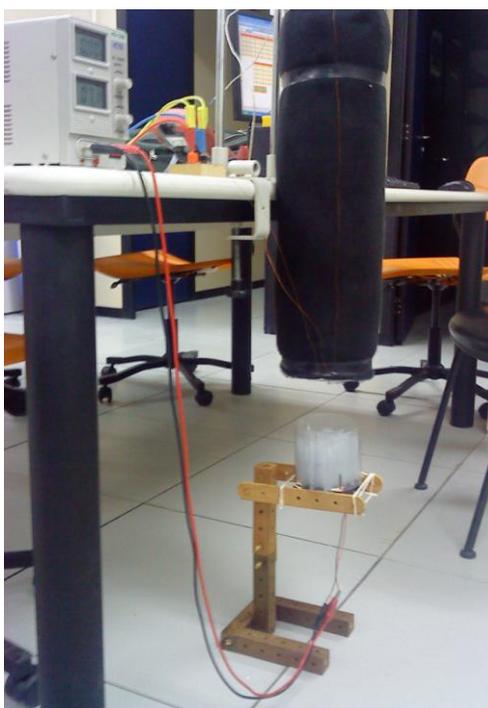
**Figura 8: Foto do ventilador (cooler de computador).**



Fonte: O autor (2010)

Para que o escoamento do vento ao longo do cano se aproximasse de um escoamento laminar foi colocado um favo feito de um material plástico, dentro de um cano plástico, na frente do ventilador. A Figura 9 mostra o ventilador com o favo de plástico acoplado na saída de ar e a posição em que este ventilador foi colocado, durante a coleta de dados.

**Figura 9: Foto do ventilador acoplado na base de madeira juntamente com o favo no cano de plástico.**



Fonte: O autor (2011)

Esta base, sustentando o ventilador e o favo de plástico, foi colocada a uma distância de 10 cm da extremidade inferior do cano de PVC.

A medida da velocidade do ar foi feita com o uso de um anemômetro digital, da marca Gubintec (modelo ICEL AN – 10).

### **3.3 CALIBRAÇÃO DO VENTILADOR**

Para determinar a velocidade do vento que passou pelo interior do cano foi utilizado um anemômetro digital. Este aparelho de medida foi colocado na extremidade oposta à extremidade onde se situava o ventilador, e este foi submetido a uma tensão máxima de 15 V. Foi-se variando a tensão com o auxílio de uma fonte de

tensão variável e medindo a velocidade de saída do vento para cada valor de tensão. A Tabela 1 apresenta a velocidade do vento para diferentes valores de tensão.

**Tabela 1: velocidade do ar em função da tensão aplicada no ventilador.**

V (V)	v <sub>ar</sub> (m/s)
5,0	0,6
6,0	0,7
7,0	0,8
8,0	1,0
9,0	1,2
10,0	1,4
11,0	1,5
12,0	1,7
13,0	1,9
14,0	2,0
15,0	2,2

Fonte: O autor (2010)

A Figura 10 se refere à foto do ventilador, conectado numa das extremidades do cano, em funcionamento.

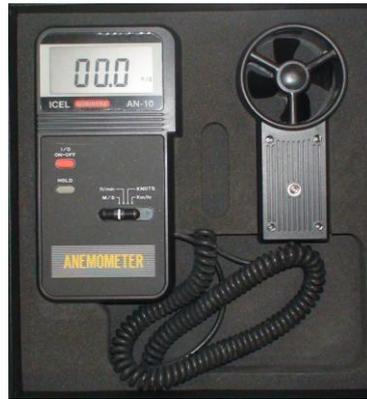
**Figura 10: Foto do ventilador em funcionamento, fixado numa das extremidades do cano de PVC.**



Fonte: O autor (2010)

A Figura 11 se refere à foto do anemômetro digital, utilizado na medição da velocidade do ar dentro do cano de PVC.

**Figura 11: Foto do anemômetro digital utilizado para a calibração do ventilador.**



Fonte: O autor (2010)

### **3.4 PROCEDIMENTO DURANTE A COLETA DE DADOS**

A coleta de dados foi feita com o cano fixado na posição vertical, conforme a Figura 12, e para isso utilizou-se uma base composta por materiais de sustentação.

**Figura 12: Foto do aparato experimental para determinação do coeficiente de convecção.**



Fonte: O autor (2011)

Primeiramente, foi feita a medida das temperaturas em cada termopar com o aparato desligado da fonte de tensão e com o ventilador desligado. Após, ligou-se os terminais do fio de cobre na fonte de tensão alternada de 127 V e esperou-se a termalização, ou seja, nessa etapa houve apenas a convecção natural.

Na sequência, ligou-se o ventilador na fonte de tensão contínua e foi-se variando a velocidade do vento conforme a tensão aplicada e, para cada valor da velocidade do vento, fez-se medidas de temperatura em cada termopar fixado no cano de PVC. Estas medidas foram realizadas quando ocorreu a termalização, e com o uso de um termômetro com graduação de 0,5 °C fez-se medidas da temperatura ambiente.

A temperatura de saída do ar na extremidade superior do cano foi medida com um termopar acoplado em um canudo de plástico, em um ponto cerca de 10 cm dentro do cano. Esta última medida de temperatura foi feita em seis pontos diferentes: no centro do cano, a 1, 2, 3, 4 e 4,6 cm de distância do seu centro, sendo que esta última posição se refere a um ponto próximo à superfície interna do cano (sem contato com a superfície). A variação das posições do termopar foi possível devido ao uso de uma régua onde o canudo envolvendo o termopar foi fixado. Para tal propósito, colocou-se este conjunto (régua, canudo e termopar) entre madeiras de sustentação, conforme mostra a Figura 13.

**Figura 13: Foto do termopar móvel acoplado na base de madeira, para medir a temperatura de saída do ar.**



Fonte: O autor (2011)

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DE LIVROS TEXTOS DESTINADOS À GRADUAÇÃO

Em uma verificação de alguns livros destinados à graduação em Física, onde o assunto ao qual se refere este trabalho é apresentado, foram feitas observações quanto à forma em que estes processos físicos são abordados. Em todos os livros pesquisados, a transmissão de energia em forma de calor por condução é abordada qualitativa e quantitativamente, através de exemplos baseados em situações cotidianas. Os cálculos são relativamente acessíveis ao aluno iniciante na graduação em Física. Já o fenômeno da transmissão de energia em forma de calor por radiação é tratado, ora de forma qualitativa e quantitativa, partindo de exemplos do dia-a-dia, como se verificou nos livros YOUNG & FREEDMAN (2008), KNIGHT (2009) e SERWAY (2004), ora de forma qualitativa, como no livro HALLIDAY, RESNICK & WALKER (2002).

A transmissão de energia em forma de calor por convecção é apresentada apenas qualitativamente em todos os livros analisados e isto sugere que esse fenômeno tenda a ser abordado de forma cada vez mais superficial nos livros de Física Geral para a graduação, visto que em edições passadas sua descrição era de forma aprofundada. É conveniente salientar que tanto a descrição conceitual quanto a quantitativa desses e de qualquer fenômeno físico são fatores determinantes para uma contextualização por parte do aluno, e, a partir dessa perspectiva, devemos dar a devida importância a assuntos mais complexos dessa ciência, mesmo mediante uma adequação de um processo físico.

### 4.2 . COMPARAÇÃO DO MODELO DE BASSO COM MODELOS JÁ CONSAGRADOS

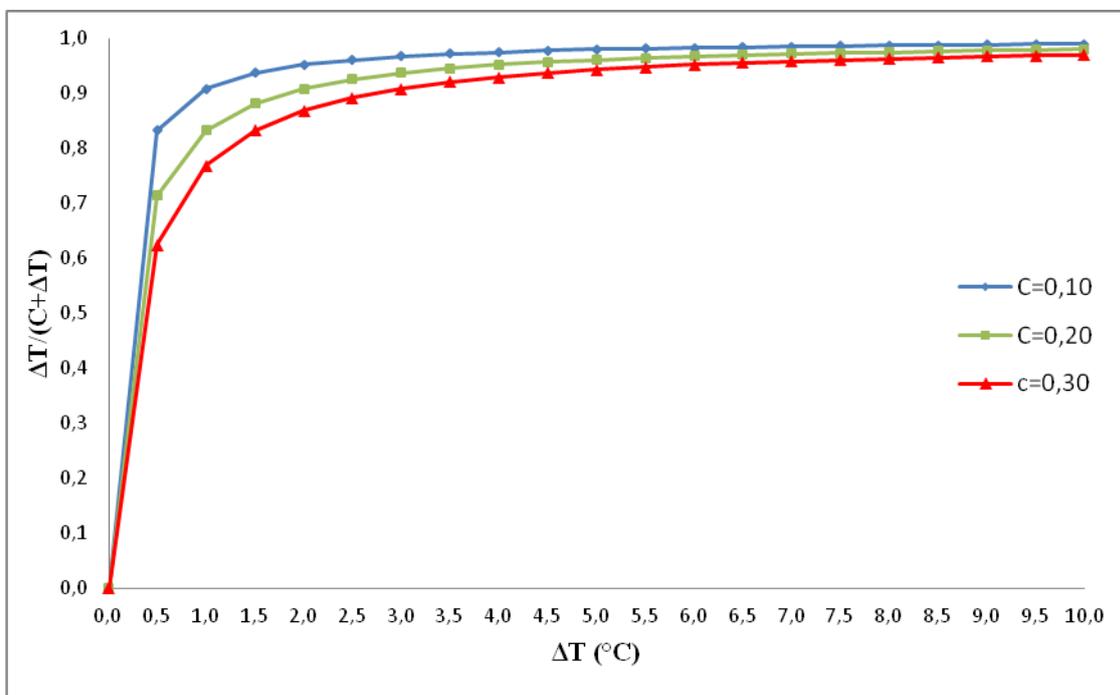
Até o momento não foi encontrado nos livros pesquisados (*Fenômenos de transporte* (BIRD, 2004), *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática* (ÇENGEL, 2009), *Princípios de transferência de calor* (KREITH, 1977), *Fundamentos de transferência de calor e de massa* (INCROPERA, 2008) e *Processos de transmissão de calor* (KERN, 1987)) que abordam o fenômeno da convecção um modelo que sirva como parâmetro para validação do modelo proposto

por BASSO. Na literatura destinada a fenômenos de transportes, a transmissão energia em forma de calor por convecção é destinada a processos industriais, onde as altas temperaturas a que esses processos estão sujeitos impedem qualquer comparação entre os modelos apresentados nestes livros e o modelo sugerido por BASSO e, portanto, não sendo possível a validação por comparação entre estes modelos já consagrados no meio científico e o modelo proposto por BASSO.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DO VALOR DA CONSTANTE C INCLUSA NA EQUAÇÃO DO MODELO DE BASSO

Como a constante  $C$  inclusa na equação proposta pelo modelo de BASSO precisa ser estimada, optou-se pelo procedimento de tentativa e erro. Assim sendo, os seguintes valores  $0,10^{\circ}\text{C}$ ;  $0,15^{\circ}\text{C}$ ;  $0,20^{\circ}\text{C}$ ;  $0,25^{\circ}\text{C}$  e  $0,30^{\circ}\text{C}$ , foram escolhidos e lançados no gráfico de  $\Delta T/(C+\Delta T)$  em função de  $\Delta T$ . Esse gráfico, juntamente com as tabelas de dados referentes ao mesmo são mostrados a seguir.

**Figura 14: Gráfico de  $\Delta T/(C + \Delta T)$  em função de  $\Delta T$  para valores de  $C$  igual a  $0,10^{\circ}\text{C}$ ,  $0,20^{\circ}\text{C}$  e  $0,30^{\circ}\text{C}$ .**



Fonte: O autor (2010)

Nesse gráfico, optou-se por mostrar apenas as curvas para os valores de  $C = 0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C = 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $C = 0,30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para ficar mais evidente o comportamento de cada curva visto que se os valores de  $C = 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $C = 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  fossem mostrados, estes poderiam dificultar a visualização do referido gráfico.

Na Tabela 2 constam todos os valores escolhidos para a constante  $C$  bem como seus resultados para  $\Delta T/(C+\Delta T)$  em função de  $\Delta T$ .

**Tabela 2: determinação empírica da constante  $C$  com valor de  $0,10^{\circ}\text{C}$ ,  $0,15^{\circ}\text{C}$ ,  $0,20^{\circ}\text{C}$ ,  $0,25^{\circ}\text{C}$  e  $0,30^{\circ}\text{C}$ , considerando variações de temperatura de  $0$  à  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ao passo de  $0,5^{\circ}\text{C}$ .**

$C$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T/(C+\Delta T)$				
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,83	0,77	0,71	0,67	0,63
1,0	0,91	0,87	0,83	0,80	0,77
1,5	0,94	0,91	0,88	0,86	0,83
2,0	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87
2,5	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89
3,0	0,97	0,95	0,94	0,92	0,91
3,5	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
4,0	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93
4,5	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
5,0	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
5,5	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95
6,0	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95
6,5	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96
7,0	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96
7,5	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96
8,0	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96
8,5	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97
9,0	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97
9,5	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97
10,0	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97

Fonte: O autor (2011)

Analisando o gráfico da Figura 14, escolheu-se  $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$  como valor para a constante  $C$ , visto que este tende rapidamente à 1 na medida em que as diferenças de temperaturas se elevam e por permitir uma melhor aproximação com os dados experimentais.

#### 4.4 RESULTADOS ENCONTRADOS COM O USO DO APARATO EXPERIMENTAL

A partir das medidas feitas com o aparato experimental, passou-se a calcular as grandezas necessárias para a determinação do coeficiente da confecção pretendido tomando como referencial o modelo idealizado por BASSO. Primeiramente calculou-se a velocidade média do ar em função da tensão aplicada no ventilador, em que os valores constam na Tabela 3, da seguinte forma:

$$\bar{v}_{ar} = \frac{v_{borda} + v_{centro}}{2} \quad (14)$$

**Tabela 3: velocidade média do ar em função da tensão aplicada no cooler.**

$V_{cooler}$ (V)	$v_{ar}$ centro (m/s)	$v_{ar}$ borda (m/s)	$v_{média}$ do ar (m/s)
15,0	2,2	2,0	2,1
14,0	2,0	1,9	2,0
13,0	1,9	1,8	1,9
12,0	1,8	1,6	1,7
11,0	1,6	1,4	1,5
10,0	1,4	1,3	1,4
9,0	1,2	1,1	1,2

Fonte: O autor (2011)

Em seguida calculou-se o valor da temperatura média da superfície interna com os valores das temperaturas medidos nos três pontos onde se fixou os termopares. Na posição em que o termopar dista 11 cm abaixo da extremidade superior mediu-se  $T_1$ , com o termopar fixado no centro do cano mensurou-se  $T_2$  e na posição em que o termopar foi colocado a uma distância de 11 cm acima da extremidade inferior mediu-se  $T_3$ . Estas medidas foram feitas em função de cada valor de velocidade média do ar, após a termalização, e os valores mensurados constam na Tabela 4. O cálculo foi realizado através da seguinte equação:

$$\bar{T}_{superfície...interna} = \frac{2T_2 + T_1 + T_3}{4} \quad (15)$$

**Tabela 4: temperatura da superfície em três pontos e temperatura média da superfície em função da velocidade média do ar.**

$V_{\text{média do ar}}$ (m/s)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_{\text{média da superfície interna}}$ (°C)
2,1	39,3	39,3	28,6	36,6
2,0	40,1	40,0	28,9	37,3
1,9	40,8	40,6	29,2	37,8
1,7	41,1	41,0	29,3	38,1
1,5	42,2	42,1	29,4	39,0
1,4	43,4	43,2	30,0	40,0
1,2	44,7	44,2	30,3	40,9
0,0	61,6	60,5	35,4	54,5

Fonte: O autor (2011)

Após, calculou-se a temperatura média de saída do ar em função da velocidade média do ar, através das medidas feitas com um termopar móvel, colocado em 6 posições diferentes, cada qual a uma certa distância do centro da circunferência do cano de PVC, a saber:

- $T_{5\text{ ar}}$  refere-se à temperatura medida quando se colocou o termopar na posição próxima à superfície interna do cano, a 0,3 cm de distância da borda, com raio igual a 4,6 cm;
- $T_{4\text{ ar}}$  corresponde à temperatura medida quando se colocou o termopar em um ponto afastado de 0,9 cm da borda, com raio igual a 4,0 cm;
- $T_{3\text{ ar}}$  refere-se à temperatura medida com o uso do termopar em uma posição distante 1,9 cm da borda, com raio igual a 3,0 cm;
- $T_{2\text{ ar}}$  corresponde à temperatura medida quando o termopar estava na posição com distância de 2,9 cm da borda, com raio igual a 2,0 cm;
- $T_{1\text{ ar}}$  refere-se à temperatura medida com o termopar em um ponto afastado 3,9 cm da borda, com raio igual a 1,0 cm;
- $T_{\text{ar centro}}$  corresponde à temperatura medida no centro do diâmetro do cano, afastado 4,9 cm da borda.

Os valores obtidos para a temperatura média de saída do ar constam na Tabela 5 bem como os valores de temperatura medidos em cada posição onde se colocou o termopar

**Tabela 5: temperatura média de saída do ar em função da velocidade média do ar.**

$v_{\text{média do ar}} \text{ (m/s)}$	$T_{5 \text{ ar}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{4 \text{ ar}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{3 \text{ ar}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{2 \text{ ar}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{1 \text{ ar}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{ar centro}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{média saída ar}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
2,1	31,3	28,8	27,4	26,7	26,5	26,3	28,0
2,0	31,7	28,9	27,5	26,8	26,6	26,4	28,2
1,9	31,9	29,0	27,7	26,9	26,7	26,6	28,3
1,7	32,3	29,2	27,8	27,1	26,9	26,8	28,5
1,5	33,0	29,6	28,1	27,4	27,2	27,2	28,9
1,4	33,8	30,4	28,8	28,1	27,4	27,4	29,6
1,2	33,7	30,3	28,6	27,8	27,7	27,5	29,5
0,0	48,5	36,5	33,4	32,7	32,3	31,9	35,9

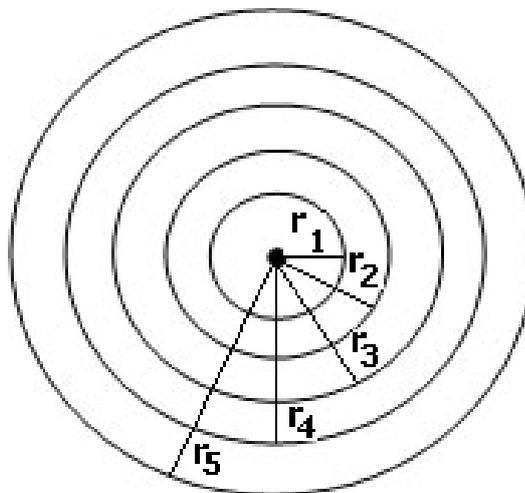
Fonte: O autor (2011)

.A equação utilizada para o cálculo da temperatura média de saída do ar foi a seguinte:

$$\bar{T}_{\text{saída...do...ar}} = \frac{((T_{\text{ar...centro}} + T_{1\text{ar}}) + 3(T_{1\text{ar}} + T_{2\text{ar}}) + 5(T_{2\text{ar}} + T_{3\text{ar}}) + 7(T_{3\text{ar}} + T_{4\text{ar}}) + 5,2(T_{4\text{ar}} + T_{5\text{ar}}))0,5}{21,2} \quad (16)$$

A equação 16 foi escolhida devido às diferentes massas de ar que passaram pelos anéis circulares da secção transversal do cano de PVC, mostrados na figura 15. Cada anel foi delimitado por duas circunferências vizinhas. Escolheu-se um ponto em cada circunferência para realizar as medidas de temperatura de saída do ar. Considerou-se que todos os pontos equidistantes ao centro da circunferência do cano tinham mesma temperatura. Pela área de um anel circular delimitada por duas circunferências vizinhas, passava uma determinada massa de ar, e esta, por sua vez, era diferente das demais massas que passavam pela área dos demais anéis circulares.

**Figura 15: Desenho da secção transversal do cano de PVC ilustrando 5 anéis circulares, cada qual delimitado por dois pontos com diferentes raios.**



Fonte: O autor (2011)

onde

$r_1$  é o raio= 1,0 cm, do centro até o ponto onde mediu-se  $T_{1\text{ ar}}$ ;

$r_2$  é o raio= 2,0 cm, do centro até o ponto onde mensurou-se  $T_{2\text{ ar}}$ ;

$r_3$  é o raio= 3,0 cm, onde mediu-se  $T_{3\text{ ar}}$ ;

$r_4$  é o raio= 4,0 cm, onde mensurou-se  $T_{4\text{ ar}}$ ;

$r_5$  é o raio= 4,6 cm, onde mediu-se  $T_{5\text{ ar}}$ .

Assim, fez-se uma média aritmética entre as temperaturas dos pontos que limitavam os anéis vizinhos e cada uma dessas médias foi multiplicada por um fator que representava quanto a área de um anel circular era maior que a área do anel circular central, ou seja, fez-se uma média ponderada para o cálculo da temperatura de saída do ar.

Na sequência, calcularam-se os valores da potência elétrica dissipada em forma de calor com a seguinte equação:

$$P = iV \quad (17)$$

onde

$P$  é a potência elétrica dissipada, em W;

$i$  é a intensidade de corrente elétrica, em A;

$V$  é a tensão, em V.

Após, calculou-se a taxa de energia em forma de calor removida por convecção após a termalização, para cada valor de velocidade média do ar, através da seguinte equação:

$$\left( \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)_{ar} = c_{p_{ar}} \rho_{ar} A v_{ar} \Delta T_{ar} \quad (18)$$

onde

$(\Delta Q/\Delta t)$  é a potência térmica, em W;

$c_{p_{ar}}$  é o calor específico á pressão constante, em que seu valor é 1007 J/kg°C;

$\rho_{ar}$  é a massa específica do ar, em que seu valor é 1,156 kg/m<sup>3</sup>;

$A$  é a área da secção, e seu valor é 0,00764 m<sup>2</sup>;

$v_{ar}$  é a velocidade média do ar, em m/s;

$\Delta T_{ar}$  é a diferença de temperatura entre a temperatura média de saída do ar e a temperatura de entrada do ar, em °C.

A temperatura de entrada do ar equivale à temperatura ambiente, e esta foi medida com o uso de um termômetro e o valor mensurado durante toda a coleta de dados foi de 26,0 °C. Os valores calculados com as equações 17 e 18 constam na Tabela 6.

**Tabela 6: variação de temperatura do ar, potência elétrica dissipada, potência removida pelo ar e percentual removido por convecção.**

$v_{\text{média do ar}}$ (m/s)	$\Delta T_{\text{ar}}$ (°C)	$i$ (A)	$V$ (V)	$(\Delta Q/\Delta T)_{\text{ar}}$ (W)	$P$ (W)	$\%_{\text{removida}}$
2,1	2,0	0,600	126,0	38,1	75,6	50,4
2,0	2,2	0,602	126,7	37,7	76,3	49,5
1,9	2,3	0,603	127,0	38,1	76,6	49,8
1,7	2,5	0,598	126,3	38,0	75,5	50,3
1,5	2,9	0,596	126,4	38,6	75,3	51,3
1,4	3,6	0,594	126,4	42,9	75,1	57,2
1,2	3,5	0,591	125,9	35,3	74,4	47,5
0,0	9,9	0,564	125,8	0,0	71,0	0,0

Fonte: O autor (2011)

A partir dos valores calculados através da equação 18, foi possível obter o coeficiente de convecção pela seguinte equação:

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_{\text{ar}} = hA\Delta T \quad (19)$$

onde:  $h$  é o coeficiente de convecção, em  $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$A$  é a área da superfície interna do cano, em  $m^2$ ;

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a temperatura média da superfície interna e a temperatura média do ar dentro do cano, em  $^\circ\text{C}$ .

O valor da área da superfície interna é igual à 0,310  $m^2$ , pois o raio do cano de PVC é 0,0493 m e o comprimento do cano no qual há aquecimento devido a bobina é de 1 m. Para determinar a temperatura média do ar dentro do cano, fez-se uso da seguinte equação:

$$\bar{T}_{\text{ar}} = \frac{\bar{T}_{\text{saída...do...ar}} + T_{\text{entrada...do...ar}}}{2} \quad (20)$$

Após o cálculo do coeficiente de convecção e com os valores da diferença de temperatura entre a temperatura média da superfície interna e a temperatura média do ar dentro do cano, obtiveram-se os valores do coeficiente de convecção natural, do coeficiente de convecção forçada e da constante  $F$  presente na equação

$h=2,2(\Delta T)^{0,25}+F(\Delta T/0,20+\Delta T)v$  (equação 13), da seguinte forma:

$$h_{\text{natural}} = 2,2(\Delta T)^{0,25} \quad (21)$$

$$h_{forçada} = h - 2,2(\Delta T)^{0,25} \quad (22)$$

$$F = \frac{h - 2,2(\Delta T)^{0,25}}{\left(\frac{\Delta T}{0,20 + \Delta T}\right)^{v_{ar}}} \quad (23)$$

Os valores calculados com as equações 21, 22 e 23 constam na Tabela 7.

**Tabela 7: valores do coeficiente de convecção do modelo em função da variação de temperatura e da velocidade média do ar.**

$v_{média}$ do ar (m/s)	$\Delta T$ (°C)	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	$h_{forçada}$ (W/m <sup>2</sup> °C)	$h_{natural}$ (W/m <sup>2</sup> °C)	$F$	$h_{modelo}$ (W/m <sup>2</sup> °C)
2,1	9,6	12,8	8,9	3,9	4,3	12,9
2,0	10,2	12,0	8,0	3,9	4,2	12,3
1,9	10,6	11,6	7,6	4,0	4,2	12,0
1,7	10,8	11,3	7,3	4,0	4,4	11,3
1,5	11,5	10,8	6,8	4,1	4,6	10,5
1,4	12,2	11,4	7,3	4,1	5,5	10,0
1,2	13,1	8,7	4,5	4,2	4,0	9,2

Fonte: O autor (2011)

O valor médio calculado a partir dos dados da Tabela 7 para a constante  $F$  presente na equação  $h = 2,2(\Delta T)^{0,25} + F(\Delta T / 0,20 + \Delta T)v$  (equação 13) foi 4,4 J/m<sup>3</sup>°C, com incerteza de 0,3 J/m<sup>3</sup>°C, que é a média aritmética dos desvios de cada medida em relação ao valor médio. Também cabe ressaltar que o valor determinado para a constante  $C$  inclusa na equação idealizada por BASSO foi de 0,20°C, visto que este tende rapidamente a 1, na medida em que as diferenças de temperaturas se elevam, e por permitir um coeficiente de convecção que se aproxima mais dos valores experimentais. Assim sendo, a equação empírica proposta por BASSO ganha a seguinte forma:

$$h = 2,2(\Delta T)^{0,25} + 4,4\left(\frac{\Delta T}{0,20 + \Delta T}\right)^{v_{ar}} \quad (24)$$

## 5 CONCLUSÃO

Sabe-se que a transmissão de calor por convecção é um fenômeno físico de extrema importância, pois esse é o mecanismo de troca de energia em forma de calor predominante nas condições ambientais. Assim sendo, deve-se analisar este fenômeno não apenas de forma qualitativa, mas também quantitativamente. Esse foi o fator que motivou a realização deste trabalho, pois a modelagem matemática presente nos livros que abordam quantitativamente esse fenômeno (geralmente livros destinados ao estudo da disciplina de fenômenos de transporte) emprega uma matemática ainda não disponível aos alunos de Física Geral.

Com a realização deste trabalho foi possível perceber na prática a dificuldade de abordar o fenômeno da transmissão de calor por convecção, pois a própria incerteza dos equipamentos utilizados já dificulta a modelagem deste fenômeno, resultando em erros que podem ser essenciais para a determinação do coeficiente de convecção. Desta forma, várias medidas devem ser tomadas para garantir que esses erros oriundos da imprecisão dos equipamentos de medida não comprometam no resultado final, como as medidas citadas no decorrer do trabalho. Com este trabalho comprovou-se que é possível utilizar um modelo matemático acessível aos alunos iniciantes na graduação em Física, pois os resultados encontrados foram satisfatórios.

A análise dos resultados experimentais da transmissão de energia em forma de calor por convecção revelou que o modelo de BASSO descreve satisfatoriamente este fenômeno, pois os valores do coeficiente de convecção calculados por meio da equação empírica de BASSO se aproximam dos obtidos experimentalmente.

Também sugere-se que este aparato experimental, bem como o modelo proposto por BASSO para a transmissão de energia em forma de calor por convecção seja utilizado para avaliar uma questão pouco estudada neste processo: a espessura da camada limite de ar, que atua como isolante térmico junto à superfície de PVC.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Celso de. **TRANSMISSÃO DE CALOR**. Livros técnicos e científicos editora S.A., 1978.

BASSO, Délcio, **EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO**. Dado não publicado, 1999.

BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro. 2 ed. LTC. 2004.

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**, 3ª Edição, São Paulo. Editora McGrawHill, 2009.

DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A. **Solar Energy Thermal Process**. New York. John Wiley & Sons. 1974.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. & WALKER, J. **Fundamentos de Física**. V.2. 6a ed. Rio de Janeiro. Editora LTC. 2002.

INCROPERA, F.P. & DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5ª ed. Rio de Janeiro. Editora LTC. 2002.

KERN, D.Q. **Processos de Transmissão de Calor**. Ed. Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro. 1987.

KNIGHT, R. D. **Física: uma abordagem estratégica**. Vol.2. Porto Alegre, Bookman. 2009.

KREITH, Frank. **Princípios da Transmissão de Calor**. Tradução da 3a. ed. Americana. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.

SEARS & ZEMANSKY. **Física: calor – ondas – ótica**. V.2. Rio de Janeiro. Editora Universidade de Brasília. 1973.

YOUNG & FREEDMAN. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12a ed. São Paulo. 2008.