



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA

Delson Antonio da Silva Júnior

Transferências de calor: Uma UEPS apoiada pelo uso do Arduino

Araranguá

2022

Delson Antonio da Silva Júnior

Transferências de calor: Uma UEPS apoiada pelo uso do Arduino

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.
Orientador: Prof. Dr. Evy Augusto Salcedo Torres

Araranguá
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva Júnior, Delson Antonio da
Transferências de calor : Uma UEPS apoiada pelo uso do
Arduino / Delson Antonio da Silva Júnior ; orientador, Evy
Augusto Salcedo Torres, 2022.
317 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de
Pós-Graduação em Ensino de Física, Araranguá, 2022.

Inclui referências.

1. Ensino de Física. 2. processos de transferência de
calor. 3. experimentos didáticos. 4. Arduino. 5.
aprendizagem significativa. I. Salcedo Torres, Evy
Augusto. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Título.

Delson Antonio da Silva Júnior

Transferências de calor: Uma UEPS apoiada pelo uso do Arduino

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Guilherme Frederico Marranghello, Dr.
Universidade Federal do Pampa

Prof. Marcelo Zannin da Rosa
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mauricio Girardi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Ensino de Física.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação
Prof. Marcelo Freitas de Andrade, Dr.

Prof. Evy Augusto Salcedo Torres, Dr.
Orientador

Araranguá, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus pais Delson (*in memoriam*) e Dilma, pelo amor e pelos cuidados que sempre tiveram comigo. Dedico também à minha esposa Grazielle e aos meus filhos Nicolas e Dalila, por estarem sempre ao meu lado nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, fundação à qual faço o primeiro agradecimento.

Agradeço à Sociedade Brasileira de Física (SBF) pela coordenação do Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), que tanto vem contribuindo para a melhoria na formação dos professores que atuam na educação básica brasileira.

Sou grato à Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Campus de Araranguá, pela oportunidade que me foi dada com a oferta de um curso público, gratuito e de qualidade.

Por compartilharem seus conhecimentos de forma brilhante e inspiradora nas aulas que tive o privilégio de participar, estendo os meus agradecimentos aos professores Cristiano da Silva Teixeira, Éverton Fabian Jasinski, Evy Augusto Salcedo Torres, Felipe Damasio, Giuliano Arns Rampinelli, Lara Fernandes dos Santos Lavelli, Leandro Batirolla Krott, Marcelo Freitas de Andrade, Marcia Martins Szortyka e Mauricio Girardi.

Agradeço aos meus colegas de mestrado pelos comentários que tanto enriqueceram os debates em sala de aula.

Por último, faço um agradecimento especial ao Professor Evy Augusto Salcedo Torres, meu orientador neste trabalho. Pela confiança depositada, pelas sugestões de leitura, pelas sugestões na redação desta dissertação, pelo acompanhamento constante, pelas participações na elaboração e na aplicação do produto educacional, pela autonomia concedida, pelo incentivo e pela motivação que não me deixaram desistir, pela generosidade e compreensão nos meus atrasos. Muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para o ensino de Física sobre as diferentes formas de transferência de calor, utilizando experiências didáticas apoiadas pela plataforma Arduino. O calor conduzido por uma barra metálica, a absorção/emissão de radiação térmica por um corpo e o resfriamento de uma superfície por convecção forçada são estudados com experimentos potencialmente significativos para a aprendizagem dos alunos. A análise dos resultados empíricos enfatiza o caráter didático desses experimentos, por permitirem a demonstração de fenômenos térmicos e enriquecerem a discussão sobre o que é previsto por modelos teóricos. No entanto, a ocorrência simultânea desses fenômenos e as limitações técnicas enfrentadas tornam difícil a aproximação entre os dados experimentais e os dados teóricos, especialmente, na situação em que a teoria utilizada precisa ser adequada aos estudantes do ensino médio. Os resultados educacionais indicam que os materiais elaborados têm potencial para promover uma aprendizagem mais significativa e que o uso da tecnologia é um fator que motiva a participação dos estudantes, por despertar a curiosidade deles. Apesar desses efeitos positivos, o uso desses recursos precisa ser complementado com ações que levem em consideração as características do público alvo.

Palavras-chave: Ensino de Física. Condução de calor. Convecção. Radiação térmica. Experimentos didáticos. Arduino. Aprendizagem significativa.

ABSTRACT

This work presents a Potentially Meaningful Teaching Unit for the teaching of Physics on the different forms of heat transfer, using didactic experiences supported by the Arduino platform. The heat conducted by a metal bar, the absorption/emission of thermal radiation by a body and the cooling of a surface by forced convection are studied with potentially significant experiments for student learning. The analysis of the empirical results emphasizes the didactic character of these experiments, as they allow the demonstration of thermal phenomena and enrich the discussion about what is predicted by theoretical models. However, the simultaneous occurrence of these phenomena and the technical limitations faced make the approximation between experimental data and theoretical data difficult, especially in the situation in which the theory used needs to be adequate for high school students. The educational results indicate that the materials developed have the potential to promote a more meaningful learning and that the use of technology is a factor that motivates students' participation, by instigating their curiosity. Despite these positive effects, the use of these resources needs to be complemented by actions that take into account the characteristics of the target audience.

Keywords: Physics education. Conduction of heat. Convection. Thermal radiation. Didactic experiments. Arduino. Meaningful learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência didática (transferência de calor)	28
Figura 2 - Hierarquia entre os elementos da UEPS	29
Figura 3 - Cilindro condutor de calor	41
Figura 4 - Aplicação da Lei de Fourier.....	43
Figura 5 - Experimento da condução de calor	46
Figura 6 - Obtendo o coeficiente angular da equação experimental	46
Figura 7 - Propagação da onda eletromagnética.....	48
Figura 8 - Espectro eletromagnético.....	49
Figura 9 - Absorção e emissão de radiação térmica	51
Figura 10 - Corpo negro	52
Figura 11 - Curva da distribuição da densidade de energia X comprimento de onda.....	53
Figura 12 - Experimento didático para estudo da radiação térmica	57
Figura 13 - Curva característica da Lei de Resfriamento de Newton.....	59
Figura 14 - Retirada de calor por convecção forçada.....	65
Figura 15 - Exemplo de interface gráfica de programação	69
Figura 16 - Placa do Arduino Uno R3.....	70
Figura 17 - Interface de programação IDE Arduino.....	72
Figura 18 - Caminho para instalação de uma nova biblioteca.....	75
Figura 19 - LM35 alimentado por fonte simétrica	76
Figura 20 - LM35 alimentado por fonte simples.....	76
Figura 21 - Pinos do LM35 (vista inferior)	76
Figura 22 - Diagrama de conexão do sensor DS18B20	77
Figura 23 - Pinos do DS18B20.....	78
Figura 24 - Pinos do MLX90614.....	79
Figura 25 - Diagrama de ligação do MLX90614	79
Figura 26 - Pinos do Circuito Integrado MAX6675.....	80
Figura 27 - Pinos do Circuito Integrado L298.....	81
Figura 28 - Controle bidirecional de motor cc com circuito integrado L298.....	82
Figura 29 - Circuito para acionar um LED.....	86
Figura 30 - Ligação do sensor LM35 à placa de Arduino	89
Figura 31 - Alunos medindo temperatura com sensor eletrônico.....	93
Figura 32 - Detalhe dos sensores distribuídos ao longo da barra de alumínio	95

Figura 33 - Posicionamento dos sensores ao longo da barra de alumínio.....	96
Figura 34 - Camadas de isolantes térmicos	97
Figura 35 - Circuitos do resistor e da pastilha Peltier com ventilador	98
Figura 36 - Ligação dos sensores à placa de Arduino	98
Figura 37 - Montagem finalizada do experimento sobre a condução de calor.....	99
Figura 38 - Tela do Aplicativo PLX-DAQ.....	102
Figura 39 - Gráfico da temperatura em função da posição quando a barra está revestida com espuma térmica.....	105
Figura 40 - Condução de calor em uma barra metálica inserida no interior de uma câmara de vácuo.....	106
Figura 41 - Gráfico da temperatura em função da posição quando a barra está dentro de uma câmara de vácuo	108
Figura 42 - Aplicação do experimento da condução de calor na Turma D.....	110
Figura 43 - Dados anotados por um dos alunos na experiência da condução de calor	112
Figura 44 - Gráfico da temperatura em função da posição construído por um aluno	114
Figura 45 - Gráfico desenhado com os dados obtidos pela Turma A.....	115
Figura 46 - Preenchendo lacunas de aprendizagem sobre função linear.....	116
Figura 47 - Obtenção da equação de Fourier com os dados obtidos pela Turma A.....	117
Figura 48 - Notas de aula escritas na lousa digital da Turma B	119
Figura 49 - Experimento da cuba de ondas	121
Figura 50 - Diagrama de ligação dos componentes da cuba de ondas	122
Figura 51 - Propagação de ondas mecânicas numa superfície d'água	124
Figura 52 - Reflexão e Interferência.....	125
Figura 53 - Transmissão da onda de um lado para o outro da barreira	126
Figura 54 - Absorção das ondas mecânicas por uma barreira esponjosa	127
Figura 55 - Simulador de cargas e campos elétricos	129
Figura 56 - Simulador de campo magnético em torno de um ímã fixo.....	129
Figura 57 - Simulador de campo magnético em torno de um condutor de corrente	130
Figura 58 - Simulador sobre o princípio da indução eletromagnética.....	130
Figura 59 - Tela da animação que representa o movimento de uma onda eletromagnética...	131
Figura 60 - Simulador de modelos do átomo de hidrogênio	132
Figura 61 - Simulador de absorção da luz por moléculas.....	133
Figura 62 - Espectro de radiação de corpo negro	134

Figura 63 - Conjunto sensores-Arduino para o experimento da radiação térmica	137
Figura 64 - Detalhe da fixação dos sensores de temperatura	138
Figura 65 - Vista completa do experimento da radiação térmica	139
Figura 66 - Esquema de ligação dos sensores do experimento da radiação térmica	140
Figura 67 - Comparação entre sensores nas leituras das temperaturas do objeto pintado (escuro)	143
Figura 68 - Comparação entre sensores nas leituras das temperaturas do objeto polido (claro)	144
Figura 69 - Comparação das curvas de aquecimento dos objetos, com dados obtidos pelos sensores infravermelhos.	146
Figura 70 - Comparação das curvas de aquecimento dos objetos, com dados obtidos pelos sensores de contato.	147
Figura 71 - Representação das trocas de calor entre os componentes do experimento.....	148
Figura 72 - Experimento da radiação térmica montado em sala de aula.....	150
Figura 73 - Participação dos alunos no experimento da radiação térmica	151
Figura 74 - Registro da participação remota do Orientador	152
Figura 75 - Detalhe da planilha com os dados obtidos dos sensores.....	152
Figura 76 - Detalhe da instalação do sensor termopar no interior do ferro de passar	154
Figura 77 - Montagem do experimento numa base	155
Figura 78 - Circuito elétrico da resistência do ferro de passar	156
Figura 79 - Circuito do ventilador	156
Figura 80 - Diagrama de ligação do sensor termopar e do display LCD à placa de Arduino	157
Figura 81 - Curvas de convecção natural e forçada da chapa do ferro de passar	160
Figura 82 - Comparação entre as curvas teórica e experimental da convecção natural	161
Figura 83 - Comparação entre as curvas teórica e experimental da convecção forçada	162
Figura 84 - Aplicação do experimento da convecção.....	163
Figura 85 - Notas de aula sobre força de empuxo	165
Figura 86 - Médias globais obtidas pelas quatro turmas no experimento sobre a condução de calor	167
Figura 87 - Gráfico da assiduidade nas quatro etapas da sequência didática sobre condução de calor	169
Figura 88 - Médias úteis obtidas pelas quatro turmas no experimento sobre a condução de calor	170

Figura 89 - Gráfico de colunas que mostra a frequência ocorrida para cada nota obtida no questionário final sobre a condução de calor.....	171
Figura 90 - Médias globais obtidas pelas quatro turmas na sequência didática sobre radiação térmica	173
Figura 91 - Gráfico da assiduidade nas quatro etapas da sequência didática sobre radiação térmica	173
Figura 92 - Médias úteis obtidas pelas quatro turmas no experimento sobre a radiação térmica	174
Figura 93 - Gráfico de colunas que mostra a frequência ocorrida para cada nota obtida no questionário final sobre a radiação térmica	175
Figura 94 - Sistema de aquecimento de água com serpentina instalada no interior de um fogão a lenha.....	177

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Questões para avaliação da aprendizagem sobre o processo de condução de calor	119
---	-----

LISTA DE *SKETCHES*

Sketch 1 - Acionando um LED por meio de uma saída digital	86
Sketch 2 - Leitura do sensor LM35 com uma porta analógica.....	90
Sketch 3 - Identificando os endereços dos sensores DS18B20	99
Sketch 4 - Programa para ler as temperaturas indicadas pelos sensores	100
Sketch 5 - Controle de velocidade PWM com botões	122
Sketch 6 - Programação para leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto pintado de preto	140
Sketch 7 - Programação para leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto polido	141
Sketch 8 - Programa para apresentar dados do sensor termopar em um display LCD.....	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas dos sensores após entrada em regime estacionário (barra revestida com camadas de espuma térmica)	103
Tabela 2 - Temperatura em função da posição (barra revestida com camadas de espuma térmica)	104
Tabela 3 - Temperaturas dos sensores após entrada em regime estacionário (barra no interior da câmara de vácuo)	106
Tabela 4 - Temperatura em função da posição (barra no interior da câmara de vácuo)	108
Tabela 5 - Temperatura dos objetos claro e escuro no instante $t = 70\text{min}$	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC Base Nacional Comum Curricular

CPU *Central Processing Unit* (Unidade Central de Processamento)

EEPROM *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (Memória Programável Somente de Leitura Eletricamente Apagável)

GND *Ground* (terra)

IDE Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)

LCD *Liquid Crystal Display* (Display de Cristal Líquido)

LED *Light-Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

MNPEF Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

OTG *On-The-GO* (Em movimento)

PWM *Pulse Width Modulation* (Modulação em Largura de Pulso)

RBEF Revista Brasileira de Ensino de Física

SRAM *Static Random Access Memory* (Memória Estática de Acesso Randômico)

UEPS Unidade de Ensino Potencialmente Significativa

USB *Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
2	PESQUISAS EDUCACIONAIS SOBRE TROCAS DE CALOR E EXPERIMENTOS DIDÁTICOS	23
3	PRESSUPOSTOS TEÓRICOS DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	27
4	SUBSÍDIOS EPISTEMOLÓGICOS DA TEORIA RACIONALISTA DE MARIO BUNGE APLICADOS AO ENSINO DE CIÊNCIAS.....	34
5	PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	40
5.1	CONDUÇÃO DE CALOR.....	40
5.1.1	Aplicação da Lei de Fourier a um experimento didático.....	45
5.2	ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E PROPAGAÇÃO DO CALOR POR RADIAÇÃO	47
5.2.1	Dedução da Lei de Stefan-Boltzmann a partir da Lei de Planck.....	52
5.2.2	Aplicação da Lei de Stefan-Boltzmann e da Lei de Wien a um experimento didático	56
5.3	CONVECÇÃO	58
5.3.1	A Lei de Resfriamento de Newton.....	58
5.3.2	A Lei de Resfriamento de Newton aplicada ao processo de convecção	61
5.3.2.1	<i>Coeficiente de transferência de calor (h)</i>	<i>63</i>
5.3.3	Proposta experimental para estudo do processo de convecção	64
6	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM ARDUINO	68
6.1	ESTRUTURA FÍSICA (<i>HARDWARE</i>)	70
6.2	PROGRAMAÇÃO (<i>SKETCHES</i>)	72

6.3	COMPONENTES EXTERNOS: SENSORES DE TEMPERATURA E PLACA CONTROLADORA DE MOTORES.....	75
6.3.1	LM35 – Sensor de precisão em escala de graus centígrados	75
6.3.2	DS18B20 – Termômetro digital (one-wire) de resolução programável	77
6.3.3	Termômetro Infravermelho MLX90614	78
6.3.4	MAX6675 - Conversor digital para termopar tipo k	79
6.3.5	Controlador em ponte H – L298	80
7	CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	83
7.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEQUÊNCIA DIDÁTICA	83
7.2	ATIVIDADE 1: INTRODUÇÃO AO ARDUINO.....	85
7.2.1	Desenvolvimento do experimento.....	85
7.2.2	Aplicação em sala de aula	87
7.3	ATIVIDADE 2: MEDINDO TEMPERATURA COM SENSOR ELETRÔNICO CONECTADO AO ARDUINO	88
7.3.1	Desenvolvimento do experimento.....	89
7.3.2	Aplicação em sala de aula	91
7.4	ATIVIDADE 3: CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA BARRA DE ALUMÍNIO	94
7.4.1	Desenvolvimento do experimento – Aspectos construtivos.....	94
7.4.2	Desenvolvimento do experimento – Análise dos dados obtidos.....	103
7.4.3	Aplicação em sala de aula (Parte I – Coleta de dados).....	109
7.4.4	Aplicação em sala de aula (Parte II – Construção do gráfico).....	113
7.4.5	Aplicação em sala de aula (Parte III – Obtenção da Lei de Fourier)	115
7.4.6	Aplicação em sala de aula (Parte IV – Discussões finais e avaliação da aprendizagem).....	118
7.5	ATIVIDADE 4: ONDAS MECÂNICAS EM UMA SUPERFÍCIE D'ÁGUA ..	120
7.5.1	Desenvolvimento da cuba de ondas.....	121

7.5.2	Aplicação em sala de aula	123
7.6	ATIVIDADES 5 E 6: AULAS EXPOSITIVAS	128
7.6.1	Planejamento da aula sobre ondas eletromagnéticas	128
7.6.2	Planejamento da aula sobre radiação de corpo negro	132
7.6.3	Execução das aulas planejadas	134
7.7	ATIVIDADE 7: EMISSÃO E ABSORÇÃO DE CALOR POR UM CORPO CLARO E POR UM CORPO ESCURO	136
7.7.1	Desenvolvimento do experimento – Aspectos construtivos.....	136
7.7.2	Desenvolvimento do experimento – Análise dos dados obtidos.....	143
7.7.3	Aplicação em sala de aula	149
7.8	ATIVIDADE 8: CONVECÇÃO	154
7.8.1	Desenvolvimento do experimento – Aspectos construtivos.....	154
7.8.2	Desenvolvimento do experimento – Análise dos dados obtidos.....	158
7.8.3	Aplicação em sala de aula	163
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	167
8.1	SOBRE A APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO DA CONDUÇÃO DE CALOR	167
8.2	SOBRE A APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO DA RADIAÇÃO TÉRMICA.	172
8.3	SOBRE A APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO DA CONVECÇÃO	176
9	CONCLUSÕES.....	178
10	REFERÊNCIAS.....	180
	APÊNDICE A – SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL QUE REPRESENTA A LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON	185
	APÊNDICE B – VERIFICANDO SE É POSSÍVEL OBTER A LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON A PARTIR DA LEI DE STEFAN-BOLTZMANN	186
	APÊNDICE C – PRODUTO EDUCACIONAL	188
	ANEXO A – DECRETO DO GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA N.º 1.408, DE 11/08/2021	305

ANEXO B – AUTORIZAÇÃO PARA PARTICIPAÇÃO DE PROFESSOR

EXTERNO 306

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física numa escola pública com alunos do ensino médio do período noturno é uma atividade cercada de desafios. A carga horária reduzida dessa disciplina, as defasagens de aprendizagem apresentadas pelos alunos e o desestímulo aos estudos que muitos deles apresentam são fatores que dificultam o trabalho do professor. É preciso que este profissional busque maneiras de aproveitar melhor o tempo disponível em sala de aula. É importante que o planejamento das suas atividades leve em consideração a importância dos conhecimentos prévios que os estudantes têm acerca de um determinado assunto a ser aprendido. Já a motivação deve ser perseguida com ações que estimulem a curiosidade e abandonem os métodos de aprendizagem mecânica.

As transferências de calor constituem o tema central deste trabalho por dois motivos. O primeiro está relacionado ao público alvo, que são alunos do segundo ano do ensino médio, em que o calor é um conteúdo predominante. O segundo motivo é que a discussão sobre essa forma de energia permite estabelecer relações com outros campos da Física e, também, com outras áreas do conhecimento, como a Matemática. O estudo sobre a condução de calor no metal é abordado sob o ponto de vista da Lei de Fourier e é uma oportunidade para demonstrar uma aplicação da função matemática linear. A propagação do calor pelo movimento de convecção de um fluido se fundamenta na compreensão das forças de empuxo e da gravidade. O fenômeno da radiação térmica de corpos aquecidos exige um repertório de conhecimentos prévios ainda maior, partindo do conceito de ondas, especialmente as eletromagnéticas, e finalizando com modelo ideal do corpo negro. Essa constante ligação entre diferentes conteúdos quebra o ciclo de ensino compartimentado, como sessões de um livro didático, onde essas relações parecem não existir. Dessa forma, a abrangência do tema contribui com o objetivo de ensinar mais, num intervalo de tempo relativamente menor, quando comparado a uma abordagem em que os assuntos são discutidos separadamente.

O método escolhido para abordar o tema das transferências de calor foi o das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), propostas por Marco Antonio Moreira (2012). A UEPS deste trabalho propõe uma sequência de ensino que se apoia no uso de experimentos didáticos e está fundamentada nos princípios da aprendizagem significativa de David P. Ausubel (1998) e nos fundamentos epistemológicos de Mario Bunge (2001). A preocupação com o levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos, a criação de materiais

potencialmente significativos e a elaboração de uma sequência de estudos que respeita uma hierarquia entre os conceitos abordados são elementos preconizados pela teoria cognitivista de Ausubel e foram observados nesta pesquisa. As ideias de Bunge são importantes por reforçarem a importância dos modelos para a compreensão de fenômenos que estão fora do alcance dos nossos sentidos. Os experimentos propostos aqui ajudam os estudantes a confrontar os dados do mundo físico com os dados previstos por modelos científicos, contribuindo para uma aprendizagem mais crítica da Física.

Os materiais potencialmente significativos são os experimentos didáticos propostos no produto educacional que acompanha este trabalho. Eles foram construídos com base na plataforma Arduino e em componentes eletrônicos compatíveis com ela. A sua utilização se justifica por ser uma alternativa viável para o professor que trabalha em escolas com poucos recursos de laboratório para o ensino de Física. Essa placa possui um microcontrolador, que pode ser facilmente programado e conectado a uma grande variedade de sensores e dispositivos de controle e sinalização. A flexibilidade desse recurso permite a sua aplicação em diferentes projetos e merece ser explorado também nos estudos sobre as trocas de calor. Espera-se, ainda, que o uso de uma tecnologia atual como essa desperte o interesse dos alunos pelo tema e contribua para uma maior compreensão sobre o processo contínuo de automatização das ações humanas. São três os experimentos principais propostos no produto educacional. O primeiro consiste no estudo sobre a condução de calor em uma barra metálica. Uma das extremidades dessa barra é aquecida, enquanto a temperatura ao longo do seu comprimento é monitorada por meio de sensores eletrônicos de temperatura. O segundo experimento consiste em comparar as curvas de aquecimento e de resfriamento de objetos de cores diferentes, submetidos à incidência de radiação térmica e luminosa de uma lâmpada incandescente. Um terceiro experimento permitirá analisar o resfriamento da chapa metálica de um ferro de passar, por convecção forçada, quando esta é submetida a uma corrente de ar gerada por um ventilador.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Construir uma sequência didática que facilite o aprendizado dos alunos sobre as diferentes formas de transferência de calor, por meio da utilização de experiências didáticas.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Demonstrar o regime estacionário da condução de calor em uma barra metálica, utilizando sensores eletrônicos de temperatura e uma placa de Arduino conectada a um computador.
2. Relacionar a equação que se obtém na realização do experimento da condução de calor com a Lei de Fourier, discutindo o processo de modelagem matemática desse fenômeno físico.
3. Traçar um percurso para a discussão sobre a radiação térmica que tenha fundamentação em conceitos clássicos do eletromagnetismo e em conceitos modernos da física quântica.
4. Comparar os efeitos sobre a temperatura de dois objetos de cores diferentes pela absorção e emissão de radiação térmica.
5. Explicar o fenômeno da transferência de calor por convecção, utilizando um experimento didático construído com um ferro de passar e um pequeno ventilador.
6. Analisar a qualidade dos experimentos como instrumentos didáticos, tanto do ponto de vista do aprendizado do estudante, quanto à concordância entre os dados experimentais e as previsões teóricas.

2 PESQUISAS EDUCACIONAIS SOBRE TROCAS DE CALOR E EXPERIMENTOS DIDÁTICOS

Este capítulo apresenta uma análise das publicações relacionadas ao tema das trocas de calor, conjuntamente ao uso do Arduino como ferramenta de auxílio na construção de experimentos didáticos, no âmbito do ensino de Física. O levantamento bibliográfico foi realizado com base na consulta a duas fontes. A primeira foi a página do MNPEF¹, onde estavam disponibilizadas 613 dissertações produzidas em diversas universidades do país, até meados do mês de maio do ano de 2022. A segunda fonte consultada foi a página da RBEF², onde estão publicados artigos sobre o mesmo tema, desde o ano de 1979. As fontes citadas não esgotam as possibilidades de pesquisa, mas são referências de destaque para educadores que ensinam Física.

As buscas pelas publicações foram realizadas com as palavras-chaves: trocas de calor, condução, radiação, convecção e Arduino. Após analisar as opções resultantes das buscas, foram selecionados quatro artigos da RBEF e quatro dissertações do MNPEF, que possuem alguma relação com esta dissertação.

O primeiro trabalho analisado foi a dissertação intitulada “Elaboração e desenvolvimento de uma unidade didática sobre os conceitos de transmissão de calor e radiação do corpo negro”, de autoria de Marlos Machado, orientação da Professora Dr.^a Iraziet da Cunha Charret, coorientação do Professor Dr. Antonio dos Anjos Pinheiro da Silva, defendida no ano de 2017 na Universidade Federal de Lavras. Nele, estão apresentadas quatro propostas experimentais que abordam o tema da transferência de calor. No experimento da condução, pedaços de vela (parafina) são fixados a um tridente, feito de três tipos diferentes de metal. As chamas de um fogareiro fornecem o calor que é conduzido de um extremo ao outro do tridente. No experimento da convecção em líquidos, uma determinada quantidade de água é aquecida até o ponto de ebulição e o efeito visual do movimento de convecção é melhorado com o uso de serragem de madeira. No experimento da convecção em gases, um catavento de papel é colocado próximo de um fogareiro, para que se possibilite observar o seu movimento giratório durante o movimento de convecção do ar aquecido pelas chamas. No experimento sobre a radiação térmica, o autor utilizou termômetros de vidro com mercúrio para monitorar a

¹ Disponível em: <http://www.www1.fisica.org.br/mnpef/dissertacoes>.

² Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/>.

temperatura de quatro latas de alumínio, cada uma pintada com tinta de uma cor diferente, enquanto uma lâmpada em posição equidistante dos objetos foi utilizada como fonte de calor (MACHADO e CHARRET, 2017).

O segundo trabalho analisado foi a dissertação intitulada “Desconstrução /construção dos conceitos de calor e temperatura: um olhar sobre o ensino de física na educação de jovens e adultos”, de autoria de Noé Comemorável de Oliveira Neto, orientação da Professora Dr.^a Regina Simplicio Carvalho, defendida no ano de 2015 na Universidade Federal de Viçosa. Nele, o autor realiza uma atividade prática para demonstrar a propagação do calor por convecção e por radiação térmica. A proposta foi pendurar uma das extremidades de uma folha de papel cortada em espiral, enquanto a outra é aquecida pela chama de uma vela acesa. O efeito demonstrado é o movimento giratório do pedaço de papel, por ação do ar aquecido que tende a subir por causa da convecção (OLIVEIRA NETO e CARVALHO, 2015).

O terceiro trabalho analisado foi a dissertação intitulada “Sequência de atividades didáticas para uma abordagem dos processos de transmissão de calor em uma perspectiva de sala de aula invertida usando como recurso a plataforma Google Sala de Aula”, de autoria de Jailson Silva Holanda, orientação do Professor Dr. Rubens Silva, defendida no ano de 2019 na Universidade Federal do Pará. Nele, o autor relata a realização de duas atividades práticas. Na primeira, o processo da transferência de calor por condução é demonstrado com um fio rígido de cobre, ao longo do qual são fixados pequenos pregos com o auxílio de parafina derretida. Após submeter uma das extremidades do fio ao calor da chama de uma vela, é possível demonstrar a propagação do calor com a queda em sequência dos pregos. A segunda atividade prática envolveu um experimento para demonstrar o movimento convectivo da água, ao ser aquecida. A utilização de sais de permanganato de potássio, que se dissolvem na água, facilitou a visualização do referido movimento (HOLANDA e SILVA, 2020).

O quarto trabalho analisado foi a dissertação intitulada “UEPS para o ensino dos modos de transmissão de calor, utilizando mapas conceituais para o acompanhamento do aprendizado”, de autoria de Messias Costa Fonseca, orientação da Professora Dr.^a Maria Lúcia de Moraes Costa, defendida no ano de 2020 na Universidade Federal do Pará. Neste, o autor relata a utilização de cinco demonstrações práticas e a construção de um modelo. Duas atividades envolveram experimentos que utilizam arames metálicos para a demonstração da transferência de calor por condução. Uma atividade demonstrou o movimento de convecção da água, ao ser aquecida com uma pequena porção de arroz. Outros dois experimentos abordaram

o tema da radiação térmica: no primeiro, duas chapas (uma pintada com tinta na cor branca e outra, na cor preta) foram aquecidas com o calor de uma lâmpada incandescente; no segundo, os objetos aquecidos eram latas de alumínio e a fonte de calor eram as chamas de um fogareiro. Quanto ao modelo construído, o corpo negro foi representado por uma caixa de papel. Um furo foi feito em uma das suas faces e as suas paredes internas foram pintadas com tinta branca (FONSECA e COSTA, 2020).

A radiação solar é tema do artigo intitulado “Uso do Arduino como um sistema alternativo para medir radiação solar global e práticas educacionais” (ALVES, REIS, *et al.*, 2020). Nesse estudo, a radiação solar é monitorada com um protótipo que utiliza um resistor dependente da luz (LDR), conectado a uma placa de Arduino. O mesmo artigo informa que o LDR apresenta uma sensibilidade maior, quando o comprimento de onda da luz incidente se encontra ao redor de 540 nm (nanômetros). Esta é uma limitação importante para experimentos que abordam a radiação térmica de corpos aquecidos, nos quais se faz necessário o uso de um tipo sensor que seja sensível a comprimentos de onda maiores (na faixa do infravermelho).

O artigo intitulado “Sensores digitais de temperatura com tecnologia *one-wire*: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica” propõe um experimento didático para analisar a Lei de Fourier (AMORIM, DIAS e SOARES, 2015). Neste, seis sensores eletrônicos de contato são conectados a uma placa de Arduino para monitorar a temperatura em diferentes pontos de uma barra metálica. Exceto por aspectos construtivos, especialmente nos elementos utilizados como reservatórios térmicos (fonte quente e fonte fria), o aparato experimental desse artigo é muito semelhante ao que é proposto nesta dissertação. Dessa forma, o artigo forneceu subsídios importantes para a análise dos resultados obtidos com o experimento desta dissertação. A principal diferença entre esses dois trabalhos está no método adotado para a verificação dos dados experimentais. Enquanto o artigo apresenta uma abordagem matemática voltada a estudantes do ensino superior, esta dissertação apresenta uma proposta de análise mais compatível com os conhecimentos matemáticos de alunos do ensino médio.

O artigo intitulado “Resfriamento de um cilindro de aço: estudo experimental da convecção e radiação do calor” (GARCIA, AMARAL, *et al.*, 2017) apresenta uma proposta que utiliza termorresistências como sensores para medir a temperatura de um cilindro metálico que é pintado de preto e aquecido até uma temperatura de 200°C, a partir da qual é deixado ao ar livre para resfriar. Os dados dos sensores são coletados por um módulo *data logger* multicanais e transferidos para uma planilha de computador. Apesar da utilização de

instrumentos com mais recursos que o Arduino, os resultados apresentados nesse artigo para o coeficiente de transferência de calor por convecção variaram significativamente, em relação às previsões teóricas. Isso corrobora o fato de que a verificação quantitativa de fenômenos térmicos é algo tecnicamente difícil de se executar.

O artigo intitulado “Um experimento para ensino de conceitos de transferência de calor em laboratório de física” (LÜDKE, ADORNES, *et al.*, 2013) apresenta um estudo sobre o aquecimento e o resfriamento de um cilindro metálico, da perspectiva do processo de condução de calor. Uma resistência elétrica é utilizada como fonte de calor e é instalada no eixo central do cilindro. Um sensor de temperatura foi conectado a um multímetro para realizar a medição dessa grandeza em outro ponto do mesmo corpo. O objetivo é encontrar uma equação da temperatura em função do raio do cilindro, com base na Lei de Fourier.

É importante salientar que, entre as quatro dissertações citadas, nenhuma utilizou sensores eletrônicos de temperatura ligados a uma placa de Arduino para o estudo das trocas de calor. Os artigos mencionados se aproximam mais do que é proposto nesta dissertação. No entanto, quando não sugerem o uso de equipamentos mais difíceis de serem adquiridos, acabam realizando análises matemáticas que fogem do alcance dos alunos do ensino médio. Dessa forma, a proposta desta dissertação deve ser considerada pertinente para a produção de conhecimentos em ensino de Física.

3 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

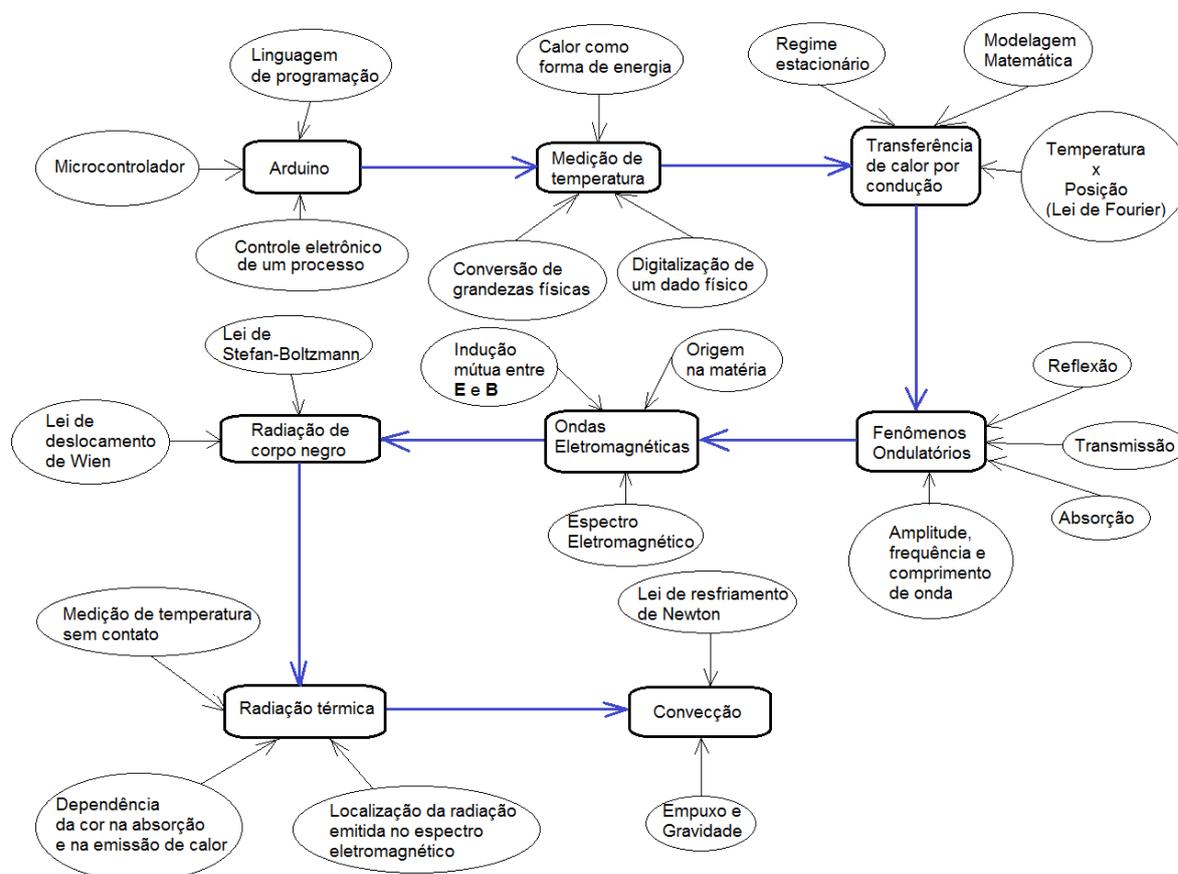
A teoria da aprendizagem significativa de David P. Ausubel (1918-2008) tem grande aceitação entre os educadores que trabalham com o ensino de Física, pois há uma convergência entre a ideia desse autor sobre como o conhecimento se organiza na mente de um indivíduo e o pensamento dos físicos sobre como se desenvolveu essa ciência natural. A proposta de que o conhecimento se organiza de forma hierarquizada no intelecto do aprendiz combina com a visão de que os diferentes campos da Física podem se relacionar também de uma forma ordenada, de modo que alguns conceitos antecessores sirvam de fundamentos para outros que surgiram em momentos posteriores no tempo. Essa evolução histórica nos permite uma visão alegórica da Física como uma construção arquitetônica, “que lembra templos que passaram por sucessivas civilizações, onde os pavimentos erguidos pelos conquistadores usam blocos tirados da demolição daqueles construídos pelos conquistados e se assentam sobre as mesmas fundações.” (MENEZES, 2005, p. 29). Analogamente, a aprendizagem será considerada significativa se o estudante conseguir relacionar o que se propõe que ele aprenda àquilo que ele já sabe. Ou seja, a tarefa educativa proposta pelo educador e/ou o novo material de estudo precisam estar relacionados de forma substancial e não arbitrária com a estrutura cognitiva do educando (AUSUBEL, NOVAK e HANESIAN, 1998).

A teoria da aprendizagem significativa foi utilizada neste trabalho para a construção de uma sequência didática para o ensino sobre os processos de transferência de calor por condução, irradiação e convecção. Considerando a fundamentação teórica citada e a aplicação dessa sequência em sala de aula, esta proposta se trata de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa – UEPS.

“São sequências de ensino fundamentadas teoricamente, voltadas para a aprendizagem significativa, não mecânica, que podem estimular a pesquisa aplicada em ensino, aquela voltada diretamente à sala de aula.” (MOREIRA, 2012, p. 2)

Nos próximos parágrafos, recorreremos às Figuras 1 e 2 para auxiliar no estabelecimento da relação entre alguns pressupostos da teoria ausubeliana e o planejamento dessa sequência.

Figura 1 - Sequência didática (transferência de calor)



Fonte: O autor (2022)

A aprendizagem significativa, segundo a teoria de Ausubel, é aquela que ocorre quando uma nova informação recebida provoca uma alteração no conhecimento preexistente na mente do estudante, tornando-o mais abrangente e mais receptivo a novas aprendizagens. A esse conhecimento preexistente foi dado o nome de “*subsumer*”, palavra adaptada ao Português como “subsunçor”. O conjunto de subsunçores presentes no intelecto de uma pessoa compõe a sua estrutura cognitiva (MOREIRA, 2019). A aplicação da sequência didática da Figura 1 tem como ponto de partida e elemento condicionante a construção prévia junto aos alunos da aprendizagem sobre tópicos de calorimetria, além do conceito de energia e o princípio de que essa grandeza se conserva em todos os processos físicos. Satisfeita essa condição, a UEPS descrita neste trabalho se propõe a modificar os referidos conceitos, tornando-os mais abrangentes e complexos, por incluir novas formas de como a energia se manifesta e por evidenciar o fato de que ela se move. Dessa forma, se os estudantes foram iniciados neste

assunto com os conceitos da mecânica, como a energia potencial (gravitacional e/ou elástica) e a energia cinética, as atividades aplicadas em sala se amparam nessa estrutura existente e buscam modificá-la para incluir a compreensão de fenômenos térmicos, ondulatórios, ópticos/eletromagnéticos e quânticos.

Considerando que um novo aprendizado se ancora num aprendizado anterior, o percurso formativo numa determinada área do conhecimento deve acontecer de forma organizada, obedecendo a uma hierarquia entre os saberes envolvidos. No entanto, “ainda que seja útil identificar e organizar os conceitos e proposições de qualquer disciplina como um aspecto do planejamento do currículo, as relações entre essas ideias não necessitam ser expressas em forma de uma hierarquia precisa e unidirecional.” (AUSUBEL, NOVAK e HANESIAN, 1998, p. 319). Tendo esses pressupostos estabelecidos, podemos agrupar os elementos ilustrados na Figura 1 em quatro subconjuntos para formar a Figura 2.

Figura 2 - Hierarquia entre os elementos da UEPS



Fonte: O autor (2022)

Devido à proposta deste trabalho, fez-se necessário iniciar a sequência didática com um módulo introdutório que fornecesse noções básicas sobre a plataforma Arduino e sobre sensores eletrônicos de temperatura. Dessa forma, o subconjunto 1 deve obrigatoriamente ser aplicado primeiro que os demais. Os outros três subconjuntos poderiam ser aplicados em qualquer ordem, respeitada a hierarquia interna que existe no terceiro item. Independentemente dessa

ordem, o importante é que cada um desses três assuntos principais seja relacionado ao conceito subsunçor de energia e o seu princípio de conservação.

Quando não se estabelece uma relação entre a nova informação e a base conceitual onde ela deveria se ancorar, o conhecimento adquirido é armazenado de forma arbitrária na estrutura cognitiva do estudante. Isso ocorre quando o professor utiliza técnicas de aprendizagem por repetição (ou mecânicas) como, por exemplo, a aplicação de sucessivos exercícios de Física com o objetivo de promover a memorização de determinada lei ou equação. Uma consequência indesejável dessa prática, por parte do aluno, é a retenção menos duradoura do conteúdo aprendido. Embora admita que a aprendizagem mecânica possa ser útil em algum momento do processo educativo, especialmente quando conceitos subsunçores importantes para determinado assunto não estiverem presentes na bagagem intelectual do aprendiz, a teoria de Ausubel sugere o uso de organizadores prévios (MOREIRA, 2006). Tratam-se de:

“[...] materiais introdutórios apropriadamente relevantes e inclusivos (organizadores) que sejam, ao mesmo tempo, tão claros e estáveis quanto possível. Esses organizadores geralmente são apresentados antes do próprio material de aprendizagem e são usados para ajudar a estabelecer uma atitude positiva em relação à aprendizagem significativa. Os organizadores prévios ajudam o aluno a reconhecer que os elementos de novos materiais de aprendizagem podem ser aprendidos de forma significativa, relacionando-os a aspectos especificamente relevantes da estrutura cognitiva existente.” (AUSUBEL, NOVAK e HANESIAN, 1998, p. 157)

Quando estabelecemos a hierarquia conceitual da Figura 2 e dizemos que o subconjunto 1 deve ser obrigatoriamente aplicado antes dos demais na sequência didática, o motivo é que o material proposto foi estruturado para funcionar como um organizador prévio do que se pretende ensinar depois. Dessa forma, um aluno que tenha a compreensão do conceito de temperatura, mesmo que de maneira superficial e baseada no senso comum (como as ideias de quente e frio), está apto a ser envolvido numa atividade que o faça refletir sobre o fator que interfere na variação dessa grandeza, que é a troca de energia (calor) entre corpos diferentes, ou entre um corpo e o seu ambiente. A partir desse evento, espera-se que temperatura e calor passem a ser subsunçores consolidados na estrutura cognitiva do estudante, para que sirvam de sustentação ao aprendizado dos processos de transferência por condução, irradiação e convecção.

Ausubel considera que existem duas formas de aprendizagem que podem ser consideradas significativas: por recepção e por descoberta.

“Na aprendizagem por recepção, o conteúdo principal da tarefa de aprendizagem simplesmente é apresentado ao aluno; ele precisa somente relacioná-lo ativa e significativamente com os aspectos relevantes da sua estrutura cognitiva e retê-lo para a recordação ou reconhecimento posteriores, ou como uma base para o aprendizado de novo material relacionado. Na aprendizagem por descoberta, o conteúdo principal do que há de se aprender se deve descobrir de maneira independente antes que se possa assimilar dentro da estrutura cognitiva.” (AUSUBEL, NOVAK e HANESIAN, 1998, p. 17)

A elaboração de experimentos didáticos para a demonstração de fenômenos físicos em sala de aula tem o objetivo de promover a aprendizagem por descoberta. No entanto, melhor seria que o próprio aluno executasse o experimento neste tipo de aprendizado. Ainda assim, a realização de um experimento, mesmo que demonstrativo, mas envolvido numa discussão que promova reflexões, pode levar o estudante ao aprendizado de um conceito científico, sem que o mesmo seja simplesmente enunciado. Tudo depende da maneira como a demonstração é conduzida pelo professor. Por exemplo, ao mostrar os valores das temperaturas medidas por sensores dispostos ao longo de uma barra metálica que conduz uma corrente térmica constante, é importante deixar que o aluno perceba sozinho o que está acontecendo: inicialmente, a temperatura de cada sensor depende do tempo e da sua posição em relação às fontes quente e fria, entre as quais o calor transita; transcorrido um determinado intervalo de tempo, as temperaturas dos sensores se estabilizam e deixam de variar com o tempo, passando a depender apenas das suas respectivas posições. Numa das posições da barra, o estudante observaria que o sensor mais próximo da fonte quente teria a sua temperatura elevada gradativamente, até que, cerca de vinte minutos depois do circuito ligado, o valor lido por ele se estabilizaria em torno de 88 °C. Este procedimento induziria a aprendizagem por descoberta do significado de regime estacionário da condução de calor.

A aprendizagem significativa por recepção ocorre de três maneiras, que sugerem uma escala gradativa de níveis entre elas. O primeiro nível é o da aprendizagem de representações. Esta categoria procura dar significado a símbolos ou palavras isoladas. No segundo nível, as palavras isoladas se combinam em forma de oração para dar origem a proposições que dão significado a um determinado conceito. Daí o nome de aprendizagem de conceitos. O terceiro e mais complexo é o nível da aprendizagem de proposições. Neste, os conceitos se organizam para significar ideias expressas em forma de proposições, que vão além da soma dos significados contidos nas palavras que as compõem (AUSUBEL, NOVAK e HANESIAN, 1998, p. 53). A transferência de calor por convecção é uma ideia que depende da aprendizagem

de proposições que reúnam os conceitos de calor, temperatura, fluido, volume, densidade, força de empuxo e força da gravidade. No entanto, o conhecimento dos significados desses conceitos isolados não é suficiente para formar a ideia que representa o processo de convecção. Ainda é preciso estabelecer uma relação coerente entre eles, para se alcançar o nível mais elevado de aprendizagem.

No que diz respeito à forma como uma nova informação se relaciona com os subsunçores preexistentes na estrutura cognitiva, a aprendizagem pode ser do tipo subordinada, superordenada ou combinatória. Na aprendizagem subordinada, é apresentado ao estudante um novo conceito mais específico que depende da existência de um subsunçor mais abrangente. Ou seja, o novo conceito mais restrito é assimilado por outro preexistente, que é mais geral. Na aprendizagem superordenada, a nova ideia apresentada que é mais abrangente e inclusiva do que os conceitos presentes no intelecto do aluno. Dessa forma, é a nova ideia mais geral que assimila os conceitos mais específicos preexistentes. Na aprendizagem combinatória, a nova proposição potencialmente significativa não está relacionada de forma subordinada ou superordenada com as ideias previamente estabelecidas. Isso significa que ela não assimila, nem é assimilada por outras proposições preexistentes. Essa nova proposição se relaciona com um fundamento mais amplo de conteúdos presentes na estrutura cognitiva (AUSUBEL, NOVAK e HANESIAN, 1998, p. 47). No subconjunto 3 da Figura 2, que trata do estudo sobre o fenômeno da radiação térmica, é estabelecida uma relação de subordinação entre os elementos que constituem essa ideia. Primeiramente, o aluno pode ser levado a mobilizar o seu conhecimento sobre energia potencial e energia cinética de um corpo móvel para contrapor às diferenças existentes na descrição do movimento de uma onda. Na sequência, o conceito subsunçor de onda é ampliado, pois a discussão avança das ondas mecânicas para as ondas eletromagnéticas. Depois que o estudante assimilou a ideia de ondas eletromagnéticas, ele está apto a discutir os efeitos da radiação térmica absorvida pela matéria, tendo como referência o modelo idealizado de corpo negro. Finalmente, este último modelo é modificado para incluir a compreensão dos fenômenos da absorção e da emissão de radiação térmica por corpos reais.

Outro aspecto relevante da teoria ausubeliana para este trabalho é o processo de diferenciação progressiva, inerente à aprendizagem subordinada. Quando um conceito subsunçor assimila outro por subordinação, ele não fica apenas mais abrangente, como também pode ser modificado e receber um novo significado. A propagação das ondas, por exemplo, ganha um novo significado quando a discussão é transposta das ondas mecânicas para as ondas

eletromagnéticas. Enquanto a propagação da onda mecânica depende das oscilações de um meio físico finito, a propagação da onda eletromagnética pode ocorrer no vácuo espacial infinito, graças às induções mútuas entre os campos elétrico e magnético.

Por último, é importante mencionar o processo de reconciliação integrativa, pelo qual se procura estabelecer relações entre conceitos e proposições presentes na estrutura cognitiva, integrando-os para formar novos subsunçores. Assim:

“Reconciliação integrativa é o princípio pelo qual a programação do material instrucional deve ser feita para explorar relações entre ideias, apontar similaridades e diferenças significativas, reconciliando discrepâncias reais ou aparentes.” (MOREIRA e MASINI, 1982, p. 22)

4 SUBSÍDIOS EPISTEMOLÓGICOS DA TEORIA RACIONALISTA DE MARIO BUNGE APLICADOS AO ENSINO DE CIÊNCIAS

Uma sequência didática centrada no uso de experimentos para a verificação de modelos e teorias da Física encontra na filosofia racionalista de Mario Bunge os pressupostos epistemológicos que melhor elucidam os anseios do autor deste trabalho, conforme discutido nos parágrafos seguintes. A necessidade de um referencial epistemológico se justifica pelo fato de o ensino de ciências não ser uma atividade desprovida de intenções do sujeito que a pratica. O professor precisa ter consciência dos motivos que o levaram a definir o rol de conteúdos selecionados e a forma de abordagem com os alunos. Portanto, “é necessário que os professores tornem claras para si mesmos suas imagens da natureza da ciência, pois eles desempenham papel importante como mediadores da cultura científica e precisam comunicar tais ideias em suas aulas.” (MOREIRA e MASSONI, 2016, p. 4)

A necessidade de transformar a natureza para fazer do mundo um lugar mais confortável levou o homem a desenvolver a ciência, um conjunto de ideias caracterizado por um conhecimento racional, sistemático, exato e, como também verificável, ainda falível. A ciência tem importante valor social, porque produz benefícios concretos quando é convertida em tecnologia. Mas, ela também tem valor em si mesma, pois é um bem cultural, como um sistema de ideias estabelecidas provisoriamente e como uma fonte de novas ideias (BUNGE, 2001, p. 11-12). O valor social é mais fácil das pessoas reconhecerem, por elas serem beneficiárias do uso das diferentes tecnologias desenvolvidas a partir dessa ciência. A educação científica deve assumir o papel de valorizar a dimensão cultural dessa atividade humana. Se tal papel não for desempenhado, a ciência continuará a ser vista como algo que é restrito a especialistas e, por isso, inacessível à maioria.

Segundo Bunge, as ciências se dividem em dois grupos, as formais e as fáticas. A diferença entre elas está no objeto de estudo e no método empregado para verificar os enunciados produzidos por suas teorias. Os objetos das ciências formais são ideias representadas por símbolos, que não existem na realidade, mas somente na mente humana. Seus teoremas são verificados somente pelo raciocínio lógico. Fazem parte desta categoria a Lógica e a Matemática. Os objetos das ciências fáticas são processos do mundo real e a verificação dos enunciados depende da observação e/ou do experimento. As ciências da natureza, como a Física, se enquadram nesta segunda categoria. O pensamento racional é uma característica

desses dois tipos de ciência, pois ambos nascem no campo das ideias. No entanto, as ciências fáticas se diferenciam por serem carregadas de objetividade, ou seja, as suas teorias buscam se aproximar o máximo possível da realidade que supõem existir. Nesta perspectiva, os experimentos propostos neste trabalho procuram demonstrar esta relação de proximidade entre o conhecimento científico e os fatos observáveis, desfazendo a visão da ciência como uma atividade produtora de verdades absolutas.

É importante destacar as principais características da ciência fática (BUNGE, 2001, p. 21-48):

- *O conhecimento científico é fático*: a ciência tenta descrever os fatos como eles são, de forma impessoal e, quando necessário, pondera sobre os desvios causados por perturbações inerentes ao ato de observar.
- *O conhecimento científico transcende os fatos*: a ciência vai além daquilo que é possível perceber pela observação. Ela seleciona os fatos, produz hipóteses explicativas e as submete a testes.
- *O conhecimento científico é analítico*: a investigação científica inicia a busca pela compreensão de um problema decompondo-o em suas partes componentes. Os objetos que surgem dessa decomposição são analisados para a compreensão dos seus mecanismos internos, responsáveis pelos fenômenos observados. A ciência deve ainda ser capaz de estabelecer relações de interdependência entre as partes analisadas e reconstruir o todo.
- *A investigação científica é especializada*: uma consequência do tratamento analítico dos problemas é a especialização da ciência. Esta não impede o surgimento de campos interdisciplinares, mas estreita a visão do cientista que fica restrito a sua área.
- *O conhecimento científico é claro e preciso*: a ciência delimita o problema que pretende resolver e apresenta os resultados com clareza. A precisão surge do exercício de oferecer descrições exatas para os conceitos, superando definições vagas e superficiais que são características do senso comum.
- *O conhecimento científico é comunicável*: a comunicação é possível porque a ciência é expressa em uma linguagem precisa, compreendida por aqueles que são treinados para isso. A comunicação também é importante para o desenvolvimento científico, quando o seu conhecimento é tornado público. Ao

serem divulgadas, as pesquisas científicas podem ser verificadas de forma independente por pares de uma determinada área.

- *O conhecimento científico é verificável*: as hipóteses fáticas devem ser testadas empiricamente, por meio de observações ou experimentos. Caso contrário, não seria possível a busca pelo conhecimento objetivo.
- *A investigação científica é metódica*: todas as suas etapas (identificação do problema, proposição de hipóteses, testagem por observação ou experiência e interpretação dos resultados) são planejadas e seguem um conjunto de prescrições que passam por um contínuo aperfeiçoamento.
- *O conhecimento científico é sistemático*: a ciência é um sistema de teorias representadas por um conjunto de hipóteses com certo grau de generalidade. Tais ideias não existem isoladas, mas são conectadas entre si por uma lógica e de forma orgânica (hipóteses novas podem modificar radicalmente uma teoria). Seu avanço é, ao mesmo tempo, acumulativo e revolucionário.
- *O conhecimento científico é geral*: a ciência não se ocupa de fatos isolados, mas sim de formular princípios gerais que sirvam para compreender classes de fatos. “Ao químico não lhe interessa esta ou aquela fogueira, mas o processo de combustão em geral.” (BUNGE, 2001, p. 37)
- *O conhecimento científico é legal*: a ciência formula leis e as aplica, inserindo fatos singulares em pautas gerais. Uma lei científica pode explicar um fato, ou estar num nível mais elevado de generalização e conter dentro de si outras leis mais específicas.
- *A ciência é explicativa*: utiliza leis para explicar fatos e as explica por meio de princípios mais gerais. Neste sentido, as Leis de Newton oferecem princípios universais que, dentre outras implicações, incorporam as Leis de Kepler, que são restritas à explicação do movimento planetário (fato).
- *O conhecimento científico é preditivo*: as leis científicas são utilizadas para explicar fatos passados e para prever fatos futuros. A previsão científica é uma maneira de testar hipóteses e de controlar ou modificar o rumo dos acontecimentos.

- *A ciência é aberta*: a possibilidade de uma lei ser refutada mantém a ciência constantemente sujeita a sofrer modificações. Não é, portanto, um sistema dogmático e fechado.
- *A ciência é útil*: pois, oferece ferramentas para o desenvolvimento tecnológico e, também, se retroalimenta de informações oferecidas por ele. Também tem valor em si mesma, por enriquecer, disciplinar e libertar a mente humana.

Façamos uma pausa na apresentação da teoria de Bunge para destacar a sua influência na proposta deste trabalho. Tomemos como exemplo as aulas centradas no tema do processo de transferência de calor por condução em uma barra metálica. Num primeiro encontro, os alunos foram levados a observar experimentalmente (caráter fático da proposta) a variação da temperatura em diferentes pontos ao longo do comprimento de uma barra metálica, enquanto esta era colocada entre uma fonte quente e uma fonte fria, localizadas nas suas extremidades. O principal fato a ser observado era que a temperatura dependia somente da localização de cada sensor, em relação às fontes quente e fria. No entanto, para evidenciar essa observação, foi preciso ignorar as medidas de temperatura lidas pelos sensores antes que o regime estacionário de condução fosse estabelecido (o que ocorreu somente depois de um determinado intervalo de tempo em que o calor começou a transitar pela referida barra). Os dados foram, dessa forma, selecionados premeditadamente. E por quê? Por causa da característica analítica da ciência. A Lei de Fourier só consegue oferecer uma regra para a temperatura, quando variamos a posição em que ela é medida ao longo do comprimento do corpo que está conduzindo calor. Essa mesma lei não dá conta de explicar os fatos observados, se o tempo for uma variável que influencie no processo. Num segundo encontro, os estudantes utilizaram os dados empíricos coletados e construíram um gráfico, em que os pontos tinham como coordenadas a temperatura e a posição linear em que a mesma foi medida. Tais pontos sugerem a hipótese de que essas duas grandezas se relacionam por uma função matemática linear. Os alunos deduziram esta função e encontraram a Lei de Fourier para a situação construída em sala de aula. A racionalidade de uma ciência fática, como a Física, fica evidente nesta etapa, em que se emprega o uso da Matemática. A observação e a seleção de fatos, além da criação de uma hipótese explicativa, demonstram parcialmente o caráter metódico da ciência, evidenciado nas etapas descritas até aqui. Ainda faltam a verificação da hipótese e a análise dos resultados. Este foi o foco do terceiro encontro a respeito deste tema. Os participantes utilizaram as suas equações para

calcular os valores das temperaturas nas posições onde se localizavam as fontes quente e fria (onde não existiam sensores, mas as temperaturas foram medidas por um termômetro infravermelho no dia da realização do experimento). Depois, esses valores teóricos foram comparados com os valores experimentais, como é característico de uma ciência verificável. Por fim, as discrepâncias entre teoria e dados experimentais serviram para discutir o levantamento de novas hipóteses, e contribui para a visão de que a ciência não é um produto acabado, mas se mantém aberta e em constante transformação.

Bunge (1974) acredita na existência de uma realidade objetiva que pode ser interpretada pelas teorias científicas gerais, por intermédio de objetos-modelos. Esses seriam elementos abstratos, pertencentes ao plano das ideias, que procuram representar da forma mais próxima possível elementos do mundo concreto. A aplicação de princípios de uma teoria geral sobre um objeto-modelo dá origem a um modelo teórico, capaz de produzir hipóteses a serem confrontadas com a realidade. Se as hipóteses passam no teste de verificação, o modelo teórico passa a incorporar a teoria geral, ampliando a sua abrangência. Se não passam, o objeto-modelo pode ser aperfeiçoado para se aproximar da realidade.

“Converter coisas concretas em imagens conceituais (objetos-modelo) cada vez mais ricas e expandi-las em modelos teóricos progressivamente complexos e cada vez mais fiéis aos fatos, é o único método efetivo para apreender a realidade pelo pensamento.” (BUNGE, 1974, p. 30)

Utilizemos como exemplo ilustrativo das ideias de Bunge o experimento apresentado neste trabalho para demonstrar características dos fenômenos da absorção e da emissão da radiação eletromagnética pelos corpos reais. O fato concreto possível de ser observado neste experimento é uma diferença na variação da temperatura entre dois corpos de cores diferentes (um claro e outro escuro), quando foram submetidos à incidência de luz visível e calor (infravermelhas), provenientes de uma lâmpada incandescente. O objeto-modelo que substitui os corpos reais neste caso é o que os físicos chamam de corpo negro, cuja característica é a sua capacidade de absorver toda a radiação incidente sobre ele. A Física Quântica é a teoria geral, cujos princípios aplicados ao objeto-modelo do corpo negro dão origem ao modelo teórico, conhecido como Lei de Planck. Esta lei produz a hipótese de que a potência por área emitida por um corpo aquecido é proporcional à sua temperatura elevada à quarta potência (Lei de Stefan-Boltzmann). A comparação entre os valores de potência irradiada pelos corpos reais nos fornece a informação sobre qual deles se aproxima mais do objeto-modelo idealizado.

Se a modelização como processo de apreensão da realidade é fundamental para o desenvolvimento das ciências fáticas, também o é para o ensino das mesmas. A apresentação do processo de construção de modelos em sala de aula é importante para o aluno entender que a nossa visão da realidade é uma simulação de modelos idealizados que tentam se aproximar dela (PIETROCOLA, 1999). É importante demonstrar que, embora sejam imperfeitos, tais modelos são úteis para a resolução de problemas do mundo real, para a explicação de fatos passados e para a previsão de fatos ainda não observados. Se o modelo for apresentado como um instrumento útil para a transformação da realidade, estaremos potencializando a capacidade criativa do estudante. O uso da modelização no ensino também contribui para uma compreensão crítica de que as teorias são provisórias, pois os modelos podem ser aperfeiçoados, ou completamente substituídos. E que, neste último caso, a nossa visão de mundo acaba mudando juntamente com o novo modelo adotado.

5 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Quando o calor é transferido para o interior de um sistema, os átomos que o compõem sofrem alterações nos seus movimentos microscópicos. A velocidade e a amplitude desses movimentos tendem a aumentar com a transferência de calor. A energia associada ao movimento das partículas é chamada de energia interna do sistema. Considerando a vibração de um átomo em torno da sua posição de equilíbrio, o período de oscilação é da ordem de 10^{-15} s, ou seja, trata-se de um movimento muito mais rápido do que estamos acostumados a presenciar cotidianamente. Além desses movimentos serem muito rápidos, a quantidade de átomos presentes em qualquer amostra do referido sistema será tão grande (da ordem de 10^{23}), que torna impossível o tratamento individual de cada partícula. Por isso, a Termodinâmica propõe que os processos que envolvem a transferência de calor sejam descritos por quantidades que possam ser verificadas macroscopicamente. Essas quantidades são as variáveis de estado, dentre as quais, citamos: temperatura, volume, pressão e número de moles. As condições de um sistema são, portanto, descritas por essas variáveis, que irão passar de um determinado estado inicial para um determinado estado final, devido ao acréscimo ou à retirada de calor do mesmo. Cada estado precisa representar uma condição estática do sistema, no momento em que ele foi observado. (CALLEN, 1985)

Os efeitos da transferência de calor se estendem sobre as propriedades físicas da matéria. O efeito termoelétrico, por exemplo, faz surgir uma diferença de potencial elétrico entre dois metais diferentes, quando são submetidos a uma diferença de temperatura. Este é o princípio aplicado na construção do sensor termopar de temperatura. Objetos aquecidos emitem radiação eletromagnética, cujo comprimento de onda depende da temperatura. Esses e outros efeitos serão explorados neste trabalho, no decorrer das discussões sobre os processos de transferência de calor por condução, irradiação e convecção.

5.1 CONDUÇÃO DE CALOR

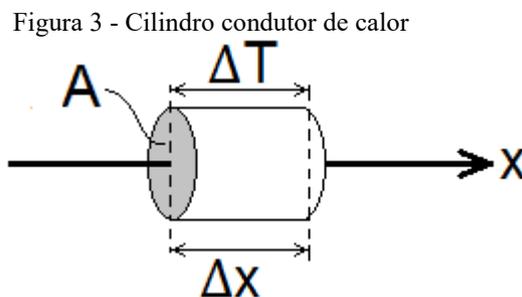
Se colocarmos apenas uma das extremidades de um objeto metálico em contato com as chamas do queimador de um fogão doméstico, a outra também tem a sua temperatura elevada gradativamente com o tempo. Conseguimos perceber, ainda, que a temperatura em cada ponto

do objeto é maior, quanto mais próxima da fonte de calor ela for medida. Essa experiência, comum em nosso cotidiano, indica que o calor proveniente das chamas é conduzido pelo objeto de uma ponta à outra. As causas desse tipo de fenômeno são demasiadamente complexas para serem discutidas neste trabalho. Mas, a descrição matemática de como ocorre a propagação do calor em um meio material nos foi apresentada por Fourier, em 1815.

Fourier parte da ideia de fluxo de calor, J , uma grandeza concebida para representar a quantidade de calor, ΔQ , que atravessa a seção transversal de um corpo por unidade de área, A , e por unidade de tempo, Δt .

$$J = \frac{1}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Embora Fourier seja o autor original dessas ideias sobre calor, por questões de disponibilidade de material para leitura e concisão, citaremos outros autores neste desenvolvimento. Dessa forma, considere um cilindro (figura 3) de comprimento Δx e área da seção transversal A , que é submetido a uma diferença de temperatura ΔT entre as suas extremidades. (SALINAS, 2016)



Fonte: O autor (2022)

Conforme Salinas (2016), se a parede lateral do cilindro não trocar calor com o ambiente ao seu redor, o fluxo de calor J depende da variação da temperatura ao longo do comprimento deste objeto, de acordo com a equação 2.

$$J = -\kappa \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Em que κ é a condutividade térmica do material que constitui o cilindro, medida em $\frac{J}{m \cdot s \cdot ^\circ C}$.

Substituindo o fluxo de calor J da equação 2 pelos termos da equação 1, encontramos equação 3 (NUSSENZVEIG, 1981, p. 280), representada na sua forma diferencial.

$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa A \frac{dT}{dx}$$

Voltando ao desenvolvimento apresentado por Salinas (2016), a situação em que o cilindro está se resfriando, o fluxo de calor que sai dele é maior que o fluxo que entra, conforme se espera de um corpo que está perdendo energia. O produto da área pela diferença entre os fluxos de saída e de entrada é a corrente térmica (quantidade de calor por unidade de tempo) que atravessa o cilindro, dada pela equação 4 (SALINAS, 2016, p. 11-13).

$$A \left[\underbrace{J(x + \Delta x, t)}_{\text{fluxo de calor que sai}} - \underbrace{J(x, t)}_{\text{fluxo de calor que entra}} \right] = -\frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Considerando que o calor perdido pelo cilindro é dado pela equação fundamental da calorimetria ($\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$) e substituindo $J(x + \Delta x, t) - J(x, t)$ por ΔJ , escrevemos a equação 5.

$$A \cdot \Delta J = -\frac{mc\Delta T}{\Delta t} \quad (5)$$

Isolando ΔJ e dividindo os dois lados da igualdade pelo comprimento Δx do cilindro, obtemos:

$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\frac{mc}{A \cdot \Delta x} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\rho c \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (7)$$

Em que $\rho = \frac{m}{A \cdot \Delta x}$ é a densidade de massa e c é o calor específico da substância que compõe o cilindro. Na sua representação diferencial, a equação 7 é reescrita como:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Aplicando a derivada acima à representação diferencial da equação 2, obteremos a equação de Fourier para a propagação do calor em uma dimensão.

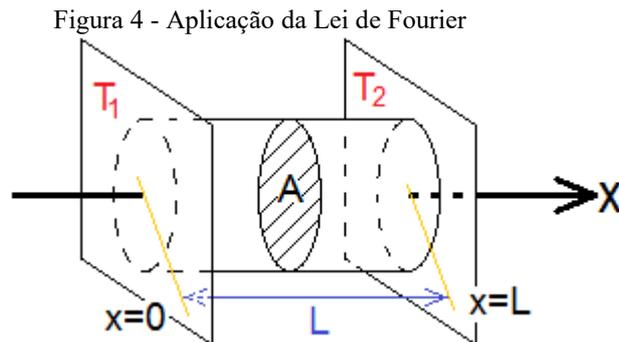
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

$$-\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Em que $k = \frac{\kappa}{\rho c}$ é chamada constante de difusividade térmica.

Vamos tratar a equação acima na situação mais simples possível, que é aquela em que a temperatura ao longo do cilindro depende somente da posição x e independe do tempo t , ou seja, em regime estacionário (ou permanente). Suponha que outro cilindro (figura 4), agora com comprimento L , esteja submetido a uma temperatura T_1 na face localizada em $x = 0$ e a uma temperatura T_2 na face posicionada em $x = L$. (ALVES, 2019, p. 6-11)



Fonte: O autor (2022)

Se a temperatura não depende do tempo, a equação 11 se torna:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (12)$$

Ou, trocando a representação de derivada parcial para derivada ordinária:

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (14)$$

Ainda segundo Alves (2019), podemos integrar a equação 14 duas vezes para encontrar a solução dessa equação diferencial ordinária. Integrando $\frac{dT}{dx}$ uma vez, obtém-se uma constante, que chamaremos de C_1 . Integrando de novo, obtém-se:

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (15)$$

As constantes de integração C_1 e C_2 são determinadas pelas seguintes condições de contorno:

- Em $x = 0$: $T(0) = C_1 \cdot 0 + C_2 = C_2 = T_1$;
- Em $x = L$: $T(L) = C_1 L + C_2 = C_1 L + T_1 = T_2 \Rightarrow C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L}$.

Dessa forma, a equação da temperatura T em função da posição x é dada por:

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \quad (16)$$

Esta é a solução da equação de Fourier para uma dimensão em regime estacionário. Vamos substituir este resultado na equação 3:

$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa A \frac{d}{dx} \left[(T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \right] \quad (17)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa A \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (18)$$

É interessante observar que o lado direito da equação 18 é formado somente por parâmetros constantes, dados pelas condições iniciais do sistema composto pelo cilindro e pelas fontes quente e fria. Dessa forma, a corrente térmica em regime estacionário é constante em

qualquer seção transversal do cilindro. Se não fosse, haveria um aumento da temperatura com o tempo, contrariamente ao que supomos nesta discussão. (NUSSENZVEIG, 1981, p. 282)

5.1.1 Aplicação da Lei de Fourier a um experimento didático

Certamente o tratamento matemático dado à Lei de Fourier na seção 5.1 não é adequado para ser apresentado aos estudantes do ensino médio. Dessa forma, é proposta neste trabalho uma versão simplificada dessa Lei, cuja dedução toma como ponto de partida a equação 18. Seja:

- a corrente térmica $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ considerada constante, situação em que ela pode ser representada por $\frac{Q}{\Delta t}$;
- a diferença de temperatura entre dois pontos do cilindro representado na figura 4 dada por $T_1 - T_n$; e
- a distância entre os dois pontos em que tais temperaturas foram medidas dada por $x_1 - x_n$.

Assim, a equação 18 é reescrita da seguinte forma:

$$\frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{(T_1 - T_n)}{(x_1 - x_n)} \quad (19)$$

Agora, na equação 19, substituímos: $x_1 = 0, T_n = T$ e $x_n = x$. Então:

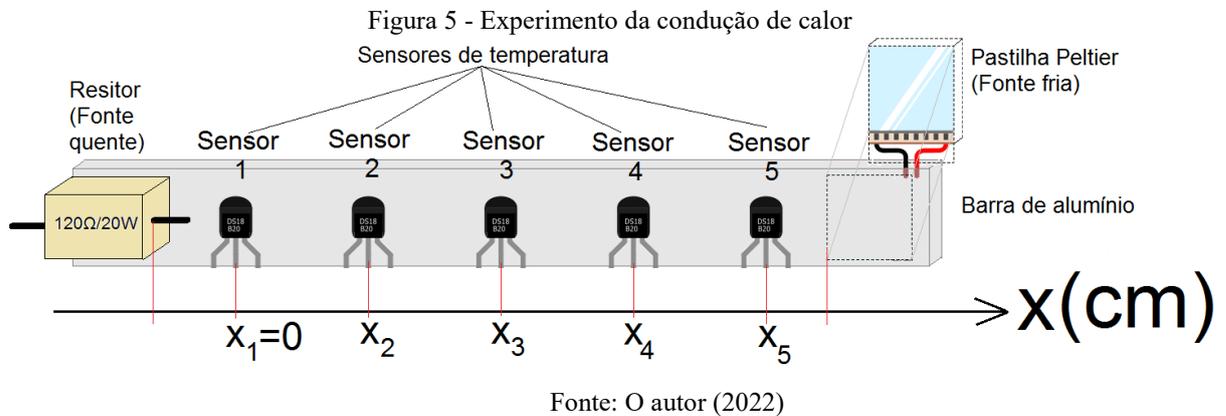
$$\frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{(T_1 - T)}{(0 - x)} \rightarrow \frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{(T_1 - T)}{-x} \rightarrow \left(\frac{1}{\kappa A} \frac{Q}{\Delta t}\right) x = T_1 - T$$

Obtemos dessa forma a versão simplificada da Lei de Fourier:

$$T(x) = -\left(\frac{1}{\kappa A} \frac{Q}{\Delta t}\right) x + T_1 \quad (20)$$

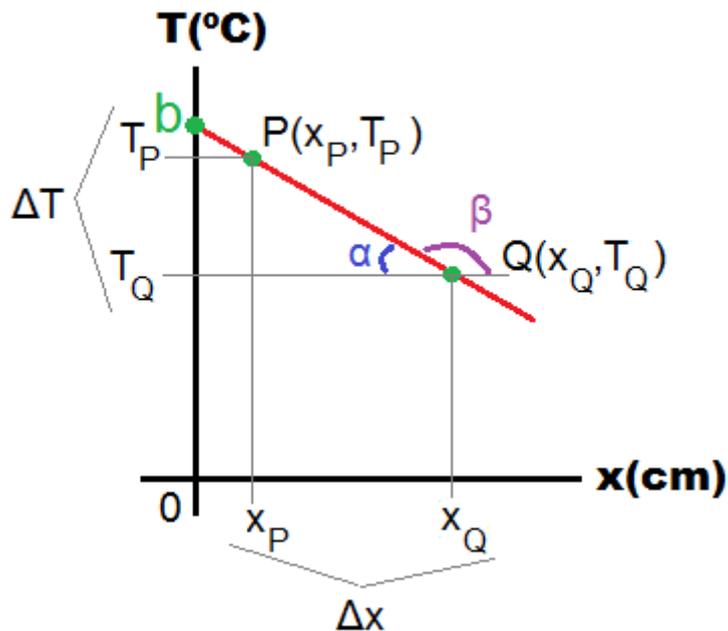
A proposta é verificar o modelo teórico dado pela equação 20 com o uso do arranjo experimental ilustrado pela figura 5, registrando os valores da temperatura em função da

posição ao longo do comprimento de uma barra de alumínio, enquanto esta conduz uma corrente térmica entre um resistor elétrico (fonte quente) e uma pastilha Peltier (fonte fria).



Considerando que a equação 20 é uma função linear, podemos propor que os alunos utilizem os dados medidos para obter a equação experimental da Lei de Fourier. Após marcar os pontos experimentais numa folha de papel milimetrado, podemos traçar uma reta que melhor se ajuste a tais pontos. Em seguida, marcamos dois pontos quaisquer (P e Q) sobre a reta traçada e calculamos o seu coeficiente angular a (Figura 6):

Figura 6 - Obtendo o coeficiente angular da equação experimental



$$a = \tan \beta = - \tan \alpha = - \frac{\Delta T}{\Delta x} = - \frac{(T_P - T_Q)}{(x_Q - x_P)} \quad (21)$$

O coeficiente linear b é dado pelo ponto em que a reta traçada intercepta o eixo vertical e corresponde à temperatura do primeiro sensor (T_1). Finalmente, a equação experimental pode ser obtida:

$$T(x) = ax + b \quad (22)$$

Em que $a = - \left(\frac{1}{\kappa A \Delta t} \frac{Q}{\Delta x} \right)$ e $b = T_1$.

5.2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E PROPAGAÇÃO DO CALOR POR RADIAÇÃO

Diferentemente da propagação do calor por condução, em que a energia necessita de um meio material para fluir, a propagação do calor por irradiação pode ocorrer até mesmo no vácuo. Segundo Griffiths (2011), a Lei de Ampère-Maxwell sugere que a variação de um campo elétrico no tempo está relacionada com o surgimento de um campo magnético correspondente. Já a Lei de Faraday sugere que a variação de um campo magnético no tempo está relacionada ao surgimento de um campo elétrico. Isso significa que, se uma carga elétrica for acelerada, o campo elétrico ao seu redor irá variar. Essa variação do campo elétrico induzirá o surgimento de um campo magnético, também variável. O campo magnético variável induzirá, novamente, um campo elétrico. Assim, campo elétrico e campo magnético se induzem mutuamente na propagação de uma onda eletromagnética. Resumidamente, este é o resultado principal da teoria eletromagnética de Maxwell.

Considerando o caso mais simples, vamos representar o campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{B} de ondas eletromagnéticas planas, que possuam uma única frequência ν (monocromáticas), pelas seguintes equações (GRIFFITHS, 2011, p. 262-266):

$$\vec{E}(z, t) = E_x \hat{x} = E_{máx} \cos(kz - \omega t) \hat{x} \quad (23)$$

$$\vec{B}(z, t) = B_y \hat{y} = B_{máx} \cos(kz - \omega t) \hat{y} \quad (24)$$

Em que:

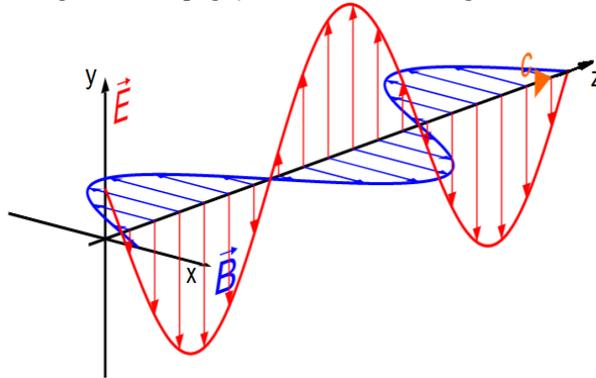
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (número de onda, relacionado com o comprimento de onda λ); e
- $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ (frequência angular, relacionada à frequência ν e ao período T).

O sentido de propagação dessa onda é dado pelo produto vetorial:

$$\vec{E} \times \vec{B} = E_x B_y \hat{z} \quad (25)$$

Neste caso, a onda se propaga no sentido do eixo z, conforme a figura 7.

Figura 7 - Propagação da onda eletromagnética



Fonte: Physics at school³ (2018)

Ao se propagar, a onda eletromagnética transporta consigo uma energia média por unidade de tempo (potência) e unidade de área, chamada de intensidade (I). Esta pode ser obtida pelo valor médio do vetor de Poynting:

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \left\langle \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \right\rangle = \frac{1}{\mu_0} E_{m\acute{a}x} B_{m\acute{a}x} \langle \cos^2(kx - \omega t) \rangle = \frac{1}{2\mu_0} E_{m\acute{a}x} B_{m\acute{a}x} \quad (26)$$

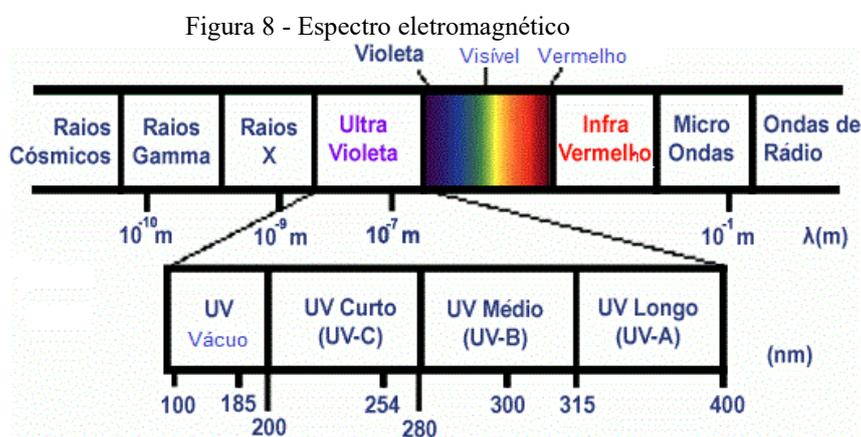
Em que μ_0 é a permeabilidade e seu valor é $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

Sabendo que $B = \frac{E}{c}$, e sendo c a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), finalmente temos a intensidade da onda eletromagnética:

³ Disponível em: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_vlna&l=pt.

$$I = \frac{1}{2\mu_0 c} E_{m\acute{a}x}^2 \quad (27)$$

E o que a oscilação dos campos \vec{E} e \vec{B} tem a ver com a propagação do calor por radiação? A resposta está no fato de que o conjunto das partículas que compõem qualquer corpo apresentam alguma quantidade de energia térmica armazenada, desde que a temperatura esteja acima do zero absoluto. Essa energia se manifesta na vibração e/ou rotação dessas partículas. Se essas possuírem a propriedade da carga elétrica, especialmente os elétrons que têm maior liberdade de movimento que os prótons, então é emitida a partir delas uma onda eletromagnética (o corpo irradia), conforme prevê a teoria de Maxwell. As ondas eletromagnéticas geradas por essa razão são chamadas de radiação térmica. Corpos à temperatura ambiente emitem radiação térmica na faixa de frequência do infravermelho do espectro eletromagnético (figura 8), enquanto corpos submetidos a temperaturas mais elevadas podem se tornar incandescentes e emitir radiação térmica na faixa da luz visível. A diferença entre um tipo e outro de radiação eletromagnética está apenas na frequência de oscilação dos campos \vec{E} e \vec{B} .



Fonte: Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul⁴ (2022)

A intensidade da radiação absorvida I_a por um corpo depende do material do qual ele é constituído, o que vai determinar a sua estrutura molecular e as distâncias interatômicas, responsáveis por características como a cor e a transparência/opacidade. Esses fatores são

⁴ Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20022/Carla/espectro.htm>.

representados por um coeficiente chamado de absorvência α . Ele representa a fração da intensidade incidente I_I que é absorvida pelo corpo e o seu valor pode variar de zero a um (TEC-SCIENCE, 2019).

$$\alpha = \frac{I_a}{I_I} \rightarrow 0 \sim 1 \quad (28)$$

Já os fatores que influem na quantidade de radiação que é emitida por um corpo estão reunidos em seu coeficiente de emissividade ϵ , cujo valor também varia de zero a um. Segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, a intensidade da radiação que é absorvida e/ou emitida por um corpo depende da sua temperatura elevada à quarta potência e são dadas, respectivamente, por:

$$I_a = \alpha\sigma T^4 \quad (29)$$

$$I_e = \epsilon\sigma T^4 \quad (30)$$

Em que σ é a constante de Stefan e seu valor é $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

Segundo a Lei de Kirchhoff, um corpo em equilíbrio térmico com o seu ambiente emite e absorve radiação térmica a uma mesma taxa (TEC-SCIENCE, 2019). Dessa forma, para um corpo a uma determinada temperatura, podemos escrever:

$$I_a = I_e \quad (31)$$

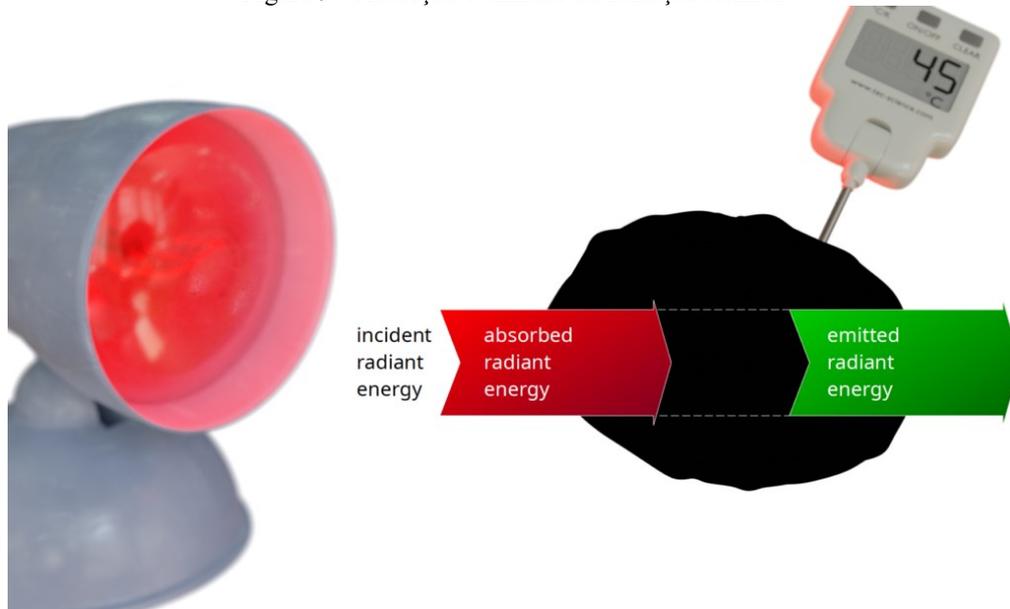
$$\alpha\sigma T^4 = \epsilon\sigma T^4 \quad (32)$$

$$\alpha = \epsilon \quad (33)$$

Ou seja, nessas condições de equilíbrio térmico, a absorvência e a emissividade de um corpo têm o mesmo valor. Portanto, um corpo pode trocar calor com o ambiente que o circunda por meio da radiação eletromagnética que ele emite e/ou absorve. Quando um corpo absorve alguma parte dessa radiação que incide sobre ele, seus átomos vibram com mais intensidade em torno das suas respectivas posições de equilíbrio. Esta vibração maior se reflete macroscopicamente no aumento da temperatura. Outra consequência desse acréscimo de energia térmica é a emissão de parte da radiação que o próprio corpo absorveu. Agora, a emissão da radiação faz diminuir a vibração das partículas, o que significa redução da temperatura. Um

corpo entra em equilíbrio térmico com o seu ambiente quando a quantidade de radiação que ele absorve se iguala à quantidade de radiação que ele emite (figura 9). (TIPLER e LLEWELLYN, 2001, p. 83)

Figura 9 - Absorção e emissão de radiação térmica



Fonte: Tec-Science⁵ (2022)

A diferença entre a intensidade da radiação emitida e a intensidade da radiação absorvida, para um corpo real, é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann, representada da seguinte forma (SILVERMAN e SILVERMAN, 2000):

$$I = -\epsilon\sigma A(T^4 - T_0^4) \quad (34)$$

A equação 34 nos diz que o fluxo de energia que um corpo irradia depende da sua área A de emissão, da sua emissividade e da diferença entre a quarta potência da sua temperatura e a quarta potência da temperatura do ambiente ao seu redor. Se a temperatura do corpo (T) for maior que a temperatura do seu ambiente (T_0), o fluxo de energia (I) será negativo, indicando que ele está emitindo mais radiação térmica que absorvendo o que incide sobre ele. O sinal negativo indica, portanto, que a direção do maior fluxo de energia é de dentro para fora do corpo. Se a temperatura do ambiente for maior, o saldo do fluxo de energia se inverte e a

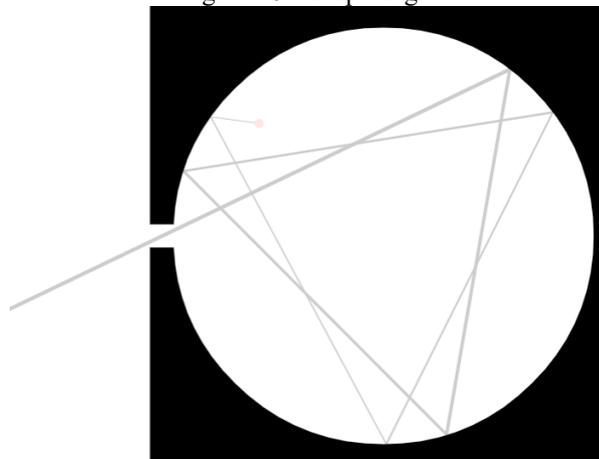
⁵ Disponível em: <https://www.tec-science.com/thermodynamics/temperature/stefan-boltzmann-law/>.

quantidade de calor que entra no corpo (radiação absorvida) passa a ser maior que a quantidade que sai (radiação emitida). Na situação de equilíbrio térmico, ocorre o que está previsto pela Lei de Kirchhoff, com as taxas de emissão e de absorção se igualando.

Um corpo idealizado pelos físicos com a propriedade de absorver toda a radiação que incide sobre ele é chamado de corpo negro (Figura 10). Tal corpo pode ser imaginado como uma cavidade que possui um pequeno orifício, por onde a radiação do meio externo entra. A probabilidade de que a radiação incidente sobre o orifício seja absorvida após sofrer sucessivas reflexões nas paredes internas da cavidade é bem maior que a probabilidade dessa mesma radiação sair (TIPLER e LLEWELLYN, 2001, p. 84). Uma vez que esse corpo entre em equilíbrio térmico com o seu ambiente, ele passará a irradiar a mesma quantidade de energia que absorve. Por essa razão, os coeficientes de absorção e de emissão para o corpo negro são iguais a um ($\alpha = \epsilon = 1$) e a Lei de Stefan-Boltzmann se resume a:

$$I = \sigma T^4 \quad (35)$$

Figura 10 - Corpo negro



Fonte: Physics at school⁶ (2022)

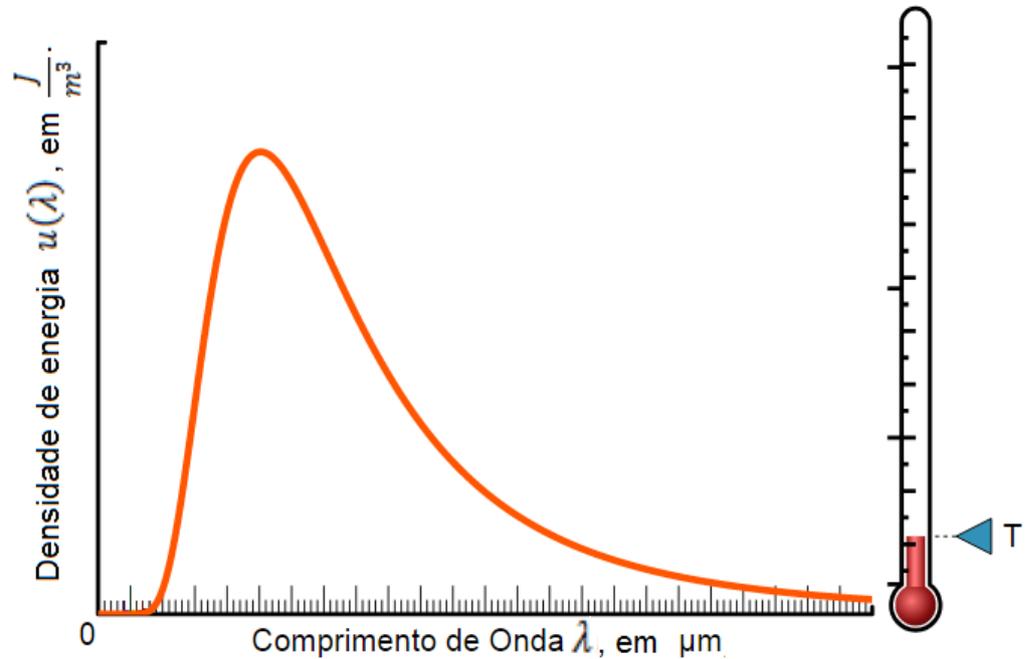
5.2.1 Dedução da Lei de Stefan-Boltzmann a partir da Lei de Planck

A Lei de Planck é uma equação que descreve o comportamento da radiação emitida pelo corpo negro e é uma aproximação para os casos de corpos reais. Antes da sua representação

⁶ Disponível em: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/templateimg.php?s=opt_model&l=pt.

algébrica, vejamos a representação gráfica (figura 11) desta Lei e quais as informações que ela fornece.

Figura 11 - Curva da distribuição da densidade de energia X comprimento de onda



Fonte: O autor (2022)

O gráfico acima nos mostra a distribuição da densidade de energia $u(\lambda)$ ao longo do espectro de emissão de um corpo aquecido a uma temperatura T . A curva nos mostra que esse corpo emite muitos comprimentos de onda (λ) diferentes, cada um deles com uma densidade de energia $u(\lambda)$ correspondente. O comprimento de onda para o qual a densidade de energia é máxima depende apenas da temperatura do corpo e é dado pela Lei de deslocamento de Wien (TIPLER e LLEWELLYN, 2001, p. 83):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,898 \times 10^{-3} m \cdot K}{T} \quad (36)$$

A equação 36 evidencia o fato de que a temperatura e o comprimento de onda máximo são grandezas inversamente proporcionais entre si. Ou seja, se a temperatura de um corpo aumenta gradativamente, o comprimento de onda máximo da radiação térmica emitida vai se deslocando para valores menores.

Ainda sobre a figura 11, observe que tanto para valores menores que $\lambda_{m\acute{a}x}$, quanto para valores maiores que $\lambda_{m\acute{a}x}$, a densidade de energia $u(\lambda)$ decai rapidamente, tendendo para zero. Tal comportamento é descrito pela Lei de Planck abaixo (TIPLER e LLEWELLYN, 2001, p. 86):

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (37)$$

Onde:

- $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (constante de Planck);
- $c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (velocidade da luz); e
- $k = 1,380658 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ (constante de Boltzmann).

Conforme Tipler e Llewellyn (2001), podemos integrar a função de distribuição da densidade de energia $u(\lambda)$, de zero a infinito, para encontrarmos a densidade total de energia U no interior do corpo aquecido.

$$U = \int_0^{\infty} u(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (38)$$

Fazendo $x = \frac{hc}{\lambda kT}$ e derivando x em relação a λ , $\frac{dx}{d\lambda} = -\frac{hc}{\lambda^2 kT}$, explicitamos $d\lambda$ ($d\lambda = -\frac{\lambda^2 kT}{hc} dx$) para substituir na integral da equação 38.

$$U = - \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^x - 1} \frac{\lambda^2 kT}{hc} dx \quad (39)$$

Utilizando um artifício algébrico, que consiste em introduzir os fatores $\left(\frac{\lambda kT}{hc}\right)^3$ e $\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)^3$ na integral da equação 39, podemos reescrevê-la:

$$U = - \int_0^{\infty} \left(\frac{\lambda kT}{\lambda kT} \right)^3 \left(\frac{hc}{hc} \right)^3 \frac{8\pi hc \lambda^{-5} \lambda^2 kT}{e^x - 1} \frac{\lambda^2 kT}{hc} dx \quad (40)$$

$$U = - \int_0^{\infty} \left(\frac{\lambda kT}{hc} \right)^3 \left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)^3 \frac{8\pi hc \lambda^{-5} \lambda^2 kT}{e^x - 1} \frac{\lambda^2 kT}{hc} dx \quad (41)$$

$$U = - \int_0^{\infty} \lambda^3 \left(\frac{kT}{hc} \right)^3 x^3 \frac{8\pi hc \lambda^{-3} kT}{e^x - 1} \frac{kT}{hc} dx \quad (42)$$

$$U = - \int_0^{\infty} \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 x^3 \frac{8\pi hc}{e^x - 1} dx \quad (43)$$

$$U = -8\pi hc \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (44)$$

Ainda segundo Tipler e Llewellyn (2001), a integral $\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$ tem resultado conhecido e é igual a $\frac{\pi^4}{15}$. Levando este resultado para a equação 44, obtemos:

$$U = -8\pi hc \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 \frac{\pi^4}{15} \quad (45)$$

$$U = - \left(\frac{8}{15} \pi^5 \frac{k^4}{h^3 c^3} \right) T^4 \quad (46)$$

A equação 46 nos dá a densidade total de energia U no interior do corpo aquecido à temperatura T . A potência por unidade de área (I) que é irradiada para fora desse corpo, segundo Tipler e Llewellyn (2001), é igual a:

$$I = \frac{1}{4} cU \quad (47)$$

Isolando U na equação 47 e substituindo na equação 46, obtemos:

$$\frac{4I}{c} = - \left(\frac{8}{15} \pi^5 \frac{k^4}{h^3 c^3} \right) T^4 \quad (48)$$

$$I = - \left(\frac{2}{15} \pi^5 \frac{k^4}{h^3 c^2} \right) T^4 \quad (49)$$

A equação 49 é a Lei de Stefan-Boltzmann, em que o termo entre parênteses é a constante de Stefan σ . O sinal negativo significa que a energia flui do corpo para o meio ambiente. Considerando o sentido oposto, em que o corpo absorve radiação do meio, a função tem valor positivo e a Lei de Stefan-Boltzmann é representada por:

$$I = \sigma T^4 \quad (50)$$

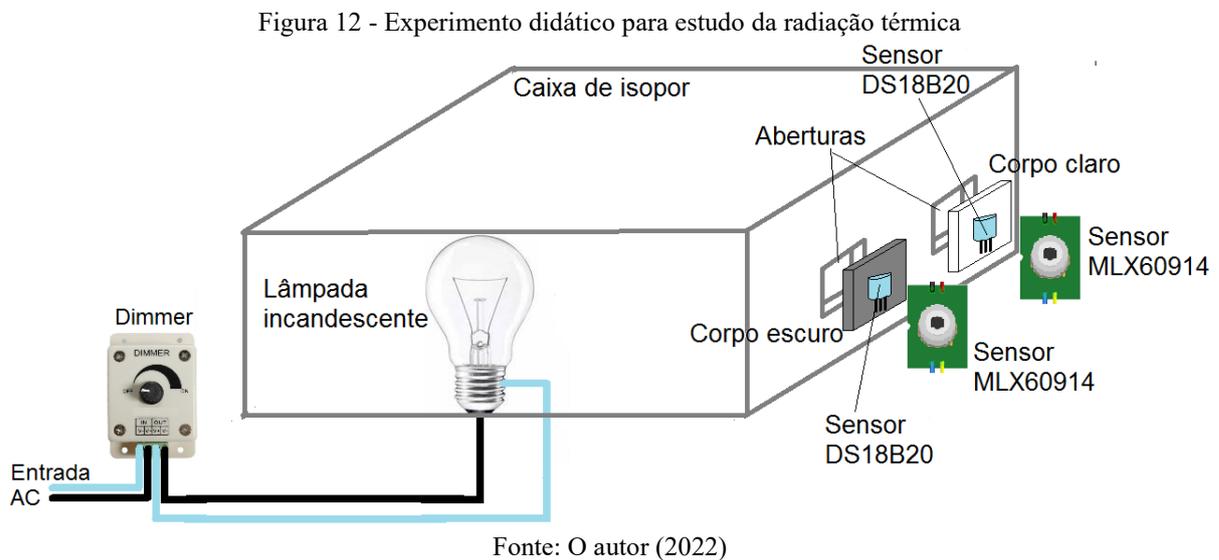
Similarmente à intensidade da radiação dada pela equação de Stefan-Boltzmann para um corpo negro (equação 50), a densidade de energia u também é proporcional à quarta potência da temperatura. Essas duas grandezas estão relacionadas pelo valor médio do vetor de Poynting, conforme a expressão abaixo. (Caruso e Oguri, 2016)

$$I = \langle \vec{S} \rangle = uc \quad (51)$$

5.2.2 Aplicação da Lei de Stefan-Boltzmann e da Lei de Wien a um experimento didático

A figura 12 ilustra o experimento utilizado para discutir a Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei de Wien com os alunos. Ele consiste de uma caixa de isopor fechada em todos os lados, exceto pelas duas aberturas feitas em uma das paredes laterais. Dentro da caixa, uma lâmpada incandescente controlada por um circuito que regula a sua potência (*dimmer*) é utilizada como fonte de radiação térmica (apesar da luz que também é emitida). Na direção de uma das aberturas é colocada uma chapa de alumínio pintada com tinta da cor preta (corpo escuro). Na

direção da outra abertura é colocada uma chapa de alumínio polida (corpo claro). Cada uma das chapas terá a sua respectiva temperatura monitorada por um par de sensores constituído por: um sensor de contato DS18B20 e um sensor infravermelho MLX60914.



Assim que a lâmpada é acionada, a primeira observação que é possível de ser feita com os estudantes é que a temperatura da chapa pintada de preto começa a se elevar mais rápido que a temperatura da chapa polida. É possível discutir com a classe os motivos dessa diferença na variação da temperatura, levando-se em consideração o modelo do corpo negro comparado a objetos reais e levar os alunos a refletirem sobre as taxas de absorção e emissão de cada chapa. O objetivo é que eles percebam que a temperatura do corpo escuro sobe mais rapidamente, porque ele absorve a maior parte da radiação incidente sobre ele e reflete uma parcela menor. Já o corpo claro reflete de volta para ambiente a maior parte da radiação incidente. A parte absorvida faz a temperatura desse último subir também, só que de maneira mais lenta, pois a absorção é menor.

O motivo para a utilização de dois sensores diferentes está no procedimento que pode ser adotado para determinar a emissividade de cada uma das chapas de alumínio. Após o aquecimento das chapas, temos três valores para cada uma: 1) a temperatura do objeto lida pelo sensor de contato (DS18B20), representada por $T_{contato}$; 2) a temperatura ambiente lida pelo sensor infravermelho (MLX60914), representada por $T_{ambiente}$; e 3) a temperatura do objeto também lida pelo sensor infravermelho (MLX60914), representada por $T_{infraverm}$. Após o

registro desses valores, calculamos a emissividade do corpo em consideração utilizando a equação 52 (MELEXIS, 2013).

$$\epsilon = \frac{T_{infraverm}^4 - T_{ambiente}^4}{T_{contato}^4 - T_{ambiente}^4} \quad (52)$$

Espera-se, desse modo, demonstrar aos estudantes que a emissividade do objeto escuro apresenta um valor mais próximo de 1 e o objeto claro, mais perto de zero. O valor encontrado para a emissividade de cada chapa pode ser utilizado para calcular a intensidade da radiação emitida, aplicando-se a Lei de Stefan-Boltzmann representada na equação 30 ($I_e = \epsilon\sigma T^4$). Assim, temos uma forma de demonstrar a relação entre a temperatura de um corpo aquecido e a potência por área que ele dissipa da sua superfície.

A mesma leitura da temperatura de cada chapa também pode ser utilizada para calcular o comprimento de onda para o qual a densidade de energia da radiação emitida é máxima. Neste caso, apresentamos um exemplo prático para dar significado à Lei de deslocamento de Wien (equação 36). Nesta etapa, é importante auxiliar os alunos a interpretar este dado, por exemplo, solicitando que localizem o comprimento de onda calculado numa representação gráfica do espectro eletromagnético. Considerando que o experimento foi realizado com dois objetos a temperaturas diferentes, os estudantes teriam duas marcações a fazer no referido espectro. Assim, facilita-se a percepção da relação inversamente proporcional que existe entre a temperatura de um corpo e o comprimento de onda mais intenso que ele emite.

5.3 CONVECÇÃO

5.3.1 A Lei de Resfriamento de Newton

Atribui-se a Isaac Newton uma das primeiras tentativas de elaborar uma escala de temperatura de utilidade prática. Newton colocou diferentes tipos de metais sobre uma barra de ferro incandescente e os deixou resfriar até que atingissem a temperatura ambiente. Durante intervalos regulares de tempo, ele monitorou a variação no volume da substância termométrica utilizada (óleo de linhaça) em seu termômetro rudimentar. Cada valor de volume era associado a um valor específico de temperatura da escala criada neste experimento. Newton concluiu que,

enquanto o tempo avançava em progressão aritmética, a temperatura avançava em progressão geométrica, mas não propôs nenhuma equação que descrevesse a relação entre essas duas grandezas. A interpretação atual é que a lei de resfriamento de Newton deve obedecer à seguinte equação matemática (SILVERMAN e SILVERMAN, 2000):

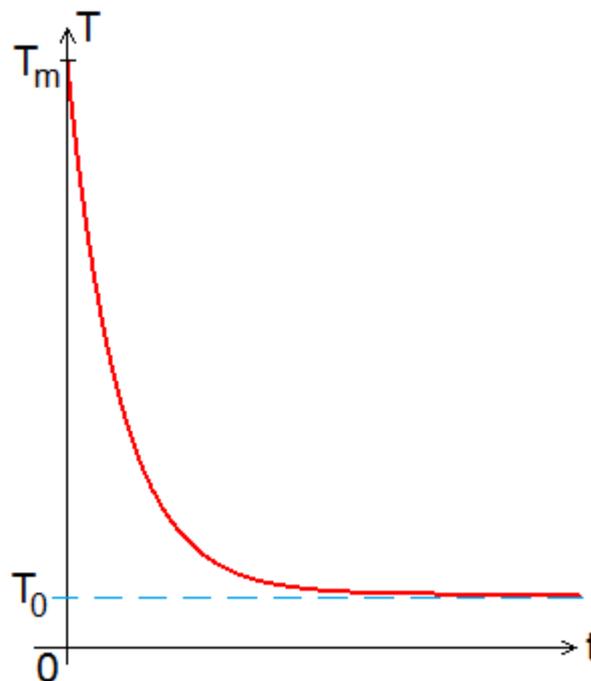
$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_0) \quad (53)$$

Em que T é a temperatura do objeto monitorado num determinado instante de tempo t , enquanto T_0 é a temperatura ambiente. A constante k deve agregar termos referentes às características físicas do corpo em estudo, que implicam na taxa com a qual a sua temperatura varia. A equação diferencial acima tem a seguinte solução (detalhada no Apêndice A):

$$T(t) = T_0 + (T_m - T_0)e^{-kt} \quad (54)$$

Em que T_m é a temperatura máxima atingida pelo objeto, no início da observação do processo de resfriamento. Essa equação sugere que a temperatura decaia exponencialmente com o tempo, conforme a curva da figura 13.

Figura 13 - Curva característica da Lei de Resfriamento de Newton



Fonte: O autor (2022)

Conforme os dados apresentados por M. P. Silverman e C. R. Silverman (2000), a equação 54 se aproxima dos valores experimentais somente numa faixa em que a temperatura do corpo aquecido não ultrapassa cerca de 20% (vinte por cento) da temperatura ambiente. Quando a temperatura do objeto em resfriamento parte de valores maiores, a perda de calor por radiação passa a ser predominante.

Islam (2017) propõe um exercício (ver Apêndice B) para deduzir a lei de resfriamento de Newton a partir da lei de Stefan-Boltzmann (equação 34), e obtém:

$$\frac{dT}{dt} = -k'(T - T_0) \quad (55)$$

Em que, $k' = \frac{A\epsilon\sigma 4T_0^3}{mc}$ e cada termo tem o seguinte significado:

- A é a área de irradiação;
- ϵ é a emissividade do material;
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ (constante de Stefan);
- T_0 é a temperatura ambiente;
- m é massa do corpo;
- c é o calor específico do material.

As equações 53 e 55 são iguais e nos sugere que exista uma relação entre a Lei de resfriamento de Newton e a Lei de Stefan-Boltzmann. No entanto, para chegar ao resultado da equação 55, Islam (2017) precisou considerar a temperatura do corpo próxima à temperatura ambiente ($T \approx T_0$). Isso é exatamente o oposto do que foi demonstrado por M. P. Silverman e C. R. Silverman (2000), ou seja, nesta faixa de temperatura há menor influência da perda de calor por radiação. Dessa forma, podemos descartar qualquer relação de proximidade entre as leis mencionadas. No entanto, veremos na próxima seção que esta Lei de Newton é importante no estudo sobre a transferência de calor por convecção.

5.3.2 A Lei de Resfriamento de Newton aplicada ao processo de convecção

A convecção é troca de calor que ocorre entre um objeto aquecido e o fluido que o envolve. Essa troca pode ser forçada ou natural. A convecção forçada é aquela em que uma bomba ou ventilador fornece a energia para a movimentação do fluido que resfria o objeto aquecido. A convecção natural é aquela que ocorre por ação das forças da gravidade e do empuxo do fluido. Neste caso, quando um fluido entra em contato com uma superfície a uma temperatura maior que a dele, o calor da superfície se transfere para a porção do fluido mais próxima a ela. O volume dessa porção se expande, o que faz diminuir a sua densidade e, conseqüentemente, a força de empuxo a empurra para camadas mais altas do fluido. Por ação da força da gravidade, uma outra porção do fluido desce e ocupa o espaço da porção que subiu, repetindo o processo de troca de calor com a superfície. Dessa forma, se estabelece uma corrente de convecção (MOREIRA, 1997).

Podemos citar alguns fatores que influenciam no processo de convecção como, por exemplo, a geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido (que inclui velocidade) e as características do fluido (como a viscosidade). A quantidade de fatores e de valores possíveis para cada um deles torna a descrição matemática desse fenômeno uma tarefa difícil. A Lei de Resfriamento de Newton nos oferece um caminho, quando a temperatura da superfície não é muito superior à temperatura ambiente. Outra forma de representar essa lei é demonstrada na equação 56 (CONNOR, 2020).

$$I = h\Delta T \quad (56)$$

Em que:

- I é a densidade de fluxo do calor local, medida em $\frac{W}{m^2}$.
- ΔT , medida em $^{\circ}C$, é a diferença de temperatura entre a superfície e um ponto do fluido suficientemente distante.
- h é o coeficiente de transferência de calor, cuja unidade de medida é $\frac{W}{m^2^{\circ}C}$. Este coeficiente reúne os efeitos relacionados aos fatores que influenciam na convecção.

Pela análise dimensional da densidade de fluxo do calor $\left([q] = \frac{W}{m^2} = \frac{\frac{J}{s}}{m^2} = \frac{J}{m^2s}\right)$, podemos reescrevê-lo da seguinte maneira:

$$I = \frac{1}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (57)$$

Em que:

- A é a área da superfície onde ocorre a troca de calor com o fluido, medida em m^2 .
- $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ é a quantidade de calor transferido da superfície para o fluido num dado intervalo de tempo, medida em $\frac{J}{s}$.

Substituímos a equação 57 na equação 56 para obter:

$$\frac{1}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = h(T_s - T_\infty) \quad (58)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA(T_s - T_\infty) \quad (59)$$

Onde representamos explicitamente a diferença de temperatura (T_s e T_∞ são, respectivamente, as temperaturas da superfície e do fluido em um ponto distante). Aplicando a equação fundamental da calorimetria, obtemos:

$$-mc \frac{\Delta T}{\Delta t} = hA(T_s - T_\infty) \quad (60)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{hA}{mc}(T_s - T_\infty) \quad (61)$$

$$\frac{dT}{dt} = -k''(T_s - T_\infty) \quad (62)$$

Esta é a equação apresentada anteriormente para representar a Lei de Resfriamento de Newton, sendo $k'' = \frac{hA}{mc}$. O sinal negativo decorre do fato de que a superfície está perdendo calor e a sua temperatura reduzirá. A solução desta equação é a mesma deduzida no Apêndice A.

$$T_s(t) = T_\infty + (T_{s_{máx}} - T_\infty)e^{-k''t} \quad (63)$$

5.3.2.1 Coeficiente de transferência de calor (h)

É importante conhecermos os fatores envolvidos na determinação do coeficiente de transferência de calor h na situação em que uma superfície plana é resfriada por convecção forçada externa (fora de um duto). Segundo J. R. S. Moreira (1997), o primeiro passo é determinar se a convecção ocorre em regime laminar ou turbulento. Para isso, é preciso calcular uma constante adimensional, chamada de número de Reynold, dada por:

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu} \quad (64)$$

Em que:

- $v \left(\frac{m}{s}\right)$ é a velocidade do fluido;
- $L (m)$ é a distância a partir do início do escoamento sobre a superfície;
- $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ é a densidade do fluido; e
- $\mu(Pa \cdot s)$ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Para um escoamento forçado externo sobre uma superfície plana e lisa, o regime é laminar, se $Re < 5 \times 10^5$ e é misto, se $5 \times 10^5 < Re < 10^8$.

Definido o regime de escoamento, J. R. S. Moreira (1997) indica que o segundo passo é calcular um segundo número adimensional, chamado número de Nusselt (Nu).

$$Nu = 0,664\sqrt{Re}\sqrt{Pr} \text{ (se o regime for laminar)} \quad (65)$$

$$Nu = (0,037\sqrt[5]{Re^4} - 871)\sqrt[3]{Pr} \text{ (se o regime for misto)} \quad (66)$$

Onde Pr é o número de Prandtl, que se encontra tabelado na literatura a respeito desse assunto. Esse número para o ar em temperatura ambiente é igual a 0,71 (CONNOR, 2019).

Finalmente, o coeficiente de transferência de calor h , segundo J. R. S. Moreira (1997), será dado por:

$$h = \frac{\kappa \cdot Nu}{L} \quad (67)$$

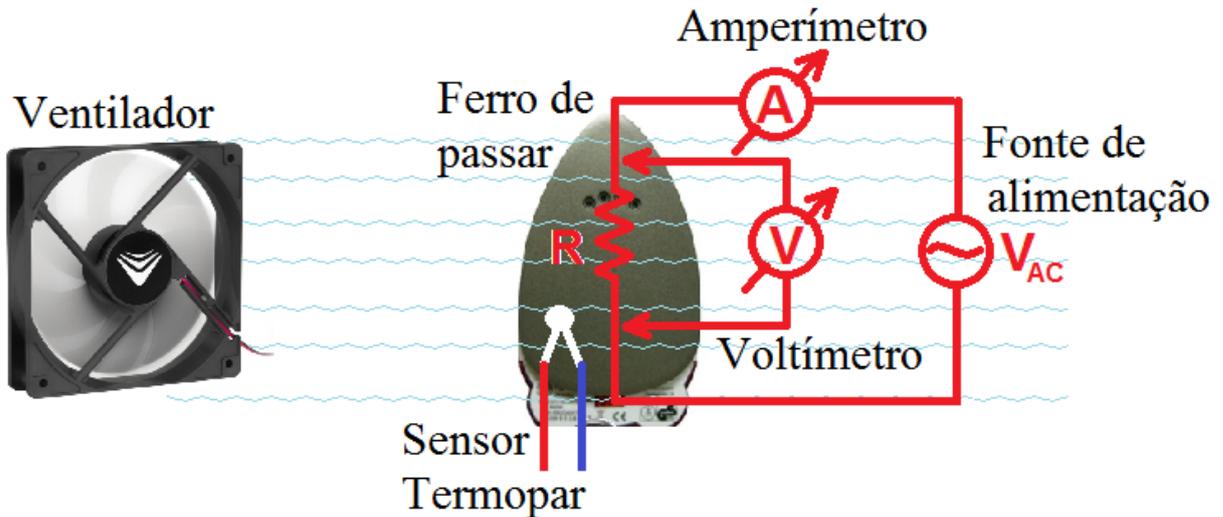
Em que:

- κ é a condutividade térmica do fluido e o seu valor para o ar a 27°C é igual a $0,026 \frac{J}{m \cdot s \cdot ^\circ C}$ (PRÄSS, 2020);
- L é a mesma distância citada acima; e
- Nu é o número de Nusselt calculado para um dos regimes citados.

5.3.3 Proposta experimental para estudo do processo de convecção

É importante ter ciência dos fatores que interferem na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), explicitados na última seção (5.3.2.1). No entanto, a demonstração de tais fatores, além de execução difícil do ponto de vista técnico e instrumental, representaria uma excessiva pormenorização de um tema que, lembremos, foi abordado com estudantes do ensino médio. Dessa maneira, a proposta experimental que foi utilizada para discutir sobre a transferência de calor por convecção apresenta medições mais simples, que permitiram uma análise mais qualitativa desse processo.

Figura 14 - Retirada de calor por convecção forçada



Fonte: O autor (2022)

A Figura 14 ilustra as peças centrais do experimento utilizado em sala de aula. Ele é composto por um ferro de passar roupa, de cuja superfície se pretende retirar calor por convecção forçada, pelo uso de um pequeno ventilador. Dentro do ferro de passar, foi instalado um sensor termopar para monitorar a temperatura da chapa metálica. Um amperímetro e um voltímetro também foram utilizados para medir a potência elétrica convertida em calor pelo referido ferro. Maiores detalhes construtivos do experimento estão apresentados na seção 7.8.1.

Antes de aquecer a chapa metálica do ferro de passar, registramos a sua temperatura inicial T_i para uso posterior. Em seguida, o circuito do ferro é ligado e os valores da corrente e da tensão elétricas podem ser registrados. Utilizando a Lei de Ohm para a potência (equação 68), foi calculado o valor do calor convertido na resistência do aparelho.

$$P = U \times I \quad (68)$$

Supomos que essa potência é constantemente dissipada pela superfície metálica, enquanto o ferro estiver ligado à fonte de alimentação. Após passar um determinado intervalo de tempo, a temperatura lida pelo sensor termopar se estabiliza e registramos o seu valor, ao qual nos referimos como $T_{máx}$. Neste ponto, podemos determinar a variação da temperatura referente ao aquecimento (ΔT_{aquec}) do ferro:

$$\Delta T_{aquec} = T_{m\acute{a}x} - T_i \quad (69)$$

A partir do momento em que a temperatura do ferro atingiu e se estabilizou no seu valor máximo, chegou a hora de promover a retirada do calor por convecção forçada. Dessa forma, acionamos o circuito do ventilador para que o processo se inicie. Imediatamente após esse passo,  possível chamar a atenção dos estudantes para que verifiquem a redução gradativa da temperatura do ferro de passar. No entanto, após um determinado intervalo de tempo com o ventilador ligado, observa-se que a temperatura da superfície (T_{superf}) metálica se estabiliza num valor intermediário entre T_i e $T_{m\acute{a}x}$. O valor de T_{superf}  menor que $T_{m\acute{a}x}$, porque o ventilador força a retirada de parte do calor gerado na resistência elétrica. No entanto, T_{superf}  maior que T_i , porque o ventilador não é capaz de dissipar todo o calor, enquanto o ferro é mantido ligado. Agora, podemos determinar a variação da temperatura referente ao resfriamento (ΔT_{resf}) causado pela convecção:

$$\Delta T_{resf} = T_{m\acute{a}x} - T_{superf} \quad (70)$$

A potência elétrica convertida em calor pela resistência já foi determinada pela equação 68. Difícil é determinar com precisão quanto dessa potência, o ventilador é capaz de retirar da superfície metálica do ferro de passar. Visando a uma discussão qualitativa, propomos uma estimativa baseada na proporção entre as duas variações de temperatura citadas. Considerando que a potência P dissipada pela resistência do ferro é capaz de provocar uma variação de temperatura igual a ΔT_{aquec} e que a potência retirada por convecção P_{convec} promove uma variação de temperatura igual a ΔT_{resf} , adotamos a regra de proporção abaixo para estimar o calor dissipado pelo ventilador a cada segundo.

$$P_{convec} = \frac{\Delta T_{resf}}{\Delta T_{aquec}} \cdot P \quad (71)$$

Inserimos a equação 71 na equação 59 (Lei de resfriamento de Newton), substituindo:

- $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = P_{convec}$; e
- $(T_s - T_\infty) = \Delta T_{resf}$

Assim, isolamos o coeficiente de transferência de calor (h) para encontrar:

$$h = \frac{P_{convec}}{A \cdot \Delta T_{resf}} \quad (72)$$

Em que A é a área de superfície da chapa do ferro a ser fornecida pelo professor.

O valor encontrado com a equação 72 é apenas uma estimativa. No entanto, a sua determinação é importante para tornar mais concreta a discussão sobre o significado do coeficiente de transferência de calor (h) num processo de convecção. Partindo de um número, o aluno pode ser levado a refletir sobre a quantidade de calor (por segundo) que seria necessário retirar de uma dada superfície para promover uma determinada variação na temperatura da mesma. Ele também pode formular hipóteses, baseadas nos fatores que influenciam no valor de h , para sugerir melhorias no processo de convecção forçada e estabelecer relações com situações do cotidiano.

Todo o caminho percorrido para a obtenção do coeficiente de transferência de calor proporciona oportunidades para que o aluno pense no fluxo de calor e nas conseqüentes variações de temperatura que ocorrem na superfície metálica e no ar ambiente próximo ao ferro de passar.

6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM ARDUINO

Arduino é uma plataforma eletrônica baseada na ideia de programação e montagem simplificadas para o usuário. Sua peça central é um microcontrolador que processa os dados, conforme o programa armazenado em sua memória. Tais dados são recebidos em suas portas de entrada (digitais ou analógicas) e, após processados, são enviados para as portas de saída. Às portas de entrada são conectados sensores dos mais variados tipos, que transformam grandezas físicas do mundo real em sinais elétricos que são recebidos e interpretados pelo microcontrolador. Através das portas de saída é possível controlar dispositivos como: relés, diodos emissores de luz (LED's), displays de cristal líquido (LCD's), motores, e outros.

Toda informação processada pelo microcontrolador é do tipo digital (até os dados analógicos que, antes de serem processados, são convertidos em digitais), ou seja, é composta por códigos binários. Tais códigos são formados por um conjunto de bits, em que cada um só pode assumir um de dois valores possíveis: 0 (zero) ou 1 (um). O bit igual a zero representa ausência de tensão (zero volt, ou nível do terra) em determinada porta ou posição de memória do microcontrolador. O bit igual a 1 representa a presença de tensão, normalmente 5 volts. Diz-se que um bit igual a zero está em nível baixo e que um bit igual a um está em nível alto.

O uso dessa placa precisa ter o suporte de um computador com comunicação USB (*Universal Serial Bus*) e sistema operacional compatível com o *software* de programação do Arduino. Além de programar o microcontrolador, o computador permite a visualização dos dados coletados em tempo real.

O Arduino é programado em linguagem C. Se o usuário não tiver familiaridade com essa linguagem, é possível utilizar aplicativos gráficos de programação (figura 15), em que o código é construído com blocos de montagem identificados por cores e formatos característicos de cada função. Um exemplo é o aplicativo **visualino**. As bibliotecas disponíveis em diversas fontes espalhadas pela internet trazem códigos prontos para as mais diferentes aplicações, facilitando ainda mais o trabalho de programadores inexperientes. (TORRES, 2019)

Figura 15 - Exemplo de interface gráfica de programação



Fonte: Tela do programa Visualino⁷

Considerando as características descritas até aqui, a plataforma Arduino apresenta a vantagem de ser flexível por se adaptar a diferentes projetos. O usuário não precisa ser um especialista em projetar e montar circuitos eletrônicos, mas dele é exigido o básico para conectar os dispositivos periféricos à placa. Também não se espera que ele conheça a fundo qualquer linguagem de programação, mas alguma noção sobre a lógica dos algoritmos é necessária.

⁷ Disponível em <http://www.visualino.net/>.

6.1 ESTRUTURA FÍSICA (*HARDWARE*)



O modelo de placa utilizado neste trabalho foi o Arduino Uno R3 (Figura 16), cujo microprocessador instalado é o ATmega328P da fabricante Atmel. Neste único componente estão integrados os elementos necessários para o funcionamento de um computador básico. Além de uma Unidade Central de Processamento (da sigla em Inglês, CPU), ele possui:

- 1 KB (quilo-byte⁹) de memória EEPROM, para armazenar o programa de inicialização do sistema;
- 32 KB de memória *flash*, dos quais 0,5 KB são utilizados no processamento de dados do programa de inicialização do sistema e o restante fica disponível para armazenar o programa criado pelo usuário; e
- 2 KB de memória SRAM, a ser acessada pela CPU durante o processamento dos dados utilizados pelo programa do usuário.

O sinal de relógio (*clock*), que determina a velocidade com a qual os dados são processados, possui uma frequência de 16 MHz (Mega-hertz). Ele é gerado por um circuito oscilador externo ao microcontrolador, que possui um cristal como elemento principal.

No que diz respeito à comunicação com componentes externos, esta placa de Arduino possui:

⁸ Disponível em <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>.

⁹ Um *Byte* é um conjunto de 8 *bits*.

- 14 pinos digitais que podem ser configurados como entrada ou saída. Desses, 6 pinos fornecem saída de pulso modulado pela largura (do Inglês, PWM) para, por exemplo, o controle de velocidade de motores;
- 6 pinos para entrada de sinais analógicos;
- 1 conector para comunicação USB com um computador.

Resumidamente, os componentes de um microcontrolador atuam da seguinte forma: Primeiro, coletam dados externos por meio de sensores, ou recebem sinais de chaves e botões, que são conectados aos pinos de entrada (analógicos ou digitais). Esses dados ou sinais são processados pela *CPU*, com auxílio da memória *SRAM*. Tal processamento ocorrerá de acordo com as instruções do programa que o usuário armazenou na memória *Flash*. Os dados resultantes desse processamento são enviados para os pinos de saída.

A alimentação da placa pode ser realizada pela porta USB, quando a mesma está conectada a um computador. Ou, ainda, por uma fonte de tensão externa de valor entre 6 e 20 V_{cc} (volts de corrente contínua), embora o recomendável seja uma alimentação entre 7 e 12 V_{cc} . O conector disponível para alimentação aceita plugue de 2,1 mm, com o terminal positivo no centro. A partir dessa tensão de entrada, a placa de Arduino utiliza circuitos integrados reguladores de tensão para disponibilizar pinos com 3,3 e 5 V_{cc} , que podem ser utilizados para alimentar componentes externos à placa. No entanto, o usuário precisa saber que o pino de 3,3 V_{cc} é capaz de fornecer uma corrente máxima de 50 mA (mili-ampères). O pinos de entrada/saída de sinais de corrente contínua podem trabalhar com o limite de 20 mA. Quando é necessário controlar valores maiores de corrente, módulos auxiliares (placas com relés ou circuitos de eletrônica de potência) são utilizados para receber sinais de controle da placa de Arduino e fornecer a potência requerida pela carga.

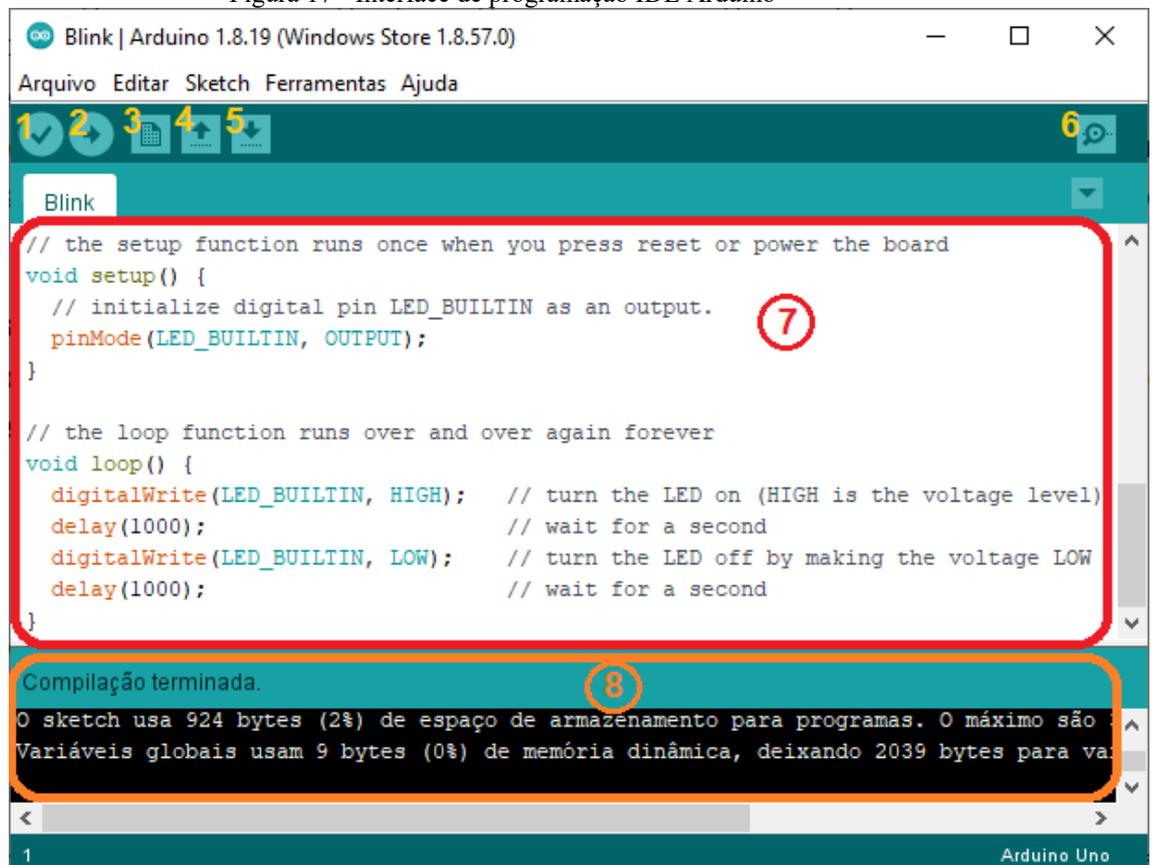
É importante destacar que, após salvar o seu programa na memória *Flash* do microcontrolador, o usuário não precisa manter a placa de Arduino conectada ao computador. A menos que este, além de fazer a programação, também esteja sendo utilizado como monitor para visualizar os dados coletados ao final do processamento. Se este não for caso, após o *upload* do programa do usuário, basta manter a placa alimentada por uma fonte externa para que o conjunto permaneça em funcionamento.

Um botão *Reset* está disponível para restaurar as configurações de fábrica, caso o programa do usuário provoque um bloqueio da *CPU*, impedindo a comunicação com a placa via conector USB. (ARDUINO, 2022)

6.2 PROGRAMAÇÃO (*SKETCHES*)

Neste trabalho, a interface editora utilizada para criar os programas de Arduino (chamados de *Sketches*) foi a IDE 1.8.19, disponível em versões para diferentes sistemas operacionais.

Figura 17 - Interface de programação IDE Arduino



Fonte: IDE Arduino¹⁰

Na figura 17, temos a ilustração do acesso às seguintes funcionalidades:

¹⁰ Disponível em <https://www.arduino.cc/en/software>.

1. Botão para verificar o *sketch*. Nesta função, a IDE busca erros no código e realiza a compilação do mesmo, transformando-o da linguagem C (alto nível) para a linguagem de máquina (baixo nível).
2. O botão “Carregar” faz o *upload* do *sketch* do usuário para a memória *Flash* do microcontrolador.
3. O botão “Novo” permite iniciar a criação de um novo *sketch*.
4. O botão “Abrir” deve ser utilizado para ter acesso a um *sketch* que já esteja salvo em algum local do computador.
5. O botão “Salvar” permite guardar o *sketch* em algum local do computador para acessos posteriores.
6. O botão “Monitor serial” faz abrir uma janela adicional da IDE, onde são mostrados os dados que o usuário enviou para a saída serial. Para isso, ele precisa utilizar duas instruções: dentro de *void setup()*, deve ser iniciada a comunicação serial por meio da instrução *Serial.begin(9600)*; e dentro de *void loop()*, deve ser utilizada uma linha com a instrução *Serial.print(val)* para cada dado que se deseja mostrar.
7. A área de programação é o espaço onde o *sketch* é escrito em linguagem de programação C.
8. Na parte inferior da tela da IDE são disponibilizadas informações sobre o *status* do *sketch*. É nessa parte que os erros são informados, quando existirem.

A lista de instruções que podem ser utilizadas na elaboração dos *sketches* é demasiadamente longa para caber neste trabalho e estão disponíveis em inúmeros tutoriais espalhados pela internet¹¹.

A criação *sketches* é facilitada pelo uso de bibliotecas. Elas são formadas por conjuntos adicionais de instruções, que são dedicadas a funções específicas como, por exemplo, coletar e codificar dados recebidos de um determinado tipo de sensor eletrônico. Neste trabalho, utilizamos as seguintes bibliotecas:

- *OneWire.h*: contém instruções para o uso de dispositivos eletrônicos que podem se comunicar simultaneamente com o microcontrolador por uma única

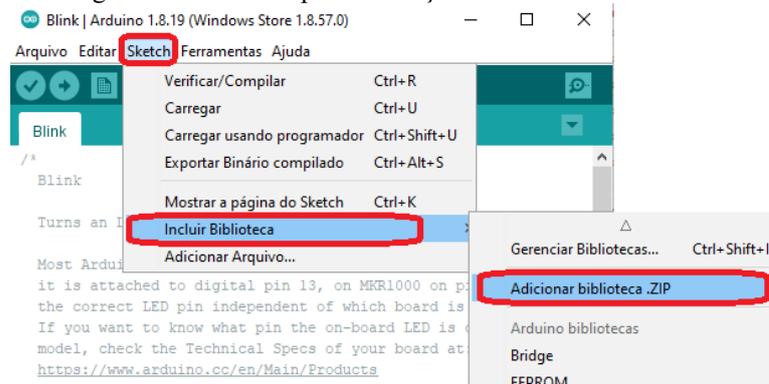
¹¹ Sugerimos como referência a página dos próprios desenvolvedores da Plataforma Arduino, acessível no endereço <https://www.arduino.cc/reference/en/>.

porta (ou fio), pois são diferenciados pelo endereço que ocupam no barramento utilizado. Trata-se, portanto, de uma biblioteca que formata um protocolo de comunicação. A versão utilizada neste trabalho está disponível no endereço <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire>.

- *DallasTemperature.h*: contém instruções para o uso do sensor de temperatura DS18B20, da fabricante Dallas Semiconductor, utilizado no experimento da condução de calor em uma barra metálica deste trabalho. Esta biblioteca foi obtida em <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>.
- *Adafruit_MLX90614.h*: contém instruções para o uso do sensor infravermelho de temperatura MLX90614, da fabricante Melexis, utilizado no experimento sobre a radiação térmica deste trabalho. Esta biblioteca foi obtida em https://github.com/adafruit/Adafruit_BusIO.
- *max6675.h*: contém instruções para o uso do módulo MAX6675, ao qual se conecta o sensor termopar, utilizado no experimento do resfriamento por convecção da chapa do ferro de passar deste trabalho. Esta biblioteca pode ser baixada de <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/max6675-library/>.
- *Wire.h*: contém instruções que estabelecem o protocolo de comunicação I2C. Está disponível em <https://www.arduino.cc/en/reference/wire>.
- *LiquidCrystal_I2C.h*: contém instruções utilizadas pela placa de interface que faz a transferência dos dados da placa de Arduino para o *display* de cristal líquido, por meio do protocolo I2C. Disponível em <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/liquidcrystal-i2c/>.

Após baixar a biblioteca desejada, o usuário pode fazer a sua instalação pela IDE, seguindo o seguinte caminho: *Sketch*>>*Incluir Biblioteca*>>*Adicionar biblioteca.ZIP* (Figura 18). Na janela que se abrirá, é preciso acessar a pasta que contém o arquivo compactado de extensão “.zip” e o selecionar. No código do sketch é preciso incluí-la por meio da instrução *#include <library_name.h>*. Concluídos esses passos, o usuário poderá utilizar as instruções adicionais que a biblioteca contém. (ARDUINO, 2022)

Figura 18 - Caminho para instalação de uma nova biblioteca



Fonte: IDE Arduino

6.3 COMPONENTES EXTERNOS: SENSORES DE TEMPERATURA E PLACA CONTROLADORA DE MOTORES

6.3.1 LM35 – Sensor de precisão em escala de graus centígrados

O LM35 é um circuito integrado que atua como um sensor de temperatura de precisão, que é calibrado para fornecer valores na escala de graus Celsius (Centígrados). A sua tensão de saída é linearmente proporcional à temperatura, pelo fator de escala de +10 mV/°C. Ou seja, a tensão de saída varia dez milivolts positivos para cada aumento de 1°C na temperatura. Ele é capaz de medir valores no intervalo entre -55°C e 150°C, com uma precisão de 0,5°C (apurada a 25°C).

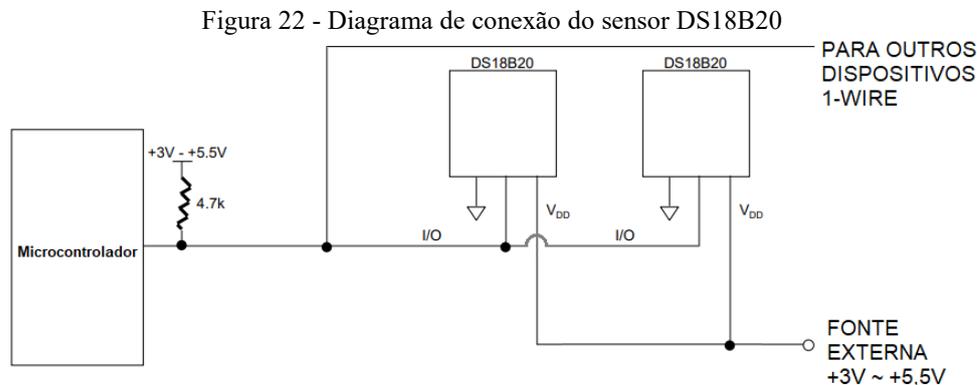
A fonte de alimentação determina a faixa de temperatura na qual o sensor poderá atuar. Esse dispositivo opera com uma alimentação entre 4 e 30 V_{CC} , com fonte simples (apenas $+V_S$) ou simétrica (necessita $+V_S$ e $-V_S$). Se desejarmos que ele atue na faixa total (-55°C a 150°C), devemos alimentá-lo com uma fonte simétrica, conforme mostrado na Figura 19. O valor do resistor R1 é dado por $\frac{V_S}{50\mu A}$ e as tensões de referência na saída são: 1500 mV a 150°C; 250 mV a 25°C; e -550 mV a -55°C.

6.3.2 DS18B20 – Termômetro digital (one-wire) de resolução programável

O DS18B20 é um sensor de temperatura que utiliza o protocolo de comunicação *OneWire*. Isso significa que podemos ligar múltiplos dispositivos como este em apenas um pino (digital, neste caso) da placa de Arduino. Cada componente sai de fábrica com um número serial que permite a sua identificação no barramento utilizado.

Ele é capaz de medir e informar temperaturas nas escalas Celsius e Fahrenheit, no intervalo entre -55°C e $+125^{\circ}\text{C}$, ou -67°F e $+275^{\circ}\text{F}$, respectivamente. A sua precisão é configurável e depende do tamanho do código gerado na leitura: para 9 bits, a precisão é de $0,5^{\circ}\text{C}$; para 10 bits, é $0,25^{\circ}\text{C}$; para 11 bits, é $0,125^{\circ}\text{C}$; e para 12 bits, é $0,0625^{\circ}\text{C}$. A configuração de fábrica é padronizada em 12 bits.

A Figura 22 mostra dois sensores conectados a uma porta do microcontrolador. Na mesma sequência, outros sensores podem ser acrescentados.

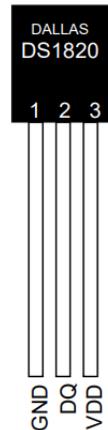


Fonte: Folha de dados da fabricante Maxim Integrated Products, Inc.¹⁵

Na Figura 23, é apresentado o padrão dos pinos com a vista frontal do sensor, em que: 1) GND é o terra; 2) DQ é a saída; e 3) VDD é o terminal de alimentação. (MAXIM INTEGRATED, 2019)

¹⁵ Disponível em <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.

Figura 23 - Pinos do DS18B20



Fonte: Folha de dados da fabricante Maxim Integrated Products, Inc.¹⁶

6.3.3 Termômetro Infravermelho MLX90614

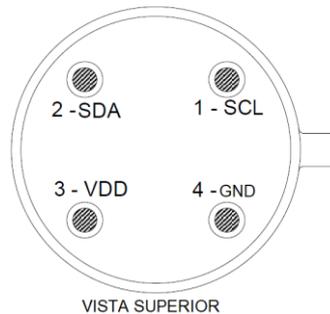
O MLX90614 é um sensor infravermelho de temperatura para medidas sem contato. Ele é constituído por dois circuitos integrados: um detector termopilha que converte o calor recebido por radiação infravermelha em um sinal elétrico; e um circuito dedicado a processar este sinal para a saída deste sensor.

O sensor infravermelho pode medir a temperatura do ambiente, no intervalo entre -40°C e 125°C, e a temperatura do objeto, no intervalo entre -70°C e 382,2°C. A precisão dessas medidas é de 0,5°C.

Conforme ilustrado na Figura 24, o MLX90614 possui 4 terminais: 1) SCL: entrada serial para o sinal de relógio (*clock*); 2) SDA: saída do sinal que contém a informação sobre a temperatura medida; 3) VDD: Alimentação de uma fonte externa; e 4) GND: terra. (MELEXIS, 2019)

¹⁶ Idem nota 15.

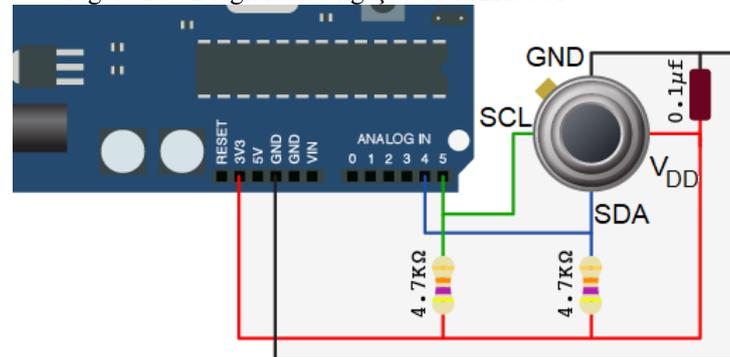
Figura 24 - Pinos do MLX90614



Fonte: Folha de dados da fabricante Melexis.¹⁷

A ligação do sensor MLX90614 à placa de Arduino é mostrada na Figura 25.

Figura 25 - Diagrama de ligação do MLX90614



Fonte: Página Artilharia Digital¹⁸

6.3.4 MAX6675 - Conversor digital para termopar tipo k

O circuito integrado MAX6675 digitaliza o sinal de um termopar tipo K e o disponibiliza na saída como um código de 12 *bits*, que corresponde a uma precisão de 0,25°C da temperatura lida. Sensores termopares do tipo K conseguem medir temperaturas na faixa entre 0°C e +800°C, embora este conversor possa fazer leituras mais elevadas (+1024°C).

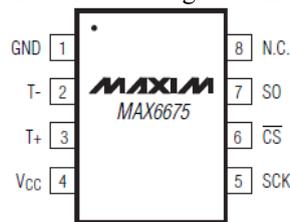
A Figura 26 mostra os pinos desse dispositivo, em que: 1) GND é o terra; 2) -T deve ser ligado ao terminal aluminizado do termopar tipo-K e ao terra, externamente ao circuito

¹⁷ Disponível em: <https://media.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90614-datasheet-melexis.pdf>.

¹⁸ Disponível em: <https://www.artilhariadigital.com/2014/11/Medir-temperatura-com-sensor-infravermelho-MLX90614-e-Arduino.html>.

integrado; 3) +T deve ser ligado ao terminal cromado do termopar tipo-K; 4) V_{CC} deve ser ligado ao terminal positivo da fonte de alimentação, que deve ter valor entre +3,0V e 5,5V; 5) SCK é o pino de entrada serial do sinal de relógio (*clock*); 6) \overline{CS} é chamado “*Chip Select*”. Ele deve ser colocado em nível baixo para habilitar a interface serial; 7) SO é o pino da saída serial de dados (*Serial Data Output*); 8) N.C. é um terminal sem conexão. (MAXIM INTEGRATED, 2002)

Figura 26 - Pinos do Circuito Integrado MAX6675



Fonte: Folha de dados da fabricante Maxim Integrated Products, Inc.¹⁹

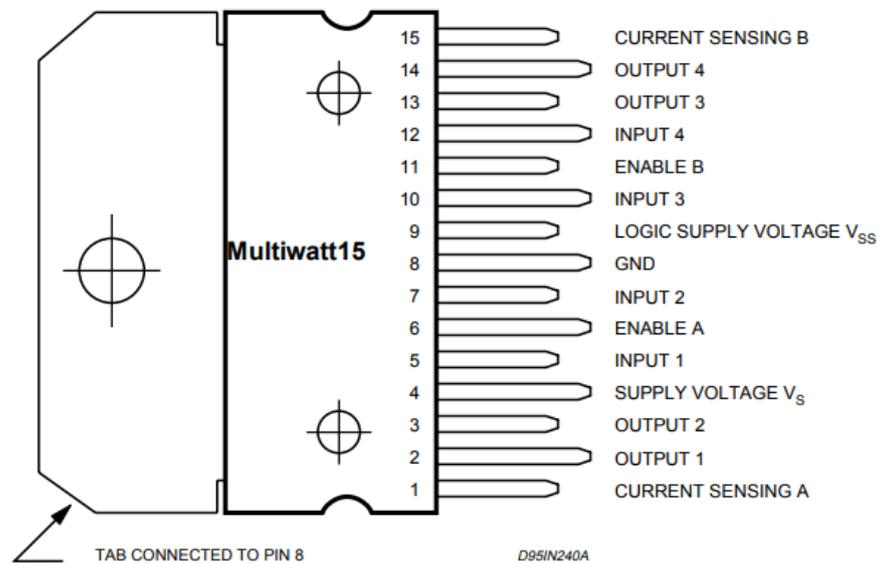
6.3.5 Controlador em ponte H – L298

O circuito integrado L298 é um controlador de alta tensão e alta corrente para o acionamento de cargas indutivas, tais como relés, solenoides e motores de corrente contínua (cc). Ele possui saída dupla para permitir o controle simultâneo de dois elementos de carga.

A Figura 27 mostra os pinos do circuito integrado L298. Nela vemos que este circuito integrado deve ser alimentado por duas fontes: uma que fornece a tensão (V_S) a ser controlada para alimentação da carga (pino 4), cujo valor deve ser entre 2,5V e 46V; e outra (V_{SS}) para alimentação dos circuitos lógicos (pino 9), cujo valor típico é de 5V. O terra do circuito deve ser conectado ao pino 8. As saídas fornecem corrente máxima de 2 A (ampères) por canal e a potência máxima de dissipação desse componente é de 25 W (watts).

¹⁹ Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>.

Figura 27 - Pinos do Circuito Integrado L298



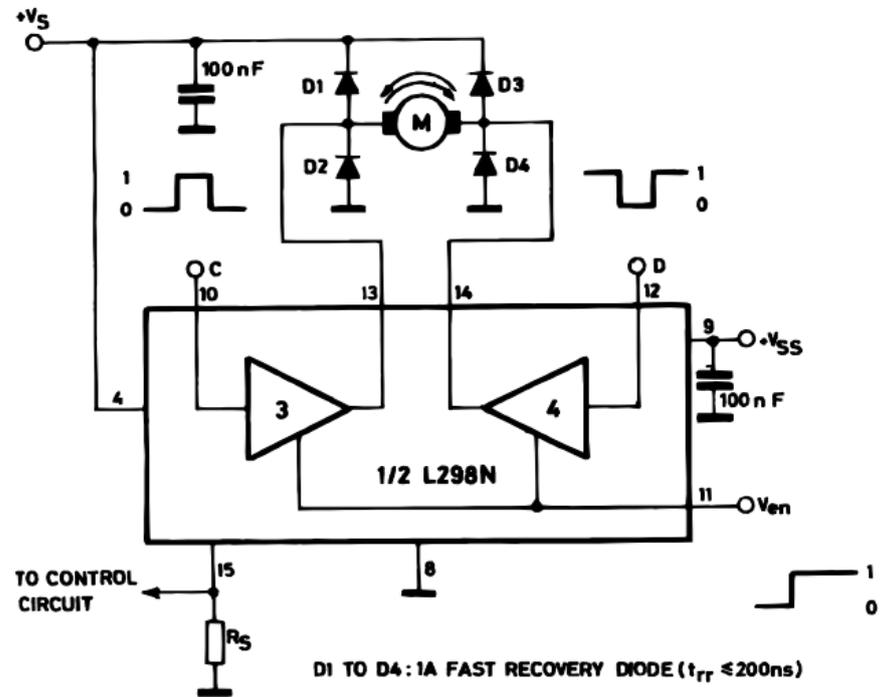
Fonte: Folha de dados da fabricante STMicroelectronics.²⁰

Figura 28 apresenta um diagrama para controle bidirecional de um motor de corrente contínua. Habilitando a metade utilizada do circuito integrado com a manutenção do pino 11 em nível alto, podemos promover duas situações:

- Primeira: colocar a entrada C (pino 10) em nível alto e entrada D (pino 12) em nível baixo. Dessa forma, as saídas dos pinos 13 e 14 irão polarizar diretamente os diodos D1 e D4, fazendo-os conduzir a corrente que fará o motor girar num determinado sentido.
- Segunda: colocar a entrada C (pino 10) em nível baixo e a entrada D (pino 12) em nível alto. Assim, os pinos 13 e 14 irão polarizar diretamente os diodos D2 e D3, invertendo o sentido da corrente no motor e, conseqüentemente, invertendo também o seu sentido de rotação. (STMICROELECTRONICS, 2000)

²⁰ Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>.

Figura 28 - Controle bidirecional de motor cc com circuito integrado L298



Fonte: Folha de dados da fabricante STMicroelectronics.²¹

²¹ Disponível em: <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>.

7 CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Neste capítulo serão descritos os aspectos construtivos dos experimentos, as suas limitações e as suas potencialidades didáticas. Também serão apresentados relatos sobre os encontros nos quais o produto foi aplicado, bem como as impressões que os estudantes deixaram sobre as atividades propostas.

No que diz respeito ao contexto, este produto educacional foi aplicado em uma escola pública administrada pela Secretaria de Estado da Educação do Governo de Santa Catarina, localizada no Município de Curitibanos. O projeto de pesquisa foi aprovado por banca de qualificação, designada pela Coordenação do MNPEF do Campus de Araranguá da UFSC, em 14 de dezembro de 2020. No entanto, devido à situação de emergência causada pela pandemia do COVID-19, a sua aplicação de forma presencial em sala de aula teve início somente no mês de agosto de 2021, quando o Governo de Santa Catarina publicou o Decreto N.º 1.408, de 11/08/2021 (Anexo A), determinando o retorno às atividades presenciais dos últimos grupos de trabalhadores da educação que se mantinham em trabalho remoto. Na UFSC, as atividades presenciais ainda estavam suspensas para os seus alunos e servidores, devido às medidas protetivas contra a transmissão do COVID-19. Dessa forma, a participação do Professor Dr. Evy Augusto Salcedo Torres, servidor docente dessa Universidade e orientador deste trabalho, ocorreu de forma remota, por meio do aplicativo Google Meet, conforme autorização apresentada no Ofício S/N (Anexo B). Quanto ao público alvo, participaram deste trabalho quatro turmas de segundo ano do ensino médio do período noturno, aqui denominadas como Turmas A, B, C e D. O número absoluto de alunos variava um pouco em cada turma, devido a fatores como trocas de turnos, trocas de turmas de um mesmo turno e transferências de/para outras escolas. A média foi de 15 alunos por turma, totalizando cerca de 60 participantes. Foram necessários 12 encontros de duas aulas seguidas com cada turma. Considerando que cada aula tinha a duração de 40 minutos, então cada encontro durava uma hora e vinte minutos.

7.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A proposta apresentada neste trabalho tem como tema central os processos de transferência de calor, discutidos em sala de aula com o apoio de experimentos que utilizam o Arduino. Neste sentido, podemos destacar três atividades principais: A atividade 3, com o

experimento sobre a condução de calor em uma barra de alumínio; A atividade 7, com o experimento sobre a absorção e a emissão de calor por um corpo claro e por um corpo escuro; e a Atividade 8 sobre o processo de convecção.

As atividades 1 e 2 são organizadores prévios da atividade 3. Nelas, buscou-se apresentar a plataforma Arduino aos alunos, com o objetivo de fazê-los entender aspectos gerais sobre os recursos físicos (portas analógicas, portas digitais e memória) e sobre a programação dessa plataforma. Adicionalmente, a atividade 2 retoma o foco para o ensino de Física, na medida em que apresenta um método para a medição da temperatura utilizando um sensor eletrônico. Classificamos essas duas primeiras atividades como organizadores prévios, porque elas mobilizam o que os estudantes já sabem sobre o uso de tecnologias e sobre os conceitos de calor e temperatura. Além de mobilizar tais conhecimentos, essas atividades os preparam para aquilo que se pretende que aprendam na atividade 3, ou seja, o processo de transferência de calor por condução.

As atividades 4, 5 e 6 também dão suporte à atividade 7. No entanto, o papel que elas exercem nesta sequência didática vai além do que se espera dos organizadores prévios. Os temas abordados por elas têm importância própria e, por isso, devem ser retomados com mais tempo dedicado e maior profundidade em outros momentos do percurso escolar. Atendendo ao propósito deste trabalho, e considerando o caráter progressivo da aprendizagem significativa, esta parte da referida sequência foi idealizada para cumprir os seguintes objetivos: 1) Atividade 4: Verificar e aprimorar os conhecimentos prévios que os alunos tinham sobre fenômenos ondulatórios como reflexão, transmissão e absorção; 2) Atividade 5: Discutir a origem da radiação térmica como um fenômeno eletromagnético e quântico; e 3) Atividade 6: Apresentar aspectos do comportamento ideal de um corpo negro durante a emissão e absorção do calor. Somente após a construção dessa base, a atividade 7 foi aplicada para tratar do comportamento de corpos reais, no que diz respeito à absorção e à emissão de radiação térmica.

A atividade 8, que abordou a dissipação de calor por convecção, precisou de um organizador prévio que ajudou os estudantes a mobilizarem o que eles sabiam sobre a força de empuxo dos fluidos. No entanto, tal organizador teve espaço no mesmo encontro em que o tema principal foi discutido.

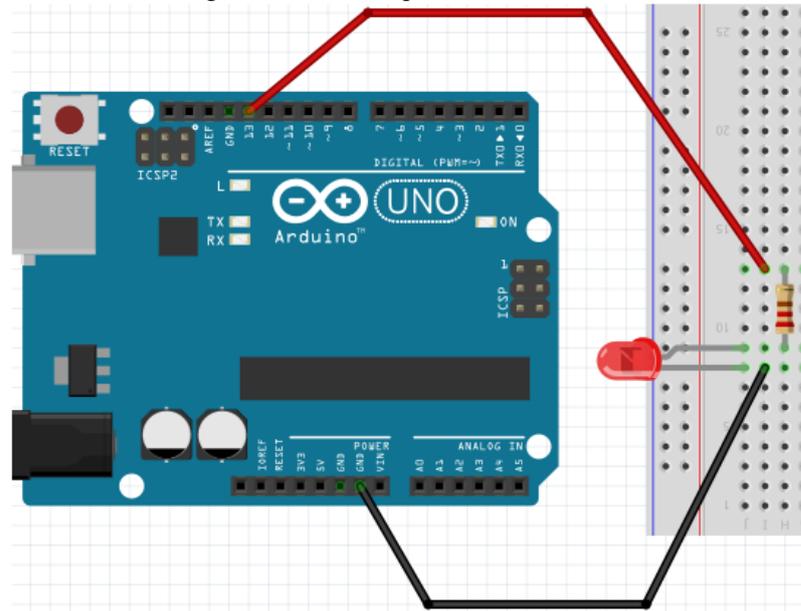
7.2 ATIVIDADE 1: INTRODUÇÃO AO ARDUINO

Esta atividade consistiu na montagem de um circuito para acionar um LED, por meio do controle programado de uma porta digital da placa de Arduino. Além da oportunidade de programar um microcontrolador, a experiência serviu de preparação para a atividade seguinte, em que um sensor de temperatura foi utilizado. Dessa forma, primeiro foi discutido como se utiliza uma porta digital como saída para controle de um componente externo. Na próxima atividade, esse aprendizado será utilizado para expandir o conhecimento do aluno sobre esse assunto, utilizando uma porta analógica para a coleta de dados do mundo exterior (ao microcontrolador).

7.2.1 Desenvolvimento do experimento

O circuito da Figura 29 mostra um LED ligado à porta digital número 13 da placa de Arduino. No entanto, essa ligação é realizada por intermédio de um resistor de $220\ \Omega$ (ohms), conectado ao terminal anodo do LED (terminal mais comprido). Considerando que, quando é acionada, a porta do Arduino fornece uma tensão de 5 V (volts), o resistor limitará a corrente do LED a um valor aproximado de 23 mA (miliampères). O resistor, portanto, é um elemento que protege a porta do Arduino de sofrer danos por excesso de corrente elétrica. O terminal catodo do mesmo LED é conectado ao pino de aterramento da placa (GND).

Figura 29 - Circuito para acionar um LED



Fonte: O Autor com auxílio do Programa Fritzing (2022)

O *Sketch 1* é o programa utilizado para controlar a referida porta digital da placa de Arduino. Após configurar o pino 13 como saída (comando “pinMode”), alternamos o estado dessa porta (comando “digitalWrite”) entre os níveis alto (High, para acender o LED) e baixo (Low, para apagá-lo). O comando “delay(1000)” interrompe o processamento do programa e mantém a saída digital num determinado estado (alto ou baixo) pelo intervalo de 1000 ms (milissegundos). (ARDUINO, 2022)

Sketch 1 - Acionando um LED por meio de uma saída digital

```
void setup() {
  pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(1000);
}
```

Fonte: Adaptado de ARDUINO (2021)

A interface utilizada para programar a placa de Arduino foi um aplicativo chamado ArduinoDroid, disponibilizado pela empresa Google no seu serviço denominado Play Store.

Essa escolha permitiu que os alunos realizassem a atividade de programar e de carregar o *sketch* na memória da placa, utilizando seus próprios aparelhos *smartphones*. Tal medida contornou o problema da falta de um laboratório de informática com computadores que permitissem utilizar outra interface de programação.

7.2.2 Aplicação em sala de aula

Esta atividade foi aplicada nas Turmas A e D, no dia 25/08/2021, com 17 e 14 alunos presentes, respectivamente. As turmas B e C participaram no dia 27/08/2021, com 6 e 8 alunos, respectivamente. Esses números permitem relatar a primeira dificuldade enfrentada durante a aplicação do produto educacional: a baixa assiduidade dos alunos no período noturno, especialmente nas aulas de sexta-feira.

Considerando a baixa complexidade da montagem e da programação para esta atividade, foi possível disponibilizar em cada turma seis conjuntos para os estudantes executarem a proposta. Portanto, cada conjunto era compartilhado por grupos de dois ou três alunos. Eles receberam uma placa de Arduino, uma matriz de contatos (*protoboard*), um LED vermelho, um resistor de 220 Ω , um cabo USB, um adaptador OTG e fios para conexão dos componentes eletrônicos.

Após uma breve explicação do que seria feito na aula, os estudantes foram instruídos a baixar e a instalar o aplicativo ArduinoDroid em seus *smartphones*. Enquanto esta etapa não era concluída por todos, foi possível discutir com eles sobre as principais características da plataforma Arduino. A qualidade do sinal de internet não era a mesma em todas as salas e, por isso, o tempo de instalação variou em cada turma. Ainda a este respeito, era importante que cada grupo tivesse, pelo menos, um estudante cujo *smartphone* funcionasse com o sistema operacional Android. O referido aplicativo não funciona em aparelhos da empresa Apple, cujo sistema operacional é o iOS.

Na sequência, os estudantes digitaram o *Sketch 1* no ArduinoDroid recém-instalado. O compilador do aplicativo apontou erros em quase todos os *sketches*. Eram todos erros de digitação, seja nas palavras que continham as instruções, seja pela falta de caracteres que faziam parte da sintaxe de cada instrução, como o uso de letras maiúsculas ou de um ponto-e-vírgula. Sem compreender que os erros eram causados por eles mesmos, alguns alunos demonstravam impaciência e vontade em se desviar da atividade. A solução era dedicar mais atenção a esses

estudantes, ajudando-os a identificar o erro e insistindo que continuassem o trabalho. Felizmente, a postura da maioria foi mais positiva e, em outros casos, mais proativa. Eram estudantes que não só descobriram o erro dos seus programas, como ajudaram os colegas de outros grupos a identificarem o erro deles. Nesses casos, foi nítida a impressão de que estavam motivados com a proposta.

A conexão entre alguns *smartphones* dos alunos e a placa de Arduino também apresentou problemas. O conector do adaptador OTG não tinha o formato que permitisse o encaixe em todos os aparelhos. Quando não era possível trocar pelo aparelho de outro componente do mesmo grupo, foi necessário solicitar um aparelho *tablet* emprestado da escola e repetir os procedimentos de obtenção e instalação do aplicativo de interface. Foi interessante perceber, antes de sugerir o uso do *tablet*, como alguns alunos omitiam o porte do celular em sala de aula para se esquivarem da atividade.

A matriz de contatos com os componentes eletrônicos e a placa de Arduino foram entregues aos alunos com todas as conexões feitas previamente. Tudo o que eles precisaram fazer foi a conexão lógica, via cabo USB e adaptador OTG, entre o *smartphone* (ou *tablet*) com a placa de Arduino e carregar o *Sketch 1* na memória dessa última. Essa etapa não apresentou problemas.

O último passo foi observar o funcionamento do circuito com o LED piscando e discutir cada linha de instrução do *Sketch 1*. Os alunos que compreenderam o assunto nem participavam mais da discussão. Não porque perderam o interesse, mas porque estavam ocupados alterando o referido *sketch*. Além de mudarem o tempo em que o LED se mantinha aceso ou apagado, alguns solicitaram um segundo conjunto de LED e resistor para serem acionados por outra saída digital da placa de Arduino. Tal comportamento evidencia que esses alunos se apropriaram do conhecimento proporcionado por essa primeira atividade.

7.3 ATIVIDADE 2: MEDINDO TEMPERATURA COM SENSOR ELETRÔNICO CONECTADO AO ARDUINO

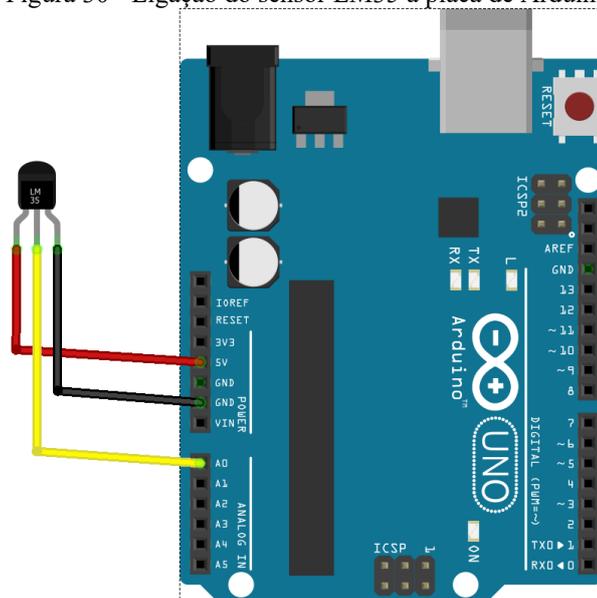
A segunda atividade dessa sequência didática consistiu em fazer medições de temperatura com o uso do sensor LM35 conectado a uma porta analógica da placa de Arduino. Os estudantes precisaram mobilizar o que haviam aprendido sobre o uso dessa tecnologia no encontro da aula anterior para compreender como uma informação analógica do mundo real

pode ser convertida num código digital, passível de processamento. Discussões tecnológicas à parte, essa atividade trouxe de volta a Física para o centro das atenções. Nela, os alunos foram estimulados a refletir sobre essa grandeza de medida indireta, que é a temperatura, com base na variação da tensão elétrica que é disponibilizada no terminal de saída do referido sensor. Mesmo que de maneira qualitativa, a discussão proporcionou uma oportunidade para que os alunos melhorassem a compreensão sobre conceitos importantes em processos de medição de temperatura como, por exemplo, a Lei Zero da Termodinâmica (equilíbrio térmico) e a dependência da massa pela capacidade térmica dos corpos (KELLER, GETTYS e SKOVE, 1997). Esta atividade é, portanto, um organizador prévio, por servir de ponte entre o que o aluno já sabe sobre calorimetria e o que se pretende que ele aprenda sobre a transferência de calor por condução (Lei de Fourier), a partir da próxima aula.

7.3.1 Desenvolvimento do experimento

A ligação do sensor LM35 à placa de Arduino é bastante simples, conforme ilustrado pela Figura 30. O terminal 1 do sensor recebe a alimentação do pino da placa que fornece 5 V (volts) de corrente contínua, o terminal 2 envia o sinal elétrico correspondente à temperatura para a porta analógica A0 e, finalmente, o terminal 3 é conectado ao pino de aterramento (GND) da placa.

Figura 30 - Ligação do sensor LM35 à placa de Arduino



Fonte: O Autor com auxílio do Programa Fritzing (2022)

O *Sketch 2* contém o código necessário para o uso do sensor LM35. Primeiramente, são declaradas três variáveis flutuantes para armazenar os seguintes dados: código decimal correspondente à temperatura lida (C); tensão elétrica correspondente à temperatura lida (V); e temperatura lida (T). Em seguida, a instrução *Serial.begin(9600)* inicia a porta de comunicação serial da placa de Arduino para permitir o envio de dados a um monitor externo. Esse monitor é a tela do *smartphone* do aluno, onde se poderá ler a temperatura indicada por meio do aplicativo ArduinoDroid, quando a instrução *Serial.print* (ou *Serial.println*) for executada. A instrução *analogRead(A0)* coleta o sinal analógico advindo do sensor de temperatura e o armazena no formato de um código decimal na variável C. Esse pode assumir valores entre 0 e 1023, ou seja, possui 1024 possibilidades correspondentes a um número binário de 10 bits ($2^{10} = 1024$). Cada código decimal corresponde a um determinado valor de tensão, que por sua vez varia de 0 a 5 (volts). Sendo assim, o código decimal é incrementado em uma unidade para cada aumento de $0,00489V \left(\frac{5}{1023}\right)$ na tensão de entrada da porta analógica A0 da placa de Arduino. Multiplicamos o valor dessa fração pela variável C para encontrar o valor absoluto da tensão elétrica que está presente no terminal 2 do sensor. Finalmente, obtemos o valor da temperatura lida, dividindo o valor dessa tensão absoluta por 0,01. Isso, porque a tensão de saída do sensor aumenta 0,01 V para cada aumento de 1°C na temperatura medida. (NOGUEIRA, 2018)

Sketch 2 - Leitura do sensor LM35 com uma porta analógica

```
float C;
float V;
float T;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  C = analogRead(A0);
  V = C*5.0/1023.0;
  T = V/0.01;
  Serial.print("Código: ");
  Serial.println(C);
}
```

```
Serial.print("Tensão elétrica: ");  
Serial.print(V);  
Serial.println(" volts");  
Serial.print("Temperatura: ");  
Serial.print(T);  
Serial.println(" °C");  
Serial.println(" ");  
delay(5000);  
}
```

Fonte: Adaptado de NOGUEIRA (2018)

Novamente, foi possível levar 6 conjuntos experimentais para a sala de aula. Além do sensor LM35, da placa de Arduino, do cabo USB e do adaptador OTG, a lista de itens necessários contou com um secador de cabelos, sendo este último de uso compartilhado entre os alunos.

7.3.2 Aplicação em sala de aula

Esta atividade foi aplicada nas Turmas A e D, no dia 1º/09/2021, com 14 e 15 alunos presentes, respectivamente. As turmas B e C participaram no dia 03/09/2021, com 12 alunos presentes em cada uma delas. Apesar dos números indicarem uma melhora na quantidade de participantes nas aulas de sexta-feira (turmas B e C), cabe informar que o aumento ocorreu devido mais a novos comparecimentos e não à reapresentação daqueles que participaram no dia 27/08/2022. Ou seja, uma parcela considerável dos alunos presentes ao encontro do dia 03/09/2022 não fazia ideia do que era Arduino. Nas turmas A e D, cujas aulas ocorrem às quartas-feiras, a presença dos alunos é mais constante.

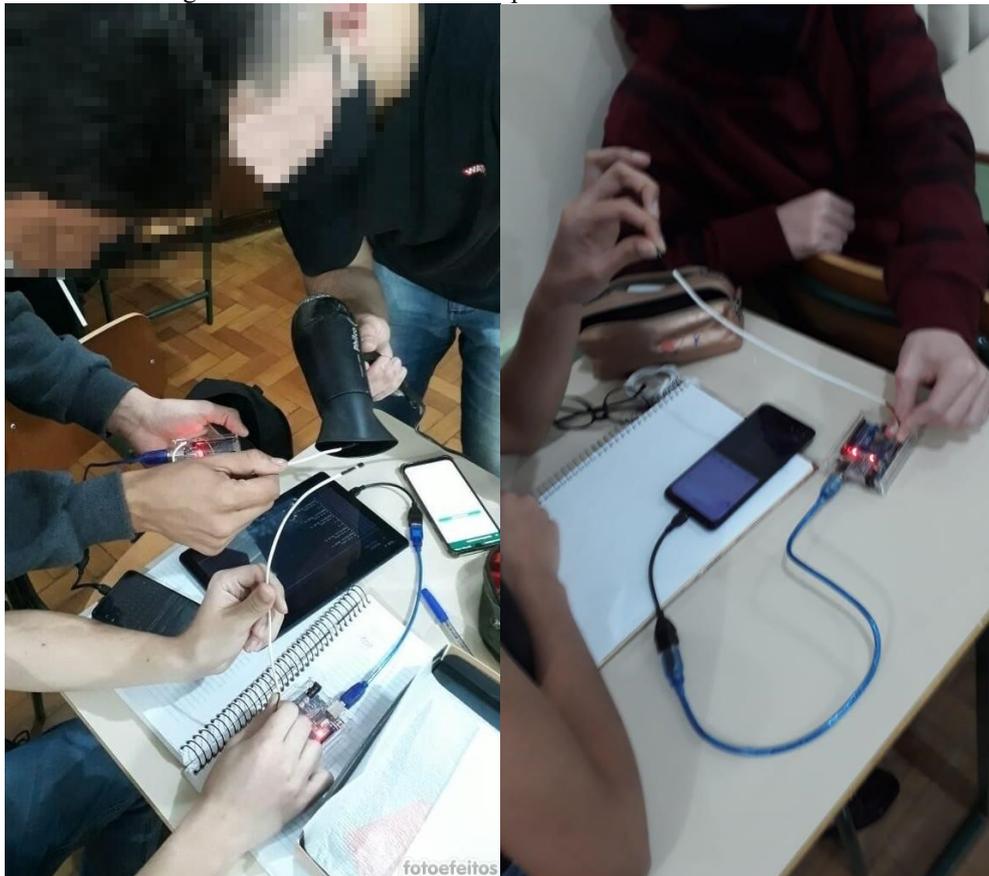
Considerando o relato do parágrafo anterior, o professor iniciou esta segunda atividade instruindo os estudantes que ainda não tinham o aplicativo ArduinoDroid instalado em seus aparelhos a executarem este procedimento. Enquanto aguardavam pelo *download* e pela instalação do referido aplicativo, cada turma recebeu uma explanação do professor sobre a atividade realizada na semana anterior de aula. Essa retomada ajudou aqueles que compareceram anteriormente a se lembrarem do que fizeram e, também, foi importante para aqueles que estavam lidando com o Arduino pela primeira vez. Após essa retomada, os estudantes se reuniram em grupos de 2 ou 3 integrantes e receberam o conjunto de itens que compunham o experimento.

Neste encontro, o professor se antecipou à possibilidade do adaptador OTG não se encaixar nos aparelhos dos alunos e já levou consigo os *tablets* da escola para a sala de aula. Outra medida tomada para otimizar o tempo foi disponibilizar aos estudantes o código fonte do *Sketch 2* em arquivo de texto, possibilitando que eles precisassem apenas copiar e, em seguida, colar no aplicativo ArduinoDroid. Além de ganhar tempo, minimizando a possibilidade de erros, é preciso levar em consideração que o *Sketch 2* é mais longo que o *Sketch 1* da aula anterior. Sem falar que o trabalho de digitar um programa inteiro na tela de um *smartphone* não é muito confortável.

Após concluir a etapa de inserir o código fonte do *Sketch 2* no ArduinoDroid, os alunos receberam instruções para fazer a conexão lógica entre a placa de Arduino e os seus respectivos aparelhos (*smartphones* ou *tablets*). Por último, os estudantes carregaram o *Sketch 2* na memória do Arduino e conectaram o sensor de temperatura, conforme a ligação ilustrada anteriormente.

As fotografias da Figura 31 mostram os estudantes medindo: 1) a temperatura do ar quente, ao aproximar o sensor LM35 de um secador de cabelo (à esquerda); e 2) a temperatura da mão, ao segurar o referido sensor (à direita). Eles se mostraram motivados durante a execução da atividade e, por uma das perguntas feitas, demonstraram que tinham associado o termômetro construído em sala de aula ao termômetro digital clínico, que é vendido em farmácias.

Figura 31 - Alunos medindo temperatura com sensor eletrônico



Fonte: O Autor (2022)

O interesse demonstrado pelos alunos tornou a discussão que se seguiu mais dinâmica. O professor propôs questões para o debate que fizeram os estudantes refletirem sobre as limitações do sensor utilizado. Afinal, o referido sensor só é capaz de medir temperaturas dentro de um determinado intervalo e a massa do corpo (ou substância), cuja temperatura é medida, também importa. Eles demonstraram compreender que corpos com massa da mesma ordem do sensor terão as suas temperaturas alteradas durante a medição. Também entenderam que corpos (ou substâncias) com massa e volume muitas vezes superior aos do referido sensor poderão apresentar valores confiáveis de temperatura somente para uma determinada localidade, onde o componente eletrônico se encontra.

Também foram colocadas questões para captar a percepção dos alunos sobre o processo de troca de calor entre o sensor e um determinado corpo. Demonstraram ter compreendido que o calor da mão era transferido para o sensor, enquanto ainda existisse uma

diferença de temperatura entre eles. Assim que a temperatura lida na tela do *smartphone* se estabilizava, supunham que o fluxo de calor entre mão e sensor tinha se encerrado.

Por último, deram sinais positivos de terem assimilado a ideia de que a temperatura é uma grandeza de medida indireta. Ou seja, perceberam que precisam medir a variação de outra grandeza física (a tensão elétrica, no caso do sensor utilizado) para associar a um determinado valor de temperatura.

7.4 ATIVIDADE 3: CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA BARRA DE ALUMÍNIO

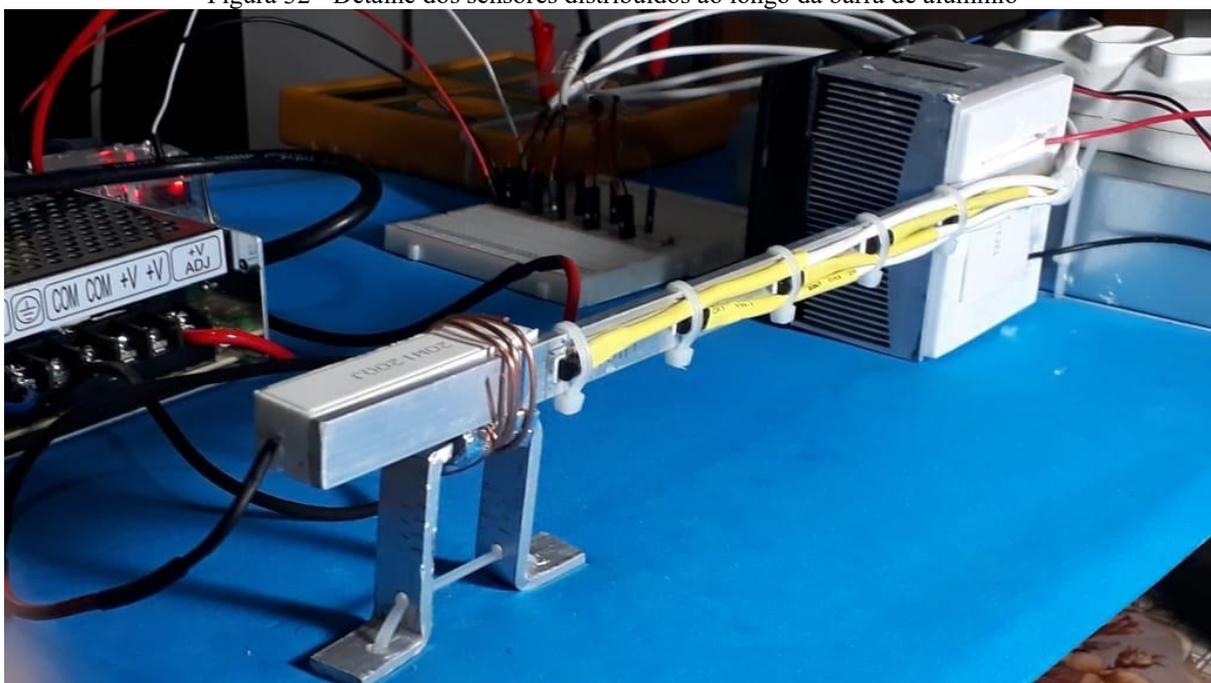
A terceira atividade dessa UEPS tratou de colocar em prática as ideias apresentadas na seção 5.1.1 deste trabalho para abordar, junto aos alunos, o tema da condução de calor, sob o ponto de vista clássico da Lei de Fourier. Pretende-se que os estudantes mobilizem conceitos subsunçores trabalhados em aulas anteriores, como calor e temperatura, e que consigam recombiná-los com o conceito matemático de função linear. Dessa forma, é esperado que os conhecimentos prévios sofram o que Ausubel (1998) chamou de diferenciação progressiva, para dar origem a um novo subsunçor relacionado ao processo físico de condução de calor em uma barra metálica.

7.4.1 Desenvolvimento do experimento – Aspectos construtivos

O experimento desta terceira atividade é apresentado na fotografia da Figura 32. Nela, vemos um conjunto de cinco sensores eletrônicos de temperatura do tipo DS18B20 fixados ao longo de uma barra de alumínio de seção retangular. Na extremidade esquerda da referida barra, um resistor cerâmico de $120\ \Omega$ (ohms)/20 W (watts) fornece um fluxo de calor que transita ao longo da barra até chegar à extremidade direita, onde a superfície fria de uma pastilha Peltier o absorve. Os sensores e o resistor foram fixados à barra com uma fita térmica, que é adesiva nas duas faces. Os terminais desses mesmos componentes foram isolados eletricamente, por meio de tubos termoretráteis (conhecidos comercialmente como “espaguete”), ou seja, se contraem com o calor de um soprador térmico. O conjunto Peltier é composto pela pastilha, por um dissipador de alumínio e por um ventilador, além de uma fonte de alimentação de 12 V (volts).

O lado da pastilha que se aquece é fixado à face lisa do dissipador, enquanto o lado que se resfria é fixado à barra de alumínio. A fim de melhorar a transferência de calor, foi aplicada uma fina camada de pasta térmica em cada uma das faces dessa pastilha. A extremidade direita da barra de alumínio está apoiada em um suporte feito do mesmo material. Para isolar termicamente um do outro, um pedaço de manta térmica (material feito de espuma térmica e uma superfície aluminizada) foi colocado entre eles.

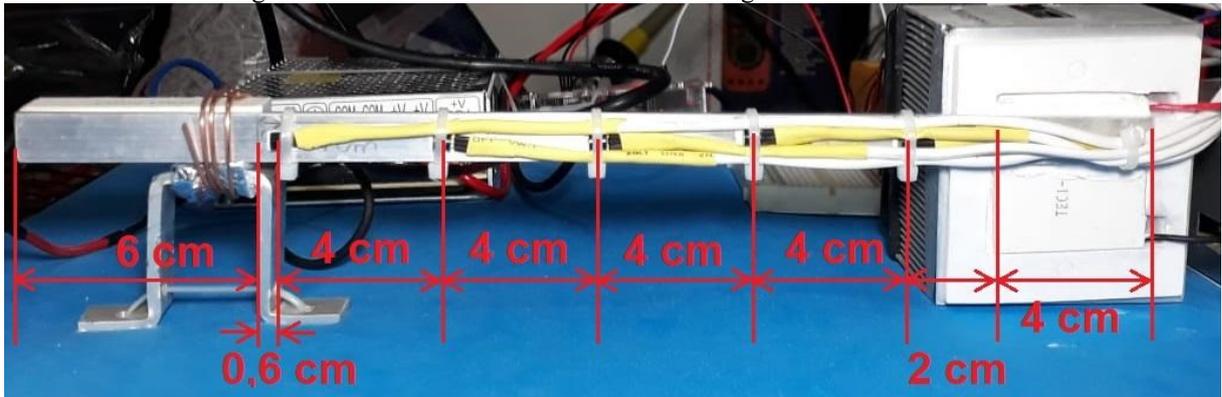
Figura 32 - Detalhe dos sensores distribuídos ao longo da barra de alumínio



Fonte: O Autor (2021)

Os sensores foram posicionados ao longo da barra de alumínio da forma ilustrada na Figura 33. O primeiro sensor está a 0,6 cm de distância da direção em que se encontra a borda direita do resistor cerâmico, enquanto o quinto sensor está a 2 cm da borda esquerda da pastilha Peltier. A distância entre eles é de 4 cm.

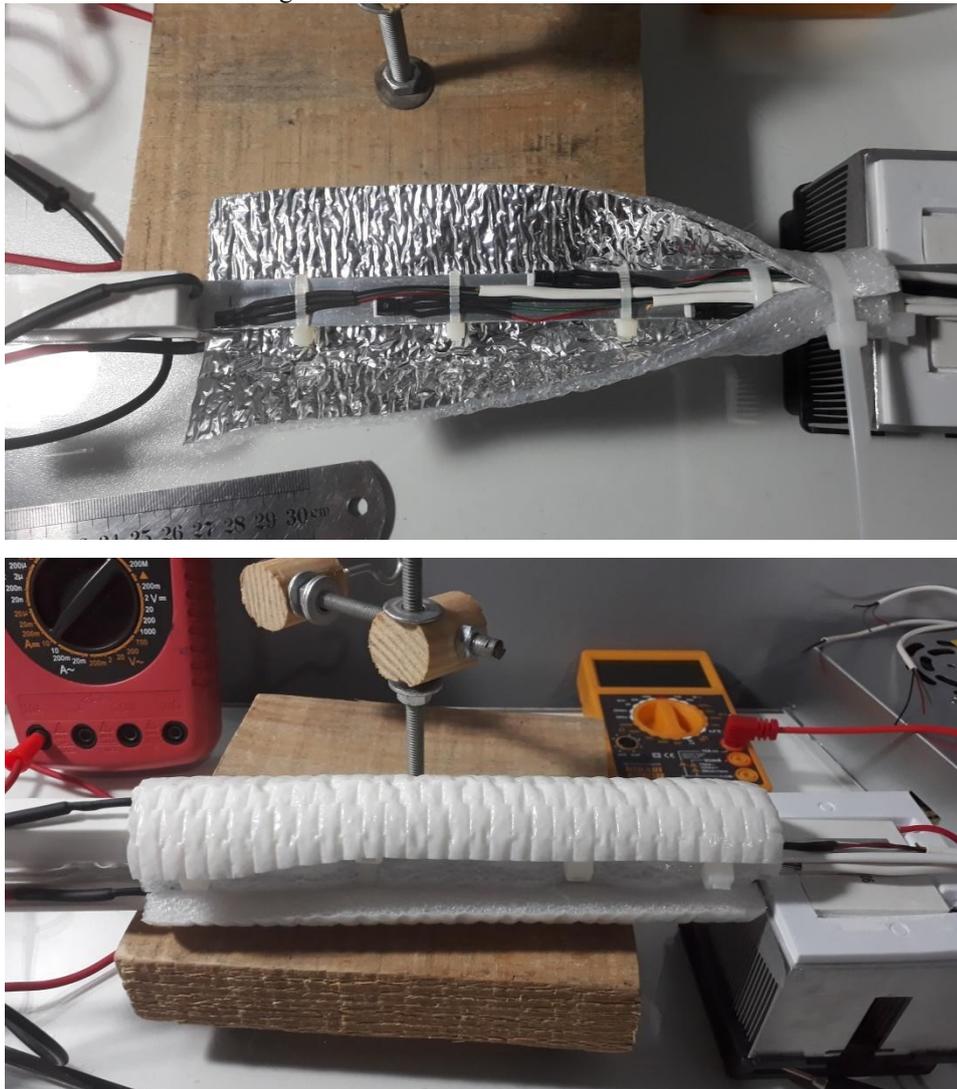
Figura 33 - Posicionamento dos sensores ao longo da barra de alumínio



Fonte: O Autor (2021)

Após a fixação dos sensores, a barra de alumínio foi revestida com duas camadas de materiais isolantes térmicos. A fotografia superior da Figura 34 mostra a primeira camada, feita com uma manta térmica. A sua face aluminizada é voltada para o lado da barra de alumínio, a fim de minimizar as perdas de calor por radiação. A face externa da manta é feita de espuma térmica e está voltada para fora. Por cima dessa manta, foi colocada uma segunda camada de espuma, do tipo utilizado em sistemas de refrigeração a ar condicionado (fotografia inferior da Figura 34). As duas camadas de espuma visam à redução das perdas de calor por convecção. A ideia é fazer com que a maior quantidade possível do calor gerado pelo resistor transite pela barra de alumínio e chegue até a pastilha Peltier.

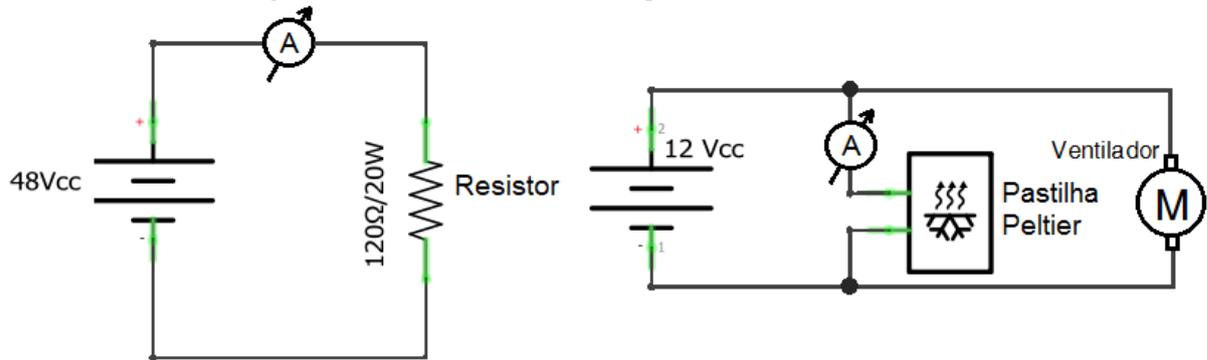
Figura 34 - Camadas de isolantes térmicos



Fonte: O Autor (2021)

O resistor e a pastilha Peltier foram alimentados por fontes de tensão de corrente contínua independentes. O resistor foi alimentado por uma fonte de $48 V_{CC}$ e a pastilha Peltier foi alimentada com $12 V_{CC}$. A alimentação da placa de Arduino veio do cabo USB conectado ao computador. Um amperímetro foi instalado nos circuitos do resistor e da pastilha Peltier para que as suas respectivas correntes pudessem ser monitoradas (ver circuitos da Figura 35).

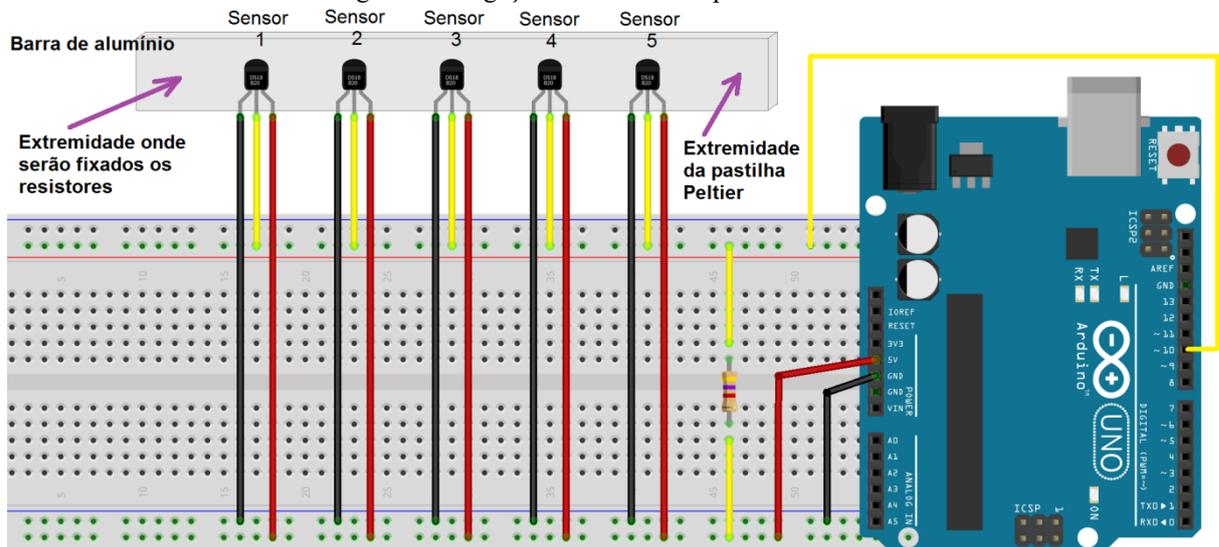
Figura 35 - Circuitos do resistor e da pastilha Peltier com ventilador



Fonte: O Autor (2022)

Os sensores de temperatura foram ligados à placa de Arduino da forma ilustrada na Figura 36. Diferentemente do sensor LM35, adotado na atividade 2, o sensor DS18B20 não necessita de uma porta analógica para cada um dos cinco que foram utilizados. Todos os seus terminais de saída são conectados a uma única porta digital da placa de Arduino. Isso é possível, porque esse tipo de sensor possui um endereço que o identifica no barramento em que foi ligado. Tal recurso facilita a montagem, por diminuir o número de fios conectados.

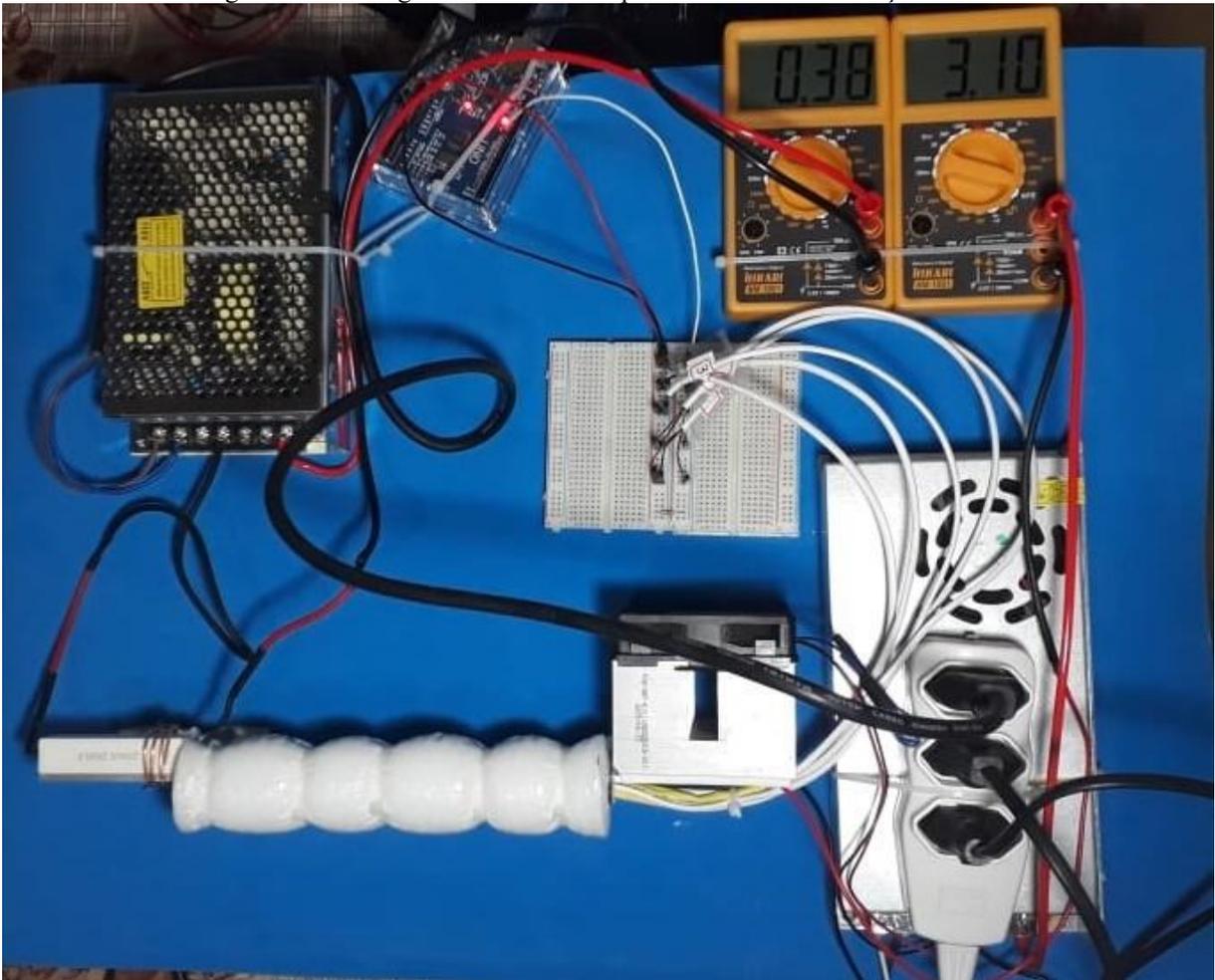
Figura 36 - Ligação dos sensores à placa de Arduino



Fonte: O Autor com auxílio do Programa Fritzing (2021)

A Figura 37 mostra a montagem finalizada do experimento utilizado para a discussão sobre o processo da transferência de calor por condução.

Figura 37 - Montagem finalizada do experimento sobre a condução de calor



Fonte: O Autor (2021)

O primeiro passo a ser dado na programação do microcontrolador da placa de Arduino precisa ser a identificação dos endereços de cada sensor DS18B20 no barramento do pino digital 10. O *sketch* 3 cumpre essa tarefa com a instrução *bus.search(address)*, que faz parte da biblioteca *OneWire.h*. Essa biblioteca precisa ser instalada previamente na interface utilizada para a programação.

Sketch 3 - Identificando os endereços dos sensores DS18B20

```
// sketch_08_01_OneWire_List
#include <OneWire.h>

OneWire bus(10);

void setup()
```

```

{
  Serial.begin(9600);
  byte address[8]; // 64 bits
  while (bus.search(address))
  {
    for(int i = 0; i < 7; i++)
    {
      Serial.print(address[i], HEX);
      Serial.print(" ");
    }
    // checksum OK or Fail
    if (OneWire::crc8(address, 7) == address[7])
    {
      Serial.println(" CRC OK");
    }
    else
    {
      Serial.println(" CRC FAIL");
    }
  }
}

void loop()
{
}

```

Fonte: (MONK, 2013)

Após a identificação dos respectivos endereços dos sensores, o *sketch* 4 foi carregado na memória do Arduino para a execução do processo de leitura das temperaturas. Uma nova biblioteca, a *DallasTemperature.h*, é necessária nesta etapa e também precisa ser instalada previamente. Importante observar que a ordem dos endereçamentos dos sensores não corresponde à disposição física de cada um deles ao longo da barra de alumínio. Na sequência em que a instrução *sensors.getAddress* é executada repetidamente, é preciso associar a posição real do sensor à sua posição lógica no barramento. A efetiva leitura do sensor é realizada pela execução da instrução *sensors.getTempC*, que faz parte do pacote da referida biblioteca.

Sketch 4 - Programa para ler as temperaturas indicadas pelos sensores

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

const int busPin = 10;

```

```
OneWire bus(busPin);
DallasTemperature sensors(&bus);
DeviceAddress sensor1;
DeviceAddress sensor2;
DeviceAddress sensor3;
DeviceAddress sensor4;
DeviceAddress sensor5;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
  {
    Serial.println("Sensor 1 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor2, 1))
  {
    Serial.println("Sensor 2 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor5, 2))
  {
    Serial.println("Sensor 5 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor4, 3))
  {
    Serial.println("Sensor 4 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor3, 4))
  {
    Serial.println("Sensor 3 não encontrado!");
  }
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL, instante,sensor1,sensor2,sensor3,sensor4,sensor5");
  delay(1000);
}

void loop(){
  sensors.requestTemperatures();
  float tempC1 = sensors.getTempC(sensor1);
  float tempC2 = sensors.getTempC(sensor2);
  float tempC3 = sensors.getTempC(sensor3);
  float tempC4 = sensors.getTempC(sensor4);
  float tempC5 = sensors.getTempC(sensor5);
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(tempC1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(tempC2);
  Serial.print(",");
```

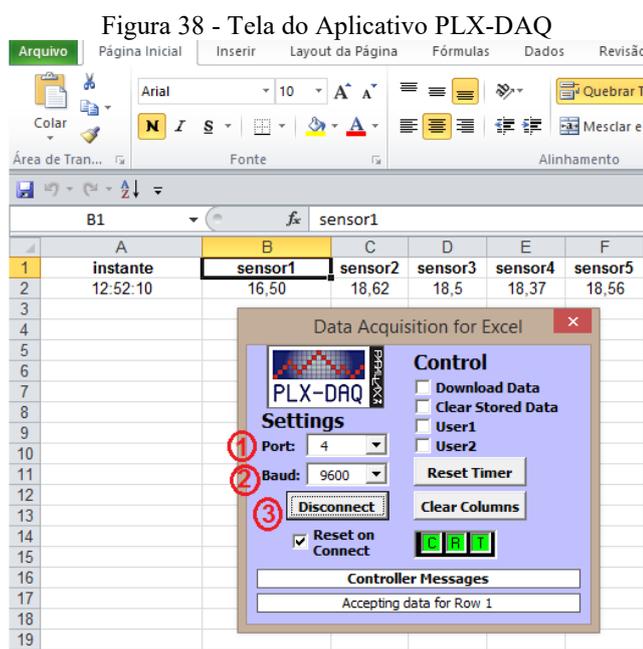
```

Serial.print(tempC3);
Serial.print(",");
Serial.print(tempC4);
Serial.print(",");
Serial.println(tempC5);
delay(30000);
}

```

Fonte: Adaptado pelo Autor, a partir de (MONK, 2013)

A sequência em que a instrução *Serial.print* (ou *Serial.println*) é executada foi estruturada de forma a tabular cada conjunto de leituras numa linha e, em cada uma delas, os dados são separados por uma vírgula. Neste formato, é possível transferir os dados lidos para uma planilha e observar as variações de temperatura em tempo real. Essa transferência das leituras realizadas pelos sensores para uma planilha do Microsoft Excel foi realizada com o auxílio do Aplicativo PLX-DAQ (PARALLAX INC., 2020), ilustrado na Figura 38.



Fonte: O Autor com auxílio de PARALLAX INC. (2020)

7.4.2 Desenvolvimento do experimento – Análise dos dados obtidos

Após ligar o experimento e aguardar um intervalo de tempo suficiente (cerca de 50 minutos) para que as temperaturas indicadas pelos sensores se estabilizassem, foram obtidos os dados da Tabela 1. Os baixos valores de desvio padrão da média indicam que a condução do calor na barra de alumínio entrou em regime estacionário.

Tabela 1 - Temperaturas dos sensores após entrada em regime estacionário (barra revestida com camadas de espuma térmica)

Hora	Temperatur a Sensor 1 (°C)	Temperatur a Sensor 2 (°C)	Temperatur a Sensor 3 (°C)	Temperatur a Sensor 4 (°C)	Temperatur a Sensor 5 (°C)
18:32:19	88,00	72,06	58,69	46,44	35,56
18:32:50	88,00	72,19	58,81	46,5	35,63
18:33:20	88,00	72,25	58,88	46,56	35,69
18:33:51	88,00	72,31	58,94	46,63	35,75
18:34:21	88,00	72,37	59	46,69	35,75
18:34:52	88,00	72,44	59,06	46,75	35,81
18:35:22	88,00	72,5	59,13	46,75	35,88
18:35:53	88,00	72,56	59,19	46,81	35,88
18:36:24	88,50	72,56	59,19	46,88	35,88
18:36:54	88,50	72,62	59,25	46,88	35,88
18:37:25	88,50	72,62	59,25	46,94	35,88
18:37:55	88,50	72,62	59,25	46,88	35,94
18:38:26	88,50	72,69	59,25	46,94	35,94
18:38:57	88,50	72,69	59,31	46,94	35,94
18:39:27	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:39:58	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:40:28	88,50	72,75	59,31	47	35,94
18:40:59	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:41:30	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:42:00	88,50	72,75	59,31	47	35,94
18:42:31	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:43:01	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:43:32	88,50	72,75	59,31	47	35,94
18:44:03	88,50	72,75	59,38	47	35,94
18:44:33	88,50	72,75	59,38	47	36
18:45:04	88,50	72,75	59,38	47	35,94
18:45:34	88,50	72,75	59,38	47	36
18:46:05	88,50	72,75	59,38	47	35,94
18:46:35	88,50	72,75	59,38	47	35,94
18:47:06	88,50	72,75	59,38	47	35,94
18:47:37	88,50	72,75	59,38	47	35,94
18:48:07	88,50	72,75	59,31	47	35,94
18:48:38	88,50	72,69	59,31	47	35,94
18:49:08	88,50	72,69	59,31	46,94	35,88
18:49:39	88,50	72,69	59,31	46,94	35,88
18:50:10	88,50	72,62	59,25	46,88	35,88

Hora	Temperatur a Sensor 1 (°C)	Temperatur a Sensor 2 (°C)	Temperatur a Sensor 3 (°C)	Temperatur a Sensor 4 (°C)	Temperatur a Sensor 5 (°C)
18:50:40	88,50	72,62	59,25	46,88	35,81
18:51:11	88,50	72,62	59,25	46,88	35,88
18:51:41	88,50	72,62	59,25	46,88	35,88
18:52:12	88,50	72,62	59,25	46,88	35,81
18:52:43	88,50	72,62	59,25	46,88	35,81
18:53:13	88,50	72,62	59,19	46,88	35,81
18:53:44	88,50	72,56	59,19	46,88	35,75
18:54:14	88,00	72,56	59,19	46,81	35,81
18:54:45	88,00	72,56	59,19	46,81	35,81
18:55:15	88,00	72,5	59,19	46,81	35,81
18:55:46	88,00	72,56	59,13	46,88	35,88
18:56:17	88,00	72,56	59,19	46,81	35,88
18:56:47	88,50	72,5	59,19	46,88	35,88
18:57:18	88,00	72,56	59,19	46,88	35,94
18:57:48	88,50	72,62	59,19	46,94	36
Temperaturas médias de cada sensor	88,36	72,61	59,23	46,89	35,88
Desvio padrão da média	0,225354	0,151513	0,146104	0,133306	0,090503

Fonte: O Autor (2022)

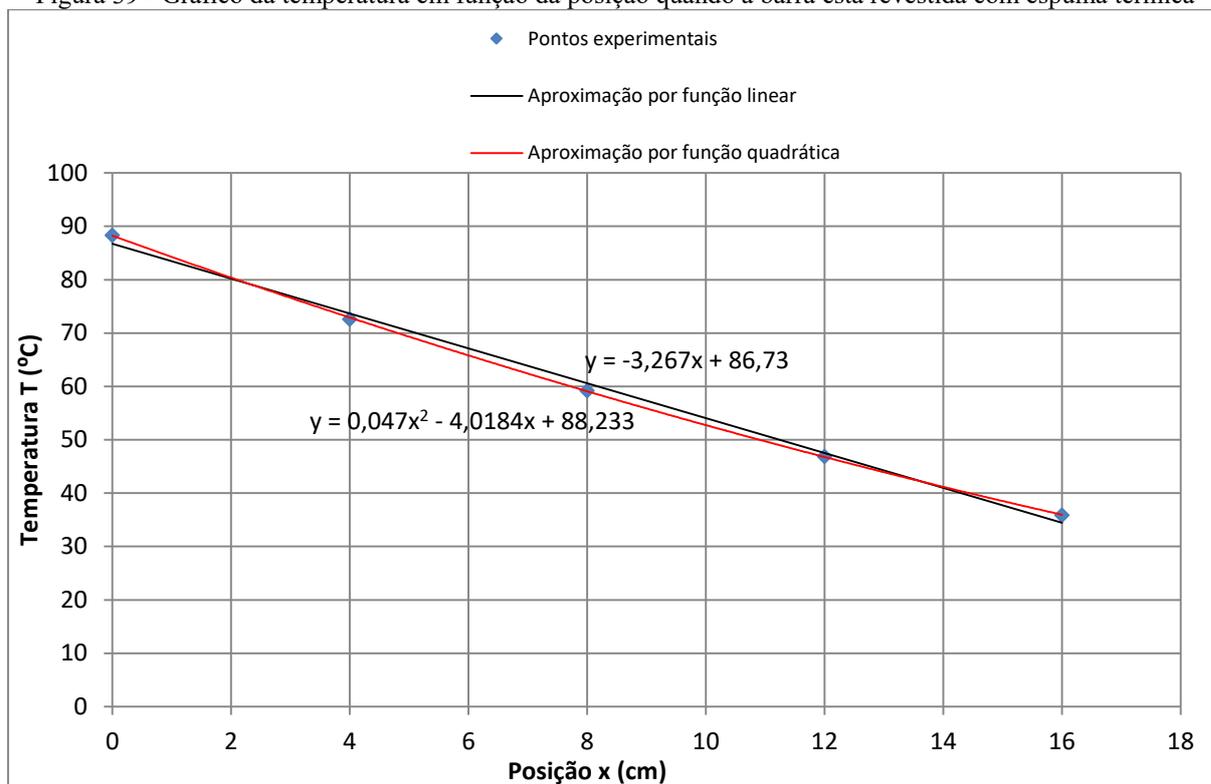
Considerando as posições de cada sensor, indicadas na Figura 33, e utilizando as temperaturas médias da Tabela 1, é possível construir a Tabela 2 e o seu gráfico correspondente (Figura 39). Obtemos, dessa forma, dados da temperatura da barra de alumínio, em função da posição onde se localiza cada sensor.

Tabela 2 - Temperatura em função da posição (barra revestida com camadas de espuma térmica)

Sensores	Posição x (cm)	Temperatur a T (°C)
1	0	88,36
2	4	72,61
3	8	59,23
4	12	46,89
5	16	35,88

Fonte: O Autor (2022)

Figura 39 - Gráfico da temperatura em função da posição quando a barra está revestida com espuma térmica



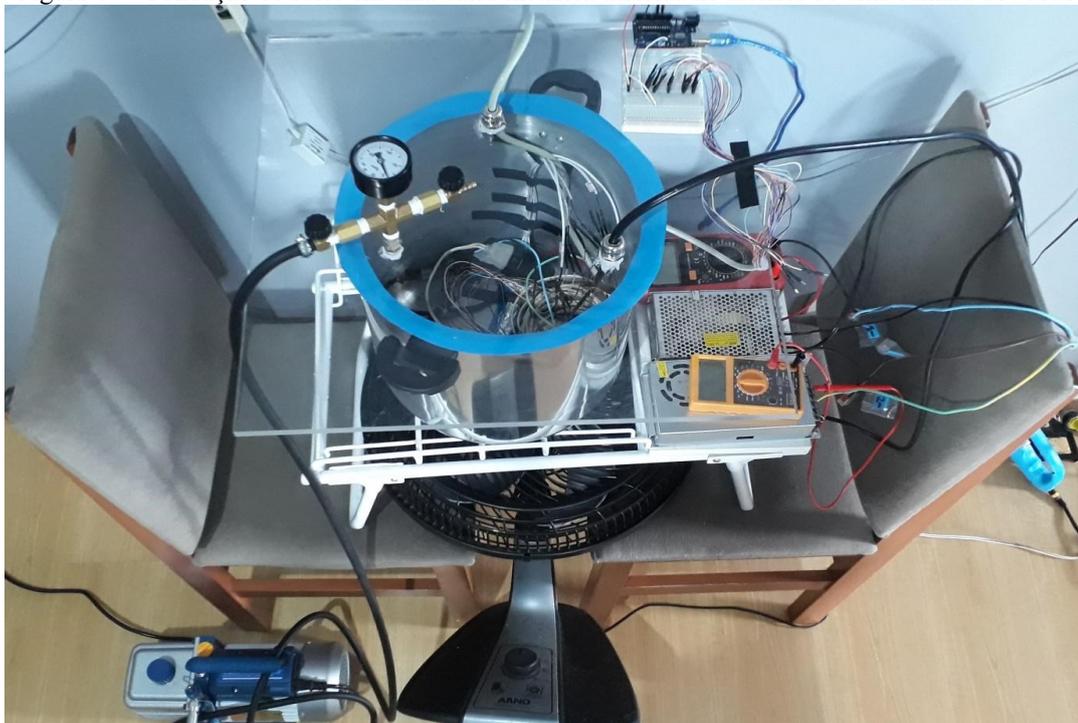
Fonte: O Autor (2022)

O gráfico da Figura 39 mostra uma linha na cor preta que se aproxima dos pontos experimentais por uma função linear ($y = -3,267x + 86,73$). Uma linha reta é o que se espera obter de um processo físico modelado pela Lei de Fourier (equação 20). No entanto, a linha vermelha do referido gráfico sugere que um arco de parábola ($y = 0,047x^2 - 4,0184x + 88,233$) se ajusta melhor aos dados empíricos. Os construtores de um experimento semelhante ao proposto neste trabalho sugerem que uma das causas para esse comportamento não linear seja a perda de calor ao longo da barra, pela imperfeição do isolamento térmico (AMORIM, DIAS e SOARES, 2015). Essa hipótese foi testada com o experimento ilustrado na fotografia da Figura 40. Neste, a barra metálica e os sensores foram colocados no interior de uma câmara de vácuo para minimizar as perdas de calor por convecção²². Eles também foram revestidos com

²² A Figura 40 mostra a fotografia de uma segunda montagem proposta para o teste da referida hipótese. Na primeira, a pastilha Peltier também havia sido inserida no interior da câmara de vácuo. No entanto, o arrefecimento da sua superfície aquecida não foi eficiente pelo contato com o fundo da câmara e, conseqüentemente, a referida pastilha queimou. Na segunda montagem, a extremidade da barra onde anteriormente era colocada a pastilha Peltier passou a ficar em contato direto com o fundo da câmara. Esta por sua vez, continuou a ser arrefecida com a ajuda de um ventilador. Outra observação importante, diz respeito à fonte de calor da barra de alumínio. Enquanto a proposta experimental que resultou nos dados do gráfico da Figura 39 utilizou apenas um resistor, a barra utilizada na câmara tinha dois resistores iguais ligados em série entre si.

uma camada de papel alumínio para reduzir as perdas por radiação. Um breve vídeo com a gravação desse experimento em funcionamento está disponível no seguinte endereço https://youtu.be/FDPVi8jIF_c.

Figura 40 - Condução de calor em uma barra metálica inserida no interior de uma câmara de vácuo



Fonte: O Autor (2022)

A Tabela 3 apresenta os dados brutos da temperatura de cada sensor, a partir do momento em que a condução de calor na barra (dentro da câmara de vácuo) entra em regime estacionário.

Tabela 3 - Temperaturas dos sensores após entrada em regime estacionário (barra no interior da câmara de vácuo)

Hora	Temperatur a Sensor 1 (°C)	Temperatur a Sensor 2 (°C)	Temperatur a Sensor 3 (°C)	Temperatur a Sensor 4 (°C)	Temperatur a Sensor 5 (°C)
22:32:39	76,00	67,75	60,5	54,5	48,69
22:33:10	76,00	67,81	60,56	54,5	48,69
22:33:48	76,00	67,87	60,56	54,56	48,75
22:34:11	76,00	67,87	60,63	54,56	48,75
22:34:42	76,00	67,87	60,63	54,56	48,69
22:35:12	76,00	67,87	60,63	54,56	48,69
22:35:43	76,00	67,94	60,69	54,63	48,75
22:36:13	76,00	67,87	60,69	54,63	48,75
22:36:44	76,00	68	60,75	54,69	48,88
22:37:14	76,00	68	60,75	54,69	48,88

Hora	Temperatur a Sensor 1 (°C)	Temperatur a Sensor 2 (°C)	Temperatur a Sensor 3 (°C)	Temperatur a Sensor 4 (°C)	Temperatur a Sensor 5 (°C)
22:37:45	76,00	68	60,75	54,75	48,81
22:38:16	76,00	68,06	60,81	54,69	48,88
22:38:46	76,00	68,06	60,81	54,75	48,88
22:39:28	76,00	68,12	60,88	54,81	48,94
22:39:47	76,50	68,19	60,88	54,81	49
22:40:18	76,50	68,25	60,94	54,88	49
22:40:49	76,50	68,25	60,94	54,88	48,94
22:41:19	76,50	68,31	60,94	54,88	49
22:41:50	76,50	68,25	60,94	54,88	48,94
22:42:20	76,50	68,19	60,88	54,81	48,94
22:42:51	76,00	68,06	60,81	54,75	48,88
22:43:21	76,00	68,06	60,81	54,75	48,88
22:43:52	76,00	68	60,81	54,75	48,88
22:44:23	76,00	68,06	60,81	54,75	48,94
22:44:53	76,00	68,06	60,81	54,81	48,94
22:45:24	76,00	68,12	60,88	54,81	48,94
22:45:54	76,00	68,19	60,88	54,88	49
22:46:25	76,50	68,19	60,94	54,88	49
22:46:56	76,50	68,19	60,94	54,88	49
22:47:26	76,50	68,19	60,94	54,81	48,94
22:47:57	76,50	68,19	60,94	54,81	48,94
22:48:27	76,50	68,19	60,94	54,88	49
22:48:58	76,50	68,25	60,94	54,88	49
22:49:38	76,50	68,25	61	54,94	49
22:49:59	76,50	68,31	61	54,88	49
22:50:30	76,50	68,25	60,94	54,88	49
22:51:00	76,50	68,25	61	54,94	49
22:51:31	76,50	68,25	61	54,94	49
22:52:18	76,50	68,31	61	54,94	49,06
22:52:36	76,50	68,37	61	54,94	49,06
Temperaturas médias de cada sensor	76,24	68,11	60,84	54,78	48,91
Desvio padrão da média	0,252868	0,15975	0,138845	0,130996	0,109836

Fonte: O Autor (2022)

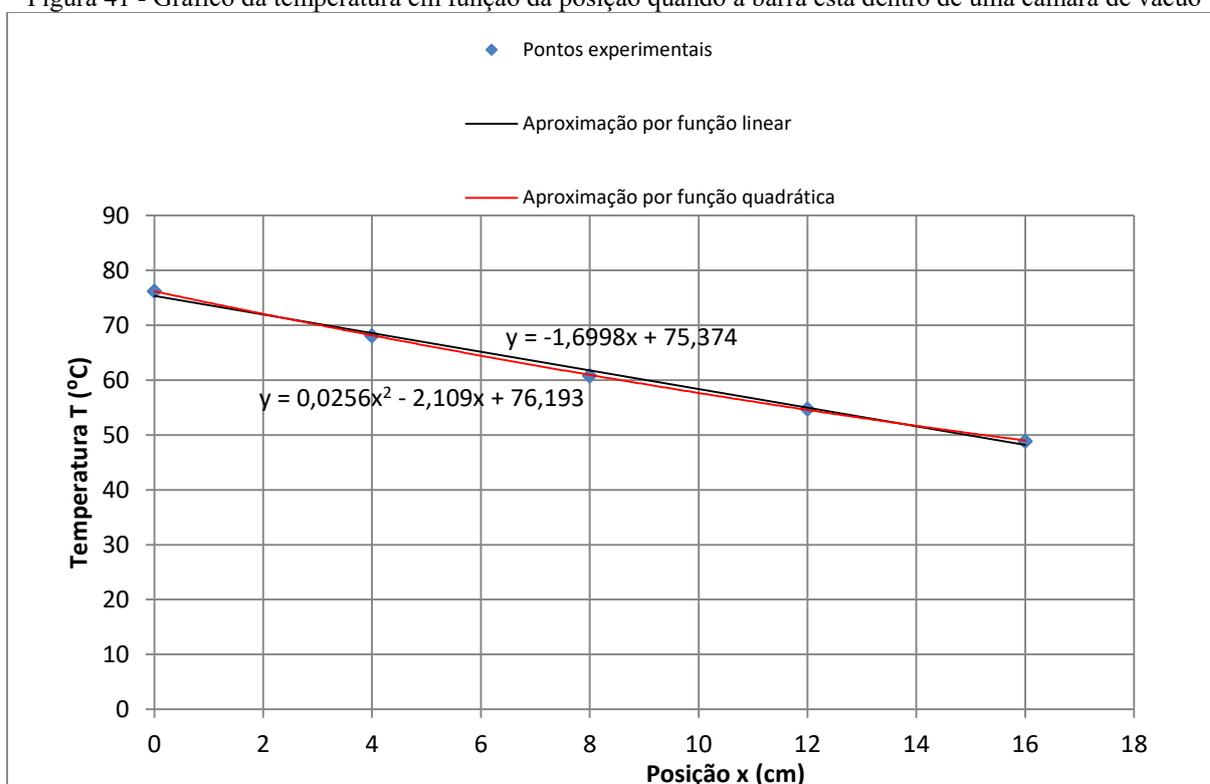
A Tabela 4 e o gráfico da Figura 41 mostram os dados da temperatura de cada sensor, em função das suas respectivas posições ao longo do comprimento da barra, nesta nova situação de baixa pressão atmosférica.

Tabela 4 - Temperatura em função da posição (barra no interior da câmara de vácuo)

Sensores	Posição x (cm)	Temperatura T (°C)
1	0	76,24
2	4	68,11
3	8	60,84
4	12	54,78
5	16	48,91

Fonte: O Autor (2022)

Figura 41 - Gráfico da temperatura em função da posição quando a barra está dentro de uma câmara de vácuo



Fonte: O Autor (2022)

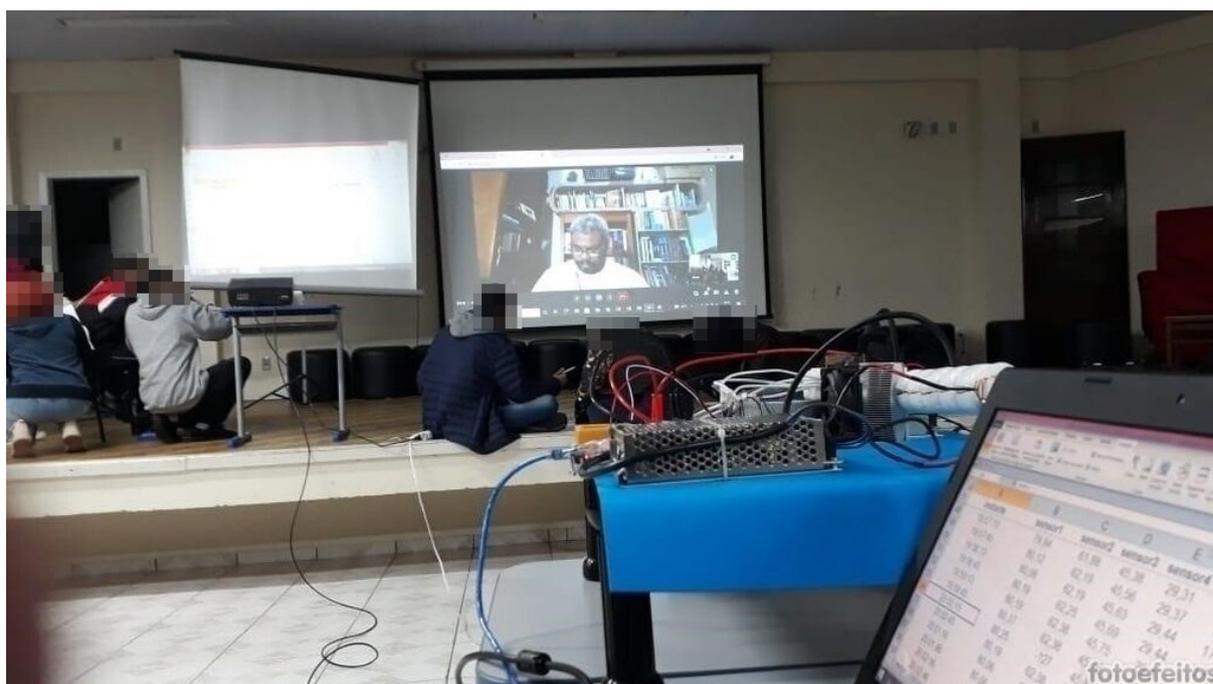
No gráfico da Figura 41, a linha reta (na cor preta) praticamente se sobrepõe à linha curva (na cor vermelha) no intervalo de temperaturas em que as medidas foram realizadas. Este resultado indica que a Lei de Fourier apresentará um resultado mais próximo dos dados experimentais, se conseguirmos reduzir as perdas de calor ao longo da barra. No entanto, apesar de produzir um resultado mais próximo do modelo teórico, o experimento da barra no interior da câmara de vácuo tem montagem mais complexa para ser levada para uma sala de aula. Ademais, para um experimento didático a ser discutido no ensino médio, consideramos

satisfatória a aproximação entre as medidas obtidas para a temperatura e a Lei de Fourier, quando utilizamos o experimento da barra revestida com espuma térmica.

7.4.3 Aplicação em sala de aula (Parte I – Coleta de dados)

O experimento da condução de calor numa barra de alumínio foi executado no dia 08/09/2021, com as turmas A (13 alunos) e D (11 alunos). No dia 10/09/2021, o mesmo experimento foi executado com as turmas B (10 alunos) e C (10 alunos). Na turma D, essa atividade contou com a participação do Professor Dr. Evy Augusto Salcedo Torres, orientador deste trabalho, de forma remota por meio de aplicativo de videoconferência. As fotografias da Figura 42 mostram a participação dos estudantes.

Figura 42 - Aplicação do experimento da condução de calor na Turma D



Fonte: O Autor (2022)

Essa primeira parte da atividade sobre condução de calor consistiu na realização do experimento para a coleta dos dados de temperatura da barra de alumínio. O professor convidou os alunos a se aproximarem do aparato experimental e explicou a função de cada componente.

Em seguida, colocou tudo em funcionamento e apresentou os dados que apareciam numa planilha, por meio de um projetor multimídia.

Enquanto os valores da temperatura de cada sensor eram registrados, a discussão era direcionada pelo professor com perguntas que ajudavam os alunos entenderem o que a Física diz sobre o que estava acontecendo. Primeiramente, um dos estudantes foi convidado a utilizar um termômetro infravermelho para medir a diferença de temperatura entre a fonte quente (resistor) e a fonte fria (pastilha Peltier), pois esta é a condição inicial para que ocorra um fluxo de calor na barra metálica. Questões para refletir sobre a necessidade do isolamento térmico também foram apresentadas.

Interessante ter notado que alguns alunos associaram a condução de calor ao movimento dos elétrons, talvez, por saberem que metais são bons condutores de energia térmica e elétrica. De fato, esta relação existe e foi confirmada a eles com a rápida menção à Lei de Windermann-Franz (TIPLER e LLEWELLYN, 2001).

$$\text{Lei de Windermann-Franz: } \frac{k}{\sigma} = LT, \text{ em que:} \quad (73)$$

- k é a condutividade térmica do metal;
- σ é a condutividade elétrica do metal;
- $L = 2,45 \times 10^{-8} \frac{W\Omega}{K^2}$ (Número de Lorentz); e
- T é a temperatura.

Apesar da contribuição dos elétrons para a condução térmica em metais ser prevista pela Física, o modelo enfatizado na discussão tratou o calor como um fluido passando por um duto.

A atenção dos alunos também foi chamada para observar na planilha projetada que as temperaturas dos sensores, inicialmente, variavam com o tempo que se passava e de acordo com a posição em que cada um estava localizado na barra. Após um determinado intervalo de tempo, o professor enfatizou a estabilização das leituras apresentadas pelos sensores. Foi necessário explicar aos estudantes que pequenas flutuações (na ordem de décimos e centésimos de °C, ou seja, menores que a precisão do componente eletrônico) não eram significativas e que os valores eram estáveis. Eles demonstraram ter compreendido que, a partir daquele momento, a temperatura de cada sensor dependia apenas da sua respectiva posição e, não mais, do tempo

decorrido. O experimento contribuiu, portanto, com a demonstração do conceito de regime estacionário da condução de calor.

Por último, os alunos registraram numa folha as últimas 10 medidas de cada sensor, durante a condução de calor em regime estacionário. Em seguida, calcularam os valores médios de cada conjunto de 10 medidas e construíram a tabela 4 da temperatura em função da posição. Também tomaram nota dos valores da tensão e da corrente elétrica, tanto do resistor, quanto da pastilha Peltier (Figura 43).

Figura 43 - Dados anotados por um dos alunos na experiência da condução de calor

Coleta de dados: Condução de calor em uma barra metálica (experimento 03)

Dados elétricos	
Tensão sobre o resistor:	46,9 V (volts ou joules por coulomb)
Corrente do resistor:	0,38 A (ampères ou coulombs por segundo)
Tensão sobre a pastilha:	11,96 V (volts ou joules por coulomb)
Corrente sobre a pastilha:	3,07 A (ampères ou coulombs por segundo)

Dados da temperatura no regime estacionário (°C)					
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	
80,06	62,19	45,63	29,44	17,75	
80,19	62,19	45,69	29,44	17,75	
80,19	62,25	45,75	29,5	17,75	
80,37	62,38	45,75	29,5	17,45	
80,25	62,38	45,81	29,5	17,75	
80,19	62,38	45,81	29,56	17,81	
80,06	62,38	45,81	29,56	17,87	
80,06	62,31	45,75	29,56	17,87	
80,25	62,31	45,81	29,62	17,87	
80,44	62,44	45,88	29,62	17,87	
Médias	81,21	62,32	45,77	29,53	17,80

Sensores	Posição x(cm)	Temperatura T(°C)
Sensor 1	$x_1 = 0$	$T_1 = 8$
Sensor 2	$x_2 = 4$	$T_2 = 62,3$
Sensor 3	$x_3 = 8$	$T_3 = 45,8$
Sensor 4	$x_4 = 12$	$T_4 = 29,5$
Sensor 5	$x_5 = 16$	$T_5 = 17,8$

Fonte: Aluno anônimo (2021)

7.4.4 Aplicação em sala de aula (Parte II – Construção do gráfico)

Os próximos encontros ocorreram somente nos dias 22 e 24/09/2021, pois nos dias 15 e 17/09/2021 nenhuma das turmas teve aula. Esses intervalos mais espaçados entre aulas não são desejáveis, por interromper a rotina e aumentar a possibilidade do assunto em discussão cair no esquecimento. No dia 22, as turmas A e D compareceram com 14 e 17 alunos, respectivamente. No dia 24, as turmas B e C tiveram, respectivamente, 17 e 9 alunos.

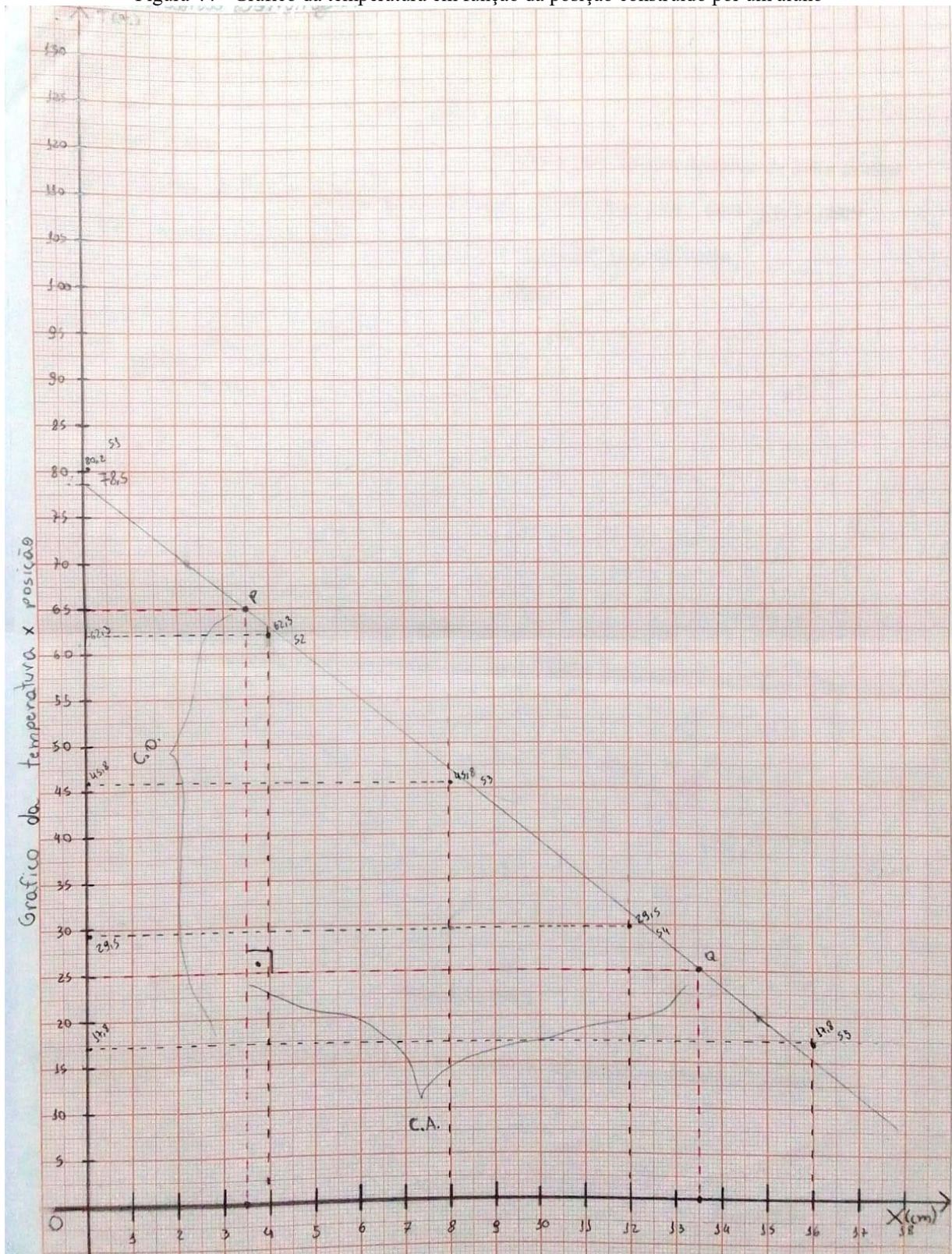
O objetivo desses encontros era auxiliar os alunos a compreenderem a dependência da temperatura em relação à posição de cada sensor, por meio da construção de um gráfico. Antes do início dessa atividade, foi necessário fazer uma descrição do experimento realizado na aula anterior²³. Após esse resgate, cada aluno recebeu uma folha de papel milimetrado e a folha de anotações que eles utilizaram na aula anterior (Figura 43). Considerando que existiam estudantes que não haviam participado da realização do experimento, o professor anotou no quadro os dados da tabela da turma correspondente.

Nesta etapa, os alunos apresentaram dificuldades em marcar os pontos experimentais no gráfico. Primeiro, foi necessário sugerir uma escala apropriada para cada eixo (x para posição, e y para temperatura). Depois, foi preciso ensinar como utilizar tal escala para determinar o quanto cada grandeza variava a cada divisão do papel milimetrado. Mesmo assim, a maioria se mostrou insegura e o professor foi requisitado para conferir quase todos os pontos marcados.

Após as marcações feitas, os estudantes foram orientados a traçar uma reta que melhor se aproximasse dos pontos experimentais. Ao final das aulas, os gráficos dos alunos presentes estavam prontos, como o exemplificado pela Figura 44.

²³ Além de terem se passado duas semanas desde a realização do experimento, o número de alunos presentes mostra que muitos não haviam participado. O problema da assiduidade, como já mencionado, foi uma constante ao longo de todo o período de aplicação deste produto educacional e do próprio ano letivo.

Figura 44 - Gráfico da temperatura em função da posição construído por um aluno



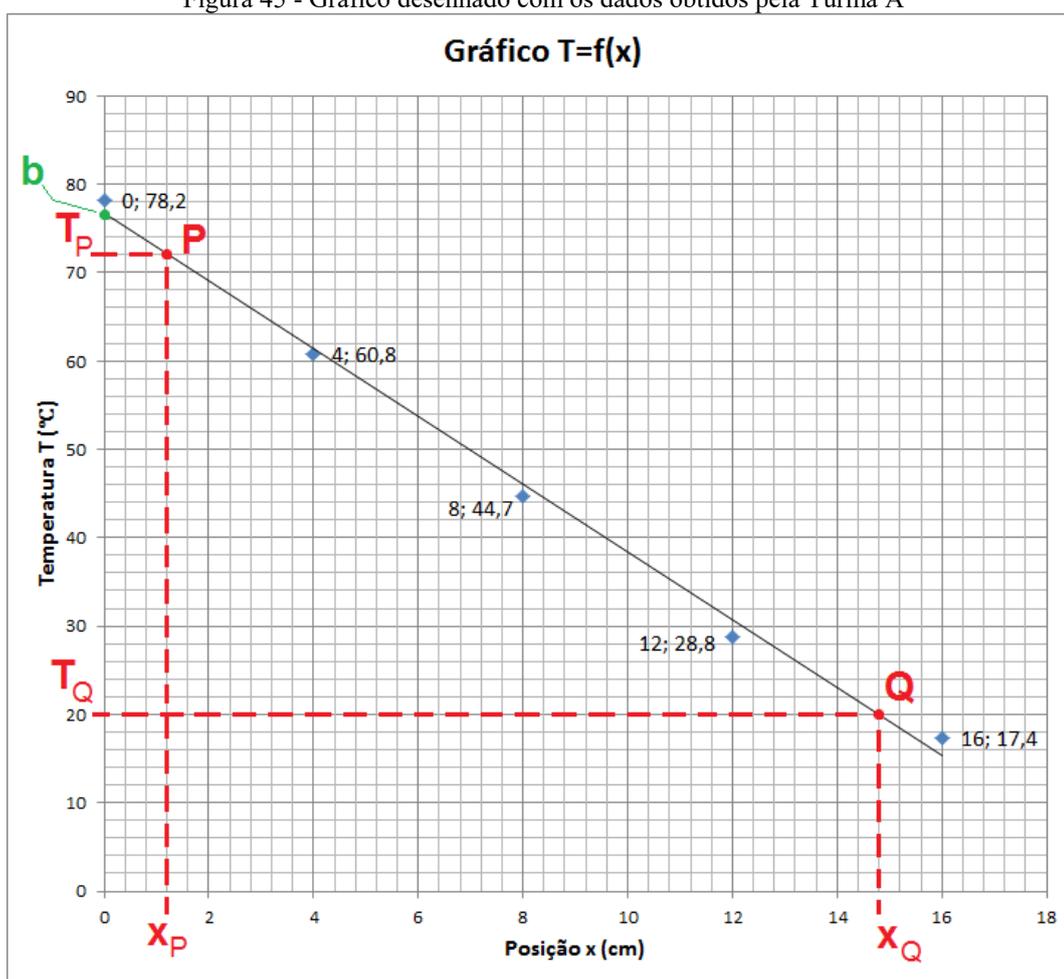
Fonte: Aluno anônimo (2021)

7.4.5 Aplicação em sala de aula (Parte III – Obtenção da Lei de Fourier)

Após a realização do experimento e a construção do gráfico, nas aulas dos dias 29/09 e 1º/10/2021, chegou o momento de obter a equação que descreve a Lei de Fourier para a situação proposta. No dia 29, as turmas A e D contaram com 18 e 17 participantes, respectivamente. No dia 1º, as turmas B e C tiveram 13 e 16 alunos presentes, respectivamente. Mais uma vez, uma recapitulação de tudo o que tinha sido discutido anteriormente sobre esse tema foi feita, antes do início das atividades do dia.

Já prevendo que alguns alunos não conseguiriam acompanhar a discussão por terem faltado na aula anterior, o professor entregou uma folha contendo o gráfico personalizado com os dados coletados pela turma (Figura 45). Aqueles que construíram o gráfico no papel milimetrado continuaram desenvolvendo a atividade nas suas próprias folhas.

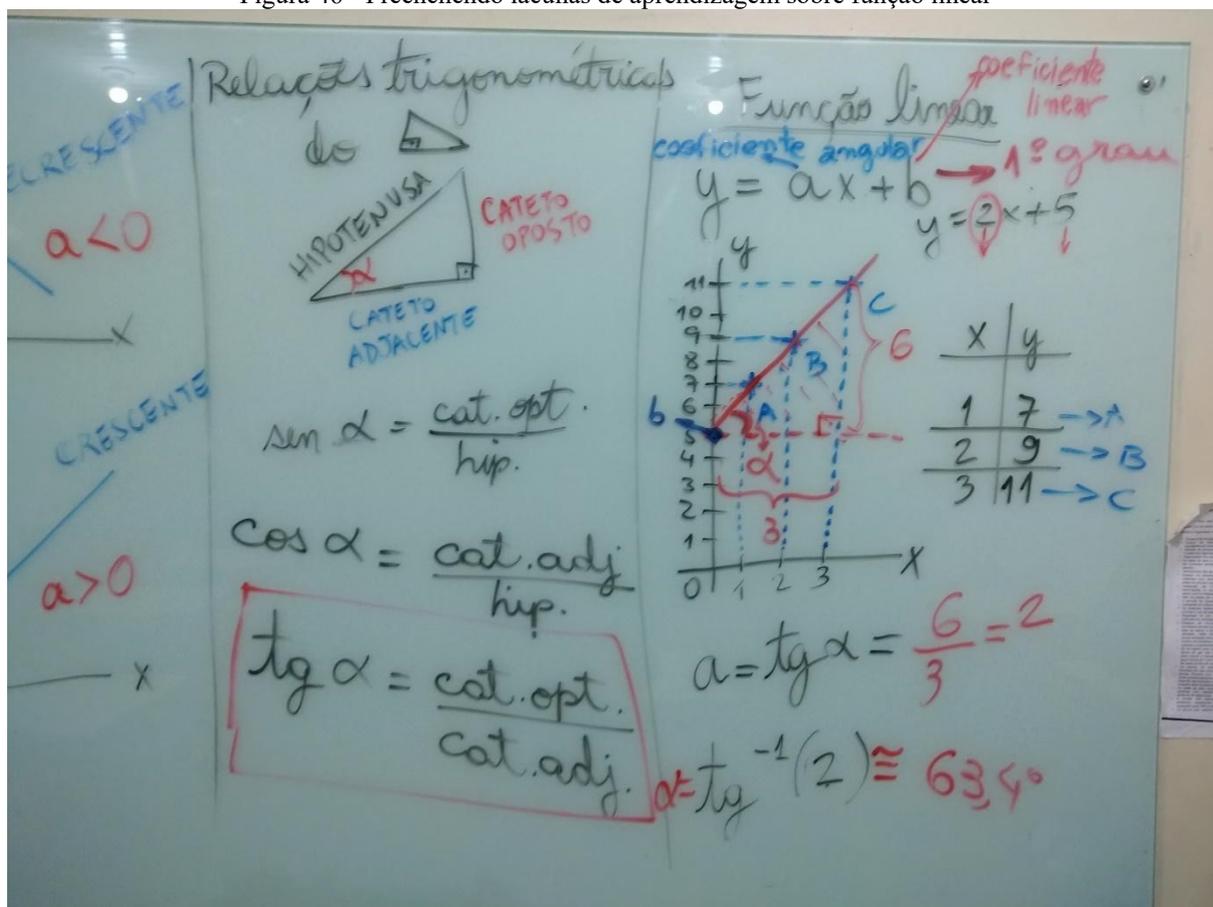
Figura 45 - Gráfico desenhado com os dados obtidos pela Turma A



Fonte: O Autor (2021)

A discussão sobre a Lei de Fourier precisou ser interrompida quando o professor percebeu que os alunos não haviam estudado sobre função linear. Não era possível continuar, sem que eles soubessem o que é e como calcular um coeficiente angular e um coeficiente linear da reta obtida experimentalmente. A aula de Física foi transformada numa aula de Matemática, conforme a fotografia tirada do quadro (Figura 46).

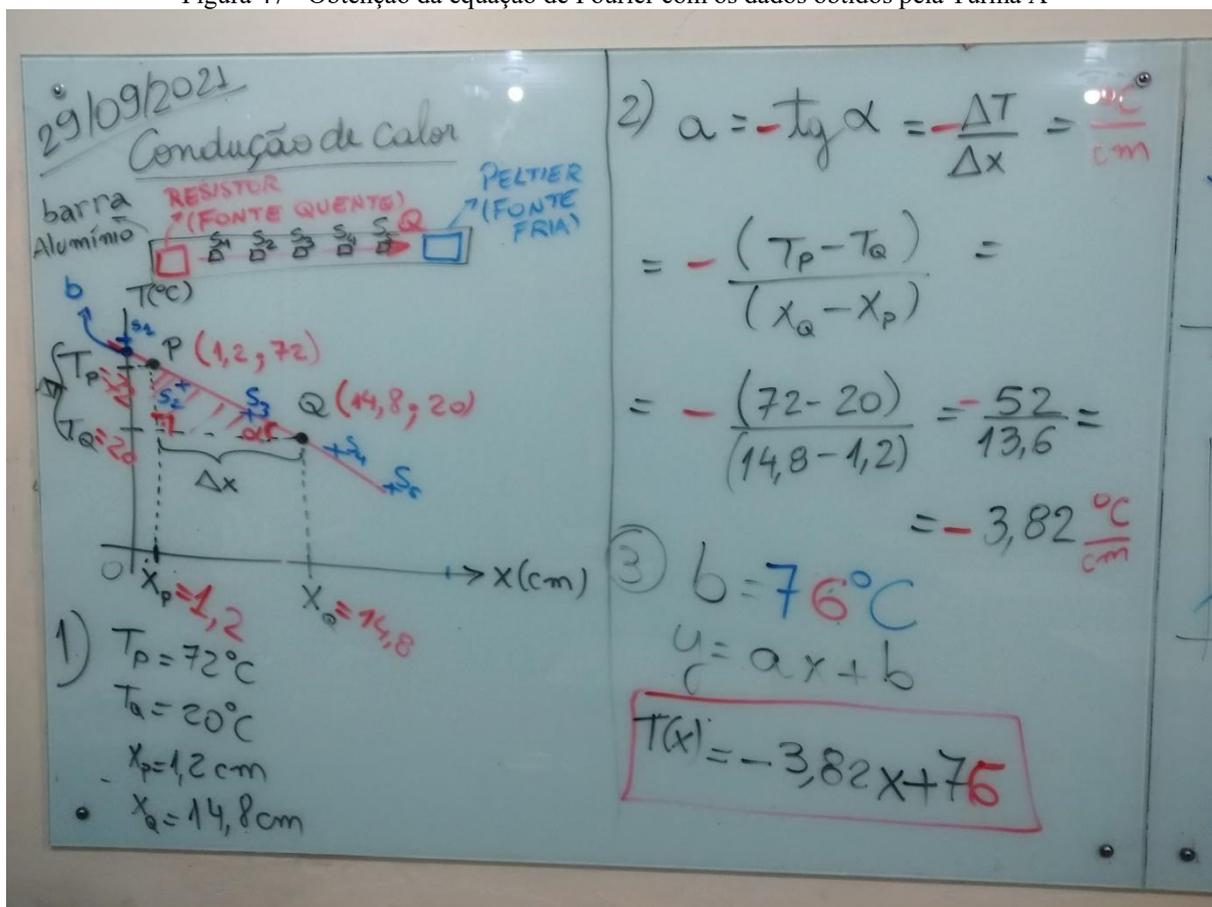
Figura 46 - Preenchendo lacunas de aprendizagem sobre função linear



Fonte: O Autor (2021)

Ainda foi possível, neste encontro, retornar ao tema da condução de calor. Os conceitos matemáticos recém-discutidos foram imediatamente aplicados para a obtenção da equação que descreve a Lei de Fourier para os dados obtidos. A Figura 47 mostra o desenvolvimento da referida equação realizado juntamente com os alunos da turma A.

Figura 47 - Obtenção da equação de Fourier com os dados obtidos pela Turma A



Fonte: O Autor (2021)

Nessas aulas, a impressão deixada por alguns alunos foi que a empolgação demonstrada na aula que teve atividade experimental foi deixada para trás, após a introdução da discussão matemática do fenômeno em estudo. No entanto, muitos demonstraram ter compreendido a associação entre o coeficiente angular da reta e a taxa de variação negativa da temperatura na barra, à medida que nos deslocamos na direção da fonte fria (pastilha Peltier). Assim como, também, associaram o coeficiente linear à temperatura do sensor localizado numa posição mais próxima da fonte quente (resistor).

7.4.6 Aplicação em sala de aula (Parte IV – Discussões finais e avaliação da aprendizagem)

As dificuldades apresentadas pelos alunos para a construção do gráfico e para a obtenção da equação da reta experimental fizeram com que a abordagem desse tema durasse mais tempo do que havia sido previsto pelo professor. No entanto, faltava discutir a Lei de Fourier tal como ela é apresentada nos livros didáticos e encerrar com uma atividade para avaliar a aprendizagem dos estudantes. Esses foram os objetivos dos encontros dos dias 13 e 15/10/2021. As turmas A e D participaram dessa discussão no dia 13, com 15 alunos cada uma. As turmas B e C participaram no dia 15, com 7 e 12 alunos, respectivamente. As aulas de Física da semana anterior (06 e 08/10/2021) foram substituídas por atividades extracurriculares, por determinação da direção e da coordenação pedagógica da escola.

Nesses encontros, a discussão avançou para associar o valor encontrado do coeficiente angular da reta com os fatores físicos que o determinam: corrente térmica (ou fluxo de calor), condutividade térmica do material e área da seção transversal da barra. Primeiramente, foi estimado que apenas um quarto da potência total dissipada pelo resistor era transferido para a barra de alumínio, pois somente uma das suas faces retangulares estava em contato com o objeto metálico. Neste caso, o valor estimado foi de 4,465 J/s (joules por segundo), conforme dados coletados (tensão e corrente do resistor) pela Turma B. A condutividade térmica do alumínio a 27°C é de 2,37 J/cm.s.°C (PRÄSS, 2020). A área da seção transversal da barra é igual a 0,429 cm². Esses três valores foram utilizados para encontrar uma taxa de variação da temperatura ao longo da barra igual a -4,39 °C/cm. A diferença percentual para o valor experimental (-3,94 °C/cm) é de 11,4%. Considerando que a condutividade térmica é difícil de ser determinada numa barra que não possui uma temperatura única (e sim, um gradiente de temperatura ao longo do seu comprimento), e levando-se em conta que o calor transmitido do resistor para a mesma barra só pode ser estimado²⁴, então o erro percentual obtido pode ser considerado tolerável. Consideremos, ainda, que a Lei de Fourier é idealizada para uma situação linear e a aplicamos a uma barra que é um corpo extenso. As notas de aula da Figura 48 demonstram os cálculos realizados com os alunos.

²⁴ Lembremos que a resistência cerâmica (apenas uma das suas faces) foi colada à barra de alumínio com o auxílio de uma fita térmica. Portanto, não se sabe quanto calor por unidade de tempo é transferido de um objeto para o outro.

Figura 48 - Notas de aula escritas na lousa digital da Turma B

Finalmente... A Lei de Fourier

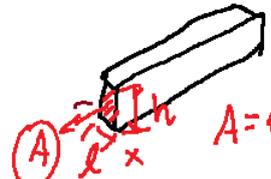
$$\Phi = -\kappa \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

(phi)
FLUXO DE CALOR $\frac{Q}{\Delta t}$

κ KAPPA
CONDUTIVIDADE TÉRMICA

$\kappa_{Al} = 2,37 \frac{J}{cm \cdot s \cdot ^\circ C} \rightarrow 27^\circ C$

$$T(x) = -\left(\frac{\Phi}{\kappa A}\right)x + T_1$$

$$T(x) = -3,94x + 78$$


$A = 0,429 cm^2$

$$\Phi = \frac{V \times I}{l} = \frac{47 \times 0,38}{4} = 4,465 \frac{J}{s}$$

$$-\frac{\Phi}{\kappa A} = -\frac{4,465}{2,37 \cdot 0,429} = -4,39 \frac{^\circ C}{cm}$$

$\epsilon\% \approx 11,4\%$

Fonte: O Autor (2021)

Após essa discussão, um questionário contendo as questões relacionadas no Quadro 1 foi aplicado junto a cada turma. No entanto, o tempo que restou da aula foi considerado insuficiente por uma parcela dos alunos. Dessa forma, para evitar que mais um encontro fosse ocupado com o tema da condução de calor, foi permitido a eles que levassem o questionário para responder em casa e entregá-lo respondido na aula seguinte.

Quadro 1 - Questões para avaliação da aprendizagem sobre o processo de condução de calor

- 1) Diga com as suas palavras o que, afinal, você compreendeu sobre a lei de Fourier para a condução de calor em metais? Tente escrever o máximo que conseguir para expressar da melhor forma a sua compreensão sobre essa lei.
- 2) No que diz respeito ao fenômeno físico da condução de calor, que informação nos oferece o coeficiente angular “a” da equação obtida a partir do gráfico que você desenhou?
- 3) Na sua equação, o valor encontrado para o coeficiente angular “a” é diferente do resultado obtido no cálculo do termo $-\left(\frac{\Phi}{\kappa A}\right)$, que pertence à Lei de Fourier. Cite os fatores que contribuem para essa diferença.

- 4) Utilize a sua equação e calcule a temperatura da barra de alumínio num trecho sobre o resistor (faça $x = -1$ cm) e em outro trecho sobre a pastilha Peltier (faça $x = 19$ cm).

Fonte: O Autor (2021)

Essa foi uma aula em que alguns alunos se mostraram mais tensos, especialmente aqueles que faltaram a um ou mais encontros sobre o tema discutido. É interessante observar que eles apresentam a inassiduidade como argumento para não desejar participar da avaliação e esperam que o professor apresente uma solução alternativa. Ainda, se queixam de não terem entendido. Mas, como poderiam se não frequentam as aulas com regularidade? Nesses casos, foi necessário esclarecer que o comparecimento às aulas é uma obrigação do aluno e que, em caso de necessidade de faltar, os conteúdos precisam ser recuperados num horário alternativo ao da aula.

Voltando as atenções para os alunos mais participativos, ou seja, aqueles que conseguiram acompanhar as explicações, percebeu-se que o interesse não diminuiu com a introdução das discussões matemáticas do fenômeno da condução. Um deles relatou que havia estudado sobre a função linear, mas que não conhecia nenhuma aplicação da mesma, até a discussão sobre a Lei de Fourier. Outro aproveitou a fala do colega para satisfazer a sua curiosidade sobre que outras funções matemáticas existiam e quais seriam as suas aplicações na Física. Esse tipo de manifestação indica que o uso da Matemática como instrumento para a Física não havia sido demonstrada a eles, em nenhuma oportunidade, antes da realização da atividade descrita nesta seção.

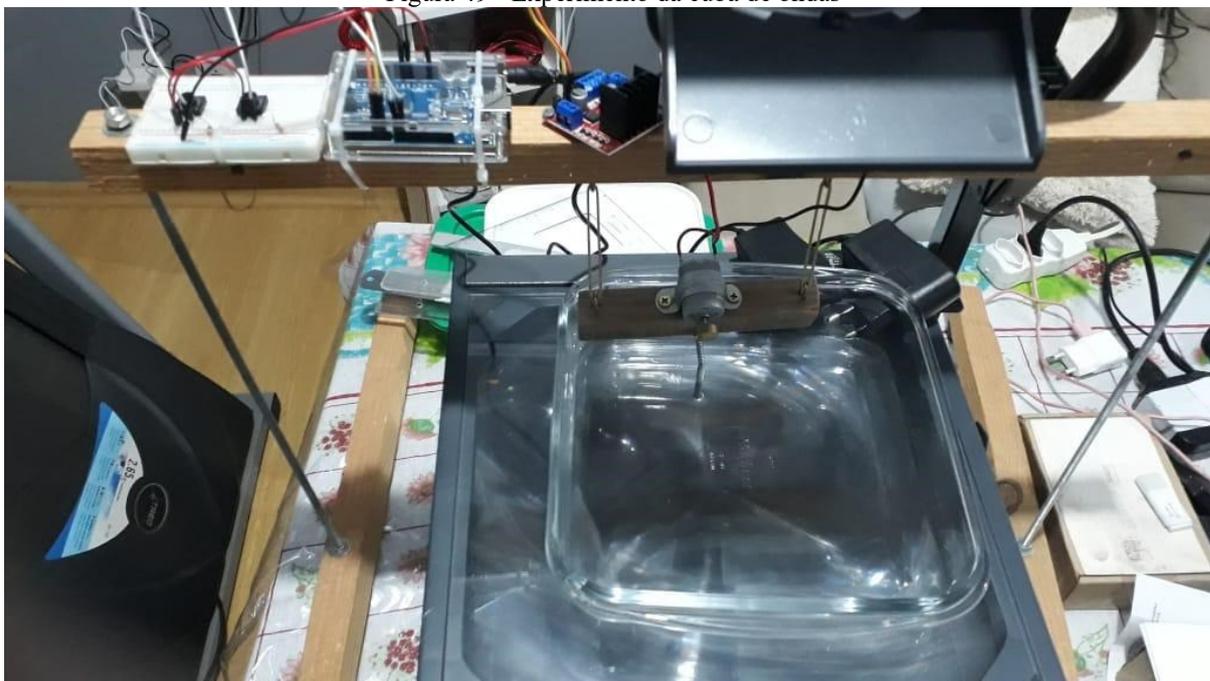
7.5 ATIVIDADE 4: ONDAS MECÂNICAS EM UMA SUPERFÍCIE D'ÁGUA

Esta é a primeira de uma sequência de três atividades, cujo objetivo é construir uma base de conhecimento sobre a qual o fenômeno da radiação térmica possa ser discutido. O primeiro elemento dessa base foram os fenômenos ondulatórios da reflexão, da transmissão, da absorção e da interferência, bem como os conceitos de frequência, período, amplitude e comprimento de onda. Para isso, foi construída uma cuba de ondas para a observação de tais fenômenos em uma superfície d'água.

7.5.1 Desenvolvimento da cuba de ondas

As ondas a serem visualizadas na cuba são geradas por um motor, em cujo eixo está fixado um pequeno cilindro metálico maciço que gira fora do seu centro. Esse conjunto motor-cilindro é fixado a uma base de madeira, que é suspensa por atilhos de borracha e possui uma haste que toca a superfície da água. Quando o motor gira, todo o conjunto vibra e provoca a formação das ondas. A fim de enxergá-las melhor, fazemos com que a luz que atravessa a cuba seja projetada numa parede como o auxílio de um projetor de slides. A frequência de oscilação das ondas foi controlada pela velocidade de rotação do eixo do motor. Um módulo denominado “Ponte H” (L298N) recebe um sinal de controle da placa de Arduino e fornece a potência elétrica necessária para fazer o pequeno motor funcionar. Dois botões são utilizados para comandar o aumento e a diminuição da rotação do motor. A fotografia da Figura 49 mostra o experimento montado.

Figura 49 - Experimento da cuba de ondas

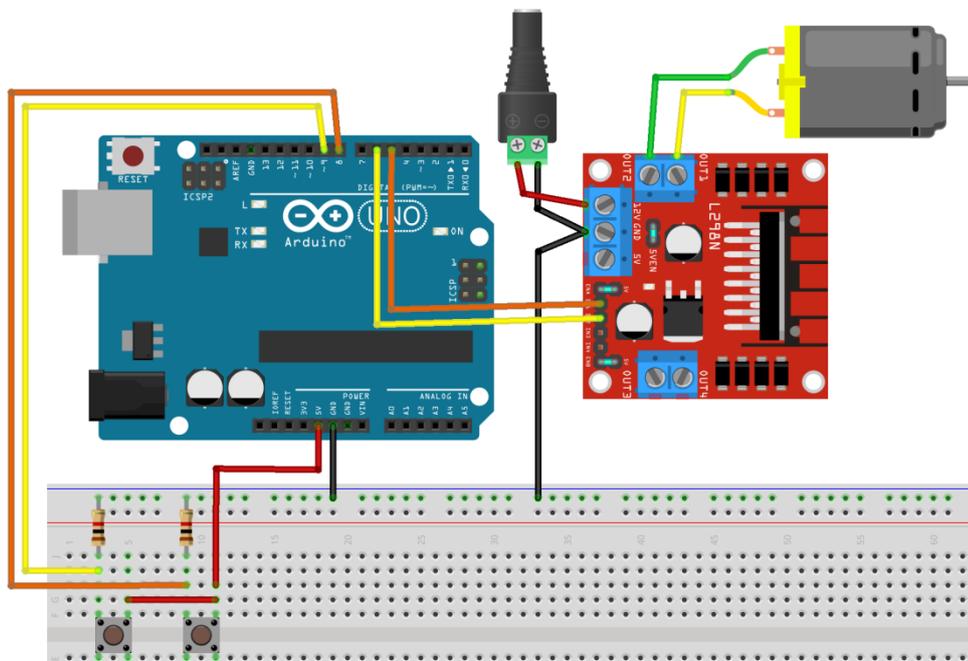


Fonte: O Autor (2021)

A Figura 50 apresenta as ligações entre os componentes da cuba de ondas. A placa de Arduino e o módulo “Ponte H” foram alimentados por fontes separadas. A primeira foi alimentada com uma fonte de $9 V_{cc}$, e o segundo recebeu $12 V_{cc}$ de outra fonte. No entanto, é

importante observar que os pinos de terra (GND) das duas placas foram interligados entre si pela matriz de contatos. Essa medida mantém a referência do 0 V (zero volt) igual para as duas placas.

Figura 50 - Diagrama de ligação dos componentes da cuba de ondas



Fonte: O Autor com auxílio do Programa Fritzing (2021)

O *sketch 5* contém as instruções que coloca o experimento em funcionamento. Nesta aplicação, a principal delas é a instrução *analogWrite*, que envia pulsos de $5 V_{cc}$ de amplitude, com largura variável dos níveis alto e baixo da saída utilizada. Quanto mais largo for o pulso em nível alto, maior a tensão média com a qual o motor é alimentado e, conseqüentemente, maior a sua velocidade de rotação.

Sketch 5 - Controle de velocidade PWM com botões

```
int pin_aumenta = 8; // pino conectado ao botão que aumenta a velocidade do motor.
int pin_diminui = 9; // pino conectado ao botão que diminui a velocidade do motor.
int pin_pwm = 5; // pino determinado para a saída do sinal PWM.
int estado_botao_aumenta = 0; // variável que armazena o estado do botão que aumenta a
velocidade do motor.
int estado_botao_diminui = 0; // variável que armazena o estado do botão que diminui a
velocidade do motor.
int cont = 100; // variável de "contagem" da velocidade iniciada com valor 100.

void setup() {
```

```

Serial.begin(9600); // inicia a comunicação serial da placa de Arduino com o computador.
pinMode(pin_umenta, INPUT); // define o pin_umenta como uma entrada digital.
pinMode(pin_diminui, INPUT); // define o pin_diminui como uma entrada digital

}

void loop() {

    estado_botao_umenta = digitalRead(pin_umenta); // Variável armazena valor lido em
pin_umenta.
    estado_botao_diminui = digitalRead(pin_diminui); // Variável armazena valor lido em
pin_diminui.
    if(cont<53) {
        cont=53; // estabelece limite mínimo de velocidade.
    }
    else if (cont>255) {
        cont=255; // estabelece limite máximo de velocidade.
    }
    else if (estado_botao_umenta == HIGH){
        ++cont; // incrementa variável cont, se o botão de aumento da velocidade for pressionado.
    }
    else if (estado_botao_diminui == HIGH) {
        --cont; // decrementa variável cont, se o botão de diminuição da velocidade for pressionado.
    }
    Serial.println(cont); // exibe valor da variável cont no monitor serial.
    analogWrite(pin_pwm, cont); // envia para pin_pwm um sinal PWM com largura útil
determinada pela variável cont.
    delay(100); // interrompe o processamento em 100 milissegundos.
}
}

```

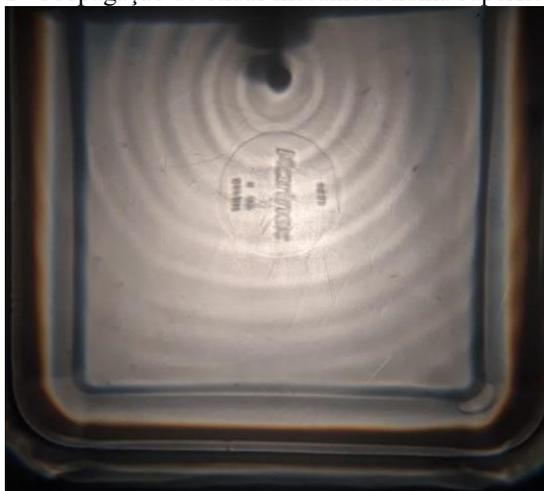
Fonte: O Autor (2021)

7.5.2 Aplicação em sala de aula

A cuba de ondas foi utilizada nas Turmas A e D no dia 20/10/2021, em cujas aulas estiveram presentes 15 e 16 alunos, respectivamente. As turmas B e C participaram da mesma atividade no dia 22/10/2022, com 10 e 9 alunos, respectivamente.

Primeiro, variamos a velocidade de rotação do motor para mostrar como o espaçamento entre as linhas claras (associadas aos vales da onda) e as linhas escuras (associadas às cristas) também variava. Dessa forma, foi mais fácil ajudar os alunos a entenderem sobre os conceitos de frequência de oscilação e comprimento de uma onda. O próprio conceito de onda como propagação da energia (mecânica, neste caso) também foi discutido no início da aula. A fotografia da Figura 51 mostra o experimento em funcionamento.

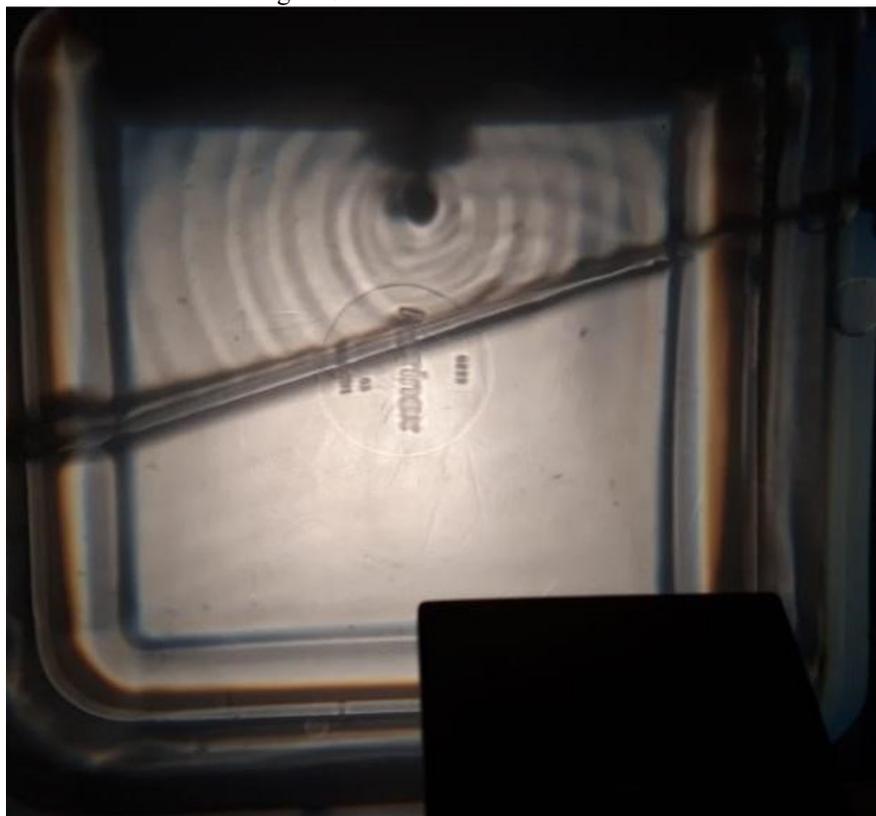
Figura 51 - Propagação de ondas mecânicas numa superfície d'água



Fonte: O Autor (2021)

No decorrer da discussão, diferentes obstáculos foram colocados na trajetória das ondas para demonstrar alguns fenômenos. Uma barreira rígida, como uma régua metálica, fazia as ondas incidentes serem refletidas de volta, em direção à fonte emissora. O encontro entre ondas incidentes e refletidas produziu um padrão de interferência no lado da referida fonte (Figura 52).

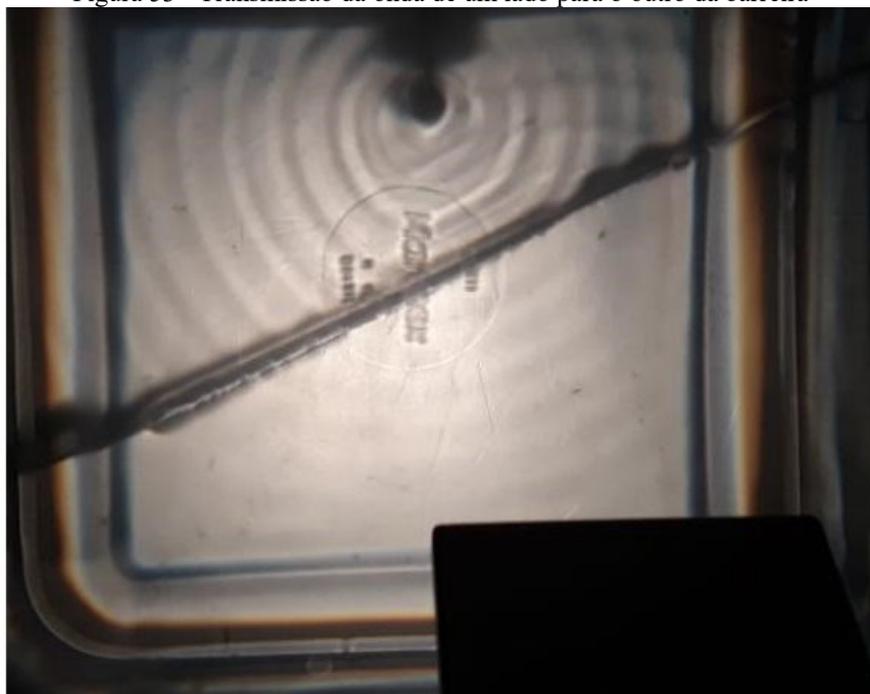
Figura 52 - Reflexão e Interferência



Fonte: O Autor (2021)

Um material flexível, como uma fina folha de acetato, permite que parte da energia das ondas incidentes seja transmitida para o outro lado da barreira. A Figura 53 mostra, em linhas tênues, as ondas transmitidas. No entanto, no lado da fonte geradora das ondas, ainda ocorre a reflexão e o padrão de interferência. Ou seja, parte da energia da onda incidente é refletida de volta e parte dessa energia é transmitida.

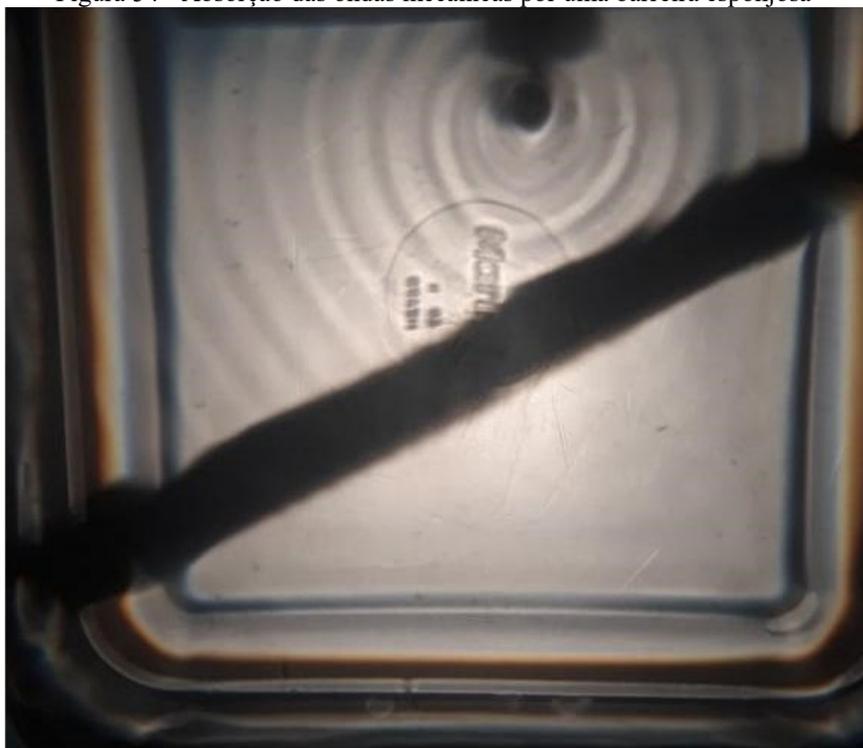
Figura 53 - Transmissão da onda de um lado para o outro da barreira



Fonte: O Autor (2021)

O fenômeno da absorção da energia mecânica foi demonstrado com a utilização de um material esponjoso como barreira. Dessa forma, não se via mais o efeito da reflexão e da interferência no lado da fonte geradora de ondas. Também, não se via a oscilação da superfície d'água no lado oposto da barreira, ou seja, não ocorria a transmissão (Figura 54). Ou seja, a energia das ondas incidentes era absorvida pela barreira de espuma.

Figura 54 - Absorção das ondas mecânicas por uma barreira esponjosa



Fonte: O Autor (2021)

Os estudantes se mostraram motivados e participativos nessas aulas. Sem dúvida o material utilizado foi significativo para esse comportamento. Alguns desejaram tocar no experimento para fazer variar a frequência de oscilação das ondas, embora o convite tenha sido estendido a todos. Outros colaboraram segurando os objetos utilizados como barreira, enquanto o professor chamava a atenção da turma para os detalhes das ondas projetadas na parede. Interessante observar que a discussão com demonstração experimental permitiu que os estudantes reconhecessem a ocorrência de fenômenos ondulatórios em situações cotidianas. Partiu espontaneamente de um deles a associação entre a absorção das ondas na água pela esponja e absorção das ondas acústicas pela espuma colocada nas paredes de estúdios de gravação.

A discussão sobre os fenômenos ondulatórios foi qualitativa. Ou seja, exceto por breves exemplos sobre a conversão da frequência em comprimento de onda (e vice-versa), a Matemática praticamente não foi utilizada nessas aulas. No entanto, alguns alunos revelaram outras dificuldades de aprendizagem: a de sintetizar as ideias discutidas e as apresentar em pequenos textos. Eles receberam uma folha de papel, em que era solicitada uma breve descrição do que havia sido observado com a ajuda do experimento. Foi possível perceber um estado de

ansiedade em alguns deles. Foi frequente a pergunta: “O que eu escrevo?” Se o professor repetisse a demonstração e tentasse explicar novamente, surgiam os pedidos: “Por favor, fale mais devagar.”, ou “fale novamente”. Era notório que estavam tentando transcrever a fala literal do professor para o papel que tinham em mãos. O desejável era que eles tentassem se apropriar dos conceitos discutidos e demonstrassem isso em textos da sua própria autoria.

7.6 ATIVIDADES 5 E 6: AULAS EXPOSITIVAS

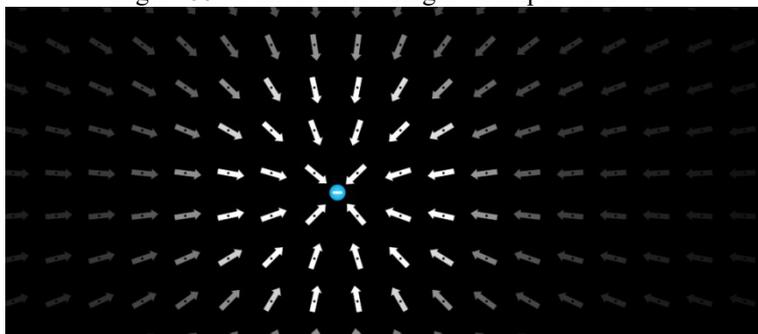
Antes da realização de mais uma demonstração experimental com Arduino e abordar o tema da radiação térmica, outras duas atividades foram realizadas com as quatro turmas participantes desta sequência didática. Tais atividades tiveram um formato de aulas expositivas e dialogadas, em que foram utilizados: simuladores didáticos, animações gráficas e a resolução de problemas de Física. Ao contrário do que fizemos na discussão sobre a condução de calor, quando o experimento foi aplicado primeiramente, agora, propomos que uma abordagem teórica seja realizada antes da demonstração experimental. Combinar os temas abordados com antecedência, numa atividade orientada por um material potencialmente significativo, pode contribuir para dar significado aos conceitos físicos discutidos. A adoção de métodos que possibilitem a construção de novos modelos na mente dos alunos, também faz parte da estratégia de ensino. Espera-se que tais modelos sejam acionados no momento da execução da atividade prática.

7.6.1 Planejamento da aula sobre ondas eletromagnéticas

A primeira aula expositiva teve o objetivo de discutir o que são as ondas eletromagnéticas e qual a sua origem. Os simuladores representados nas figuras 55 a 58 foram utilizados para demonstrar a relação entre a eletricidade e o magnetismo de uma forma bastante introdutória. O primeiro simulador ilustra o campo elétrico em torno de uma carga estática. O segundo ilustra o campo magnético ao redor de um ímã em repouso. O terceiro mostra o surgimento de um campo magnético, a partir da movimentação das cargas elétricas (e, conseqüentemente, dos seus respectivos campos elétricos). O quarto demonstra que são as cargas elétricas que se movem, quando estão na área de atuação de um campo magnético variante. A síntese do que se pretendeu com tais simulações é: 1) quando carga e ímã estão em repouso,

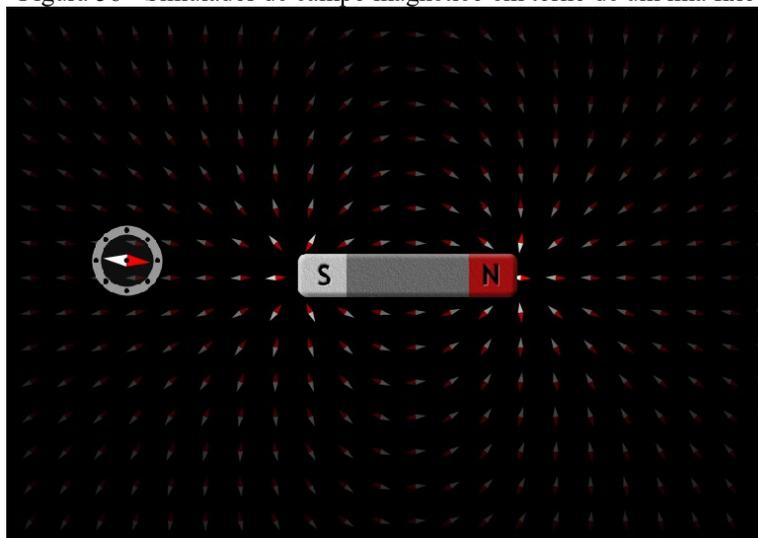
cada um deles possui um campo característico em torno de si, que também é estático; e 2) quando campo elétrico e campo magnético estão em movimento, induzem-se mutuamente.

Figura 55 - Simulador de cargas e campos elétricos



Fonte: PhET Interactive Simulations²⁵ (2021)

Figura 56 - Simulador de campo magnético em torno de um ímã fixo

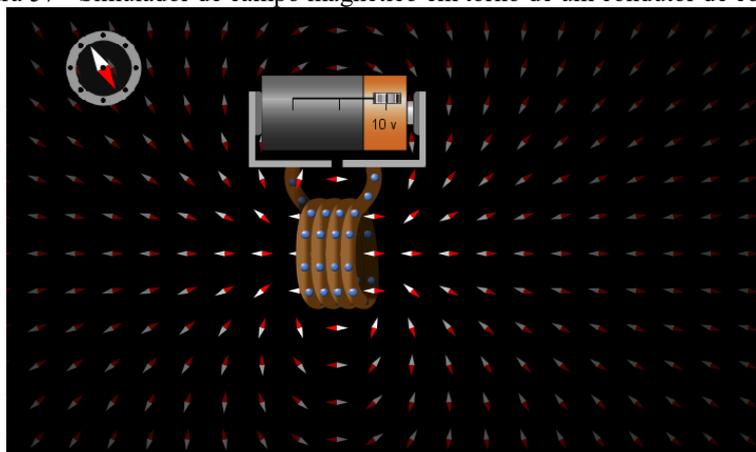


Fonte: PhET Interactive Simulations²⁶ (2011)

²⁵ Disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html.

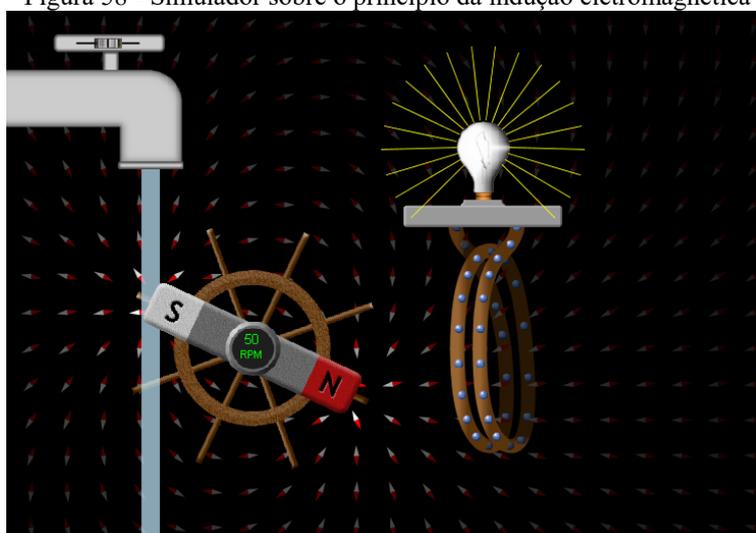
²⁶ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/faraday/latest/faraday.html?simulation=magnet-and-compass>.

Figura 57 - Simulador de campo magnético em torno de um condutor de corrente



Fonte: PhET Interactive Simulations²⁷ (2011)

Figura 58 - Simulador sobre o princípio da indução eletromagnética



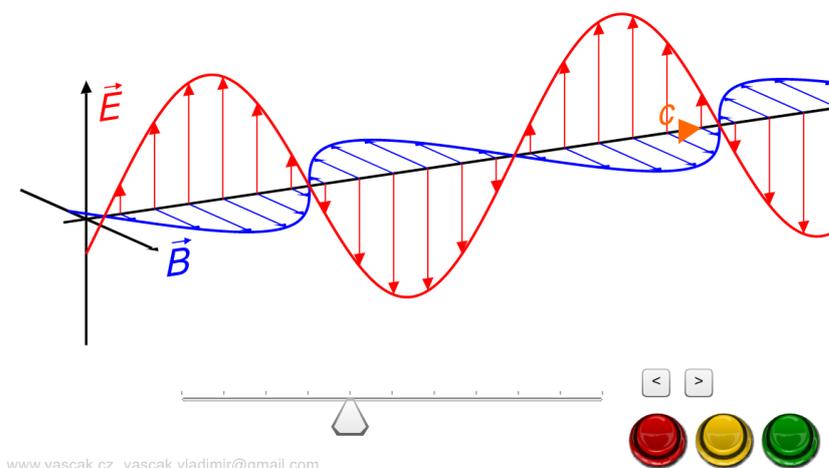
Fonte: PhET Interactive Simulations²⁸ (2011)

Após essa discussão introdutória, a onda eletromagnética pode ser apresentada como mais um efeito dos fenômenos eletromagnéticos. Analogamente à onda mecânica que se espalha sobre a superfície d'água, a onda eletromagnética também se move. A diferença a ser destacada aos alunos é que a segunda não necessita de um meio físico para se propagar, pois depende apenas das oscilações mútuas entre os campos elétrico e magnético. Uma animação gráfica auxilia na visualização dessa ideia, mostrando esses dois campos em movimento (Figura 59).

²⁷ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/faraday/latest/faraday.html?simulation=faraday>.

²⁸ Disponível em: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/generator>.

Figura 59 - Tela da animação que representa o movimento de uma onda eletromagnética

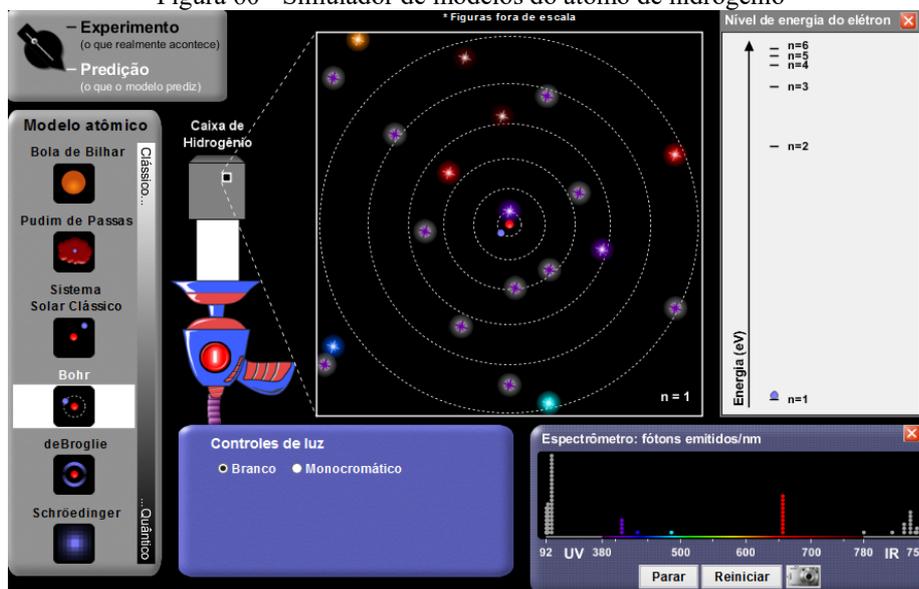


Fonte: Physics at school²⁹ (2018)

Após ofertar essa visão sobre a onda eletromagnética, a discussão pode ser encaminhada para a sua origem na matéria. Para contribuir nesse sentido, propomos a utilização do simulador que apresenta os modelos do átomo de hidrogênio (Figura 60), sendo suficiente selecionar o Modelo de Bohr. Com ele, os alunos podem entender que a absorção e a emissão dos fótons de luz dependem das transições do elétron entre as órbitas, que a ele é permitido ocupar. Na continuidade do assunto, os estudantes podem ser levados a constatar que a energia dos fótons é quantizada e que o seu valor depende da frequência de oscilação da onda eletromagnética (multiplicada pela constante de Planck).

²⁹ Disponível em: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_vlna&l=pt.

Figura 60 - Simulador de modelos do átomo de hidrogênio



Fonte: PhET Interactive Simulations³⁰ (2011)

Finalizando esse tema, deve-se apresentar o espectro eletromagnético aos alunos, destacando os seus diferentes intervalos e as suas respectivas aplicações. É importante que o aluno reconheça que a luz e a radiação térmica (faixa do infravermelho) têm a mesma natureza, diferenciando-se uma da outra, apenas pela frequência e, conseqüentemente, pela energia que cada uma carrega.

7.6.2 Planejamento da aula sobre radiação de corpo negro

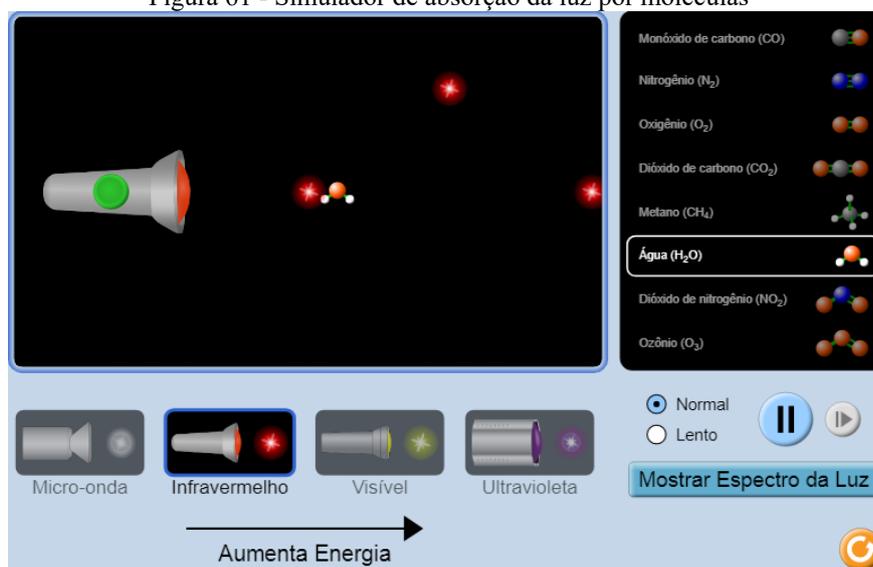
A segunda aula expositiva tratou de discutir as características da radiação de corpo negro, aproveitando os conceitos discutidos sobre ondas eletromagnéticas, na aula que deve ocorrer antes. O primeiro passo deve ser o auxílio para que o estudante reconheça que os fenômenos estudados com o experimento da cuba de ondas também ocorrem com ondas eletromagnéticas. Ou seja, é preciso que eles saibam que existem três possibilidades para a radiação que incide sobre um corpo: ser absorvida, ser refletida ou ser transmitida.

No caso da porção da radiação térmica que é absorvida, propomos a utilização do simulador ilustrado pela Figura 61. Ele oferece ao aluno uma imagem do que acontece com a

³⁰ Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/hydrogen-atom.

molécula de uma substância quando a mesma absorve um fóton, no caso do nosso interesse, de luz infravermelha. O aumento na vibração dessa molécula pode ajudar o estudante a associá-lo ao aumento da temperatura da substância, ou do corpo, ao qual ela pertença. O mesmo simulador mostra, também, que o fóton anteriormente absorvido é emitido de volta ao ambiente, após um determinado intervalo de tempo. Conseqüentemente, a vibração da molécula diminui, sugerindo uma redução na temperatura.

Figura 61 - Simulador de absorção da luz por moléculas



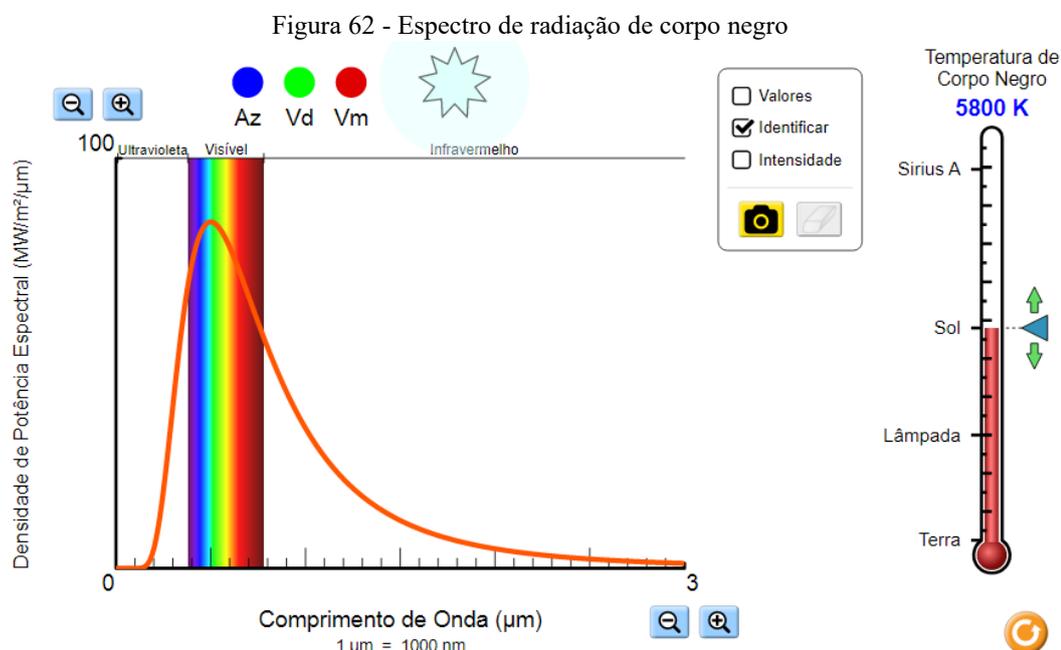
Fonte: PhET Interactive Simulations³¹ (2021)

Após o aluno ter assimilado essa relação entre temperatura e luz infravermelha, propomos que seja apresentada a Lei de Stefan-Boltzmann para explicar que a potência por área da radiação térmica que é emitida por um corpo aquecido depende apenas da sua temperatura elevada à quarta potência. Esse momento é oportuno para a apresentação do modelo do corpo negro, afinal ele foi idealizado para representar um corpo capaz de absorver e reemitir toda a radiação térmica que incide sobre ele. O coeficiente de emissão também pode ser introduzido na referida lei para efeito de comparação entre o comportamento de um corpo ideal e de um corpo real.

Por último, o espectro de radiação de corpo negro pode ser apresentado aos estudantes para a discussão sobre a Lei de deslocamento de Wien. Sugerimos, para este momento da discussão, o uso do simulador ilustrado pela Figura 62. Espera-se que os alunos compreendam

³¹ Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/molecules-and-light.

a relação entre a temperatura de um corpo e o comprimento de onda para o qual a densidade de energia da radiação emitida é máxima.



Fonte: PhET Interactive Simulations³² (2021)

7.6.3 Execução das aulas planejadas

O tema das ondas eletromagnéticas foi discutido no dia 27/10/2021, com as turmas A (14 alunos) e D (15 alunos); e, no dia 29/10/2021, com as turmas B (7 alunos) e C (3 alunos). No entanto, devido ao pequeno número de comparecimentos no dia 29 (uma sexta-feira, véspera do feriado de Finados) e ciente de que esse assunto precisaria ser retomado no encontro seguinte, o professor alongou as discussões em torno dos fenômenos eletromagnéticos, de modo que a aula seguinte fosse menos repetitiva para os alunos presentes. Dessa forma, as turmas A e D ficaram com o conteúdo mais avançado que as turmas B e C, mas era preciso voltar a sincronizá-las, antes da realização do próximo experimento. Assim, no dia 03/11/2021, as turmas A (17 alunos) e D (11 alunos) começaram as discussões sobre a radiação de corpo negro, deixando o estudo do espectro de emissão e da Lei de Wien para a próxima aula. No dia

³² Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/blackbody-spectrum.

05/11/2021, as turmas B (13 alunos) e C (12 alunos) retomaram as discussões sobre ondas eletromagnéticas. No dia 10/11/2021, as turmas A (14 alunos) e D (16 alunos) encerraram o assunto da radiação térmica de corpo negro. Finalmente, no dia 12/11/2021, as turmas B (12 alunos) e C (9 alunos) tiveram uma discussão mais condensada sobre as leis de Stefan-Boltzmann e de Wien e, em tese, alcançaram seus colegas que assistem aulas de Física na quarta-feira. Manter as turmas sincronizadas ajuda o professor na organização das suas aulas, especialmente quando se pretende realizar experimentos didáticos. Turmas com conteúdos diferentes demandam que materiais diferentes sejam levados para a sala de aula e isso, quase nunca, é fácil de praticar. Por isso, formas de administração do tempo e do conteúdo, como as relatadas acima, não são desejáveis, mas são necessárias.

Quanto às discussões realizadas, ficou a impressão de que o tempo adicional foi benéfico para as turmas A e D, pois os exemplos puderam ser resolvidos com maior tranquilidade e houve mais espaço para responder as perguntas dos alunos. Durante o uso dos simuladores, foi possível fazer uma quantidade maior de demonstrações e detalhar melhor os assuntos abordados.

Apesar do menor tempo disponível, as discussões também foram produtivas nas turmas B e C e os simuladores foram ferramentas importantes para isso. O seu uso permitiu demonstrar com clareza e rapidez as ideias que se desejava transmitir. Os estudantes também interagiram com o professor, estimulados por tais aplicativos.

Os simuladores foram apresentados pelo computador do professor, cuja imagem da tela era projetada no quadro da sala. Embora os alunos manifestassem o desejo de baixar essas aplicações em seus *smartphones*, várias delas não são suportadas por dispositivos móveis, tendo em vista que foram desenvolvidas em linguagem de programação incompatível (JAVA). Mesmo para aquelas que foram desenvolvidas em linguagem HTML5 (e que, portanto, funcionariam nos aparelhos dos estudantes), optou-se por não recomendar o *download*. Além da qualidade do sinal de internet da escola não ser boa, existia a real possibilidade da maioria deles utilizar o acesso à rede para outras finalidades.

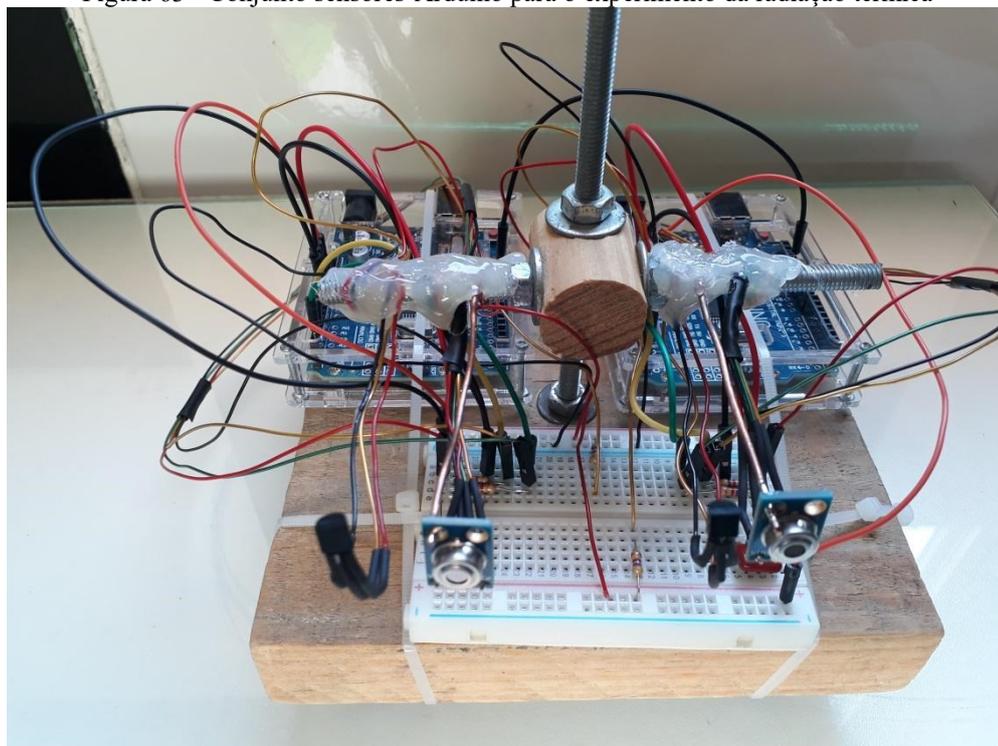
7.7 ATIVIDADE 7: EMISSÃO E ABSORÇÃO DE CALOR POR UM CORPO CLARO E POR UM CORPO ESCURO

A proposta dessa atividade experimental com o material descrito na seção 5.2.2 é promover a reconciliação integrativa entre os temas estudados em aulas anteriores. Luz visível, radiação infravermelha, distribuição espectral, reflexão, absorção, emissão, temperatura e outros conceitos devem ser relacionados durante a discussão em torno do experimento proposto. O objetivo é a consolidação desses subsunçores na estrutura cognitiva dos alunos, tanto para compreender os fenômenos em estudo, quanto para transpor esse conhecimento para a compreensão de situações cotidianas.

7.7.1 Desenvolvimento do experimento – Aspectos construtivos

A fotografia da Figura 63 ilustra a parte central do experimento proposto para o estudo de fenômenos que envolvem a radiação térmica. São dois conjuntos duplicados de sensores e placas de Arduino, cada um deles é dedicado a monitorar as variações de temperatura de objetos diferentes. Enquanto um vai medir a temperatura de uma chapa de alumínio pintada com tinta da cor preta, o outro vai medir a temperatura de uma chapa de alumínio sem revestimento e com as superfícies polidas.

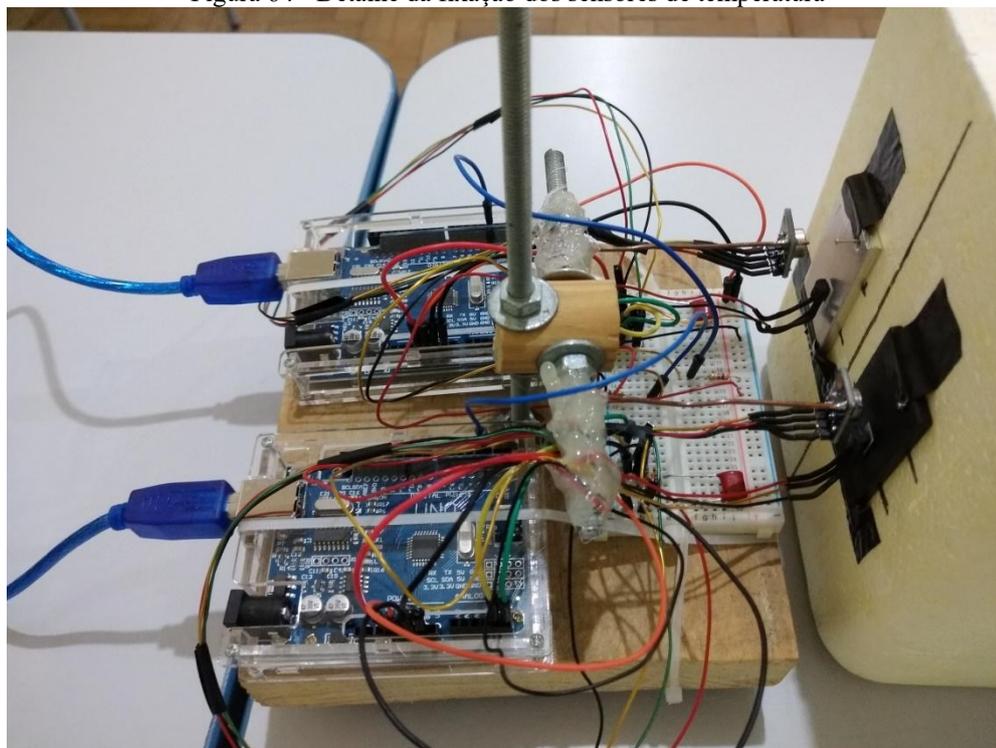
Figura 63 - Conjunto sensores-Arduino para o experimento da radiação térmica



Fonte: O Autor (2021)

Os sensores de contato (DS18B20) foram fixados às chapas de alumínio com o auxílio de uma fita térmica, que é adesiva nas duas faces. Os sensores infravermelhos (MLX90614) estão apoiados por uma haste feita com fio rígido de cobre e se encontram a cerca de um centímetro de distância das referidas chapas. Cada chapa foi fixada na direção de uma abertura feita na parede da caixa de isopor. Ver fotografia da Figura 64.

Figura 64 - Detalhe da fixação dos sensores de temperatura

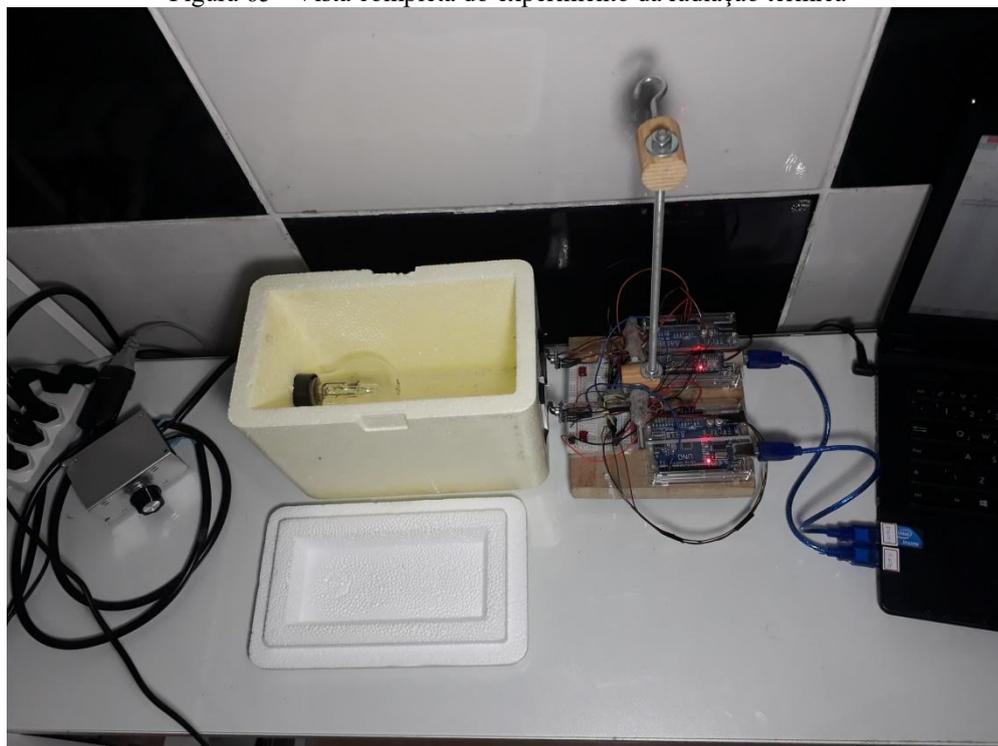


Fonte: O Autor (2021)

Dentro da caixa de isopor, uma lâmpada incandescente de 100 W (watts) emite a luz visível e a radiação infravermelha que irão atingir as chapas de alumínio. Considerando que as paredes da caixa podem sofrer deformação com o calor recebido da lâmpada, optou-se por reduzir a potência emitida com o auxílio de um controlador *dimmer*³³. Ver fotografia da Figura 65.

³³ Pelo controle do ângulo de disparo de um componente eletrônico chamado Retificador Controlado de Silício (em inglês, a sigla é SCR), é possível variar a tensão eficaz que é disponibilizada para a carga (a lâmpada, no caso). A senóide completa que pode representar a tensão de entrada do circuito é entregue recortada na saída, com uma área útil que depende do momento em que o referido componente recebeu o sinal para interromper a condução da corrente. Este sinal, por sua vez, é gerado por sucessivas cargas e descargas de um capacitor, ligado a um potenciômetro que é acionado pelo usuário.

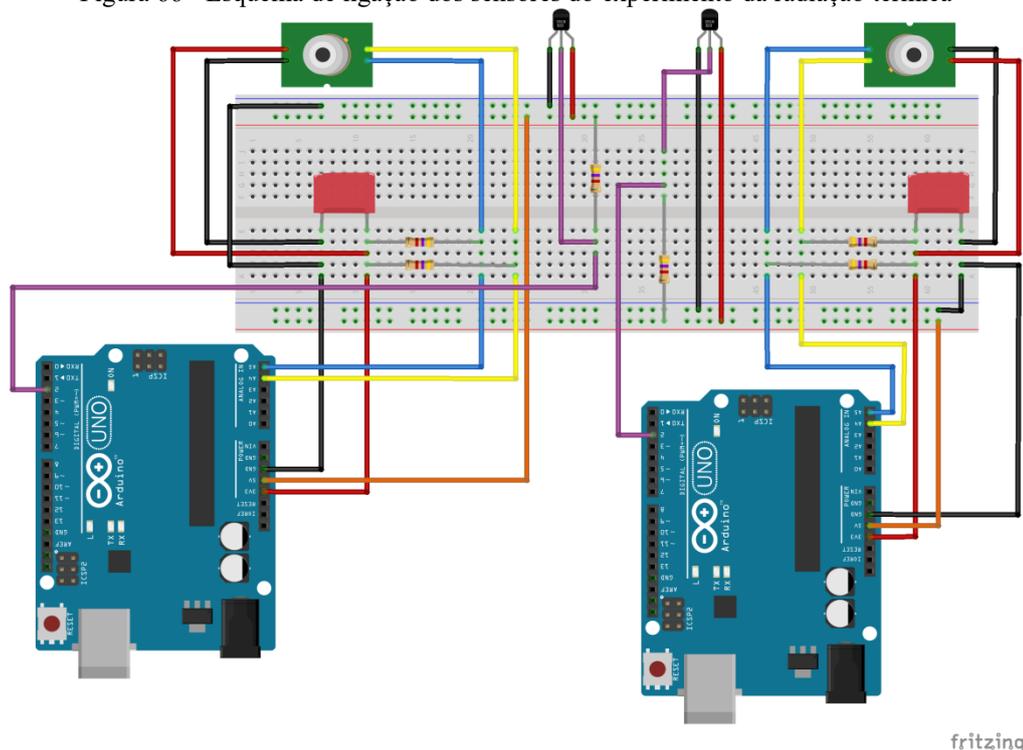
Figura 65 - Vista completa do experimento da radiação térmica



Fonte: O Autor (2021)

O circuito da lâmpada e do controlador *dimmer* está representado na Figura 12 deste trabalho. Faltava representar o esquema de ligação dos sensores às placas de Arduino que, agora, é mostrado na Figura 66.

Figura 66 - Esquema de ligação dos sensores do experimento da radiação térmica



Fonte: O Autor com auxílio do Programa Fritzing (2021)

As temperaturas serão medidas pelos sensores e os dados serão coletados, processados e transferidos das placas de Arduino para uma planilha de computador, por meio dos *Sketches* 6 e 7. O primeiro é para a leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto preto e o segundo para o objeto polido. Eles se diferenciam por apenas uma instrução: *Serial.print("ROW,SET,10000")*, presente no *sketch* 7. Ela armazena os dados do objeto polido a partir da linha 10000 da planilha eletrônica, deixando todas as anteriores disponíveis para o armazenamento dos dados coletados do objeto pintado de preto. A principal novidade que esses programas apresentam em relação aos anteriores é o uso das instruções *mlx.readObjectTempC()* e *mlx.readAmbientTempC()* para a leitura das temperaturas do objeto e do ambiente, respectivamente, pelo sensor MLX90614. Tais instruções fazem parte da biblioteca *Adafruit_MLX90614.h*, que precisa ser instalada com antecedência à programação.

Sketch 6 - Programação para leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto pintado de preto

```
#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

```

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor_DS18B20;

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  sensors.getAddress(sensor_DS18B20, 0);
  while (!Serial);

  Serial.println("Comparando MLX90614 e DS18B20");

  if (!mlx.begin()) {
    Serial.println("Error connecting to MLX sensor. Check wiring.");
    while (1);
  };

  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,
Hora,MLX90614_Ambiente,MLX90614_Objeto,DS18B20_Objeto");
  delay(1000);
}

void loop(void) {

  sensors.requestTemperatures();
  float tempC1 = sensors.getTempC(sensor_DS18B20);

  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(mlx.readAmbientTempC());
  Serial.print(",");
  Serial.print(mlx.readObjectTempC());
  Serial.print(",");
  Serial.println(tempC1);
  delay(3000);
}

```

Fonte: O Autor (2021)

Sketch 7 - Programação para leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto polido

```

#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2

```

```
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor_DS18B20;

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  sensors.getAddress(sensor_DS18B20, 0);
  while (!Serial);

  Serial.println("Comparando MLX90614 e DS18B20");

  if (!mlx.begin()) {
    Serial.println("Error connecting to MLX sensor. Check wiring.");
    while (1);
  };

  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.print("ROW,SET,10000");
  Serial.println("LABEL,
Hora,MLX90614_Ambiente,MLX90614_Objeto,DS18B20_Objeto");
  delay(1000);
}

void loop() {

  sensors.requestTemperatures();
  float tempC2 = sensors.getTempC(sensor_DS18B20);

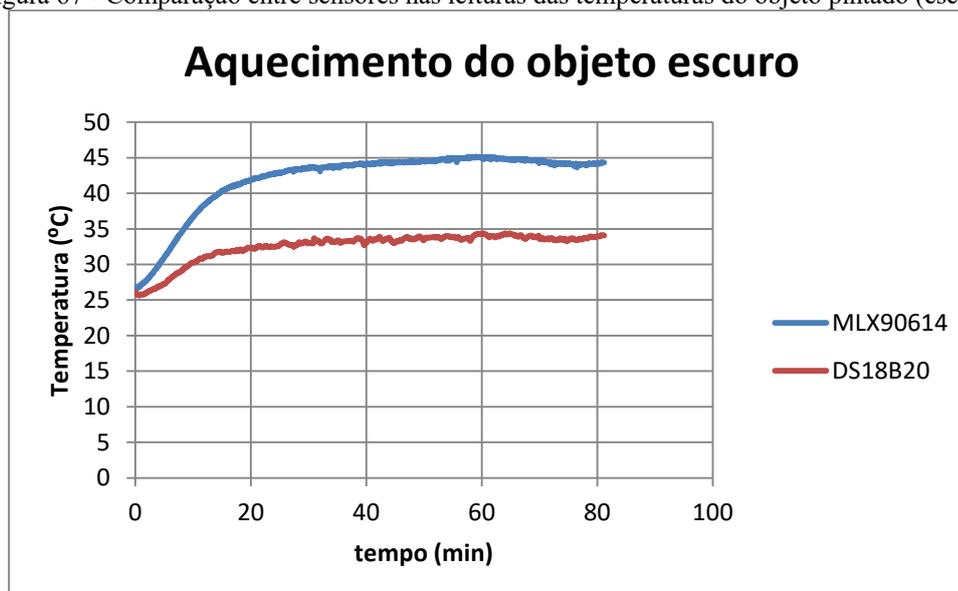
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(mlx.readAmbientTempC());
  Serial.print(",");
  Serial.print(mlx.readObjectTempC());
  Serial.print(",");
  Serial.println(tempC2);

  delay(3000);
}
```

7.7.2 Desenvolvimento do experimento – Análise dos dados obtidos

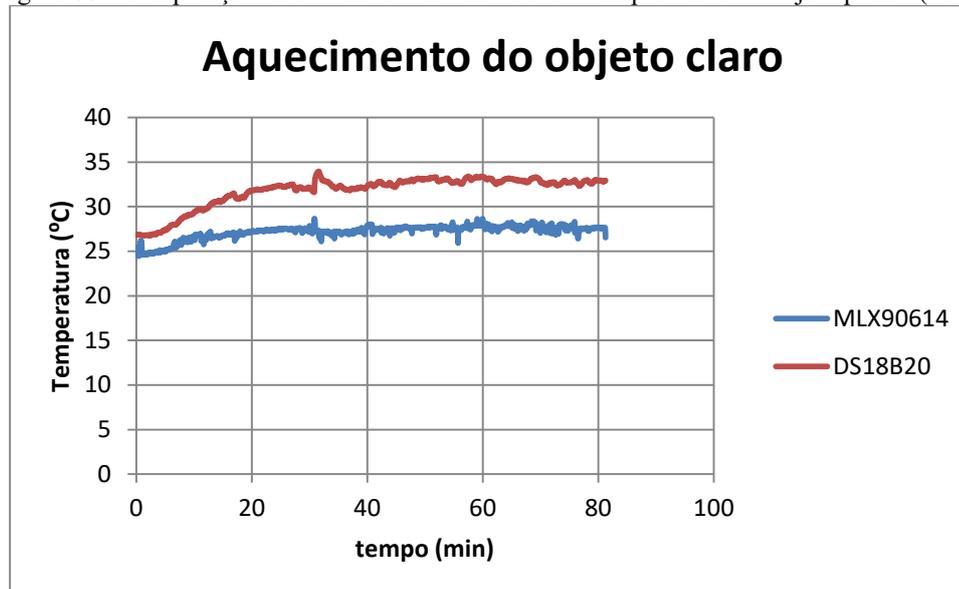
Os registros obtidos neste experimento permitem analisar as variações da temperatura em função do tempo, durante o aquecimento sofrido pelo objeto claro e pelo objeto escuro. Essa análise qualitativa nos permite fazer inferências sobre as trocas de calor envolvidas entre os diferentes componentes do aparato experimental. Dessa forma, considere que a lâmpada incandescente tenha permanecido acesa por cerca de 80 minutos, com brilho reduzido. A curva de aquecimento do objeto pintado de preto (escuro), traçada com valores medidos pelo sensor infravermelho (MLX90614) e pelo sensor de contato (DS18B20), é vista no gráfico da Figura 67. O objeto polido (claro) tem a sua curva de aquecimento mostrada na Figura 68.

Figura 67 - Comparação entre sensores nas leituras das temperaturas do objeto pintado (escuro)



Fonte: O Autor (2021)

Figura 68 - Comparação entre sensores nas leituras das temperaturas do objeto polido (claro)



Fonte: O Autor (2021)

A primeira observação é que os dois sensores divergem consideravelmente entre si, na leitura das temperaturas que eles fazem de cada objeto. Tanto para a chapa pintada, quanto para a chapa polida, as curvas traçadas estão nitidamente afastadas. T tamanha diferença só pode indicar que um dos dois sensores não está realizando a leitura esperada.

A segunda observação é que os objetos claro e escuro parecem fazer com que tipos diferentes de sensores realizem as maiores leituras de temperatura. Na Figura 67, o sensor infravermelho aponta valores maiores para a temperatura do objeto escuro, em comparação ao sensor de contato. Na Figura 68, ocorre o inverso. Ou seja, o sensor de contato coleta temperaturas maiores do objeto claro, quando comparado ao sensor infravermelho.

Devido a tais inconsistências, primeiramente, pensou-se que o sensor infravermelho precisasse ter o valor da emissividade reconfigurado em sua memória. Utilizando a Equação 52, calculamos o valor da emissividade de cada objeto, aplicando os valores indicados pelos sensores no instante em que o tempo decorrido de aquecimento era de 70 minutos e as temperaturas estavam estabilizadas.

Tabela 5 - Temperatura dos objetos claro e escuro no instante $t = 70\text{min}$

Objeto escuro			Objeto claro		
Temperatura ambiente medida pelo sensor infravermelho (°C)	Temperatura do objeto medida pelo sensor infravermelho (°C)	Temperatura do objeto medida pelo sensor de contato (°C)	Temperatura ambiente medida pelo sensor infravermelho (°C)	Temperatura do objeto medida pelo sensor infravermelho (°C)	Temperatura do objeto medida pelo sensor de contato (°C)
28,77	44,45	33,63	27,05	27,69	32,69

Fonte: O Autor (2021)

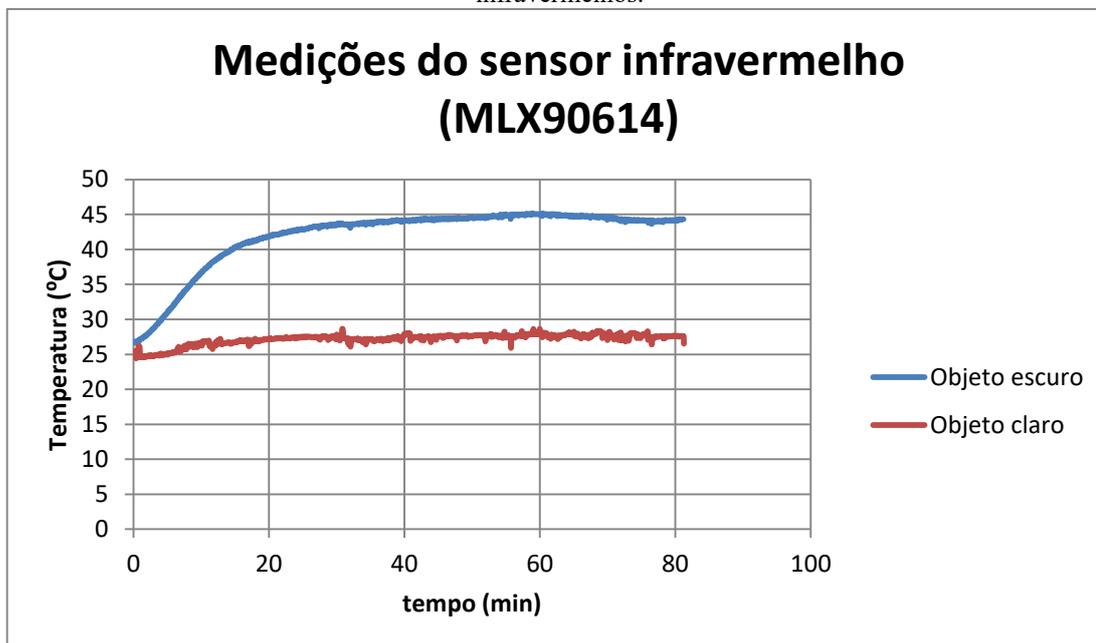
$$\epsilon_{escuro} = \frac{(44,45 + 273,15)^4 - (28,77 + 273,15)^4}{(33,63 + 273,15)^4 - (28,77 + 273,15)^4} \cong \frac{1,865 \times 10^9}{0,5481 \times 10^9} \cong 3,4$$

$$\epsilon_{claro} = \frac{(27,69 + 273,15)^4 - (27,05 + 273,15)^4}{(32,69 + 273,15)^4 - (27,05 + 273,15)^4} \cong \frac{6,948 \times 10^7}{62,77 \times 10^7} \cong 0,11$$

O objeto claro não causa surpresa, pois se o seu índice de reflexão é próximo de 1, a sua absorvidade e, conseqüentemente, a sua emissividade devem ser próximas de zero. Neste caso, o valor foi de 0,11. O problema está no objeto escuro. A sua emissividade ficou maior que a unidade. Seu valor foi de 3,4 e é totalmente inconsistente, pois significaria que a chapa pintada emite no ambiente uma radiação térmica que é mais de três vezes o valor da radiação que ela recebeu da lâmpada. Isso corrobora a hipótese de que um dos dois sensores não está apresentando a leitura esperada.

Agora, vamos agrupar as curvas de aquecimento dos objetos, conforme a leitura de cada tipo de sensor. Na Figura 69, temos as evoluções das temperaturas dos objetos claro e escuro, segundo as medições realizadas pelos respectivos sensores infravermelhos. Na Figura 70, a mesma comparação é realizada entre os dois objetos, porém com dados obtidos pelos sensores de contato.

Figura 69 - Comparação das curvas de aquecimento dos objetos, com dados obtidos pelos sensores infravermelhos.

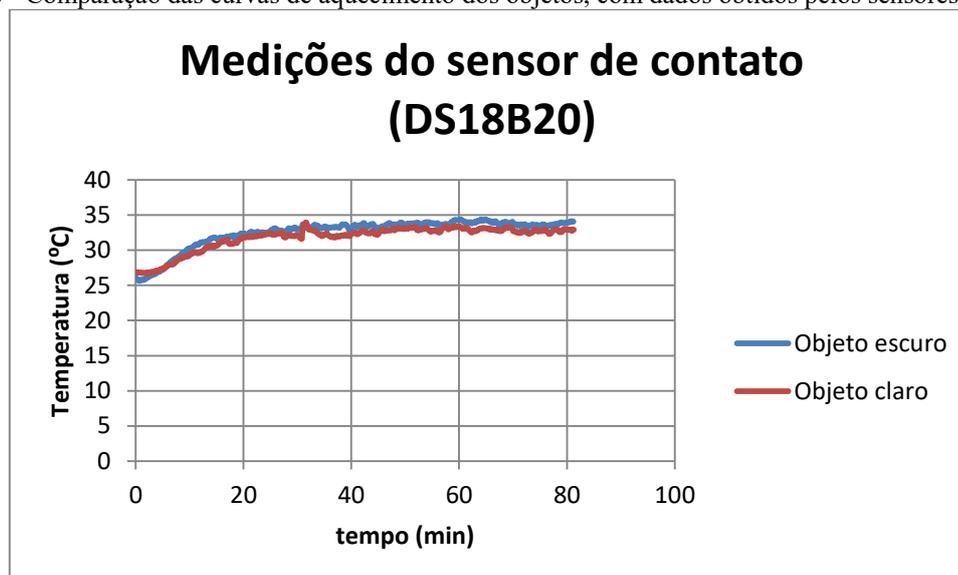


Fonte: O Autor (2021)

Os dados do sensor infravermelho (figura 69) que aponta para o objeto claro mostram que ele sofre pequena variação na sua temperatura, o que é esperado de um corpo com emissividade próxima de zero. No que diz respeito ao objeto escuro, os dados do sensor infravermelho que aponta para ele mostram que a sua temperatura atinge valores maiores e de forma mais rápida. Isso também é previsto para um corpo, cuja emissividade esperada deve estar próxima de um.

Começamos a ter uma ideia do que está ocasionando as inconsistências relatadas, quando observamos as curvas de aquecimento de cada objeto, traçadas com os dados obtidos pelos sensores de contato. O gráfico da Figura 70 mostra que as curvas de aquecimento dos objetos claro e escuro praticamente se sobrepõem uma à outra. Que os sensores infravermelhos divergiam dos sensores de contato, já havia sido constatado. A novidade está no fato de que dois sensores de contato diferentes fazem praticamente a mesma leitura das temperaturas de objetos com cores (e, conseqüentemente, emissividades) diferentes.

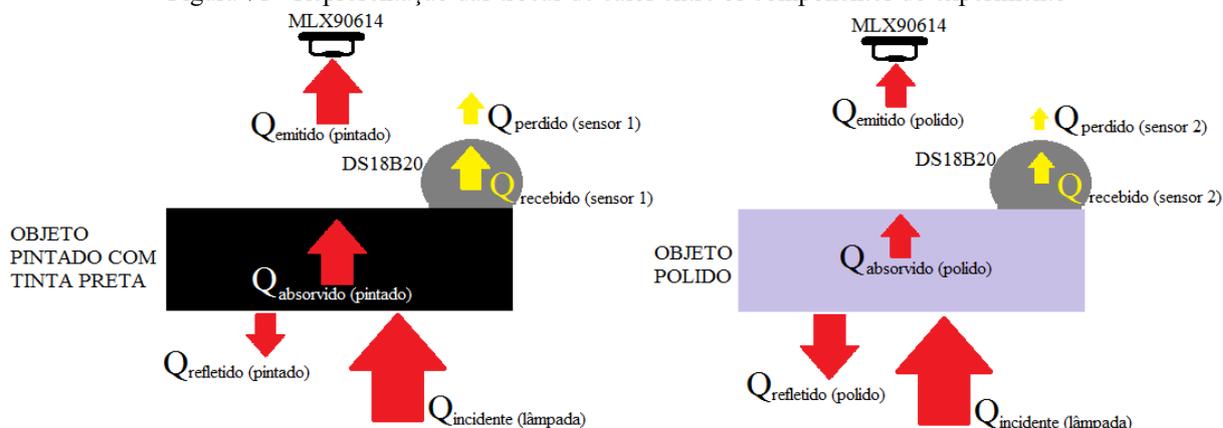
Figura 70 - Comparação das curvas de aquecimento dos objetos, com dados obtidos pelos sensores de contato.



Fonte: O Autor (2021)

A explicação mais plausível deve estar no fato de que, a princípio, ignoramos as trocas de calor que os sensores de contato realizam com o ar ambiente. A Figura 71 ilustra de forma representativa as trocas de calor que ocorrem entre os diferentes componentes deste experimento. Começando pelo objeto pintado com tinta preta, representamos o calor transferido pela lâmpada $Q_{incidente (lâmpada)}$ sendo, em maior parte, absorvido $Q_{absorvido (pintado)}$; e, em menor parte, refletido $Q_{refletido (pintado)}$. No objeto polido, a maior parte de $Q_{incidente (lâmpada)}$ é refletida $Q_{refletido (polido)}$; e a menor parte é absorvida $Q_{absorvido (polido)}$. A maior absorção de radiação térmica por parte do objeto pintado faz com que a radiação emitida por ele $Q_{emitido (pintado)}$ também seja maior que a radiação emitida pelo objeto polido $Q_{emitido (polido)}$. A diferença entre as intensidades dessas radiações emitidas foi apontada pelos sensores infravermelhos no gráfico da Figura 69.

Figura 71 - Representação das trocas de calor entre os componentes do experimento



Fonte: O Autor (2021)

Uma parte do calor absorvido pelo objeto pintado de preto é transferido ao sensor de contato $Q_{recebido (sensor 1)}$. Essa transferência faz a temperatura desse sensor aumentar, mas não em quantidade suficiente para que as suas medições se aproximem dos valores apontados pelo sensor infravermelho. Lembremos que a curva da temperatura do sensor de contato fica sempre abaixo da curva traçada pelo sensor infravermelho, no caso do objeto escuro (gráfico da Figura 67). Provavelmente, o motivo é que o sensor de contato não troca calor somente com a chapa de alumínio pintada. Ele também troca calor com o ar ambiente, perdendo-o por convecção e por emissão de radiação térmica $Q_{perdido (sensor 1)}$. Este sensor faz contato com o objeto apenas pela sua face frontal. Todo o restante do encapsulamento do componente está em contato com o ar ambiente. Por isso, embora receba calor do corpo escuro, este sensor perde uma parcela para o ambiente. Isso provoca uma leitura defasada da temperatura do objeto pintado.

Quanto ao calor recebido pelo sensor de contato fixado ao objeto polido $Q_{recebido (sensor 2)}$, também é esperado que parte dele se perca no ambiente $Q_{perdido (sensor 2)}$. Mas, neste caso, conforme o gráfico da Figura 68, as temperaturas indicadas por esse tipo de sensor ficam maiores que as leituras do sensor infravermelho. Isso se deve, provavelmente, a dois fatores: 1) a alta reflexividade (ou baixa emissividade) do objeto polido dificulta a subida da sua temperatura, já que ele absorve menos radiação térmica; e 2) o ponto onde o sensor de contato é fixado ao objeto polido está obstruído para a saída da radiação térmica, o que deve provocar o surgimento de uma pequena “ilha” de calor. O calor perdido pelo sensor de contato $Q_{perdido (sensor 2)}$, nesta situação, parece não ser grande o suficiente para fazer com que a sua

leitura fique abaixo do seu sensor infravermelho correspondente. Afinal, o calor recebido por ele $Q_{recebido} (sensor 2)$ também tem que ser menor. E, por último, existindo uma diferença menor entre a temperatura do sensor e a do ambiente, as trocas de calor por convecção e por radiação entre eles serão menos eficientes.

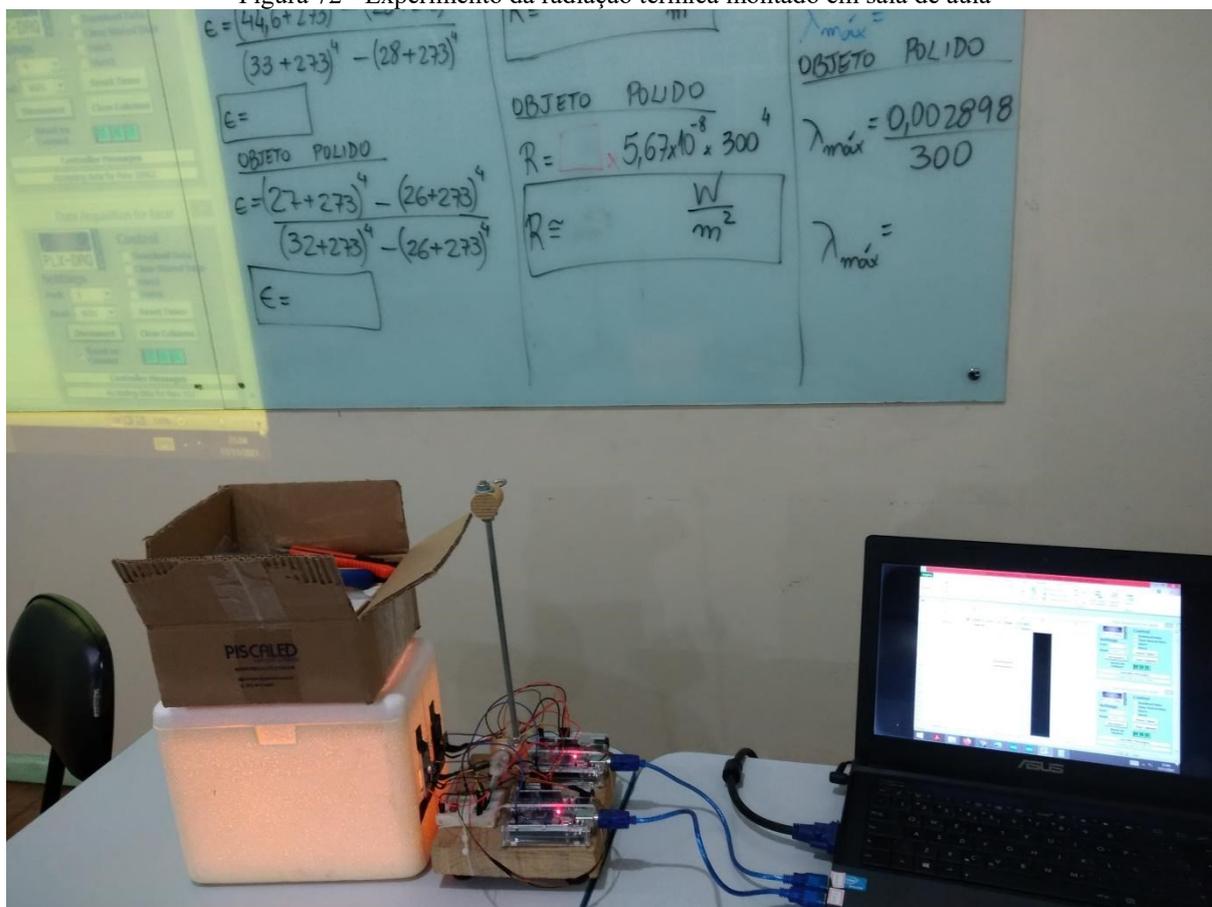
As aparentes inconsistências ficam esclarecidas quando consideramos as perdas de calor sofridas pelos sensores de contato. Numa nova versão desse experimento, é preciso encontrar uma maneira de isolar termicamente esses sensores do ambiente. Fazendo isso, é esperado que as temperaturas lidas por esse tipo de sensor sempre fiquem mais elevadas que as leituras dos sensores infravermelhos, inclusive para o objeto escuro. Conseqüentemente, a emissividade calculada para ele não ultrapassará a unidade.

7.7.3 Aplicação em sala de aula

O experimento da radiação térmica foi realizado no dia 17/11/2021 com as turmas A (10 alunos) e D (15 alunos). As turmas B e C participaram da mesma atividade no dia 19/11/2021, com 11 alunos presentes em cada uma delas.

A exemplo do que ocorreu nas atividades anteriores que envolveram demonstrações experimentais, nesta também foi necessário que o professor comparecesse à escola em horário que antecedia o início das aulas, a fim de deixar tudo pronto. Considerando que é inviável transportar todo o material para a troca de turmas, o experimento fica montado numa mesma sala para todas as aulas e são os alunos que precisam se deslocar até ela. A fotografia da Figura 72 mostra o equipamento preparado para a realização das discussões.

Figura 72 - Experimento da radiação térmica montado em sala de aula



Fonte: O Autor (2021)

Na fotografia da Figura 73, temos o registro fotográfico de uma das turmas, com a participação dos alunos neste experimento. Esta é uma das turmas que possui as aulas intercaladas pelo intervalo e essa fotografia foi tirada momentos antes do reinício das atividades. Dessa forma, a sala ainda não se encontrava com a totalidade dos alunos pertencentes a essa turma.

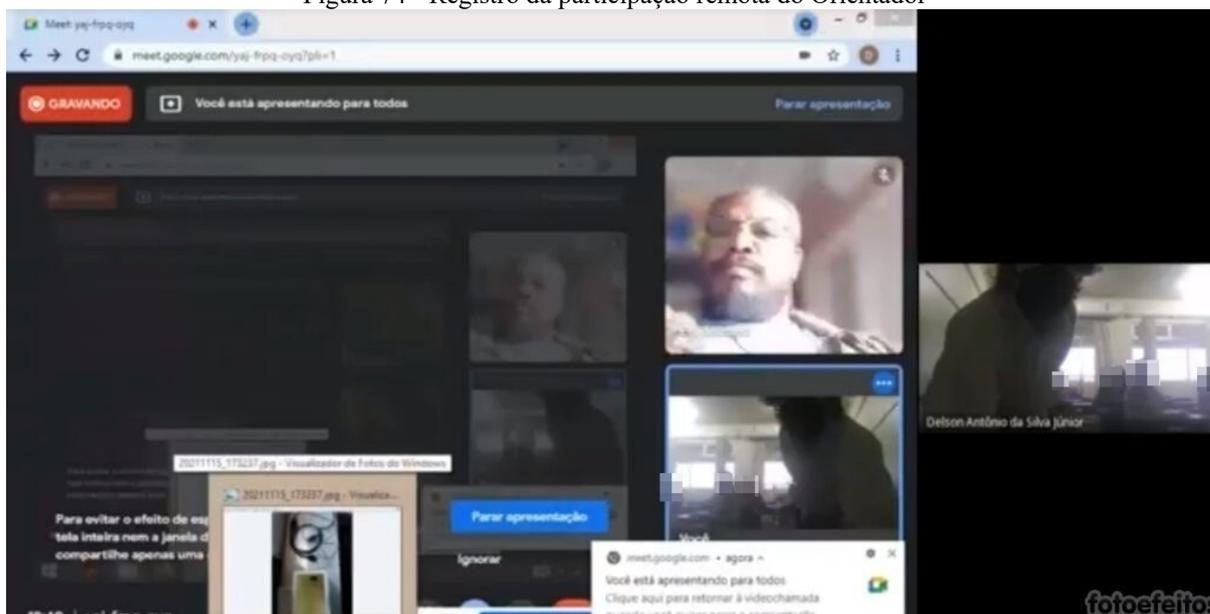
Figura 73 - Participação dos alunos no experimento da radiação térmica



Fonte: O Autor (2021)

No dia 19/11/2021, as aulas com uma das turmas contou com a presença de forma remota do Professor Dr. Evy Augusto Salcedo Torres, orientador deste trabalho (fotografia da Figura 74).

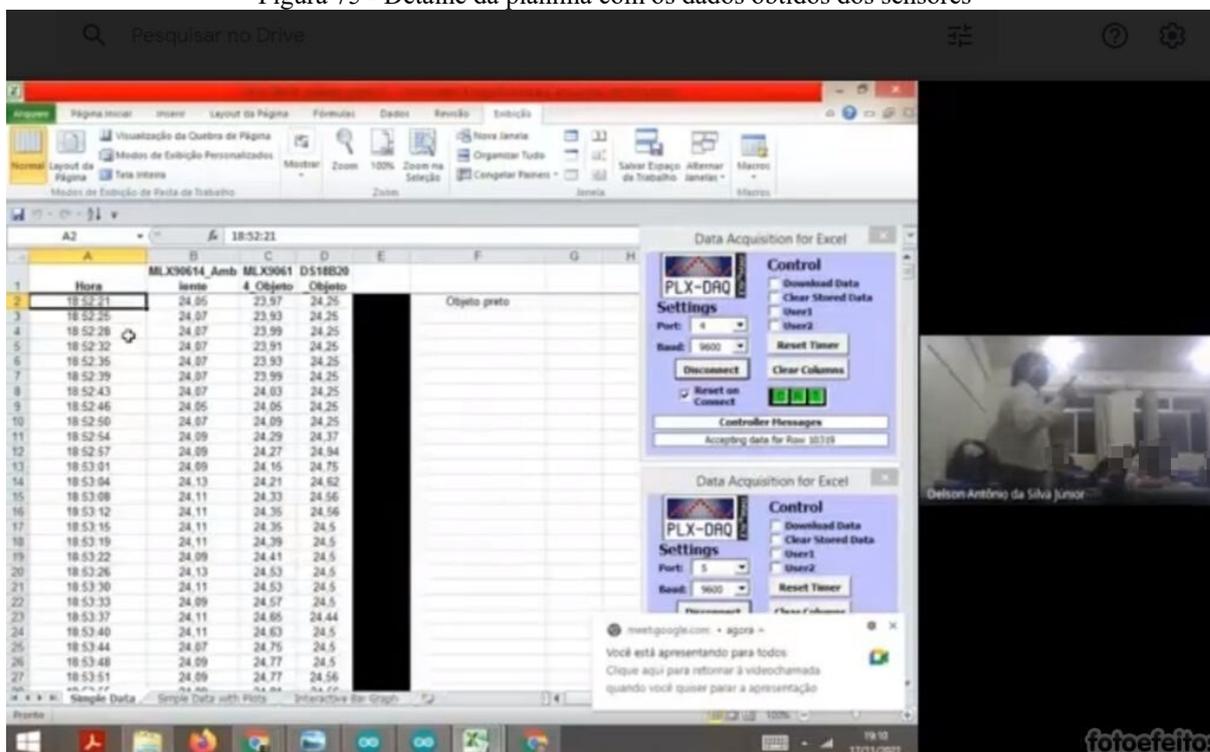
Figura 74 - Registro da participação remota do Orientador



Fonte: O Autor (2021)

A atividade teve início com uma breve explicação do professor sobre o funcionamento do experimento e no que ele se propõe a auxiliar nas discussões. Em seguida, o aparato é posto em funcionamento e os dados coletados são projetados no quadro (fotografia da Figura 75).

Figura 75 - Detalhe da planilha com os dados obtidos dos sensores



Fonte: O Autor (2021)

Enquanto os objetos são aquecidos pela lâmpada no interior da caixa de isopor, o professor fez os alunos pensarem sobre quais grandezas físicas estavam envolvidas na conversão da radiação térmica recebida pelo sensor infravermelho em dados sobre a temperatura. Logo após, foi possível observar a primeira diferença nas temperaturas dos objetos claro e escuro. Os estudantes perceberam facilmente que o objeto escuro aquecia mais rapidamente. Quando perguntados se eles conseguiriam sugerir uma explicação para isso, nas quatro turmas, sempre surgiu alguém que conseguisse relacionar o fato observado com a teoria discutida nas aulas anteriores. Nesses casos, corretamente, eles reconheceram a alta emissividade (baixa refletividade) da chapa pintada de preto e a baixa emissividade (alta refletividade) da chapa polida como fatores responsáveis pelas diferenças de temperatura apresentadas por esses objetos. Essa é uma evidência de aprendizagem significativa, pois foi preciso mobilizar o que se estudou antes, com o auxílio de simuladores, e transpor para outra situação, dada pelo experimento.

As discussões se estenderam para situações cotidianas como, por exemplo, se roupas de cores mais escuras secariam em menor tempo que roupas de cores mais claras, quando estão submetidas à radiação solar. Ou ainda, se faz sentido um clube de futebol utilizar de previsões regimentais para obrigar o seu adversário a jogar com o seu segundo uniforme, quando este for escuro e a partida for disputada num dia ensolarado.

Após a estabilização das temperaturas dos objetos claro e escuro, o professor conduziu a discussão para o cálculo de algumas grandezas que envolviam o conteúdo estudado anteriormente. Primeiro, foram calculadas as emissividades de cada chapa e o que cada um daqueles valores significava. Depois, a Lei de Stefan-Boltzmann foi aplicada para estimar quanta potência por área cada uma das chapas dissipava. Por último, a Lei de Wien foi utilizada para determinar o comprimento de onda emitido com maior intensidade pelos mesmos objetos e os alunos foram convidados a localizar estes valores numa figura que representava o espectro eletromagnético. Também neste caso, cada turma apresentou pelo menos um aluno voluntário que respondeu corretamente, identificando a faixa do infravermelho como a região do espectro ao qual pertence a radiação emitida pelos corpos em estudo.

7.8 ATIVIDADE 8: CONVECÇÃO

Nesta última atividade proposta é apresentado o desenvolvimento e a aplicação do experimento sobre a convecção, cujos princípios foram apresentados na seção 5.3.3. Dentre os conhecimentos prévios que se espera que os alunos possuam, estão os conceitos de densidade, volume, força de empuxo, força gravitacional, calor e temperatura. O propósito é utilizar o aparato experimental para promover a recombinação de tais conceitos e auxiliar na compreensão desse fenômeno térmico.

7.8.1 Desenvolvimento do experimento – Aspectos construtivos

A proposta deste experimento é simplesmente aquecer a chapa de um ferro de passar roupa e resfriá-la por convecção forçada, com o auxílio de um pequeno ventilador. O primeiro passo dado foi na instalação de um sensor termopar no interior do ferro, conforme a fotografia da Figura 76.

Figura 76 - Detalhe da instalação do sensor termopar no interior do ferro de passar



Fonte: O Autor (2021)

O experimento é composto por um ferro de passar com sensor termopar instalado, um ventilador, um multímetro (na função de amperímetro), uma placa de arduino e um módulo *display* que são montados numa base, conforme pode ser visto nas fotografias da Figura 77.

Figura 77 - Montagem do experimento numa base

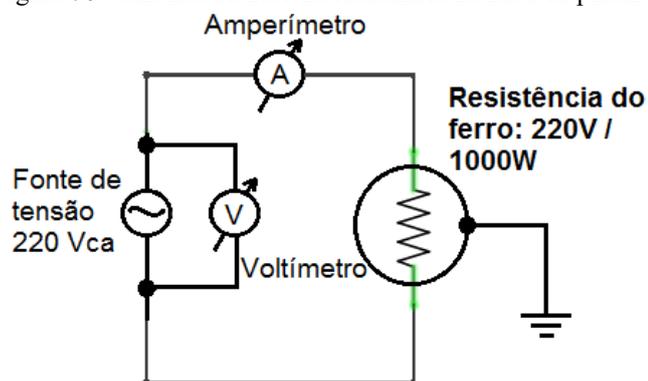


Fonte: O Autor (2021)

O circuito do ferro de passar é composto por uma fonte de tensão de 220 V_{ca} , um amperímetro, um voltímetro e pela resistência do próprio do próprio eletrodoméstico (Figura 78). Se houver a disponibilidade de um multímetro, primeiramente ele pode ser utilizado para medir a tensão de alimentação da rede elétrica e, depois, na execução do experimento,

desempenhar o papel de amperímetro. Tal medida dispensaria a necessidade de dois instrumentos de medição elétrica.

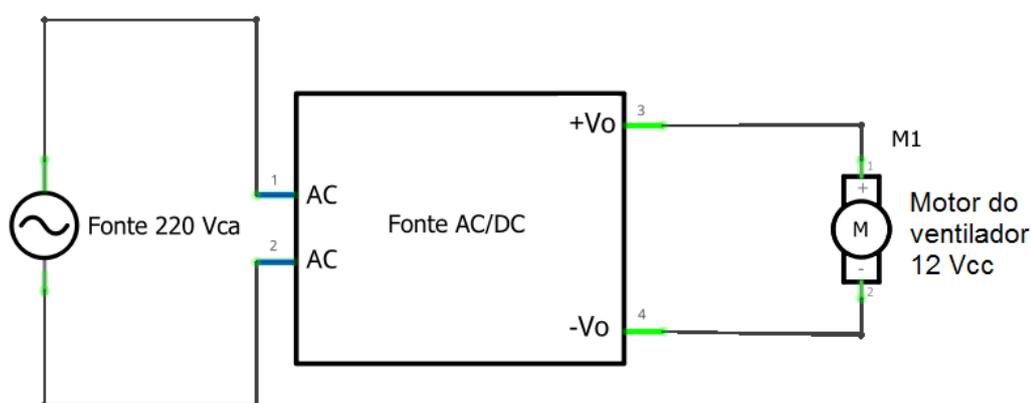
Figura 78 - Circuito elétrico da resistência do ferro de passar



Fonte: O Autor (2021)

O ventilador deve receber a alimentação de uma fonte de 12 V_{cc} que, por sua vez, é alimentada pela rede elétrica disponível no local (220 V_{ca}). Ver Figura 79.

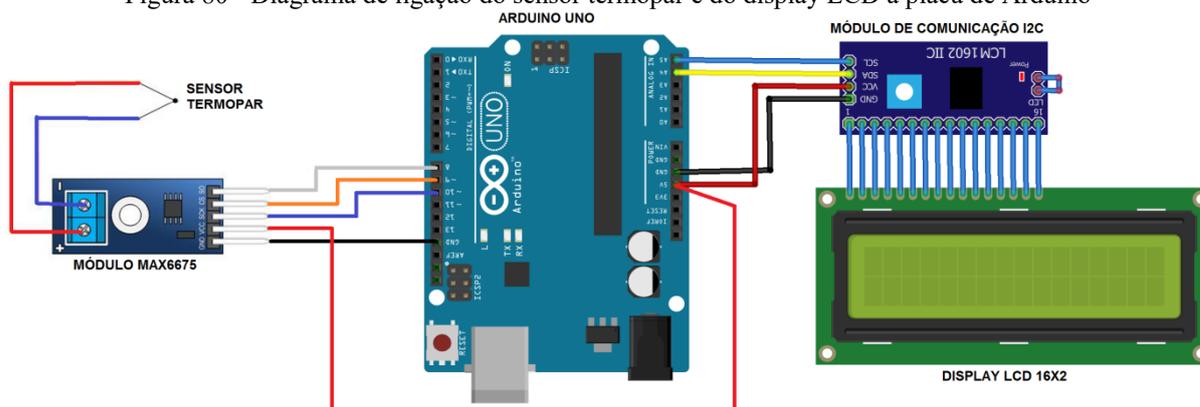
Figura 79 - Circuito do ventilador



Fonte: O Autor (2021)

A placa de Arduino recebe dados do sensor termopar por intermédio de um módulo auxiliar (MAX6675) que, por sua vez, demanda a instalação da biblioteca *max6675.h* na interface de programação. O *display* de cristal líquido também utiliza um módulo para a comunicação com o Arduino, e exige que a biblioteca *LiquidCrystal_I2C.h* também esteja instalada. O diagrama da Figura 80 mostra a ligação entre esses elementos.

Figura 80 - Diagrama de ligação do sensor termopar e do display LCD à placa de Arduino



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

O funcionamento dos dispositivos eletrônicos necessita que o *sketch* 8, apresentado abaixo, esteja armazenado na memória do Arduino.

Sketch 8 - Programa para apresentar dados do sensor termopar em um display LCD

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <max6675.h>

#define endereco 0x3F // Endereços comuns: 0x27, 0x3F
#define colunas 16
#define linhas 2

int ktcSO = 8;
int ktcCS = 9;
int ktcCLK = 10;

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
LiquidCrystal_I2C lcd(endereco, colunas, linhas);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Hora, Temperatura");
  delay(1000);
}

void loop(){
```

```

lcd.clear();
lcd.print("Temperatura: ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(ktc.readCelsius());
lcd.print("*C");
Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.println(ktc.readCelsius());
delay(5000);
}

```

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2018) e (ARDUINO E CIA, 2016)

7.8.2 Desenvolvimento do experimento – Análise dos dados obtidos

Seguindo os procedimentos descritos na seção 5.3.3, antes de aquecer a resistência do ferro de passar, foi registrada uma temperatura de 24,5 °C (T_i) e a tensão da rede elétrica era de 210 V_{ca} . Ao ligar o circuito do ferro de passar, o amperímetro indicou uma corrente de 4,36 A. Dessa forma, pela Equação 68 ($P = U \times I$), calculamos que a potência dissipada pela resistência era de 915,6 W.

Após cerca de dez minutos, a temperatura indicada pelo sensor termopar se estabilizou em 54°C ($T_{m\acute{a}x}$). Conforme a Equação 69 ($\Delta T_{aquec} = T_{m\acute{a}x} - T_i$), durante esse aquecimento, a temperatura do ferro variou 29,5°C (ΔT_{aquec}).

Na sequência o circuito do ventilador foi acionado e a convecção forçada começou a reduzir a temperatura do ferro de passar. No entanto, como o circuito da resistência permaneceu ligado, a temperatura indicada pelo sensor não voltou ao seu valor inicial. Nessas condições, a temperatura da superfície do ferro se estabilizou em torno de 47°C (T_{superf}). Assim, a variação da temperatura durante esse resfriamento por convecção forçada foi de 7°C (ΔT_{resf}), conforme a Equação 70 ($\Delta T_{resf} = T_{m\acute{a}x} - T_{superf}$).

Assumindo a hipótese dada pela Equação 71 ($P_{convec} = \frac{\Delta T_{resf}}{\Delta T_{aquec}} \cdot P$), estimamos que a potência retirada da chapa por convecção seja de:

$$P_{convec} = \frac{7^{\circ}\text{C}}{29,5^{\circ}\text{C}} \cdot 915,6\text{W} \cong 217,3\text{W}$$

A área de superfície da chapa do ferro foi obtida por meio do seguinte procedimento:

- 1) Traçamos uma das bordas da chapa numa folha de papel milimetrado, onde havia um sistema de eixos para referência;
- 2) A partir da curva traçada, anotamos as coordenadas de cerca de

quinze pontos e construímos uma tabela; 3) Transferimos os dados da tabela para uma planilha do Microsoft Excel e obtivemos a equação polinomial que melhor se ajustou à curva dada pelos pontos. 4) Integramos a função para achar a área debaixo da curva e multiplicamos o seu resultado por 2, tendo em vista que a outra metade da chapa tem o mesmo tamanho. A área total obtida para a chapa do ferro foi de aproximadamente $0,022 m^2$.

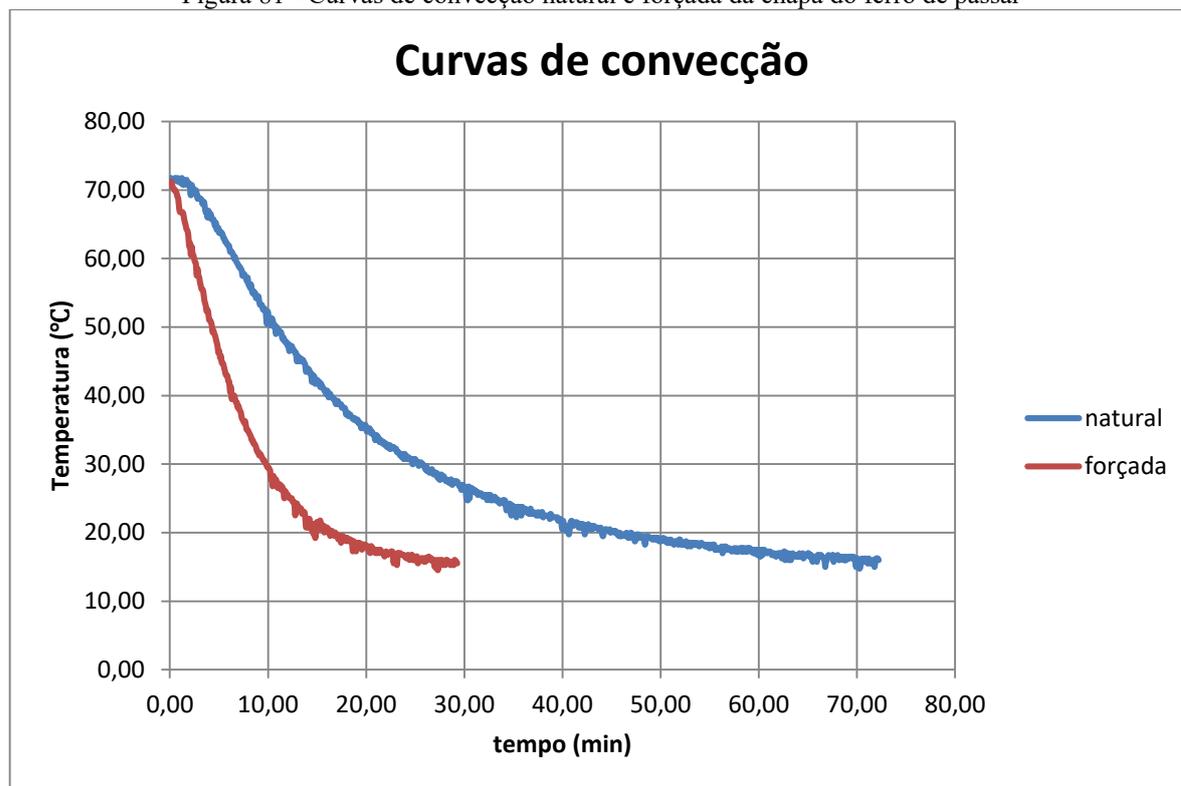
Por fim, aplicamos os dados obtidos na Lei de Resfriamento de Newton (Equação 72) para estimar o valor do coeficiente de transferência de calor h :

$$h = \frac{P_{convec}}{A \cdot \Delta T_{resf}} = \frac{217,3W}{0,022m^2 \times 7^{\circ}C} \cong 1411 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$$

A estimativa apresentada acima era a que estava mais próxima de poder ser acompanhada pelos alunos, de acordo com os conhecimentos em Matemática que se esperava deles. Apesar de ter sido elaborada com suposições difíceis de serem verificadas, tal estimativa apresentou um valor que é, pelo menos, da mesma ordem de grandeza do valor que podemos obter com o procedimento que descreveremos abaixo.

Duas novas tomadas de dados foram realizadas com o experimento, uma deixando a chapa do ferro resfriar por convecção natural, e outra submetendo a mesma chapa à convecção forçada do ventilador. Nas duas situações, a resistência do ferro foi desligada quando a temperatura da chapa atingiu um valor próximo de $70^{\circ}C$. No caso da convecção forçada, no mesmo momento em que a resistência foi desligada, o circuito do ventilador foi acionado. Os dados coletados pelo sensor termopar foram armazenados numa planilha, que permitiu a construção do gráfico da Figura 81.

Figura 81 - Curvas de convecção natural e forçada da chapa do ferro de passar



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Microsoft Excel (2021)

É esperado que as curvas de convecção da Figura 81 possam ser representadas por equações exponenciais como $T_s(t) = T_\infty + (T_{s_{máx}} - T_\infty)e^{-k''t}$ (Equação 63), que é a solução da equação diferencial que representa a Lei de Resfriamento de Newton. Utilizando o programa Microsoft Excel, testamos equações que geravam curvas próximas às obtidas experimentalmente. Neste caso, adotamos:

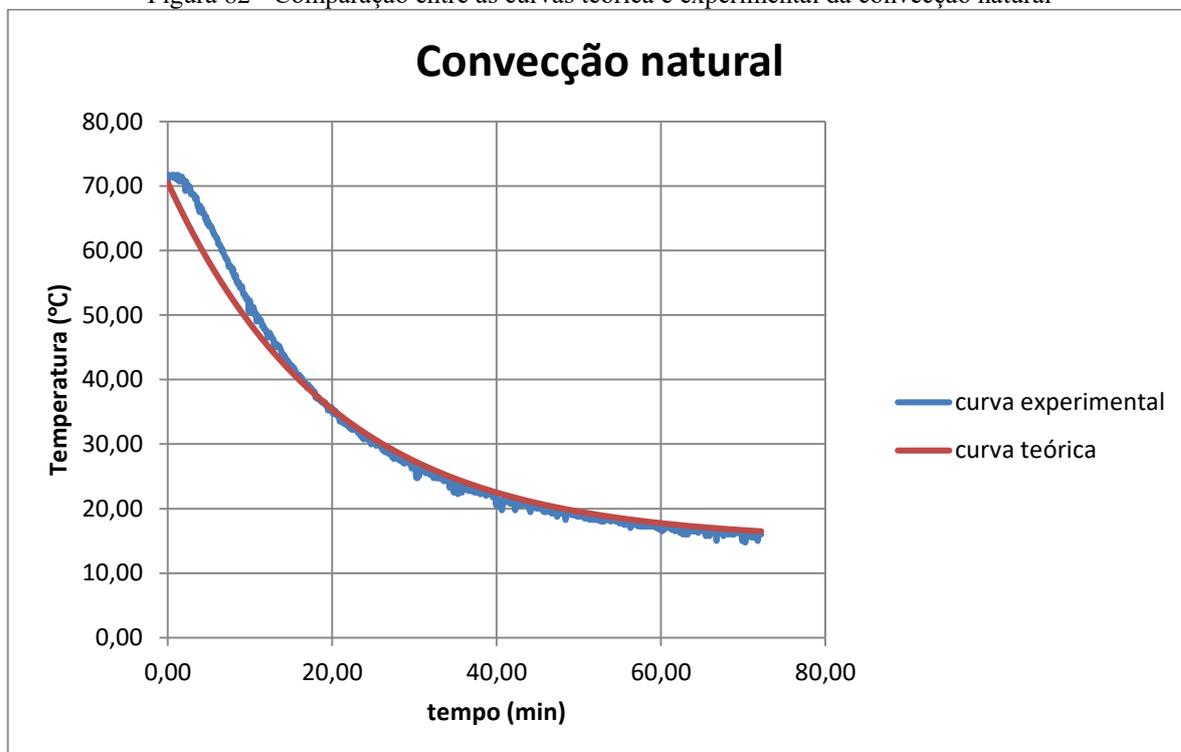
- $T_\infty = 15^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente);
- $T_{s_{máx}} - T_\infty = 70,5^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 55,5^\circ\text{C}$ (diferença entre a temperatura máxima atingida pela chapa do ferro e a temperatura ambiente).

Portanto, as duas curvas devem se parecer com algo do tipo $T_s(t) = 15 + 55,5e^{-k''t}$. O passo seguinte foi atribuir valores diferentes para o termo k'' , até que fosse obtida uma curva teórica que se aproximasse da curva experimental.

A Figura 82 apresenta a comparação entre a curva obtida experimentalmente e a curva teórica para a convecção natural. A curva teórica pode ser representada pela equação:

$$T_s(t) = 15 + 55,5e^{-0,05 \cdot t} \quad (74)$$

Figura 82 - Comparação entre as curvas teórica e experimental da convecção natural

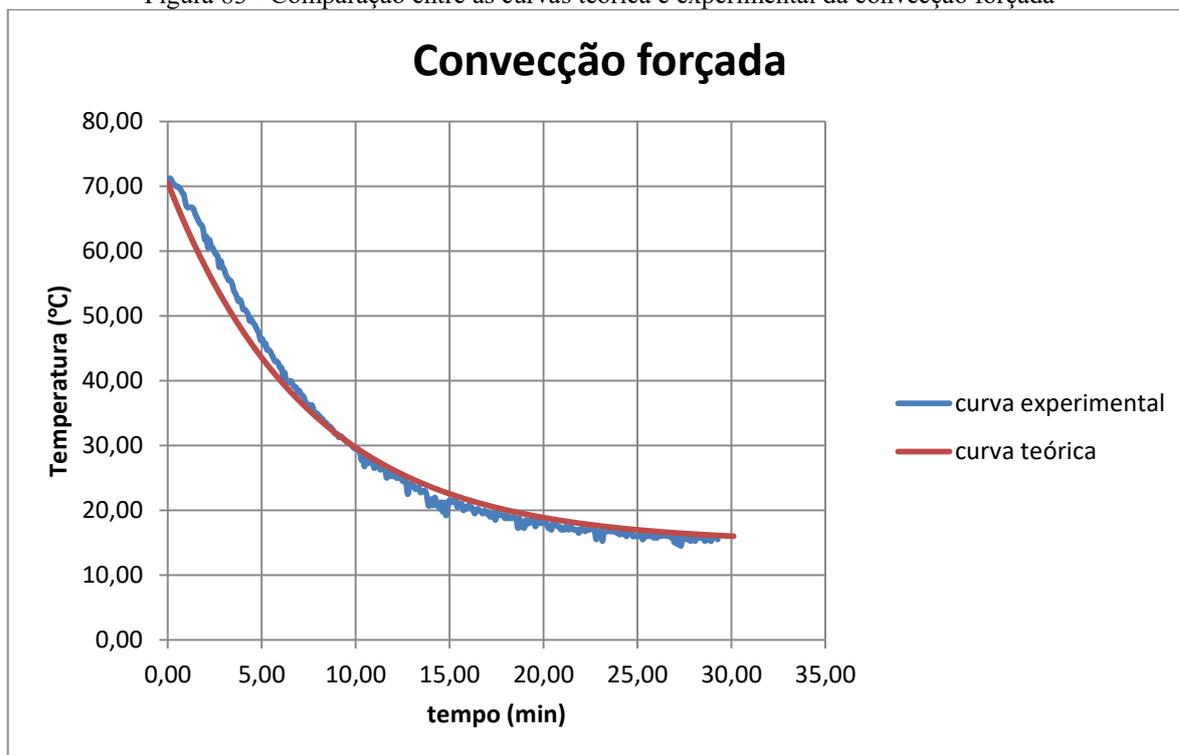


Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Microsoft Excel (2021)

A Figura 83 apresenta a comparação entre a curva obtida experimentalmente e a curva teórica para a convecção forçada. A curva teórica pode ser representada pela equação:

$$T_s(t) = 15 + 55,5e^{-0,133 \cdot t} \quad (75)$$

Figura 83 - Comparação entre as curvas teórica e experimental da convecção forçada



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Microsoft Excel (2021)

O termo k'' , portanto, é igual a $0,05 \text{ s}^{-1}$ para a curva teórica da convecção natural e é igual a $0,133 \text{ s}^{-1}$ para a curva teórica da convecção forçada. Sabendo que o valor aproximado para a massa que constitui a chapa de ferro é de $0,8 \text{ kg}$, que a área dessa mesma chapa é de aproximadamente $0,022 \text{ m}^2$ e que o calor específico do ferro (a 27°C) é igual a $0,11 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}}$ (PRÄSS, 2020), calculamos o coeficiente de transferência de calor h para obter novos valores estimativos. Considerando $k'' = \frac{hA}{mc}$,

Convecção natural

$$h = \frac{m \cdot c \cdot k''}{A}$$

$$h = \frac{0,8 \text{ kg} \cdot 0,11 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 0,05 \frac{1}{\text{s}}}{0,022 \text{ m}^2}$$

$$h = \frac{0,8 \text{ kg} \cdot 0,11 \frac{4,186 \text{ J}}{0,001 \text{ kg}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 0,05 \frac{1}{\text{s}}}{0,022 \text{ m}^2}$$

Convecção forçada

$$h = \frac{m \cdot c \cdot k''}{A}$$

$$h = \frac{0,8 \text{ kg} \cdot 0,11 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 0,133 \frac{1}{\text{s}}}{0,022 \text{ m}^2}$$

$$h = \frac{0,8 \text{ kg} \cdot 0,11 \frac{4,186 \text{ J}}{0,001 \text{ kg}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 0,133 \frac{1}{\text{s}}}{0,022 \text{ m}^2}$$

$$h \cong 837 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h \cong 2227 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

O ventilador que provoca a convecção forçada consegue retirar da chapa do ferro cerca de 2,66 vezes a quantidade de calor retirado por convecção natural. Os valores encontrados, apesar de mais factíveis, também são estimativas. O valor atribuído ao calor específico do ferro é indicado somente para uma temperatura fixa de 27 °C, o que não corresponde à realidade do experimento, em que a temperatura variou entre 70,5 e 15 °C.

7.8.3 Aplicação em sala de aula

Este experimento foi aplicado nas aulas do dia 24/11/2021 nas Turmas A e D, quando estiveram presentes 9 e 19 alunos, respectivamente. Nas turmas B e C, a mesma atividade foi realizada no dia 03/12/2021, quando estiveram presentes 13 e 12 alunos, respectivamente. A fotografia da Figura 84 mostra o material utilizado em sala de aula.

Figura 84 - Aplicação do experimento da convecção

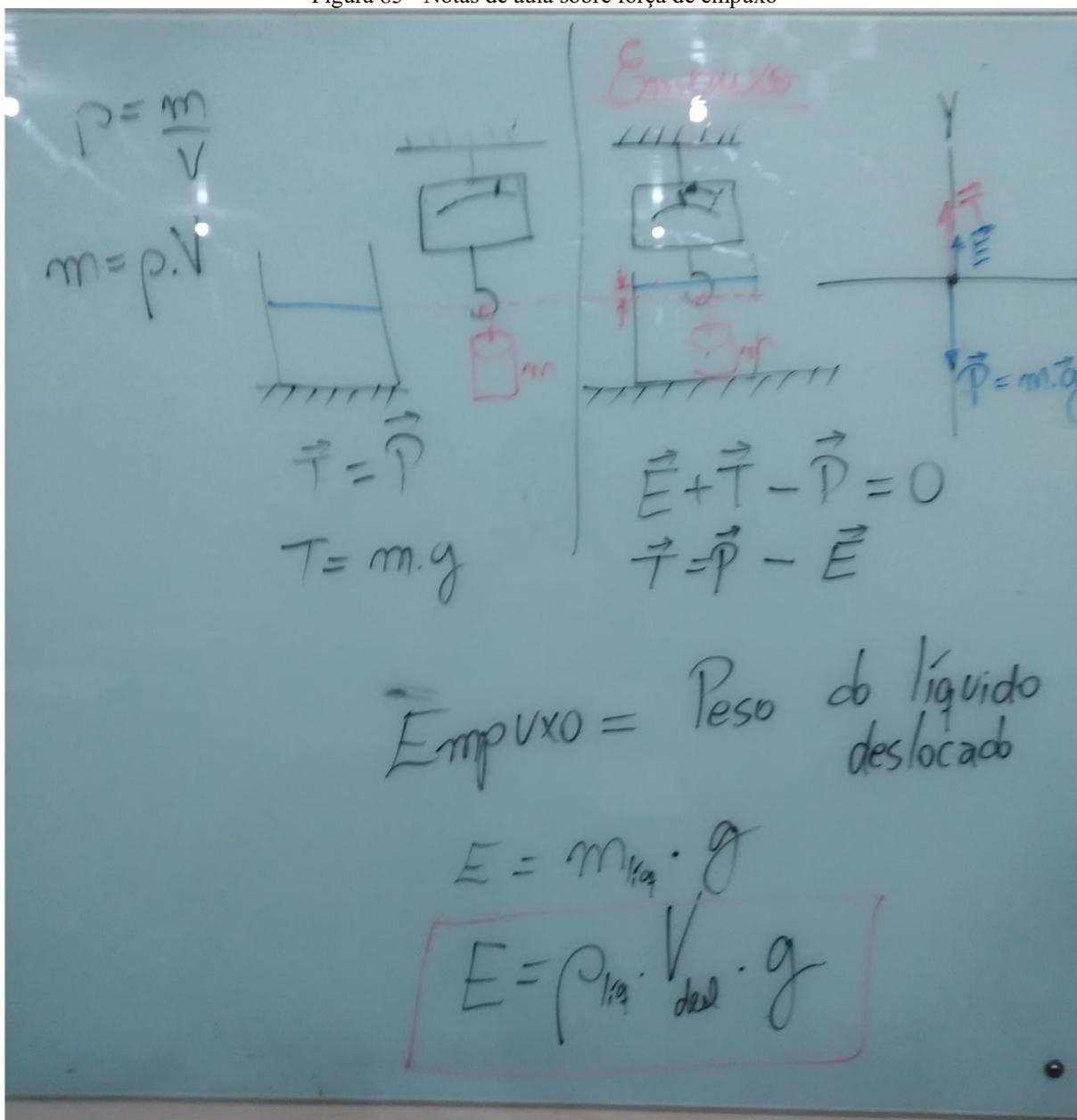


Fonte: O Autor (2021)

A primeira observação foi que, nessas aulas os alunos estavam mais resistentes à continuação dos estudos. Informaram o professor de Física que, na maioria das outras disciplinas, as aulas tinham terminado e que estavam na escola para ver os amigos. A estratégia foi abrir mão de algumas formalidades. Ao contrário dos experimentos anteriores, em que o professor entregava uma folha para que eles registrassem o que era observado, dessa vez, não precisavam fazer anotações. Qualquer tipo de avaliação mais formal, também foi deixado de lado. Tudo o que se esperava deles era a participação nas discussões.

Inicialmente, eles foram perguntados se sabiam explicar por que ocorre o resfriamento de uma xícara de café quente, quando exposta ao ar ambiente por um determinado tempo. Sabiam dizer que o calor do café era perdido para o ar ambiente, mas sem dar maiores detalhes. O professor ofereceu uma explicação, baseada nas relações entre a força gravitacional e a força de empuxo, quando as trocas de calor promoviam mudanças de volume e densidade no fluido em questão. Neste momento da discussão, os estudantes disseram que não sabiam o que era força de empuxo. O professor dedicou um tempo da aula para apresentar a explicação ilustrada na fotografia da Figura 85.

Figura 85 - Notas de aula sobre força de empuxo



Fonte: O Autor (2021)

Ao retomar o assunto da convecção, o professor apresentou o experimento, explicando o seu funcionamento e o seu propósito para aquela aula. Durante a realização da atividade, os alunos participaram fazendo perguntas e observações sobre os componentes do material didático. Tinham curiosidade em saber que temperatura a superfície do ferro de passar atingiria, se o sensor utilizado poderia ser colocado no interior de um forno doméstico e se poderia alterar o texto mostrado no *display* de cristal líquido.

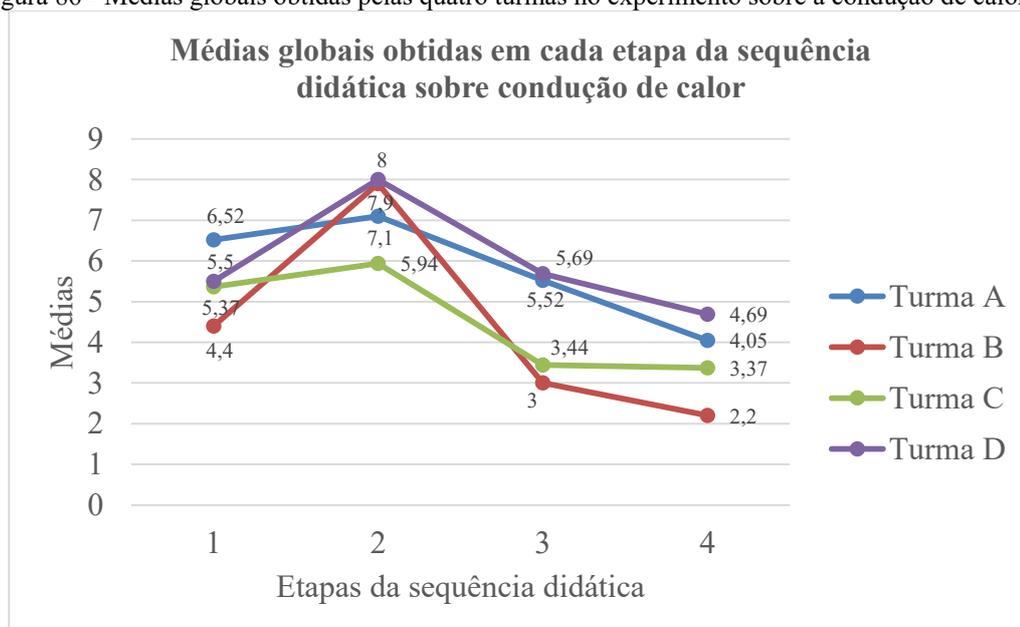
Ao término dos procedimentos de manuseio do experimento, o professor conduziu a discussão para apresentar a Lei de Resfriamento de Newton e a utilizou para estimar o valor do coeficiente de transferência de calor. A partir do valor estimado, os alunos discutiram que fatores poderiam interferir para melhorar a eficiência do resfriamento por convecção. O tamanho e a velocidade de rotação do ventilador foram os aspectos mais ressaltados por eles, o que evidencia que a velocidade do fluido foi reconhecida como um fator importante.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 SOBRE A APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO DA CONDUÇÃO DE CALOR

Na primeira parte da sequência didática, que tratou sobre a condução de calor, foram utilizados quatro instrumentos para o acompanhamento e a avaliação da aprendizagem. Durante a etapa 1 (execução do experimento), os alunos precisaram registrar os dados obtidos numa tabela e a essa participação foi atribuída uma nota (parcial 1). Na aula seguinte, a construção do gráfico em papel milimetrado (etapa 2) deu origem a uma segunda nota (parcial 2). À atividade executada para a obtenção e análise da equação de Fourier (etapa 3) foi atribuída uma terceira nota (parcial 3). Por último, um questionário que procurou avaliar de forma mais ampla (etapa 4) o que foi aprendido neste processo gerou a quarta nota (parcial 4). Essas quatro notas foram utilizadas para calcular duas médias: uma em que a média aritmética incluiu as notas de todos os estudantes da turma, mesmo daqueles que não tenham realizado a atividade por algum motivo (chamamos de *média global*); e outra em que o cálculo da média aritmética não considerou as notas iguais a zero, referentes a estudantes que não realizaram a atividade por qualquer razão (chamamos de *média útil*).

Figura 86 - Médias globais obtidas pelas quatro turmas no experimento sobre a condução de calor



Fonte: O Autor (2022)

O gráfico da Figura 86 apresenta as médias globais obtidas pelas turmas A, B, C e D, nas quatro etapas da sequência didática sobre o tema da condução de calor. Nele, podemos observar que, após uma elevação da primeira para a segunda etapa, as médias globais caem nas duas últimas.

Primeiramente, é preciso esclarecer que a primeira etapa pouco exigia dos alunos. Bastava que eles anotassem os dados obtidos experimentalmente numa folha entregue pelo professor. Mesmo assim, as médias foram baixas e isso se atribui às notas iguais a zero que foram obtidas por alunos que faltaram injustificadamente à aula em que o experimento foi realizado.

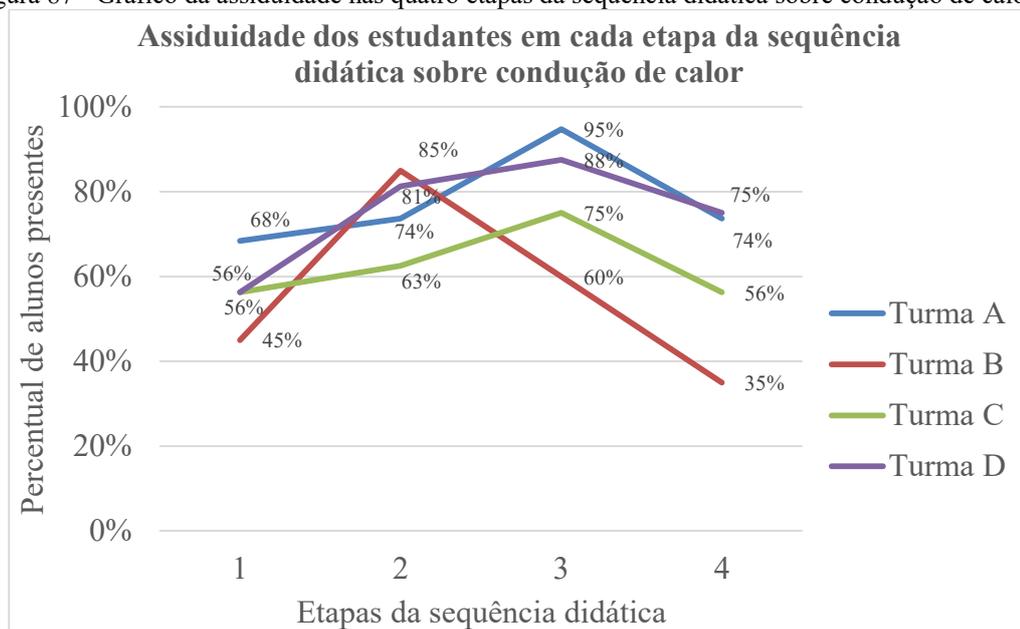
Na segunda etapa (desenho do gráfico), o desempenho de todas as turmas melhorou, devido a dois fatores: 1) o número de alunos ausentes foi menor; e 2) o professor fez um acompanhamento individualizado, percorrendo a sala para ajudar e exigir que todos construíssem seus gráficos.

Eles também receberam um suporte do professor na terceira etapa (obtenção e análise da equação de Fourier) desta sequência. No entanto, as médias baixaram e isso se deve à dificuldade que os estudantes demonstraram para acompanhar as discussões. Eles não tinham bem fundamentado um conhecimento prévio sobre a função linear. Embora o professor tenha dedicado tempo ao assunto, o resultado indica que isso não foi o suficiente para a maioria.

A quarta etapa (questionário final) apresenta uma queda ainda maior nas médias globais. Isso ocorreu, porque não houve interferência do professor na execução da atividade, ou seja, foi exigido deles uma iniciativa maior para refletir sobre o que foi realizado e elaborar as devidas respostas. Quando retirado o auxílio do professor, cerca de 45% (quarenta e cinco por cento) dos alunos simplesmente se abstiveram de participar da atividade, deixando de entregar o questionário respondido, conforme o gráfico que apresenta as notas atribuídas ao questionário final (Figura 89).

O gráfico da Figura 87 mostra a variação do percentual de presenças em cada etapa dessa sequência didática. Se compararmos o gráfico das médias globais com o gráfico da assiduidade, podemos inferir que há uma forte correlação entre essas variáveis. É importante destacar que os desempenhos das turmas B e C, que tinham as aulas de Física às sextas-feiras e apresentavam problemas de assiduidade dos alunos, foram os mais baixos.

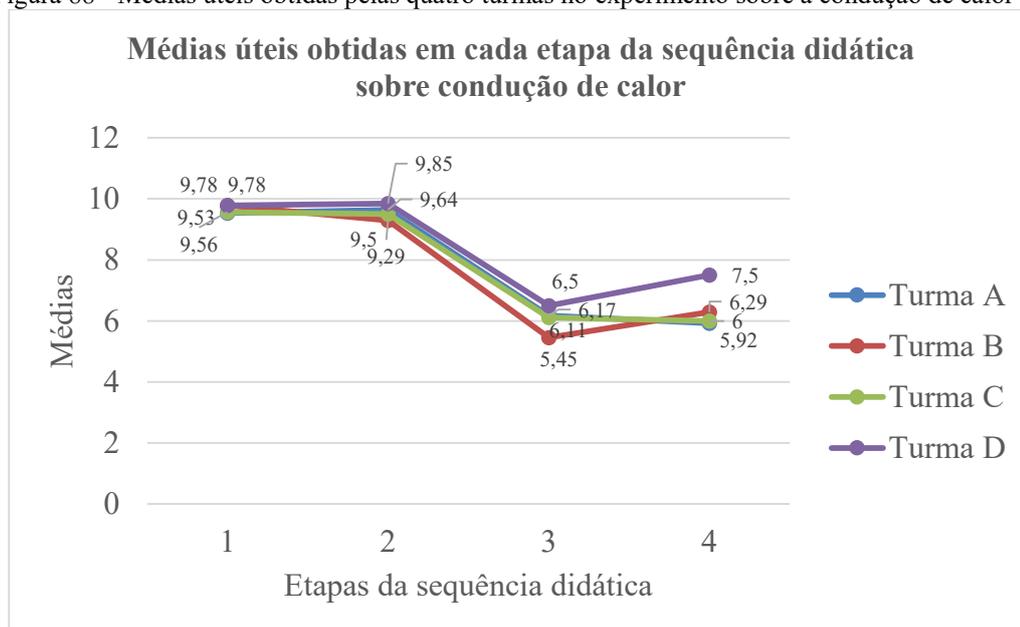
Figura 87 - Gráfico da assiduidade nas quatro etapas da sequência didática sobre condução de calor



Fonte: O Autor (2022)

Considerando que não é possível avaliar o aprendizado de um aluno que não compareceu à aula, ou que não entregou a sua atividade, é razoável excluirmos as notas iguais a zero (atribuídas a esses casos) e calcularmos uma nova média, que leve em consideração apenas o desempenho de quem deixou registro de participação efetiva em cada etapa. As médias aritméticas calculadas assim foram chamadas de médias úteis e estão apresentadas no gráfico da Figura 88.

Figura 88 - Médias úteis obtidas pelas quatro turmas no experimento sobre a condução de calor

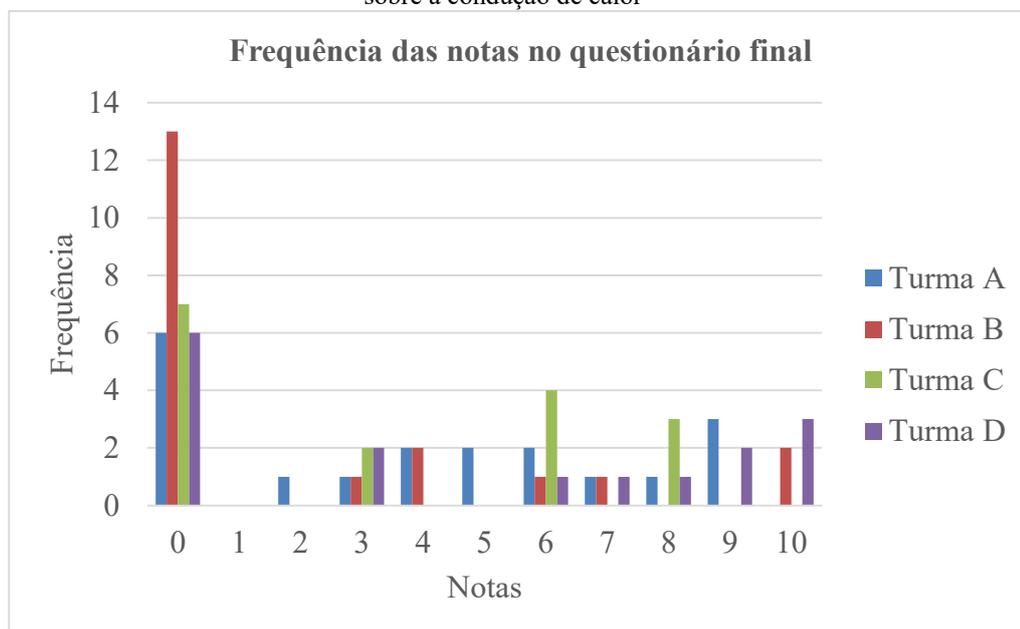


Fonte: O Autor (2022)

Nas duas primeiras etapas, em que a complexidade das atividades era menor, o desempenho dos participantes foi bastante elevado, beirando a nota máxima. Nas duas etapas seguintes, quando a complexidade aumentou e quando se exigiu mais autonomia dos alunos, o desempenho foi mais baixo. No entanto, a média da maioria das turmas orbitou em torno de um valor igual a 6 (seis), o que deve ser considerado bom. Destaque-se o desempenho da Turma D, cuja média útil atingiu 7,5 (sete vírgula cinco).

A frequência ocorrida para cada nota no questionário final é apresentada no gráfico da Figura 89. Além do grande número de alunos que se abstiveram de participar dessa etapa de avaliação da aprendizagem, já destacado anteriormente, é possível verificar que cerca de 36,6% (trinta e seis vírgula seis por cento) dos alunos obtiveram desempenho com nota maior ou igual a 6 (seis), que é considerado o valor mínimo para aprovações. Se consideramos que o referido questionário tem o potencial para revelar de forma mais concreta a taxa de sucesso do objetivo de promover uma aprendizagem significativa sobre o tema da condução de calor, então, podemos afirmar que essa sequência didática atingiu positivamente um pouco mais de um terço dos alunos participantes.

Figura 89 - Gráfico de colunas que mostra a frequência ocorrida para cada nota obtida no questionário final sobre a condução de calor



Fonte: O Autor (2022)

Podemos interpretar melhor os resultados apresentados quando levamos em consideração o contexto escolar em que eles foram produzidos. Primeiramente, a proposta foi aplicada em turmas do período noturno, em que uma boa parcela dos alunos trabalha durante o dia. Isso dificulta que o professor solicite que eles realizem alguma atividade fora do horário de aula, entre um encontro e outro. Quando a disciplina ocorre em apenas um encontro semanal (e ainda é possível que ocorram interrupções), as discussões que exigem mais tempo acabam sendo fragmentadas, o que dificulta a aprendizagem. Também não se pode ignorar o fato de que esses alunos apresentaram grande defasagem de aprendizagem, especialmente, na área das ciências exatas. Tal defasagem parece ter sido agravada pelo período de estudos remotos, imposto pela pandemia do COVID-19.

O expressivo número de estudantes que se abstiveram de participar do questionário final sobre a condução de calor (etapa 4) revela um comportamento de aversão a avaliações, apresentado por muitos alunos. Enquanto as atividades eram tutoradas pelo professor, o número de participações era maior. Depois, quando foi exigido que caminhassem sozinhos, começaram a surgir comportamentos reativos. Diziam que não iam responder, porque tinham perdido a folha do questionário, ou porque não puderam acompanhar todas as etapas da discussão. Outros, ainda, perguntavam se era possível ser reprovado na série em curso por causa de apenas uma disciplina. Sabendo que a decisão colegiada normalmente lhes é favorável, claramente, esses

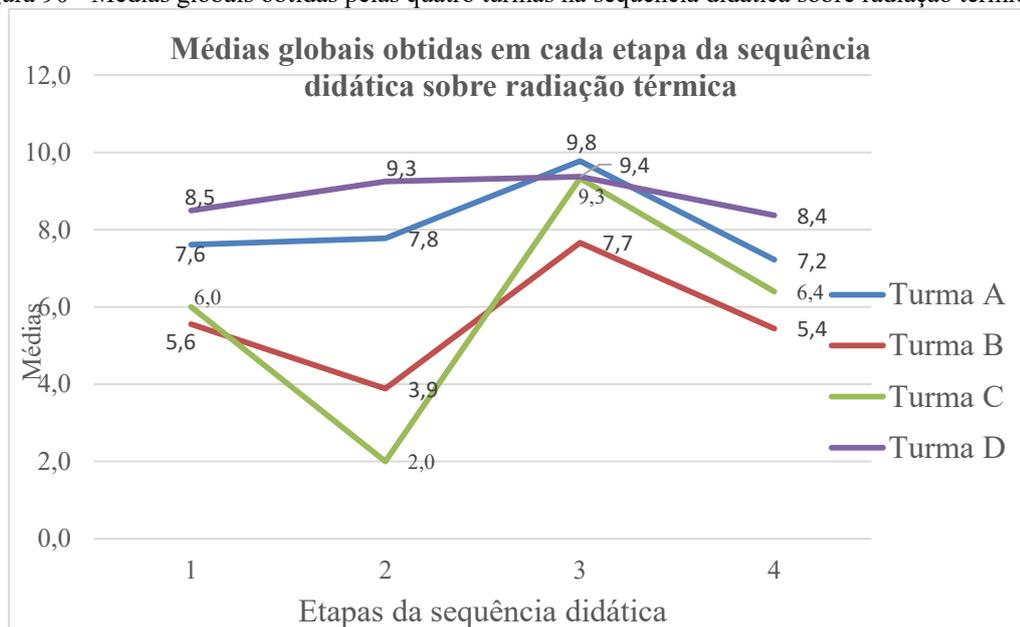
alunos escolheram a disciplina de Física para não participar de avaliações. Também vale mencionar a postura passiva daqueles que se abstiveram de participar do referido questionário, mas perguntaram que atividade seria realizada para recuperar as suas notas. Ou seja, não oferecem subsídios para que o professor realize um diagnóstico do processo de aprendizagem que está em andamento, mas exigem o seu direito à recuperação paralela.

8.2 SOBRE A APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO DA RADIAÇÃO TÉRMICA

Na segunda parte da sequência didática, sobre a radiação térmica, a avaliação da aprendizagem foi realizada por meio dos roteiros de aula em que, ao final de cada um, os alunos tinham que responder algumas questões. O intuito era avaliar o que o aluno tinha compreendido sobre um determinado assunto, na mesma aula em que este foi abordado. Na primeira parte da sequência didática, era perceptível que os alunos precisavam ser esclarecidos com detalhes sobre o tema em discussão, mesmo que tivessem comparecido à aula anterior. Portanto, a ideia de começar e terminar um determinado assunto numa mesma aula era uma maneira de superar a fragmentação que a discussão sofria quando era necessário estender as atividades para o próximo encontro. No entanto, é importante ponderar que a relativa independência entre os temas abordados nesta segunda parte da sequência didática contribuiu bastante para tornar possível o encerramento de cada assunto no tempo da aula. Diante do exposto, foram utilizados quatro questionários, ao final dos seguintes roteiros: 1) Roteiro do experimento da cuba de ondas; 2) Roteiro da aula expositiva sobre ondas eletromagnéticas; 3) Roteiro da aula expositiva sobre radiação do corpo negro; e 4) Roteiro do experimento sobre absorção e emissão de radiação térmica por um corpo claro e por um corpo escuro.

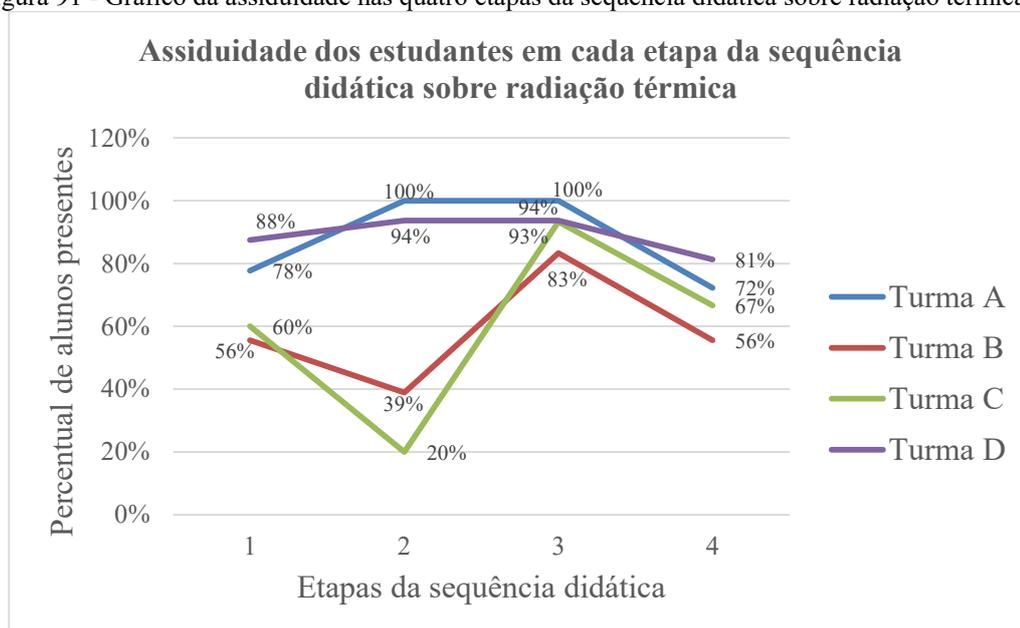
As variações das médias globais são mostradas no gráfico da Figura 90. Tais variações espelham o que ocorreu com a assiduidade das turmas (Figura 91). Ou seja, onde o número de alunos presentes foi maior, a média global também foi maior.

Figura 90 - Médias globais obtidas pelas quatro turmas na sequência didática sobre radiação térmica



Fonte: O Autor (2022)

Figura 91 - Gráfico da assiduidade nas quatro etapas da sequência didática sobre radiação térmica

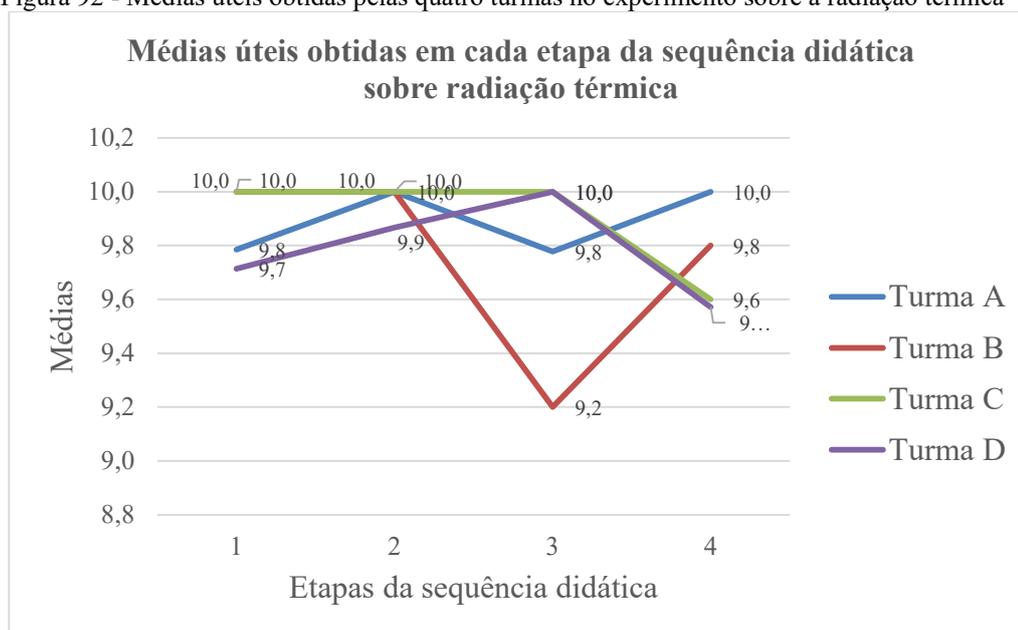


Fonte: O Autor (2022)

As médias úteis apresentadas no gráfico da Figura 92 mostram que os alunos que participaram das atividades tiveram notas elevadas. Parte desse desempenho deve ser atribuído ao fato de que os questionários foram aplicados na mesma aula em que o assunto foi abordado, aproveitando-se da memória recente dos alunos. Parte também se deve aos métodos de ensino

utilizados, que envolveram experimentos e simuladores virtuais, pois incentivaram uma postura mais participativa nos estudantes. Também é verdade que muitas perguntas apresentadas nos referidos roteiros podem ser consideradas de caráter descritivo. Ou seja, essas questões solicitavam que os estudantes relatassem o que estavam presenciando na atividade proposta. Mesmo parecendo que o grau de exigência era menor, muitos estudantes se mostravam inseguros em redigir seus próprios relatos. Alguns deles solicitavam insistentemente que as ideias fossem reapresentadas para tomar nota do que era falado pelo professor e, assim, tentar realizar uma transcrição literal para o papel. No entanto, o objetivo de tais perguntas era verificar em que medida os estudantes se apropriavam dos conceitos discutidos, por meio da produção de pequenos textos. Quanto mais autênticas fossem as respostas, melhor o diagnóstico que poderia ser realizado. No final, pela quantidade de textos semelhantes, as notas também foram parecidas.

Figura 92 - Médias úteis obtidas pelas quatro turmas no experimento sobre a radiação térmica

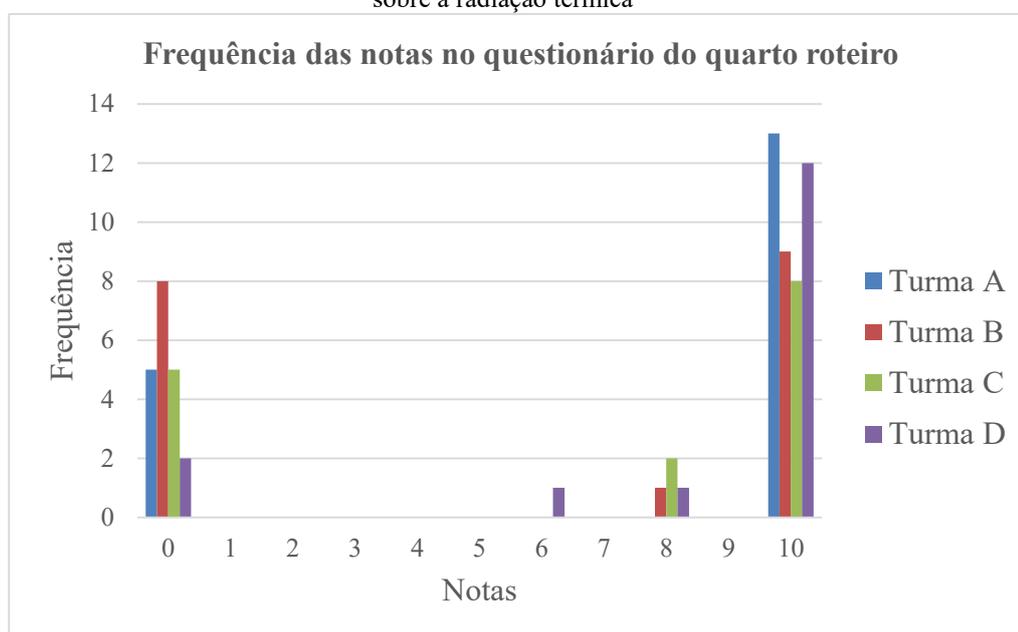


Fonte: O Autor (2022)

Segundo Moreira (2012), a aprendizagem é considerada significativa, quando o aluno mobiliza um determinado conhecimento adquirido, para resolver uma situação-problema que é inédita para ele. O quarto roteiro dessa segunda parte da sequência didática foi elaborado com o objetivo de proporcionar a referida situação-problema. Por meio de uma demonstração experimental, esperava-se que os estudantes utilizassem o que aprenderam nas aulas anteriores

para analisar o fenômeno em estudo. O gráfico da Figura 93 mostra que 47 alunos (de um total de 67), ou cerca de 70%, obtiveram nota superior a 6 neste questionário, tendo a maioria alcançado a nota máxima. Ressalva seja feita sobre este desempenho para dizer que ele reflete mais uma construção coletiva do que individual. As reações relatadas na aplicação do questionário final (etapa 4) da primeira parte dessa sequência didática (sobre condução de calor) levaram a mudanças na forma como a avaliação foi conduzida nas atividades da sequência que abordou o tema da radiação térmica. As perguntas passaram a ser respondidas imediatamente após a discussão dos conceitos e ideias. No devido momento, o professor realizava pausas para que os alunos elaborassem as suas respostas. Quando era requisitado, uma nova explicação era oferecida. A atividade só avançava depois que os participantes tivessem respondido a determinada questão. A ideia era fazer todos caminharem juntos e não deixar ninguém para trás. Tal procedimento contribuiu para diminuir o nível de ansiedade nos estudantes e a torná-los mais participativos.

Figura 93 - Gráfico de colunas que mostra a frequência ocorrida para cada nota obtida no questionário final sobre a radiação térmica



Fonte: O Autor (2022)

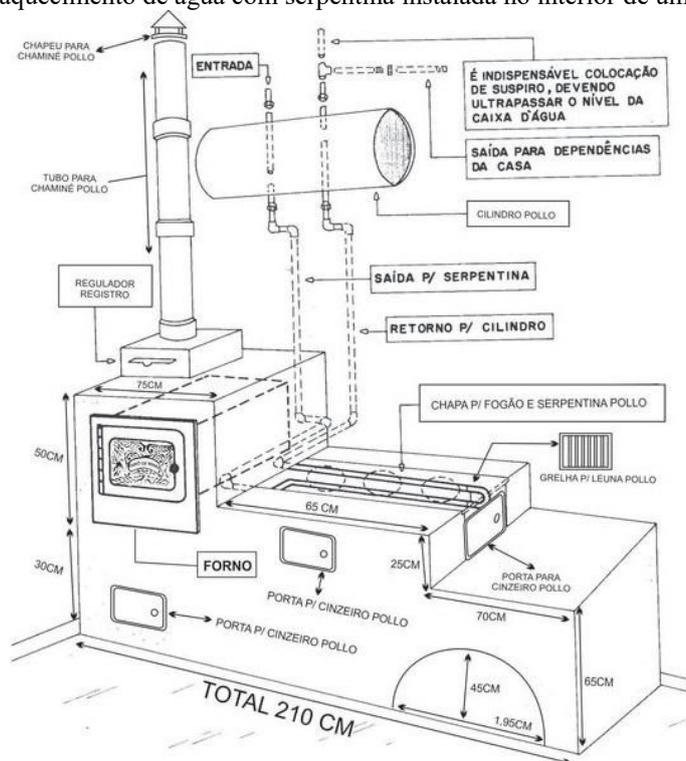
8.3 SOBRE A APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO DA CONVECÇÃO

Conforme o relato apresentado na seção 7.8.3, qualquer forma de avaliação mais objetiva foi descartada nesta terceira parte da sequência didática, que tratou do tema da transferência de calor por convecção. A proximidade do final do ano e o encerramento das atividades de ensino, anunciadas por professores de outras disciplinas, promoveram nos alunos um sentimento de que a escola seria utilizada para finalidades recreativas nos últimos dias letivos. Ficou a impressão, também, de que os estudantes cansaram de ter que responder aos questionários. Parece ter havido um esgotamento do método. Dessa forma, a análise dos resultados deve ser qualitativa, com base nas observações do professor.

O fato de saber que não seriam avaliados de uma maneira formal contribuiu para que os estudantes se sentissem mais à vontade durante a aula. Um número maior deles se aproximou do aparato experimental, demonstrando curiosidade em relação aos componentes e aos efeitos que podiam ser vistos ou sentidos. Também ocorreram mais intervenções, com perguntas e comentários feitos por eles. Certamente, a aula foi mais descontraída que as anteriores.

Uma evidência de aprendizagem significativa foi dada por um dos participantes, ao associar o fenômeno da convecção ao processo de aquecimento da água por meio de uma serpentina, que é instalada no interior do fogão à lenha (Figura 94). Ele próprio explicou o movimento de subida da água quente até o cilindro e a descida da água fria até a serpentina, utilizando os conceitos de empuxo e gravidade. Certamente, a discussão motivada pelo uso do experimento levado para sala de aula contribuiu para a construção da explicação elaborada pelo estudante.

Figura 94 - Sistema de aquecimento de água com serpentina instalada no interior de um fogão a lenha



Fonte: Página da Empresa Pollo Fundidos³⁴

³⁴ Disponível em: <https://d3ugyf2ht6aenh.cloudfront.net/stores/757/084/products/esquema-de-forno-da-pollo-fundidos61-b0139495d93981733c15765118475373-640-0.jpg>

9 CONCLUSÕES

Os testes realizados com os experimentos propostos neste trabalho, especialmente aqueles utilizados para tratar o tema das trocas de calor, mostraram que a conciliação entre dados experimentais e previsões teóricas depende de uma análise que leve em consideração a ocorrência simultânea de diferentes processos de transferência dessa forma de energia. Tecnicamente, é difícil isolar um processo do outro e a sobreposição dos efeitos torna a análise matemática um tanto desafiadora. O uso de fontes capazes de manter o fluxo de calor constante e as técnicas de isolamento térmico adotadas foram fatores que contribuíram para que o experimento da condução na barra de alumínio apresentasse os melhores resultados. O experimento da radiação térmica de um corpo claro e de outro escuro precisa ser aperfeiçoado para oferecer um isolamento térmico ao sensor de contato, de modo que os seus dados possam ser melhor comparados aos dados do sensor infravermelho. A quantidade de variáveis que envolvem as características de um fluido, além das limitações técnicas para medi-las, fez com que o experimento da convecção tivesse uma abordagem mais qualitativa com os alunos.

Quanto à sala de aula, a análise dos resultados da primeira parte da sequência didática indicam que o uso de um experimento didático para o estudo sobre a condução de calor é uma ferramenta de motivação importante, afinal pouco mais de um terço dos estudantes obteve bom desempenho no questionário final. Além disso, os dados obtidos com esse experimento permitiram uma discussão crítica sobre o assunto estudado. No entanto, a fragmentação das discussões, a inassiduidade, a defasagem de aprendizagem e a reação negativa à aplicação de um instrumento avaliativo que exigiu mais autonomia dos alunos são fatores que reduziram a possibilidade de obtenção de indicadores melhores.

A segunda parte da sequência didática, que abordou o tema da radiação térmica, apresentou um resultado expressivo, pois cerca de 70% dos alunos apresentaram um bom desempenho. No entanto, a mudança nos procedimentos de avaliação (em que se buscou uma construção coletiva das respostas para as questões propostas) reduziu a precisão das informações sobre o desempenho individual do estudante, mas contribuiu para promover uma postura mais participativa nos questionários aplicados. O planejamento de atividades que começavam e terminavam na mesma aula também foi importante, pois se reduziam as chances do assunto cair no esquecimento de um encontro para o outro. Por último, os experimentos e os simuladores utilizados nesta segunda parte da sequência foram imprescindíveis para

proporcionar situações que levaram a discussões críticas sobre os fenômenos e conceitos estudados. Eles também despertaram a curiosidade e incentivaram uma postura mais participativa dos alunos.

Não há números para representar o desempenho dos alunos na terceira parte da sequência didática, em que se discutiu o fenômeno da convecção. Esta foi a parte com a menor duração (apenas um encontro de 80 minutos), pois ocorreu no fim do período letivo. No entanto, a dispensa de um instrumento formal de avaliação mostrou que pode deixar os alunos menos ansiosos e promover um comportamento mais leve e espontâneo. O uso do experimento didático acaba sendo potencializado por essa mudança de postura. A preocupação deixa de ser o preenchimento de um questionário, ou fazer registros escritos para uma futura avaliação. O foco é mantido no objeto que está sendo utilizado na aula, ou seja, o experimento didático. Não se trata de defender a extinção das avaliações formais, mas naquele momento e para o perfil dos alunos participantes, foi necessária uma postura mais flexível do professor.

A reflexão sobre todas as etapas descritas permite concluir que o ensino de Física desperta a curiosidade das pessoas. Métodos alternativos, como os descritos neste trabalho, são potencialmente significativos para a motivação dos estudantes. No entanto, ao passar da etapa de demonstração experimental para a etapa da abstrata discussão matemática, o comportamento de muitos alunos mudou completamente. O entusiasmo deu lugar à indiferença pelo assunto. Não se deve esperar que os experimentos didáticos resolvam todos os problemas da sala de aula. Eles são ferramentas que devem ter o seu uso planejado com um conjunto de ações, que levem em consideração as características dos alunos que vão utilizá-las.

10 REFERÊNCIAS

ADAMS, W. et al. Modelos do Átomo de Hidrogênio. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2011. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/hydrogen-atom/about>. Acesso em: Outubro 2021.

ALVES, T. A. Notas da Aula 3 - EM41G - Transferência de Calor- Condução 1D em Regime Permanente. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR**, 2019. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/thiagoalves/em41g-transferencia-de-calor-2018-1-mestrado-1>>. Acesso em: 1º Maio 2022.

AMORIM, H. S.; DIAS, M. A.; SOARES, V. Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, 12 Dezembro 2015. ISSN 1806-9126.

ARDUINO. Built-in Examples - Blink. **Docs Arduino**, 2022. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/built-in-examples/basics/Blink>>. Acesso em: 3 Maio 2022.

ARDUINO. Datasheet SKU: A000066. **Arduino Uno Rev3**, 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf?_gl=1*wo2p6k*_ga*NzExMTY5MzI4LjE2NTIyMTQxOTY.*_ga_NEXN8H46L5*MTY1Mzc2MzAxOS40LjEuMTY1Mzc2Mzg2My42MA>. Acesso em: 28 Maio 2022.

ARDUINO. Overview of the Arduino IDE 1. **Arduino Docs**, 2022. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/Environment>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

ARDUINO E CIA. Como usar o módulo I2C com Arduino e display LCD 16x2. **Arduino e Cia**, 2016. Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/modulo-i2c-display-16x2-arduino/>>. Acesso em: Outubro 2021.

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicología educativa Un punto de vista cognoscitivo**. 2ª. ed. México: Trillas, 1998.

BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974.

BUNGE, M. **La Ciencia: Su método y su filosofía**. 4ª. ed. Buenos Aires: Sudamericana, 2001.

CALLEN, H. B. **THERMODYNAMICS AND AN INTRODUCTION TO THERMOSTATISTICS**. 2ª. ed. Singapura: John Wiley & Sons, 1985.

CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2016.

CONNOR, N. O que é o número Prandtl de água e ar – Definição. **Thermal Engineering**, 2019. Disponível em: <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-numero-prandtl-de-agua-e-ar-definicao/>>. Acesso em: 4 Maio 2022.

CONNOR, N. O que é a Lei do resfriamento de Newton – Definição. **Thermal Engineering**, 2020. Disponível em: <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-a-lei-do-resfriamento-de-newton-definicao/>>. Acesso em: 4 Maio 2022.

DUBSON, M. et al. Gerador. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2011. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/generator/about>. Acesso em: Outubro 2021.

DUBSON, M. et al. Ímãs e Eletroímãs. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2011. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/magnets-and-electromagnets/about>. Acesso em: Outubro 2021.

GLEISER, M. Por que ensinar Física? **A Física na Escola**, v. 1, n. 1, p. 4-5, Outubro 2000.

GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3ª. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

ISLAM, S. U. Is Newton's law of cooling and the Stefan–Boltzmann law related? **Quora**, 2017. Disponível em: <<https://www.quora.com/Is-Newtons-law-of-cooling-and-the-Stefan%E2%80%93Boltzmann-law-related>>. Acesso em: 4 Maio 2022.

MAXIM INTEGRATED. Data Sheet. **MAX6675**, 2002. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/signal-integrity/MAX6675.html>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

MAXIM INTEGRATED. Data Sheet. **DS18B20**, 2019. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

MELEXIS. Changing Emissivity Setting in MLX90614. **Melexis - Inspired Engineering**, Julho 2013. Disponível em: <<https://www.melexis.com/en/documents/documentation/application-notes/application-note-mlx90614-changing-emissivity-setting>>. Acesso em: 2 Maio 2022.

MELEXIS. Data Sheet. **MLX90614**, 2019. Disponível em: <<https://www.melexis.com/en/product/mlx90614/digital-plug-play-infrared-thermometer-to-can>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

MENEZES, L. C. D. A Matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1ª. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005. p. 29.

MONK, S. simonmonk/ArduinoNextSteps. **GitHub**, 2013. Disponível em: <https://github.com/simonmonk/ArduinoNextSteps/blob/master/ArduinoNextSteps/sketch_08_01_OneWire_List/sketch_08_01_OneWire_List.ino>. Acesso em: 12 Maio 2022.

MONK, S. Utilizando mais de um sensor DS18B20 com o protocolo OneWire. **GitHub**, 2013. Disponível em: <https://github.com/simonmonk/ArduinoNextSteps/blob/master/ArduinoNextSteps/sketch_08_03_OneWire_DS18B20_2/sketch_08_03_OneWire_DS18B20_2.ino>. Acesso em: 12 Maio 2022.

MOREIRA, J. R. S. Transferência de calor. **Revista do Frio**, São Paulo, v. 91, p. 1-6, Dezembro 1997. Disponível em: <http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2014/10/Conveccao.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2022.

MOREIRA, M. A. A Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. In: MOREIRA, M. A. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Universidade de Brasília (UnB), 2006. Cap. 1.

MOREIRA, M. A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS. **Textos de Apoio ao Professor de Física**, Porto Alegre, 23, março 2012. 22. Disponível em: <<https://ppgenfis.if.ufrgs.br/>>. Acesso em: 2022.

MOREIRA, M. A. A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. In: MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. 2ª. ed. São Paulo: E.P.U., 2019. Cap. 11, p. 159-173.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem Significativa - A Teoria de David Ausubel**. São Paulo: MORAES LTDA., 1982.

MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T. **Subsídios Epistemológicos para o Professor Pesquisador em Ensino de Ciências: Epistemologias do Século XX**. 2ª. ed. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2016.

MORICONI, L. AS LEIS DE STEFAN-BOLTZMANN E WIEN. **Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2006. Disponível em: <<https://www.if.ufrj.br/~moriconi/MecEst/corpo-negro.pdf>>. Acesso em: 2 Maio 2022.

NOGUEIRA, D. Como utilizar o sensor LM35 com Arduino? **Blog AutoCore Robótica**, 2018. Disponível em: <<https://autocorerobotica.blog.br/utilizando-sensor-lm35-com-arduino/>>. Acesso em: 11 Maio 2022.

NUSSENZVEIG, M. H. **CURSO DE FÍSICA BÁSICA: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. São Paulo: Edgard Blücher, v. 2, 1981.

OLIVEIRA, E. Como usar com Arduino – Módulo MAX6675 Termopar Tipo K – 0º a 800°C. **Blog MasterWalker**, 2018. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-max6675-termopar-tipo-k-0o-a-800oc>>. Acesso em: Outubro 2021.

PARALLAX INC. Parallax Data Acquisition (PLX-DAQ). **Parallax**, 2020. Disponível em: <<https://www.parallax.com/plx-daq-updated-for-excel-windows-10-and-propeller-2-early-adopter-progress/>>. Acesso em: 12 Maio 2022.

PIETROCOLA, M. CONSTRUÇÃO E REALIDADE: O REALISMO CIENTÍFICO DE MÁRIO BUNGE E O ENSINO DE CIÊNCIAS ATRAVÉS DE MODELOS. **Investigações em Ensino de Ciências**, Florianópolis, SC, v. 4, p. 213-227, 1999. ISSN 1518-8795.

PRÄSS, A. R. CONSTANTES FÍSICAS - Condutividade Térmica. **FISICANET**, 2020. Disponível em: <[https://www.fisica.net/constantes/condutividade-termica-\(k\).php](https://www.fisica.net/constantes/condutividade-termica-(k).php)>. Acesso em: 4 Maio 2022.

PURKAYASTHA, A. et al. Espectro de Corpo Negro. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2021. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/blackbody-spectrum/about>. Acesso em: Outubro 2021.

ROUINFAR, A. et al. Cargas e Campos. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2021. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/charges-and-fields/about>. Acesso em: Outubro 2021.

ROUINFAR, A. et al. Moléculas e Luz. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2021. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/molecules-and-light/latest/molecules-and-light_pt_BR.html>. Acesso em: Outubro 2021.

SALINAS, S. Introdução à Termodinâmica Estatística. **Disciplinas da USP**, 2016. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/604072/mod_resource/content/1/notas%20de%20a%20-%20vers%C3%A3o%202016-01.pdf>. Acesso em: 1º Maio 2022.

SED-SC. Portaria 189/SED. **Secretaria de Estado da Educação do Governo de Santa Catarina**, 09 Fevereiro 2017. Disponível em: <<https://www.sed.sc.gov.br/documentos/recursos-humanos-161/concurso-de-ingresso-magisterio-2017/5640-portaria-p-189-2017-sistematica-de-avaliacao/file>>.

SILVERMAN, M. P.; SILVERMAN, C. R. Cool in the Kitchen: Radiation, Conduction, and the Newton “Hot Block” Experiment. **THE PHYSICS TEACHER**, v. 38, Fevereiro 2000. ISSN <https://doi.org/10.1119/1.880467>.

STMICROELECTRONICS. Data Sheet. **L298**, 2000. Disponível em: <https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>. Acesso em: 28 Maio 2022.

TEC-SCIENCE. Stefan-Boltzmann law & Kirchhoff’s law of thermal radiation, 2019. Disponível em: <https://www.tec-science.com/thermodynamics/temperature/stefan-boltzmann-law/>. Acesso em: 1º Maio 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. LM35. **Online Data Sheet**, 2017. Disponível em: <https://www.ti.com/document-viewer/LM35/datasheet/abstract#SNIS1592470>. Acesso em: 28 Maio 2022.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2001.

TORRES, E. A. S. Introdução ao Arduino como Ferramenta no Ensino de Física, 2019. Disponível em: <http://harpia.pbx-brasil.com/Disciplinas/Arduino/arduino.html>. Acesso em: 20 novembro 2019.

VASCAK, V. Onda eletromagnética. **Física na escola**, 2018. Disponível em: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_vlna&l=pt. Acesso em: Outubro 2021.

APÊNDICE A – SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL QUE REPRESENTA A LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON

Considerando a equação 1 $\left[\frac{dT}{dt} = -k(T - T_0)\right]$, podemos aplicar o método da separação de variáveis para escrever:

$$\frac{1}{(T - T_0)} dT = -k dt \quad (76)$$

Considerando o interesse em descrever um resfriamento, integramos dT de uma temperatura máxima T_m até uma determinada temperatura mais baixa T . O tempo é integrado de zero até um instante t qualquer em que a temperatura T é atingida.

$$\int_{T_m}^T \frac{1}{(T - T_0)} dT = \int_0^t -k dt \quad (77)$$

$$\ln(T - T_0) - \ln(T_m - T_0) = -kt \quad (78)$$

$$\ln\left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right) = -kt \quad (79)$$

$$e^{-kt} = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (80)$$

$$T - T_0 = (T_m - T_0)e^{-kt} \quad (81)$$

Por fim, a solução apresentada na equação 54.

$$T(t) = T_0 + (T_m - T_0)e^{-kt}$$

APÊNDICE B – VERIFICANDO SE É POSSÍVEL OBTER A LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON A PARTIR DA LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

Começemos essa demonstração, desmembrando a equação 35 $\left[-\frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)\right]$, que é a Lei de Stefan-Boltzmann, da seguinte maneira (ISLAM, 2017):

$$-\frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma(T^2 + T_0^2)(T^2 - T_0^2) \quad (82)$$

$$-\frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma(T^2 + T_0^2)(T + T_0)(T - T_0) \quad (83)$$

$$-\frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma(T^3 + T_0^2T + T^2T_0 + T_0^3)(T - T_0) \quad (84)$$

Na sequência, Islam (2017) sugeriu uma simplificação para situações em que a temperatura do objeto está próxima da temperatura ambiente, ou seja, quando $T \approx T_0$. Neste caso, podemos escrever:

$$-\frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma(T_0^3 + T_0^3 + T_0^3 + T_0^3)(T - T_0) \quad (85)$$

$$-\frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma 4T_0^3(T - T_0) \quad (86)$$

Denominando $k = A\epsilon\sigma 4T_0^3$, temos:

$$-\frac{dQ}{dt} = k(T - T_0) \quad (87)$$

Conforme a equação fundamental da calorimetria, é lembrado por Islam (2017) que:

$$\frac{dQ}{dt} = mc \frac{dT}{dt} \quad (88)$$

Então:

$$mc \frac{dT}{dt} = -k(T - T_0) \quad (89)$$

Após a denominação de uma nova constante, $k' = \frac{k}{mc} = \frac{A\epsilon\sigma 4T_0^3}{mc}$, Islam (2017) conclui para encontrar a equação 55:

$$\left[\frac{dT}{dt} = -k'(T - T_0) \right]$$

APÊNDICE C – PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE ARARANGUÁ
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

MATERIAL DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

Transferências de calor: Uma UEPS apoiada pelo uso do Arduino

Delson Antonio da Silva Júnior
Orientador Prof. Dr. Evy Augusto Salcedo Torres

Araranguá

2022

Delson Antonio da Silva Júnior

Transferências de calor: Uma UEPS apoiada pelo uso do Arduino

Material de apoio ao professor como produto educacional
apensado à dissertação submetida ao Programa de
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de Mestre em Ensino de Física.
Orientador: Prof. Dr. Evy Augusto Salcedo Torres

Araranguá

2022

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Placa de Arduino.....	196
Figura 2 - Interface do ArduinoDroid.....	197
Figura 3 - Circuito do LED acionado por uma porta de saída do Arduino	198
Figura 4 - Conexão do Arduino com o celular	199
Figura 5 - Esquema de conversão da temperatura em um código digital.....	201
Figura 6 - Ligação do sensor LM35 à placa de Arduino	204
Figura 7 - Comunicação da placa de Arduino com o smartphone.....	204
Figura 8 - Interface do aplicativo ArduinoDroid.....	206
Figura 9 - Abrindo o monitor serial do ArduinoDroid	207
Figura 10 - Monitor serial do ArduinoDroid	207
Figura 11 - Condução de calor em um cristal.....	209
Figura 12 - Corrente de calor fluindo pelo cilindro.....	210
Figura 13 - Foto do experimento montado	211
Figura 14 - Detalhe dos resistores, da barra de alumínio e da fita térmica	213
Figura 15 - Detalhe de tiras da fita térmica coladas no resistor	213
Figura 16 - Detalhe dos resistores fixados na barra de alumínio	214
Figura 17 - Detalhe do dissipador, pastilha Peltier e junta de isolamento.....	214
Figura 18 - Fixação da junta de isolamento ao dissipador de calor.....	215
Figura 19 - Detalhe da aplicação da pasta térmica à pastilha Peltier	215
Figura 20 - Detalhe da pastilha Peltier instalada sobre o dissipador de calor	216
Figura 21 - Detalhe da fixação dos sensores à barra de alumínio	216
Figura 22 - Detalhe da identificação dos fios	217
Figura 23 - Foto da primeira camada de isolamento, feita com manta térmica aluminizada. 218	
Figura 24 - Segunda camada de isolamento com espuma térmica.....	218
Figura 25 - Fechamento da espuma térmica com braçadeiras de nylon.....	218
Figura 26 - Detalhe da camada de gelo formada na superfície da pastilha Peltier.....	219
Figura 27 - Circuito do resistor.....	219
Figura 28 - Circuito da pastilha Peltier (fonte fria)	220
Figura 29 - Esquema de ligação dos sensores DS18B20	221
Figura 30 - Como incluir uma nova biblioteca a ser utilizada pela IDE Arduino.....	222
Figura 31 - Telas da IDE do Arduino- configuração de comunicação.....	223

Figura 32 - Botões para compilar e de upload do sketch.	224
Figura 33 - Ícone do botão do monitor serial.	225
Figura 34 - Tela da IDE do Arduino, em que o monitor serial mostra os endereços dos sensores.	225
Figura 35 - Configurações do PLX-DAQ	227
Figura 36 - Medindo as posições dos sensores ao longo da barra de alumínio.....	229
Figura 37 - Método para obtenção da equação da reta.....	230
Figura 38 - Desenhando o um gráfico no Microsoft Excel	231
Figura 39 - Obtendo a equação da curva de tendência com o Microsoft Excel.	231
Figura 40 - Dimensões do resistor cerâmico	232
Figura 41 - Gráfico desenhado no Microsoft Excel	235
Figura 42 - Experimento da cuba de ondas	239
Figura 43 - Bases da cuba de ondas.....	241
Figura 44 - Detalhe da fixação das barras roscadas com porca e arruela.....	241
Figura 45 - Fixação do travessão central	242
Figura 46 - Fixação da matriz de contatos, placa de Arduino e Módulo Ponte H ao travessão central	243
Figura 47 - Fixação dos ganchos ao travessão central.....	243
Figura 48 - Motor com carga excêntrica	244
Figura 49 - Destaque do conjunto oscilador.....	244
Figura 50 - Detalhe do conjunto oscilador pendurado em elásticos de borracha	245
Figura 51 - Experimento montado e em funcionamento	245
Figura 52 - Esquema de ligação dos componentes eletroeletrônicos da cuba de ondas.....	246
Figura 53 - Ondas numa superfície d'água	248
Figura 54 - Reflexão das ondas após incidirem sobre uma barreira rígida	249
Figura 55 - Transmissão das ondas após incidirem sobre uma barreira fina e flexível.....	249
Figura 56 - Absorção das ondas após incidirem sobre uma barreira esponjosa.....	250
Figura 57 - Slide 1 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	251
Figura 58 - Slide 2 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	251
Figura 59 - Slide 3 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	252
Figura 60 - Slide 4 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	252
Figura 61 - Slide 5 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	252

Figura 62 - Slide 6 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	253
Figura 63 - Slide 7 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	253
Figura 64 - Slide 8 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	253
Figura 65 - Slide 9 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	254
Figura 66 - Slide 10 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	254
Figura 67 - Slide 11 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	254
Figura 68 - Slide 12 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	255
Figura 69 - Slide 13 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	255
Figura 70 - Slide 14 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	255
Figura 71 - Slide 15 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	256
Figura 72 - Slide 16 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	256
Figura 73 - Slide 17 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas	256
Figura 74 - Slide 1 da aula sobre Radiação de corpo negro	257
Figura 75 - Slide 2 da aula sobre Radiação de corpo negro	258
Figura 76 - Slide 3 da aula sobre Radiação de corpo negro	258
Figura 77 - Slide 4 da aula sobre Radiação de corpo negro	258
Figura 78 - Slide 5 da aula sobre Radiação de corpo negro	259
Figura 79 - Slide 6 da aula sobre Radiação de corpo negro	259
Figura 80 - Slide 7 da aula sobre Radiação de corpo negro	259
Figura 81 - Slide 8 da aula sobre Radiação de corpo negro	260
Figura 82 - Slide 9 da aula sobre Radiação de corpo negro	260
Figura 83 - Slide 10 da aula sobre Radiação de corpo negro	260
Figura 84 - Slide 11 da aula sobre Radiação de corpo negro	261
Figura 85 - Slide 12 da aula sobre Radiação de corpo negro	261
Figura 86 - Slide 13 da aula sobre Radiação de corpo negro	261
Figura 87 - Slide 14 da aula sobre Radiação de corpo negro	262
Figura 88 - Slide 15 da aula sobre Radiação de corpo negro	262
Figura 89 - Slide 16 da aula sobre Radiação de corpo negro	262
Figura 90 - Slide 17 da aula sobre Radiação de corpo negro	263
Figura 91 - Slide 18 da aula sobre Radiação de corpo negro	263
Figura 92 - Slide 19 da aula sobre Radiação de corpo negro	263
Figura 93 - Curva de emissão de um corpo aquecido.....	265

Figura 94 - Preparo da caixa de isopor	269
Figura 95 - Detalhe do experimento montado	270
Figura 96 – Experimento montado, visto de outro ângulo.	271
Figura 97 - Experimento em operação	271
Figura 98 - Diagrama de ligação do circuito da lâmpada.....	272
Figura 99 - Diagrama de ligação dos sensores à placa de Arduino	272
Figura 100 - Diagrama de ligação do MLX90614	273
Figura 101 - Biblioteca Adafruit_MLX90614.....	273
Figura 102 - Como instalar uma nova biblioteca na IDE Arduino.....	274
Figura 103 - Acesso a ferramentas Arduino Uno	278
Figura 104 - Como salvar um arquivo do PLX-DAQ	279
Figura 105 - Transmissão Baud.....	279
Figura 106 - Espectro eletromagnético.....	282
Figura 107 - Movimento de Convecção	284
Figura 108 - Montagem do experimento	285
Figura 109 Vista do sensor termopar com o fundo da tampa intermediária do ferro virado para baixo	286
Figura 110 - Vista do sensor termopar com o fundo da tampa intermediária do ferro virado para cima	287
Figura 111 - Detalhe das posições de cada componente do experimento	287
Figura 112 - Montagem do circuito do ferro de passar	288
Figura 113 - Montagem do circuito do ventilador.....	288
Figura 114 - Diagrama de ligação do sensor termopar e do display LCD à placa de Arduino	289

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Temperatura de cada sensor228

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	190
2	PROPOSTA DE UEPS PARA ENSINAR OS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO, RADIAÇÃO E CONVECÇÃO	191
2.1	SITUAÇÕES INICIAIS	191
2.2	SITUAÇÕES-PROBLEMA	192
2.3	ABORDAGEM DO TEMA CENTRAL	193
2.4	RETOMADAS	194
2.5	AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM	195
3	PRIMEIRA ATIVIDADE - CONHECENDO O ARDUINO	196
3.1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	196
3.2	INSTALAÇÃO DO ARDUINODROID	197
3.3	PROGRAMANDO O ARDUINO	197
3.3.1	Criando um programa	197
3.4	COLOCANDO O ARDUINO PARA FUNCIONAR	198
3.4.1	Montagem do circuito externo	198
3.4.2	Conexão do Arduino com o celular	199
3.4.3	Fazendo o ‘upload’ do programa	199
3.5	VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO	199
3.6	REFLETINDO SOBRE O EXPERIMENTO	200
4	SEGUNDA ATIVIDADE - CONSTRUINDO UM TERMÔMETRO DIGITAL COM O SENSOR LM35	201
4.1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	201
4.2	LIGAÇÕES DA PLACA DE ARDUINO	203
4.2.1	Ligação do sensor LM35	203
4.2.2	Conexão do Arduino com o celular	204

4.3	PROGRAMANDO O ARDUINO.....	204
4.4	UTILIZANDO O SEU TERMÔMETRO DIGITAL	206
4.5	REFLETINDO SOBRE O EXPERIMENTO (PARTE PARA ENTREGAR VALENDO NOTA)	208
5	TERCEIRA ATIVIDADE – CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA BARRA METÁLICA	209
5.1	ROTEIRO DO PROFESSOR.....	209
5.1.1	Introdução teórica	209
5.1.2	Procedimentos de montagem	211
5.1.2.1	<i>Descrição do experimento</i>	<i>211</i>
5.1.2.2	<i>Lista de materiais</i>	<i>211</i>
5.1.2.3	<i>Montagem da barra de alumínio com sensores, resistor e pastilha Peltier.....</i>	<i>212</i>
5.1.2.4	<i>Montagem do circuito do resistor (fonte quente)</i>	<i>219</i>
5.1.2.5	<i>Montagem do circuito da pastilha Peltier (fonte fria).....</i>	<i>220</i>
5.1.2.6	<i>Montagem do circuito dos sensores de temperatura fixados na barra de alumínio</i>	<i>220</i>
5.1.3	Procedimentos de programação	221
5.1.3.1	<i>Programação do Arduino com software para computador (IDE)</i>	<i>221</i>
5.1.3.2	<i>Download e instalação do software (IDE)</i>	<i>222</i>
5.1.3.3	<i>Download da ferramenta para aquisição de dados do Arduino pelo Microsoft Excel</i>	<i>222</i>
5.1.3.4	<i>Instalação de novas bibliotecas no Arduino.....</i>	<i>222</i>
5.1.3.5	<i>Configuração do software (IDE) para a comunicação do Arduino com o computador.....</i>	<i>223</i>
5.1.3.6	<i>Sketch para identificação dos endereços dos sensores</i>	<i>223</i>
5.1.3.7	<i>Sketch para a leitura dos dados dos sensores</i>	<i>225</i>
5.1.4	Manuseio do experimento e coleta de dados	227

5.1.4.1	<i>Selecionando dados do regime estacionário</i>	228
5.1.5	Análise dos dados	229
5.1.5.1	<i>Construindo um gráfico $T=f(x)$</i>	229
5.1.5.2	<i>Obtendo a equação da condução de calor com o gráfico desenhado na folha de papel milimetrado</i>	229
5.1.5.3	<i>Obtendo a equação da condução de calor com o programa Microsoft Excel</i>	231
5.1.5.4	<i>Estimativa da corrente de calor que atravessa a barra de alumínio</i>	232
5.1.6	Reflexões sobre o experimento	233
5.2	TABELA DE DADOS – PARTE 1 (COLETA DOS ALUNOS).....	234
5.3	ROTEIRO DO ALUNO – PARTE 2 (OBTENÇÃO DA LEI DE FOURIER A PARTIR DA CONSTRUÇÃO DE UM GRÁFICO COM DADOS EXPERIMENTAIS)....	235
5.3.1	Construção do gráfico da temperatura em função da posição	235
5.3.2	Obtendo a equação da condução de calor para o experimento realizado	235
5.3.3	A Lei de Fourier	236
5.4	QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM SOBRE A CONDUÇÃO DE CALOR.....	238
6	QUARTA ATIVIDADE - INTRODUÇÃO AOS FENÔMENOS ONDULATÓRIOS PARA O ESTUDO DA RADIAÇÃO TÉRMICA	239
6.1	APRESENTAÇÃO.....	239
6.2	PROCEDEDIMENTOS DE MONTAGEM.....	239
6.2.1	Lista de materiais	239
6.2.2	Construção do gerador de oscilações	240
6.2.3	Esquema de ligação	246
6.2.4	Programação do Arduino	246
6.3	EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO E DISCUSSÃO SOBRE AS OBSERVAÇÕES	247

7	QUINTA ATIVIDADE – AULA EXPOSITIVA SOBRE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	251
7.1	NOTAS DE AULA.....	251
7.2	REFLEXÕES SOBRE O CONTEÚDO ESTUDADO	257
8	SEXTA ATIVIDADE – AULA EXPOSITIVA SOBRE RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO	257
8.1	NOTAS DE AULA.....	257
8.2	REFLEXÕES SOBRE O CONTEÚDO ESTUDADO	264
9	SÉTIMA ATIVIDADE - EMISSÃO E ABSORÇÃO DE CALOR POR UM CORPO CLARO E POR UM CORPO ESCURO	265
9.1	ROTEIRO DO PROFESSOR.....	265
9.1.1	Introdução teórica	265
9.1.2	Procedimentos de montagem	266
9.1.2.1	<i>Descrição do experimento</i>	266
9.1.2.2	<i>Lista de materiais</i>	267
9.1.2.3	<i>Construção do experimento</i>	268
9.1.2.4	<i>Montagem do circuito da lâmpada.....</i>	272
9.1.2.5	<i>Conexão dos sensores à placa de Arduino</i>	272
9.1.3	Procedimentos de Programação do Arduino	273
9.1.3.1	<i>Instalação de novas bibliotecas no Arduino.....</i>	273
9.1.3.2	<i>Sketch para coleta dos dados do objeto preto.....</i>	275
9.1.3.3	<i>Sketch para coleta dos dados do objeto branco</i>	276
9.1.3.4	<i>Configuração do software (IDE) para a comunicação do Arduino com o computador.....</i>	277
9.1.4	Manuseio do experimento	278
9.1.5	Execução do experimento.....	280
9.1.6	Discussões sobre o experimento e avaliação da aprendizagem	281

10	OITAVA ATIVIDADE - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR	
	CONVECÇÃO	283
10.1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	283
10.2	PROCEDIMENTOS.....	285
10.2.1	Descrição do experimento	285
10.2.2	Lista de materiais	285
10.2.3	Construção do experimento	286
10.2.4	Montagem do circuito do ferro de passar	288
10.2.5	Montagem do circuito do ventilador	288
10.2.6	Montagem do circuito para ligação do sensor e do display placa de Arduino	288
10.3	PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO COM <i>SOFTWARE</i> PARA COMPUTADOR (IDE)	289
10.3.1	Instalação de novas bibliotecas no Arduino	289
10.3.2	<i>Sketch</i> para o funcionamento do experimento	289
10.4	MANUSEIO DO EXPERIMENTO, COLETA E ANÁLISE DOS DADOS	290
10.5	AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM	292
11	CONSIDERAÇÕES FINAIS	293
	REFERÊNCIAS	295
	APÊNDICE A - RESPOSTAS DAS PERGUNTAS PROPOSTAS AO FINAL DE CADA ATIVIDADE	298

1 APRESENTAÇÃO

Prezado(a) Professor(a),

Este material apresenta uma sequência de roteiros de aula que abordam o estudo sobre as trocas de calor com estudantes do ensino médio. As atividades propostas, em sua maioria, envolvem o uso da Plataforma Arduino para a construção de experimentos que visam à demonstração de fenômenos térmicos. Tais atividades foram complementadas com aulas expositivas que são necessárias para a construção de conhecimentos prévios e envolvem o uso de simuladores do Projeto PhET da Universidade do Colorado.

O uso do Arduino tem o potencial de contribuir para a compreensão e o uso mais consciente de tecnologias atuais. Sobre o tema das trocas de calor, as atividades propostas apresentam um percurso que se alicerça em conceitos clássicos, como a Lei de Fourier para a transferência por condução e a Lei de Resfriamento de Newton para a convecção. No entanto, a Física Moderna também é abordada quando o assunto é a transferência de calor por radiação, em que a Lei de Planck para o modelo do corpo negro é referência utilizada.

Os roteiros de aula podem ser classificados em três categorias: Roteiros acessórios com Arduino; Roteiros acessórios com simuladores PhET-Colorado; e Roteiros principais com Arduino.

Os roteiros acessórios, sejam com Arduino, sejam com simuladores PhET-Colorado, contém atividades que abordam temas considerados como conhecimentos prévios, que são necessários para uma aprendizagem significativa dos conceitos considerados como objetos principais deste trabalho.

São três roteiros ditos principais, que formam a base deste produto educacional: experimento da condução de calor em uma barra metálica; experimento sobre radiação térmica absorvida por um corpo claro e outro escuro; e o experimento sobre o resfriamento da chapa metálica de um ferro de passar por meio da convecção forçada de um pequeno ventilador.

2 PROPOSTA DE UEPS PARA ENSINAR OS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO, RADIAÇÃO E CONVECÇÃO

Objetivo: Ensinar os processos de transferência de calor com uma abordagem que envolve conceitos clássicos e modernos da Física, por meio do uso de tecnologias atuais.

2.1 SITUAÇÕES INICIAIS

Considerando que esta proposta aborda três processos de transferência de calor, cada um deles exige um rol específico de ações que visam ao levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos.

Condução

A discussão teórica sobre o tema da condução de calor deve ser antecedida de duas atividades: uma para a apresentação da Plataforma Arduino aos estudantes (Primeira Atividade); e outra para a construção de um termômetro digital (Segunda Atividade); A primeira atividade tem caráter introdutório sobre a tecnologia utilizada. A segunda atividade envolve os alunos em outra atividade prática que, além de possibilitar o surgimento de dúvidas, também tem o potencial de revelar o que eles já sabem sobre os conceitos de calor e temperatura.

Radiação

O tema da transferência de calor por radiação deve ser antecedido de duas atividades que pretendem construir uma base sobre a qual se pretende apoiar as discussões posteriores: uma demonstração experimental sobre fenômenos ondulatórios em uma superfície d'água, com o uso de uma cuba de ondas (Quarta Atividade); e uma aula expositiva e dialogada sobre ondas eletromagnéticas, que utiliza o apoio de simuladores do Projeto PhET da Universidade do Colorado (Quinta Atividade). A atividade experimental auxilia no ensino dos conceitos de transmissão, absorção, reflexão e interferência de ondas, que são importantes para o tema da radiação térmica, especialmente os três primeiros. A aula expositiva enfatiza a origem das ondas eletromagnéticas na matéria e apresenta a radiação térmica dos corpos como uma das variantes desse fenômeno.

Convecção

O processo de transferência de calor por convecção pode ser iniciado com uma discussão sobre processos cujos efeitos são facilmente percebidos pelos alunos em seu cotidiano, tais como: o resfriamento de uma xícara de café, ou a ebulição da água em uma chaleira, por exemplo. Nessa conversa, é importante que o professor avalie o grau de compreensão que os estudantes têm sobre conceitos que envolvem os fluidos, como: densidade, volume e força de empuxo.

2.2 SITUAÇÕES-PROBLEMA

As ações propostas aqui são organizadores prévios que procuram estabelecer uma ligação entre o que os estudantes já sabem e o que se pretende ensinar a eles.

Condução

Sobre o tema da condução de calor é proposta a realização de uma demonstração experimental em que uma barra de alumínio é submetida a uma diferença de temperatura entre as suas extremidades (Terceira Atividade, Roteiro do aluno, parte 1). Esta atividade se aproxima mais do objetivo de discutir o fenômeno desejado, demonstrando na prática o conceito de regime estacionário. Após a obtenção de medidas com sensores eletrônicos localizados em diferentes pontos da barra metálica, os alunos devem construir um gráfico da temperatura em função da posição. Espera-se que eles percebam a relação aproximadamente linear que existe entre essas duas grandezas.

Radiação

No que diz respeito ao tema da radiação, as situações-problema são norteadas pelas seguintes perguntas:

- 1) O que pode acontecer com a luz e radiações eletromagnéticas de outros comprimentos de onda quando incidem sobre um objeto sólido?
- 2) O que ocorre com a variação da temperatura de um corpo quando ele absorve radiação térmica? E quando ele emite?
- 3) O que aconteceria a um corpo que fosse capaz de absorver toda a radiação que incidisse sobre ele? Esse corpo existe?
- 4) Em que faixa do espectro eletromagnético se encontra o comprimento de onda emitido com maior intensidade pela radiação solar?

Tais questionamentos são discutidos numa aula expositiva sobre a radiação de corpo negro (Sexta Atividade).

Convecção

Quanto ao tema da convecção, a situação-problema é conduzida por uma discussão sobre as condições de equilíbrio de um corpo no interior de um fluido, em que ele fica submetido à ação das forças de empuxo e da gravidade. Tal debate é um organizador prévio para a continuidade do assunto, em que as ideias apresentadas são aplicadas ao movimento do próprio fluido, quando este troca calor com o meio externo.

2.3 ABORDAGEM DO TEMA CENTRAL

A abordagem do tema deve mobilizar os conhecimentos prévios dos alunos e promover a modificação dos mesmos, tornando-os mais inclusivos e abrangentes (diferenciação progressiva).

Condução

O gráfico obtido no experimento da condução de calor na barra de alumínio deve ser utilizado para a obtenção da equação linear que relaciona a temperatura com a posição de cada sensor utilizado (Terceira Atividade, Roteiro do aluno, parte 2). Após transformar dados experimentais numa informação visual, agora o aluno é levado a refletir sobre a representação matemática do fenômeno em estudo. Nesta etapa, é estabelecida a relação entre o conceito matemático de coeficiente angular de uma reta e o conceito físico de taxa de variação da temperatura em função da posição. Espera-se que o aluno compreenda que é o fluxo constante de calor que estabelece a condição estacionária de uma temperatura fixa em cada ponto ao longo do comprimento da barra. Os conceitos de calor e temperatura devem sofrer a modificação esperada, com o avanço da discussão que utiliza princípios de matemática básica.

Radiação

Após utilizar os recursos gráficos de simuladores para a problematização de temas como ondas eletromagnética e o modelo do corpo negro, nesta etapa, o tema da radiação térmica é abordado com uma demonstração experimental, em que um corpo claro e outro escuro são submetidos à incidência de luz visível e infravermelha de uma lâmpada incandescente (Sétima Atividade). A discussão promovida em torno da realização do experimento tem o potencial de

consolidar e dar mais sentido aos conceitos de absorção e reflexão, além de demonstrar o efeito da radiação térmica sobre os corpos.

Convecção

Uma vez que o aluno esteja familiarizado com os conceitos de densidade, volume, força de empuxo e força gravitacional, é chegado o momento em que o professor deve oferecer uma breve explanação de como essas ideias se relacionam no processo de transferência de calor por convecção. A introdução teórica da Oitava Atividade oferece uma explicação suficiente para esta etapa e a demonstração experimental que a acompanha complementa e enriquece a discussão.

2.4 RETOMADAS

As retomadas são ações que sucedem a abordagem do tema central, de modo a promover o aprofundamento do mesmo e/ou a integração entre os conceitos discutidos (reconciliação integrativa).

Condução

A retomada das discussões sobre o fenômeno da condução de calor é conduzida pelo professor para auxiliar os alunos a reconhecer que a equação linear obtida com os dados experimentais expressa a Lei de Fourier. Aqui, passam a fazer parte da discussão os aspectos construtivos do experimento, tais como o material do qual a barra utilizada é feita (por causa da condutividade térmica) e as suas dimensões físicas (como a área da seção transversal), além da tentativa de estimar a quantidade de calor que transita neste meio.

Radiação

No tema da radiação térmica, a retomada é feita com a análise dos dados obtidos experimentalmente. A emissividade, a potência dissipada (por área) e o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação é máxima são estimados em cálculos que conduzem a discussão em sala de aula. Neste momento, as aparentes inconsistências entre os resultados previstos pela teoria e os resultados obtidos pela prática devem ser discutidas e resolvidas.

Convecção

Quanto à convecção, a retomada também envolve uma discussão em torno dos dados experimentais obtidos, para a realização de um cálculo estimativo da quantidade de calor que é possível se retirar da chapa de um ferro de passar com a utilização de um pequeno ventilador.

Nesta etapa, o tema é aprofundado com a apresentação da Lei de Resfriamento de Newton, que é utilizada na referida estimativa.

2.5 AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM

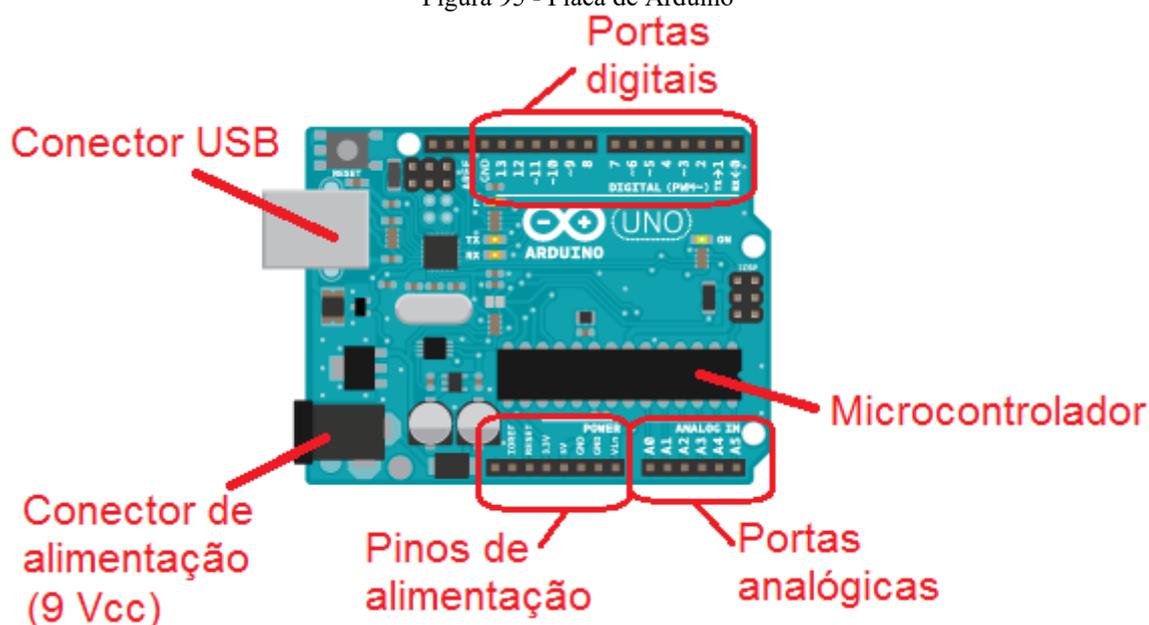
A avaliação da aprendizagem poderá ocorrer por meio das folhas de registro que os alunos devolvem ao final de cada atividade. Este seria um instrumento de avaliação contínua, em que a participação efetiva dos estudantes é o critério principal. O somatório dessas folhas de registro representaria 50% da nota final. Outro instrumento adotado seria um questionário individual a ser aplicado ao final dos experimentos principais (experimento da condução, experimento da radiação e experimento da convecção). Os três questionários comporiam os outros 50% da nota final. A adoção dessas sugestões fica a critério do professor que estiver conduzindo a sequência didática.

3 PRIMEIRA ATIVIDADE - CONHECENDO O ARDUINO

(Duração prevista: 2 horas-aula de 40 minutos cada, em sequência.)

3.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Figura 95 - Placa de Arduino



Fonte: Anotações do Autor em figura obtida na página do Arduino³⁵ (2021)

O Arduino é essa placa da Figura 1, cuja peça principal é um microcontrolador. Este circuito integrado (popularmente chamado de ‘chip’) é mais simples que o microprocessador do seu celular, tablet ou computador, mas é da mesma família. De acordo com o programa que estiver armazenado em sua memória, o microcontrolador do Arduino irá receber informações do (ou enviar para o) mundo exterior. Essas informações entram ou saem do arduino por meio das portas digitais e analógicas que estão destacadas na figura. Por exemplo: Você pode ter um sensor eletrônico de temperatura conectado à porta analógica “A1”. Este sensor vai emitir um sinal elétrico (que é informação) correspondente ao valor da temperatura que ele está medindo. O microcontrolador recebe essa informação e toma uma decisão, de acordo com o programa que está gravado em sua memória. Esta decisão pode ser o desligamento (deixar a tensão elétrica igual a zero) da porta digital n.º 3. Se esta porta que foi desligada estiver conectada a um relé (que é uma chave que precisa de energia elétrica para funcionar), este componente pode

³⁵ Disponível em: <https://www.arduino.cc/>.

cortar a energia de um ar condicionado. Pronto! Se você entendeu o que foi dito até aqui, você já capaz de compreender o funcionamento de um sistema microcontrolado para regular a temperatura de um ambiente. Podemos criar diversos sistemas microcontrolados com os diferentes sensores para Arduino disponíveis comercialmente. (ARDUINO, 2022)

3.2 INSTALAÇÃO DO ARDUINODROID

Os microcontroladores não fazem nada, sem que um humano diga a eles o que deve ser feito. As instruções que os humanos repassam aos microcontroladores são chamadas de programas (ou, no caso do Arduino, chamamos de *sketches*). Para escrevermos um *sketch* de Arduino, vamos utilizar um aplicativo específico para isso. Com um *smartphone* conectado à internet, abra o “*Play Store*”, pesquise pelo aplicativo “**ArduinoDroid**” e o instale. Pelo nome, você já deve ter suspeitado (e acertou!) que este aplicativo só funcionará no seu *smartphone*, se ele tiver o Android como sistema operacional.

Figura 96 - Interface do ArduinoDroid



Fonte: O Autor (2021)³⁶

3.3 PROGRAMANDO O ARDUINO

3.3.1 Criando um programa

- a) Abra o aplicativo ArduinoDroid e digite o programa (*sketch*) mostrado na Figura 2.

³⁶ O código que aparece na Figura é adaptado de ARDUINO (2021).

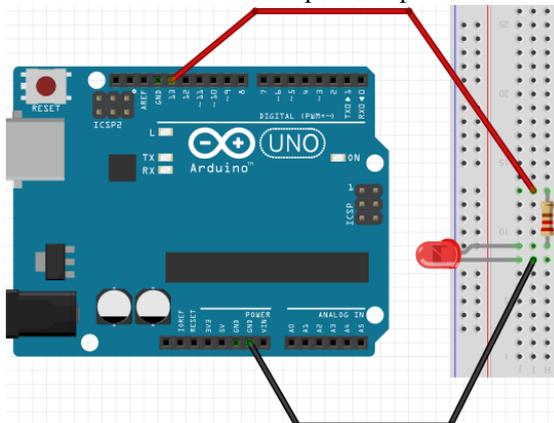
- b) O ArduinoDroid sugere um nome para o seu sketch. Mas, vamos salvá-lo com outro nome. Clique em “:” e siga o caminho **Sketch>>Save as to>>Device**. Escolha uma pasta e clique no ícone em forma de um lápis (canto superior direito da tela) para dar um nome ao seu sketch. Sugiro o nome: **piscaLed**. Clique em “✓” para confirmar o nome.
- c) Você digitou um programa em Linguagem “C”. Sei que, a princípio, ela parece um pouco difícil de entender. Mas, por incrível que pareça, a Linguagem “C” é mais simples que a linguagem compreendida pelas máquinas. Essas só entendem programas escritos em seqüências de “zeros” e “uns” (Exemplo: 10011001. Loucura, né?). Para traduzir da Linguagem “C” para a linguagem do microcontrolador, você precisa compilar o seu sketch. Para isso, clique no ícone em forma de raio. Nesta etapa, você será avisado pelo ArduinoDroid se o seu *sketch* tiver algum erro.

3.4 COLOCANDO O ARDUINO PARA FUNCIONAR

3.4.1 Montagem do circuito externo

O sketch escrito por você irá controlar um diodo emissor de luz (LED) por meio da porta digital n.º 13 da placa de Arduino. Dessa forma, conecte o terminal do resistor ao pino **13** do Arduino e o catodo do LED ao pino **GND** [significa “ground” (terra), que é o negativo da placa]. Veja a figura 3.

Figura 97 - Circuito do LED acionado por uma porta de saída do Arduino



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

3.4.2 Conexão do Arduino com o celular

Depois de escrever, salvar e compilar o seu sketch, chegou a hora de transferi-lo para a memória do microcontrolador. Para isso, conecte a placa de Arduino ao seu smartphone, utilizando os cabos de conexão USB (Figura 4).

Figura 98 - Conexão do Arduino com o celular



Fonte: O Autor (2021)

3.4.3 Fazendo o ‘upload’ do programa

Após realizar a conexão física com os cabos USB, transfira o sketch do smartphone para o Arduino, clicando no ícone com a forma de uma seta apontada para baixo (ícone destacado com a letra “d” na figura 2).

3.5 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Se o seu LED está piscando em intervalos de 1 segundo, parabéns! Você fez tudo certo. Se não, verifique se digitou o *sketch* corretamente [O sinal “;” (ponto e vírgula) ao final de cada linha de instrução indica que o programa deve passar para a linha seguinte. Se ele for esquecido, o seu *sketch* não irá funcionar.] e, também, verifique se conectou os fios aos pinos corretos do Arduino.

Após ter feito tudo funcionar, altere o número entre parênteses no comando “*delay*” para 500. Salve o *sketch* (pode ser *piscaLed2*), compile e faça um novo ‘*upload*’ para a placa de Arduino. E agora, o que aconteceu?

3.6 REFLETINDO SOBRE O EXPERIMENTO

Discutam em grupo e elaborem respostas para as perguntas abaixo.

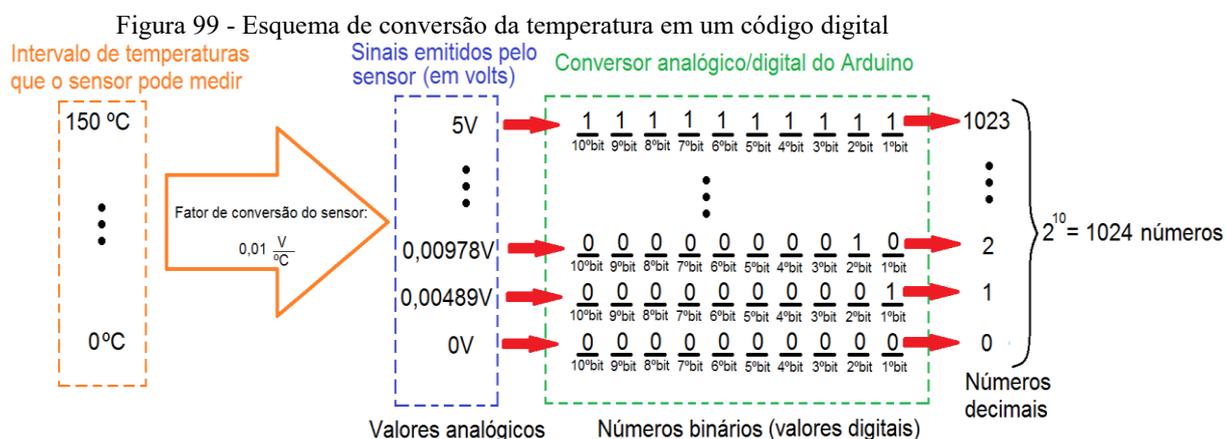
- 1) O que a placa de Arduino faz quando executa o comando “`digitalWrite(13,HIGH)`”?
- 2) O que a placa de Arduino faz quando executa o comando “`digitalWrite(13,LOW)`”?
- 3) O que a placa de Arduino faz quando executa o comando “`delay(1000)`”?
- 4) O uso do Arduino nos ajudará a construir experimentos didáticos sem a necessidade de muitos recursos, mas também nos leva a refletir sobre os processos de automação que substituem a força de trabalho humano pelas máquinas. Produza um breve texto, ressaltando os aspectos em que a sociedade é beneficiada e aqueles em que ela é prejudicada pelo uso das tecnologias.

4 SEGUNDA ATIVIDADE - CONSTRUINDO UM TERMÔMETRO DIGITAL COM O SENSOR LM35

(Duração prevista: 2 horas-aula de 40 minutos cada, em sequência.)

4.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Podemos medir a temperatura de um corpo (mundo real) e transformá-la numa informação digital (mundo virtual) com o auxílio de um sensor eletrônico de temperatura (LM35) e de um circuito embutido no interior do microcontrolador, chamado de conversor analógico-digital (A/D). Veja a Figura 5.



Fonte: O Autor (2021)

Como qualquer tipo de termômetro, o sensor irá trocar calor com o corpo que está em contato com ele até que as temperaturas dos dois se igualem. Alguma propriedade elétrica (normalmente a resistência) de um componente interno do sensor irá sofrer alterações que acompanham as mudanças da sua temperatura. Dessa forma, o sensor emitirá um valor de tensão na sua saída, que é correspondente ao valor da temperatura medida. No caso do sensor LM35, a tensão de saída aumentará 0,01V para cada aumento de 1°C na temperatura (TEXAS INSTRUMENTS, 2017). Fazendo uma regra de três simples, podemos escrever a relação entre temperatura e tensão para este sensor:

$$\begin{array}{l} \text{Tensão (volts)} \quad ______ \text{ Temperatura } (^{\circ}C) \\ 0,01 \quad ______ \quad 1 \\ V \quad ______ \quad T \end{array}$$

$$\frac{0,01}{V} = \frac{1}{T}$$

$$0,01T = V$$

$$T = \frac{V}{0,01}$$

Equação 1

A tensão elétrica na saída do sensor poderá assumir qualquer valor (incluindo frações) no intervalo entre 0 e 5V. Este sinal elétrico já é informação para o microcontrolador, mas é do tipo analógica (pois assume valores contínuos entre 0 e 5V). Essa informação analógica precisa ser transformada numa informação digital para que o microcontrolador do Arduino possa utilizá-la no *sketch* a ser processado. O conversor A/D faz esta função, recebendo o valor analógico do sensor e o convertendo em um código digital de 10 bits³⁷. Com essa quantidade de bits é possível criar $2^{10} = 1024$ códigos binários diferentes, que em números decimais correspondem à sequência do 0 ao 1023. Dividindo 5V por 1023 códigos, obtemos a relação de 0,00489V por código. Isso significa que o conversor A/D vai gerar na saída o código 0000000001 (correspondente ao número decimal 1), a partir do momento em que a tensão na sua entrada atingir o valor de 0,00489V. O próximo código a ser gerado será o 0000000010 (correspondente ao número decimal 2), quando a temperatura subir mais 0,00489V (atingindo o valor de 0,00978V). Esses incrementos sucessivos na tensão podem ocorrer até que o seu valor chegue a 5V, o que fará o conversor A/D gerar o código 1111111111 (correspondente ao número decimal 1023). Podemos fazer outra regra de três simples, agora, para encontrar a relação entre a tensão e o seu código digital correspondente (representado por um número decimal entre 0 e 1023).

Tensão (volts) _____ Código

5 _____ 1023

V _____ C

³⁷ Um bit é a unidade mínima de informação que pode ser armazenada num circuito digital. Esse bit pode assumir o valor 0 (zero) ou o valor 1 (um). O valor “zero” indica ausência de tensão numa determinada posição da memória digital. O valor “um” indica a presença de tensão (normalmente 5V) nessa mesma posição.

$$\frac{5}{V} = \frac{1023}{C}$$

$$1023V = 5C$$

$$V = \frac{5}{1023}C$$

Equação 2

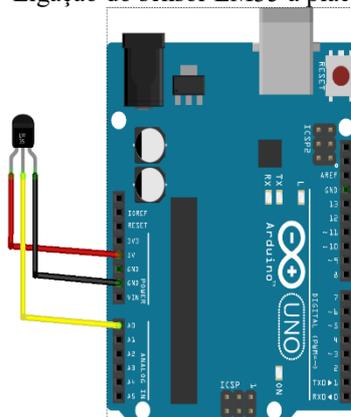
A equação 1 evidencia que o trabalho do sensor é converter a grandeza física temperatura na grandeza física tensão elétrica. A equação 2 mostra que o papel do conversor A/D é transformar a tensão elétrica (informação analógica) em um código numérico (informação digital). No *sketch* que escreveremos para o Arduino, vamos utilizar essas duas equações.

4.2 LIGAÇÕES DA PLACA DE ARDUINO

4.2.1 Ligação do sensor LM35

O sensor de temperatura LM35 tem três terminais. A alimentação do sensor é feita pelos terminais 1 e 3. O n.º 1 é conectado ao positivo da fonte de alimentação, ou seja, ao pino do Arduino que fornece 5V. O n.º 3 é conectado ao negativo da fonte, ou seja, ao pino GND. O terminal n.º 2 é por onde o sensor emite o seu sinal de saída. Ligaremos este terminal n.º 2 à porta analógica “A0” da mesma placa. Veja a figura 6.

Figura 100 - Ligação do sensor LM35 à placa de Arduino



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

4.2.2 Conexão do Arduino com o celular

Utilize os cabos fornecidos pelo professor para conectar a placa de Arduino ao seu smartphone, conforme a Figura 7.

Figura 101 - Comunicação da placa de Arduino com o smartphone



Fonte: O Autor (2021)

4.3 PROGRAMANDO O ARDUINO

Abra o aplicativo ArduinoDroid instalado em seu smartphone e digite (ou copie e cole) as seguintes linhas de comando em seu sketch.

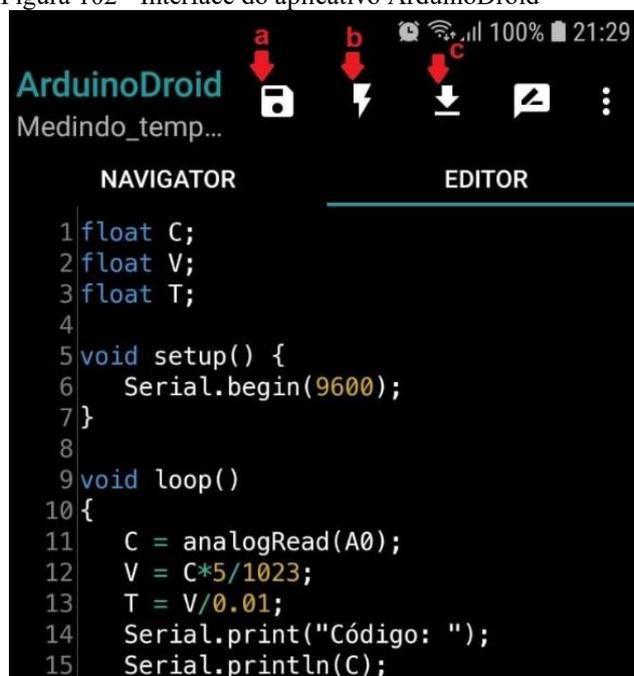
Sketch – Leitura do sensor LM35 com uma porta analógica

```
float C;  
float V;  
float T;  
  
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop()  
{  
  C = analogRead(A0);  
  V = C*5.0/1023.0;  
  T = V/0.01;  
  Serial.print("Código: ");  
  Serial.println(C);  
  Serial.print("Tensão elétrica: ");  
  Serial.print(V);  
  Serial.println(" volts");  
  Serial.print("Temperatura: ");  
  Serial.print(T);  
  Serial.println(" °C");  
  Serial.println(" ");  
  delay(5000);  
}
```

Fonte: Adaptado de NOGUEIRA (2018)

Salve (a), compile (b) e faça o upload do seu *sketch* para a memória do Arduino (c), conforme as indicações da Figura 8.

Figura 102 - Interface do aplicativo ArduinoDroid



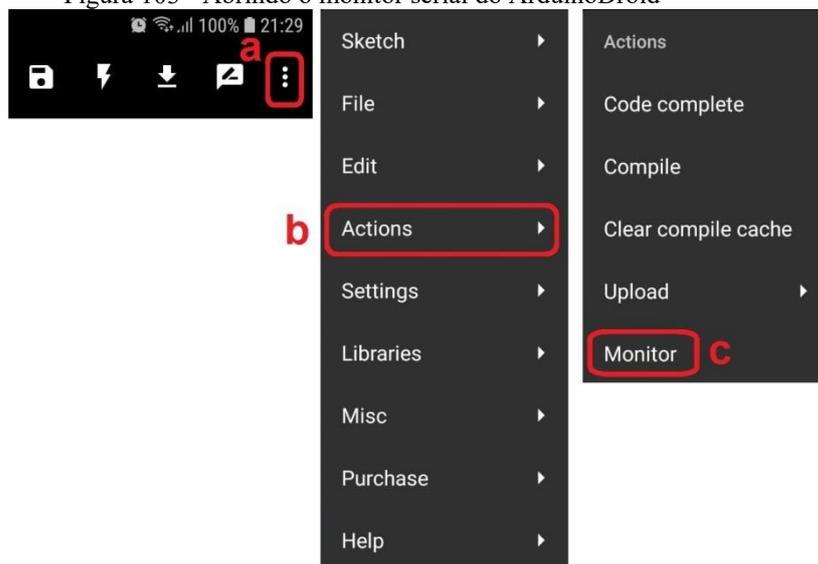
Fonte: O Autor (2021)

4.4 UTILIZANDO O SEU TERMÔMETRO DIGITAL

O resultado do processamento do nosso *sketch* pode ser visualizado por meio do monitor do ArduinoDroid. Tudo o que você digitou após o comando *Serial.print* (ou *Serial.println*) irá aparecer neste monitor. Observe as leituras obtidas, seguindo os seguintes passos:

1. Abra o monitor serial do ArduinoDroid (Figura 9) e:

Figura 103 - Abrindo o monitor serial do ArduinoDroid

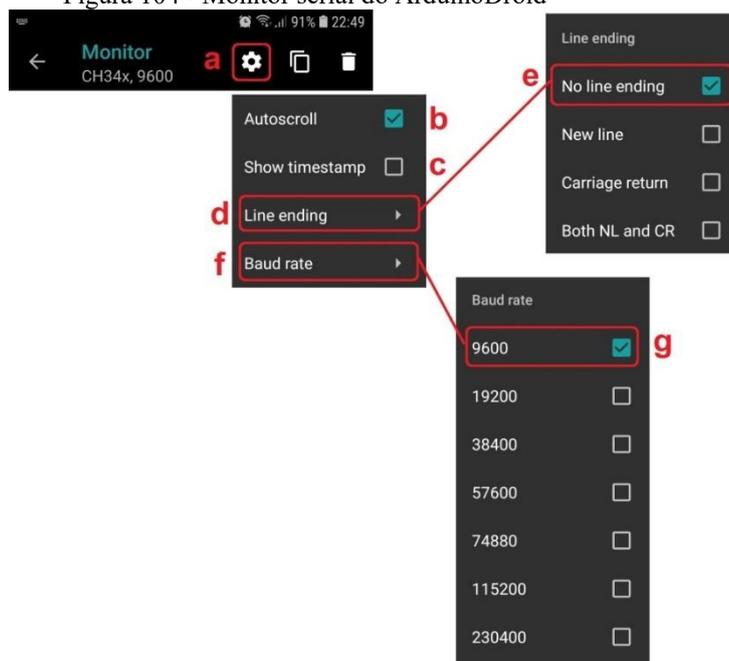


Fonte: O Autor (2021)

- a) Clique em “?”;
- b) Depois, clique em “Actions”;
- c) Por último, clique em “Monitor”.

2. Como configurar o monitor (Figura 10):

Figura 104 - Monitor serial do ArduinoDroid



Fonte: O Autor (2021)

- a) Clique no botão de configuração;
- b) Deixe a opção de rolagem automática (Autoscroll) habilitada;
- c) Desabilite a opção de mostrar a hora (Show timestamp);
- d) Clique em “Line ending”;
- e) Escolha a opção “No line ending”;
- f) Clique em “Baud rate” para selecionar a taxa de transmissão;
- g) Escolha a opção 9600.

3. Utilize uma fonte de calor moderada, como as suas mãos, para fazer variar a temperatura do sensor LM35 e observe os valores enviados pelo Arduino para a tela do seu *smartphone*.

4.5 REFLETINDO SOBRE O EXPERIMENTO (PARTE PARA ENTREGAR VALENDO NOTA)

Agora, responda as perguntas abaixo.

- 1) Qual foi o valor indicado pelo termômetro para a temperatura da sua mão? Esse valor foi diferente do valor que você esperava? Se sim, a quais motivos você atribui essa diferença?
- 2) Ao medir a temperatura da sua mão, você deve ter percebido que o valor indicado foi aumentando gradativamente até se estabilizar. Por que a temperatura não é lida instantaneamente? O que está ocorrendo durante a variação da temperatura e o que ocorreu quando o seu valor se estabilizou?
- 3) Da forma como utilizamos o sensor LM35 neste experimento, podemos utilizá-lo para medir a temperatura interna de um freezer? E para medir a temperatura interna de um forno de cozinha? E para medir a temperatura de uma chocadeira com ovos fertilizados de galinha? Você consegue sugerir outra aplicação para este sensor?
- 4) Será que podemos medir a temperatura de qualquer corpo com o sensor LM35 como, por exemplo, um grão de milho ou a água da piscina de um clube? Sim? Não? Por quê?
- 5) Você consegue identificar qual a linha de comando do sketch que executa a ordem para armazenar o valor lido na entrada analógica da placa de Arduino?

5 TERCEIRA ATIVIDADE – CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA BARRA METÁLICA

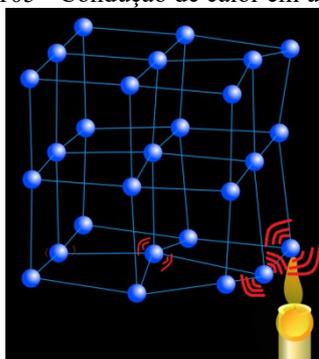
(Duração prevista: 8 horas-aula de 40 minutos cada, sendo 2 para a realização do experimento e a coleta de dados, 2 para a construção do gráfico, 2 para a obtenção da equação de Fourier e discussões teóricas, e 2 para avaliação da aprendizagem.)

5.1 ROTEIRO DO PROFESSOR

5.1.1 Introdução teórica

Aqui na região sul do Brasil é comum as pessoas instalarem fogões a lenha com placas de ferro fundido, seja para cozinhar, seja para aquecer o interior das casas. Se você tem um fogão desses, já deve ter percebido que o calor das chamas se propaga ao longo de toda a superfície da referida placa, fazendo a sua temperatura se elevar até mesmo em pontos mais afastados do fogo. Nesta situação o calor se propaga por condução no metal.

Figura 105 - Condução de calor em um cristal



Fonte: Página do Professor Vladimir Vascak³⁸ (2021)

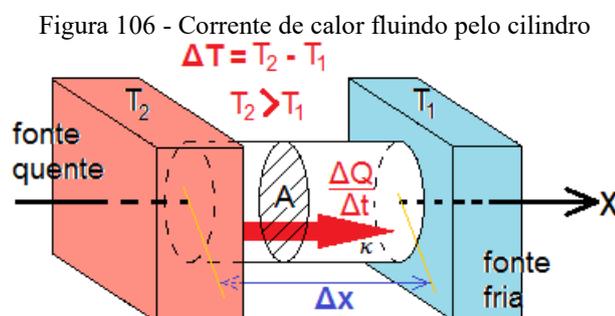
A Figura 11 nos oferece um modelo para compreender como esse processo ocorre num objeto sólido, cuja constituição tem um arranjo característico de um cristal³⁹. Ao aproximarmos uma fonte de calor a um material como esse, os átomos (ou moléculas) mais próximos irão

³⁸ Disponível em:

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mf_vnitni_energie&l=pt.

³⁹ Átomos dispostos em posições com distâncias regulares, formando um padrão geométrico bem definido que se repete ao longo de todo o material.

vibrar com mais intensidade em torno dos seus respectivos pontos de equilíbrio. Essa vibração provoca uma perturbação nos átomos vizinhos e, assim, o calor se propaga pelo material.



Fonte: O Autor (2021)

A análise do fluxo de calor num metal em escala atômica fica matematicamente inviável de se fazer na educação básica. Por isso, utilizaremos a Lei de Fourier, que nos oferece um modelo matemático menos complexo. Considere um cilindro metálico, cuja condutividade térmica é igual a κ , a sua área da seção transversal igual é a A e o seu comprimento é igual a Δx (figura 12). Quando colocamos uma das extremidades do cilindro em contato com uma fonte quente de calor (à temperatura T_2) e a outra extremidade em contato com uma fonte fria (à temperatura T_1), uma corrente térmica ($\frac{Q}{\Delta t}$, quantidade de calor Q num dado intervalo de tempo Δt) o percorre no sentido indicado pela seta vermelha na mesma figura. Se for possível impedir que a parede lateral do cilindro perca calor para o ambiente e se a variação da temperatura não depender do tempo, a corrente térmica será dada pela Lei de Fourier (NUSSENZVEIG, 1981, p. 282):

$$\frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x}, \text{ sendo } \Delta T = T_2 - T_1. \quad \text{Equação 3.}$$

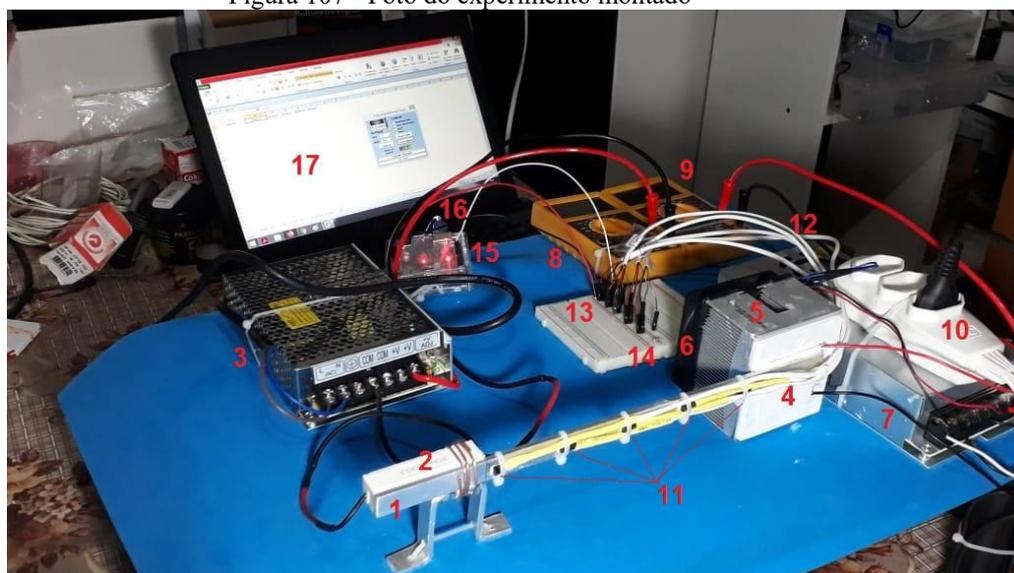
Portanto, o nosso objetivo nesta atividade é verificar experimentalmente as características da lei acima, a fim de compreendermos melhor o processo de transferência de calor por condução em um metal.

5.1.2 Procedimentos de montagem

5.1.2.1 Descrição do experimento

A ideia desse experimento é fazer com que o calor produzido pelo resistor seja conduzido por uma barra de alumínio até chegar à extremidade oposta, onde será colocado um dispositivo que se mantém a uma temperatura relativamente baixa (se comparada à temperatura do resistor), chamado pastilha Peltier. Ao longo da mesma barra, sensores eletrônicos nos darão informações sobre a temperatura em diferentes pontos. A figura 13 nos apresenta uma visão geral de como deve ficar a montagem desse experimento.

Figura 107 - Foto do experimento montado



Fonte: O Autor (2021)

5.1.2.2 Lista de materiais

1. Uma barra de alumínio com 29 cm de comprimento e seção retangular que mede 1,3 cm x 0,33 cm;
2. Resistor cerâmico de 120 Ω / 20W;
3. Uma fonte de 48 Vcc/150 W;
4. Uma pastilha Peltier TECI-12706 (12 Vcc);
5. Dissipador de alumínio para a pastilha Peltier;
6. Um ventilador (*cooler*) para resfriar o dissipador de alumínio;

7. Uma fonte de 12 Vcc/30 A;
8. Multímetro com função de amperímetro para medir a corrente do resistor cerâmico;
9. Multímetro com função de amperímetro para medir a corrente da pastilha Peltier;
10. Extensão elétrica para a alimentação das fontes.
11. Cinco sensores de temperatura DS18B20;
12. Matriz de contatos (*proto-board*);
13. Resistor de 4,7 k Ω ;
14. Placa de Arduino Uno;
15. Cabo USB para conexão da placa de Arduino ao computador;
16. Computador;
17. Fios para conexão dos sensores à matriz de contatos;
18. Ferro de solda;
19. Estanho;
20. Soprador térmico;
21. Espaguete termo retrátil;
22. Pasta térmica;
23. Fita térmica;
24. Braçadeiras de nylon;
25. Alicates de corte;
26. Alicates de bico.

5.1.2.3 Montagem da barra de alumínio com sensores, resistor e pastilha Peltier

Sugerimos começar pelo preparo dos resistores cerâmicos, soldando fios que prolonguem os seus terminais. Isole esses terminais com espaguete termo retrátil e o auxílio de um soprador térmico. A Figura 14 mostra dois resistores prontos para a fixação à barra de alumínio e um rolo de fita térmica.

Figura 108 - Detalhe dos resistores, da barra de alumínio e da fita térmica



Fonte: O Autor (2021)

Corte tiras da fita térmica e cole-as em uma das faces do resistor cerâmico, como mostrado na Figura 15. Como essa fita é adesiva nos dois lados, ela auxiliará na fixação dos resistores à barra de alumínio.

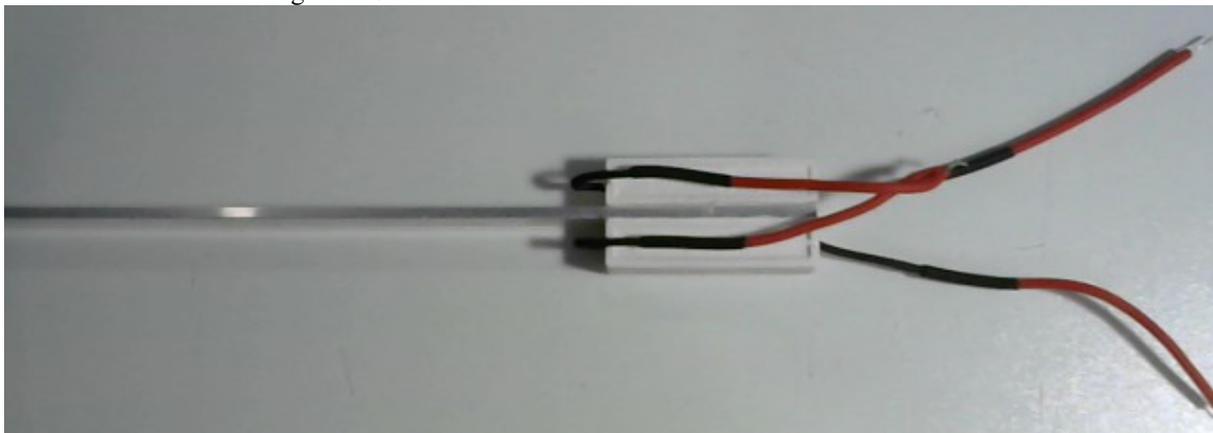
Figura 109 - Detalhe de tiras da fita térmica coladas no resistor



Fonte: O Autor (2021)

A Figura 16 mostra dois resistores fixados na barra de alumínio. Após a realização de testes, em que os dois resistores foram ligados em série e em paralelo, decidimos pelo uso de apenas um resistor.

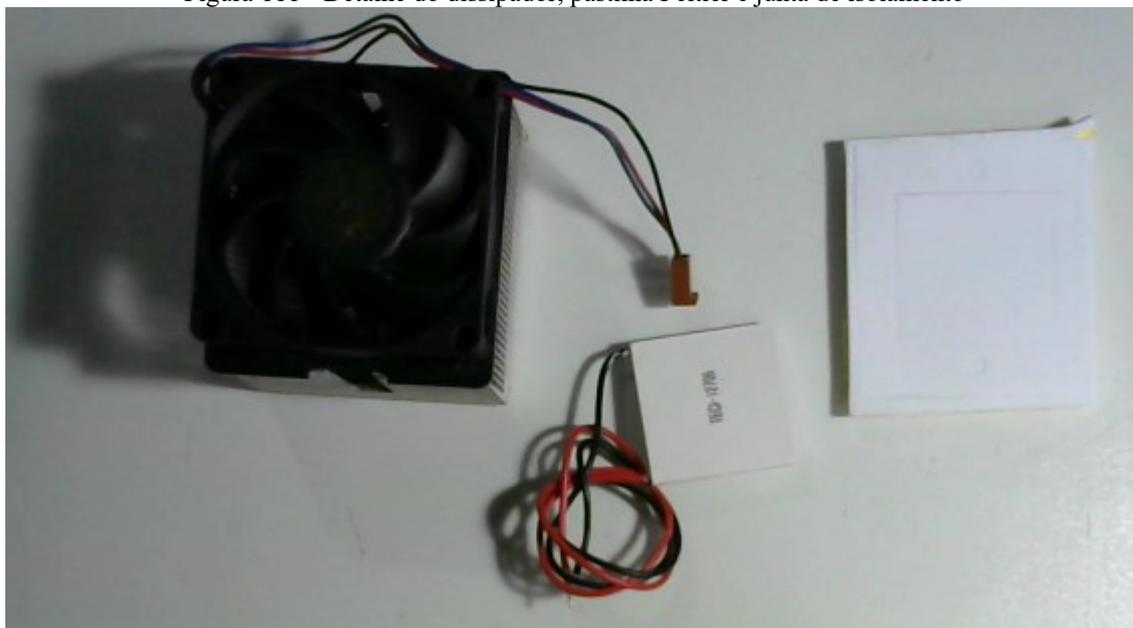
Figura 110 - Detalhe dos resistores fixados na barra de alumínio



Fonte: O Autor (2021)

Passemos para a montagem da pastilha Peltier sobre o dissipador de calor. A Figura 17 mostra a referida pastilha, o dissipador com um ventilador fixado a ele e, mais à direita, a junta de isolamento.

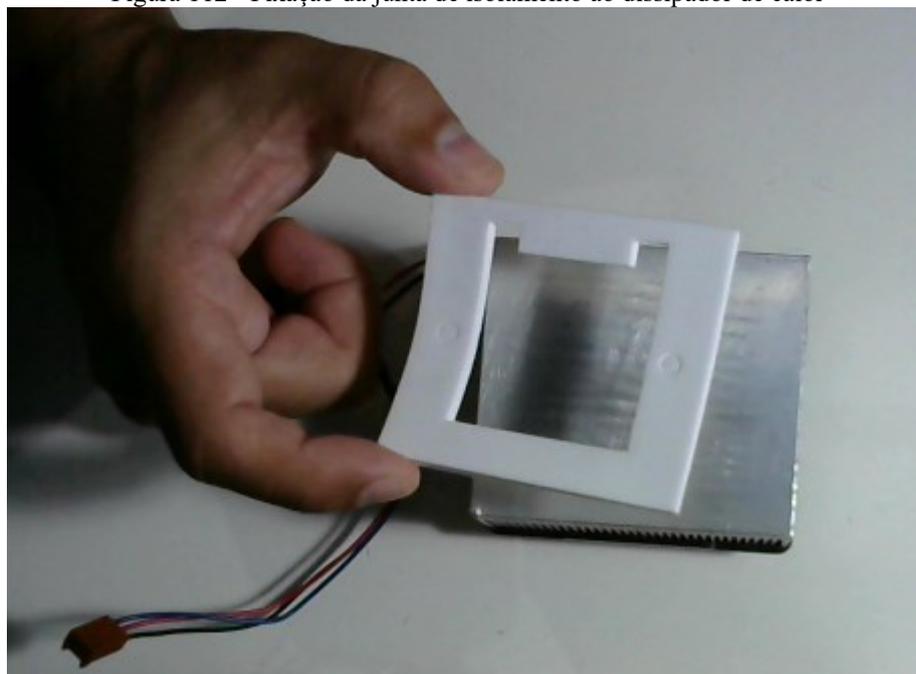
Figura 111 - Detalhe do dissipador, pastilha Peltier e junta de isolamento



Fonte: O Autor (2021)

Retire a parte central da junta de isolamento, remova a película da parte de trás e cole-a na face lisa do dissipador de calor (Figura 18). Esta junta é autoadesiva na parte de trás e, portanto, não precisará de mais nada para a sua fixação.

Figura 112 - Fixação da junta de isolamento ao dissipador de calor



Fonte: O Autor (2021)

Aplique uma fina camada de pasta térmica à face que não contém inscrição da pastilha Peltier, pois este é o lado que aquece. Na Figura 19, é demonstrada uma determinada quantidade de pasta térmica aplicada sobre a referida pastilha. É preciso espalhar essa pasta, formando uma camada fina e, se necessário, retirar o excesso.

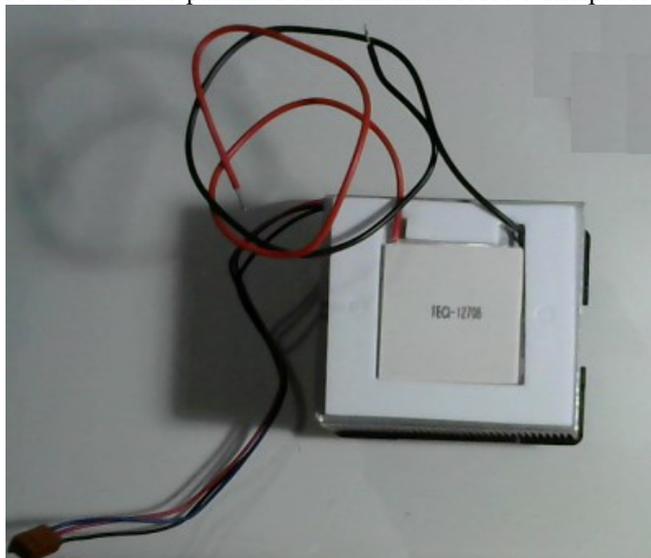
Figura 113 - Detalhe da aplicação da pasta térmica à pastilha Peltier



Fonte: O Autor (2021)

A montagem final da pastilha Peltier e da junta de isolamento ao dissipador de calor é mostrada na Figura 20. Observe que a face que se resfria da referida pastilha fica com a inscrição voltada para fora.

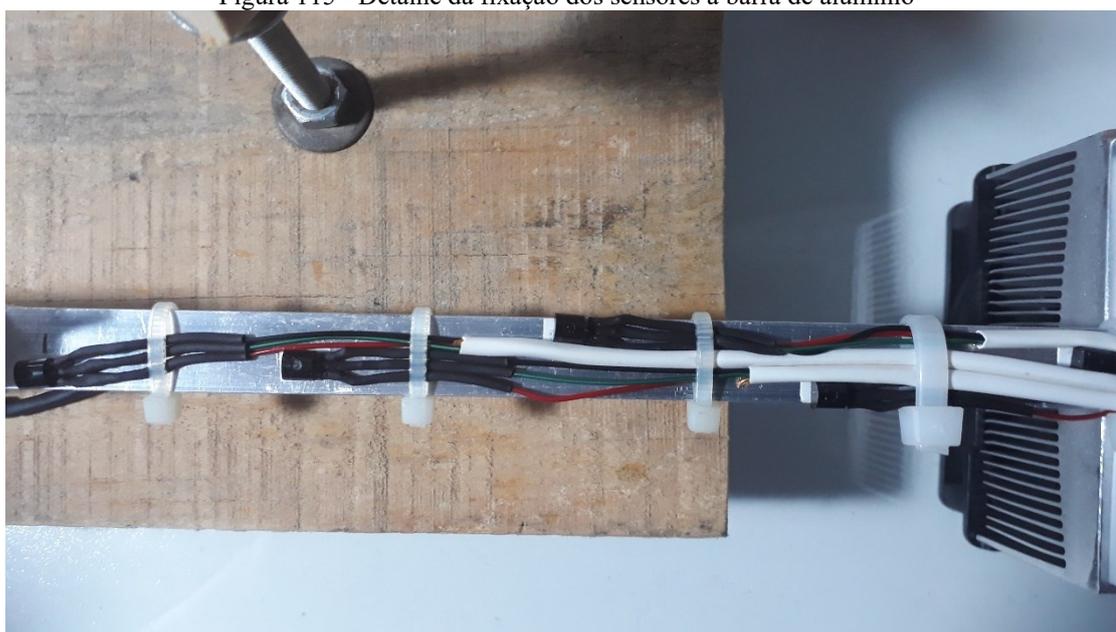
Figura 114 - Detalhe da pastilha Peltier instalada sobre o dissipador de calor



Fonte: O Autor (2021)

Solde fios que prolonguem os terminais de cada sensor e os isole com espaguete termo retrátil. Corte pequenos pedaços de fita térmica para fixar cada sensor à barra de alumínio e prenda seus fios com o auxílio de braçadeiras de nylon. A distância entre cada sensor é de 4 cm. Veja a Figura 21.

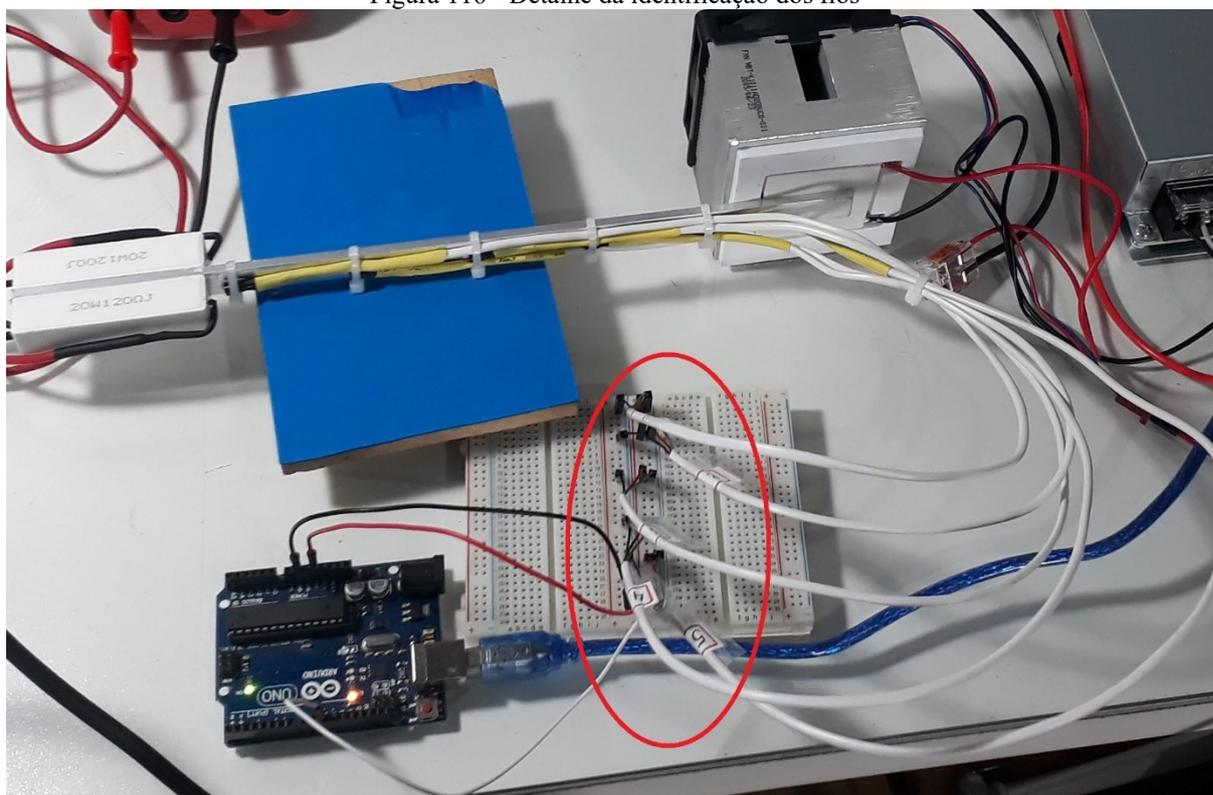
Figura 115 - Detalhe da fixação dos sensores à barra de alumínio



Fonte: O Autor (2021)

Identifique as extremidades dos fios soldados aos sensores com o auxílio de etiquetas. Após a execução do passo seguinte, que é o isolamento térmico da barra de alumínio, será difícil saber a qual sensor pertence cada fio, se você não fizer essa identificação. Também é importante que você adote um padrão de cores para cada terminal do sensor. Por exemplo, cor vermelha para todos os terminais n.º 1, cor verde para todos os terminais n.º 2 e cor preta para todos os terminais n.º 3. Veja a Figura 22.

Figura 116 - Detalhe da identificação dos fios



Fonte: O Autor (2021)

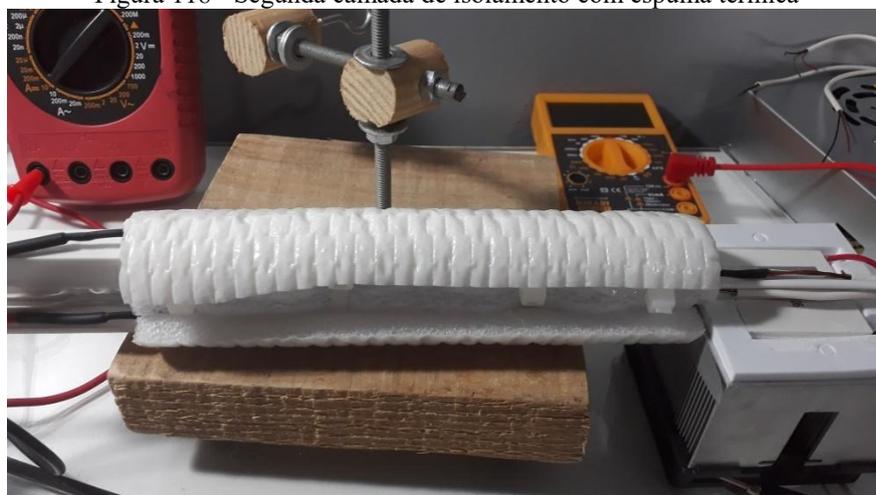
Utilizaremos duas camadas sobrepostas para fazer o isolamento térmico da barra de alumínio e, dessa forma, minimizar as perdas de calor por radiação e por convecção. A primeira camada é feita com uma manta térmica aluminizada (Figura 23) e na segunda foi utilizada uma espuma térmica (Figura 24).

Figura 117 - Foto da primeira camada de isolamento, feita com manta térmica aluminizada.



Fonte: O Autor (2021)

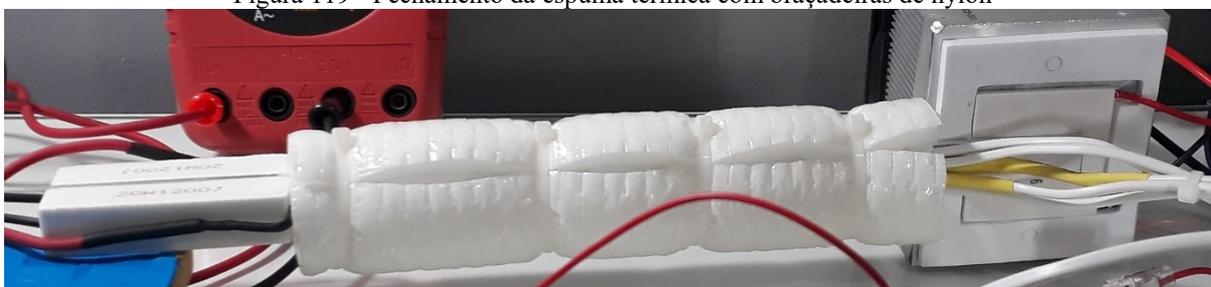
Figura 118 - Segunda camada de isolamento com espuma térmica



Fonte: O Autor (2021)

Prenda a espuma térmica com braçadeira de nylon, conforme mostra a Figura 25.

Figura 119 - Fechamento da espuma térmica com braçadeiras de nylon

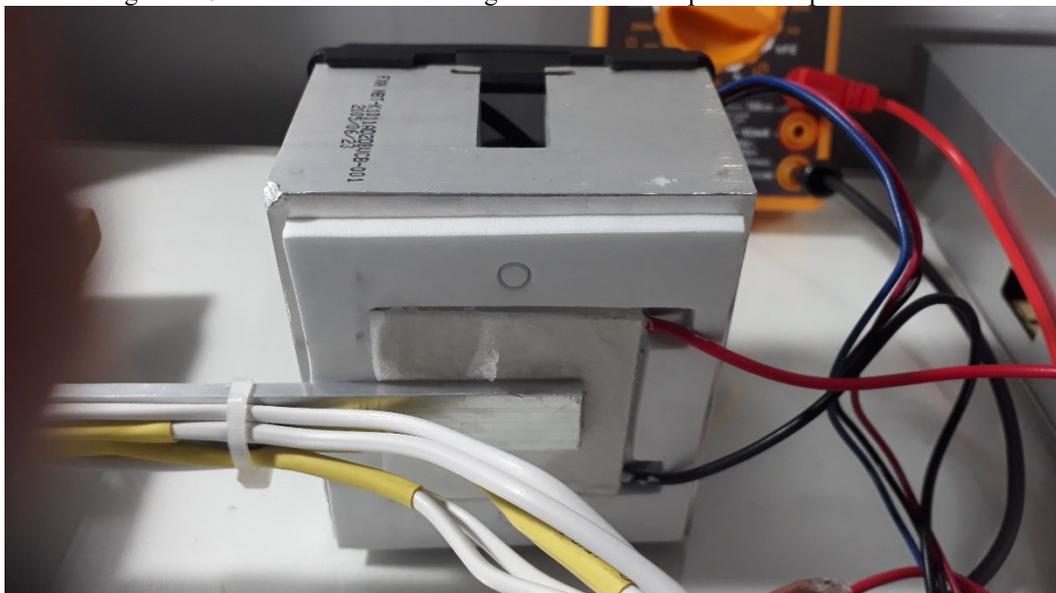


Fonte: O Autor (2021)

A pastilha Peltier é fixada à barra de alumínio, na extremidade oposta ao resistor. Aplique uma fina camada de pasta térmica na extremidade da barra que ficará em contato com

a pastilha. Na Figura 26, observe a camada de gelo que se forma sobre a pastilha, o que demonstra a sua temperatura reduzida em relação à temperatura ambiente.

Figura 120 - Detalhe da camada de gelo formada na superfície da pastilha Peltier

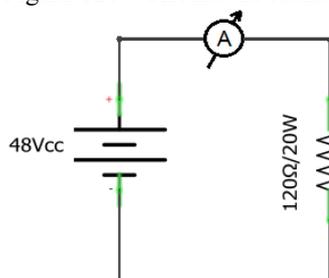


Fonte: O Autor (2021)

5.1.2.4 Montagem do circuito do resistor (fonte quente)

Utilizaremos um resistor cerâmico de $120\Omega/20W$ (cada) para fornecer o calor a ser conduzido ao longo da barra de alumínio. Ele será conectado a uma fonte de tensão de $48V_{cc}$ ⁴⁰ e dissipará uma potência elétrica aproximadamente igual a $19,2W$ (Figura 27). Dois multímetros serão necessários para medir a tensão e a corrente do resistor.

Figura 121 - Circuito do resistor



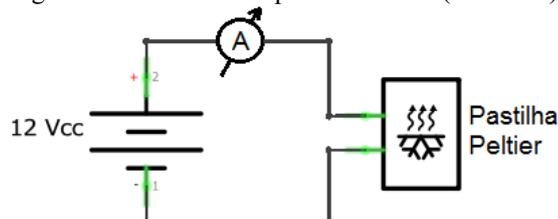
Fonte: O Autor (2021)

⁴⁰ Volts de corrente contínua.

5.1.2.5 Montagem do circuito da pastilha Peltier (fonte fria)

O calor dissipado pelo resistor e conduzido através da barra de alumínio será absorvido pela superfície de menor temperatura de uma pastilha Peltier⁴¹. Ela fará, portanto, a função de fonte fria do nosso experimento. Para funcionar, os terminais desta pastilha devem ser ligados a uma fonte de tensão de 12 Vcc (Figura 28).

Figura 122 - Circuito da pastilha Peltier (fonte fria)



Fonte: O Autor (2021)

5.1.2.6 Montagem do circuito dos sensores de temperatura fixados na barra de alumínio

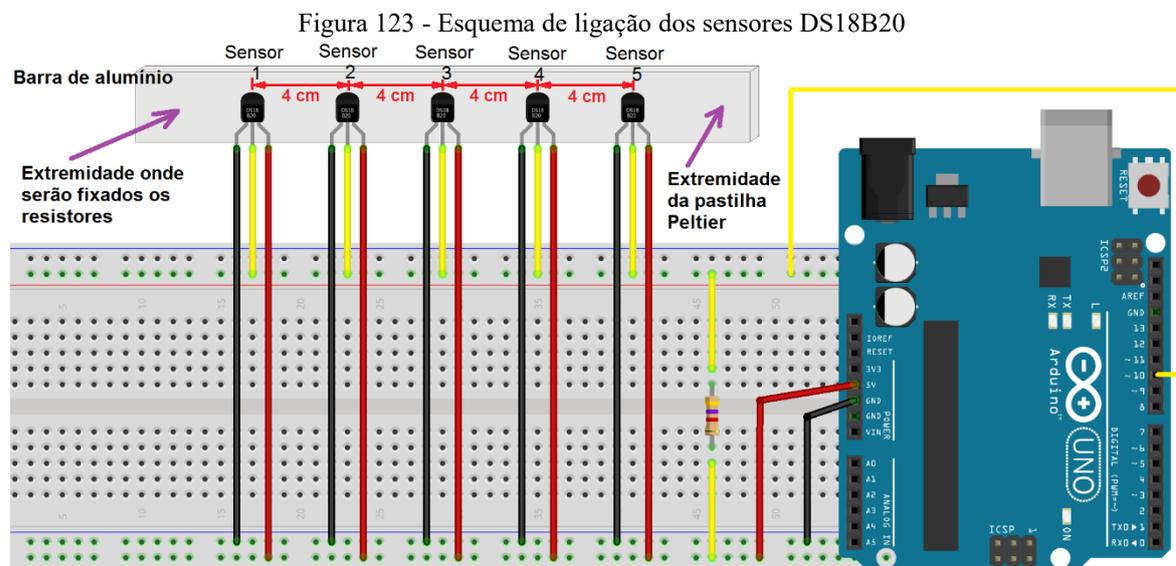
Utilizaremos neste experimento o sensor de temperatura DS18B20. Ele possui precisão ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ no intervalo entre -10°C e 85°C) e faixa de temperatura (-55°C a 125°C) semelhantes ao sensor LM35. A sua vantagem está na montagem externa do circuito. Primeiro, porque o sensor DS18B20 não exige uma fonte de alimentação simétrica⁴² para a medição de temperaturas abaixo de 0°C (ou seja, uma fonte simples de 5Vcc atende às necessidades desse dispositivo). Segundo, porque podemos ligar vários sensores a uma única porta (neste caso, digital) da placa de Arduino (se utilizássemos o sensor LM35, seria necessária uma porta analógica do Arduino para cada um). Assim, o sensor DS18B20 é conhecido como um dispositivo *OneWire*, pois os dados de vários sensores são levados ao microcontrolador por

⁴¹ O efeito Peltier é aquele em que uma diferença de temperatura é produzida na junção de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando eles são submetidos a uma tensão elétrica. No caso da pastilha Peltier comercial, ao ser submetida a uma tensão (normalmente 12 Vcc), uma das suas superfícies tem a temperatura elevada e a outra, reduzida.

⁴² Uma fonte simétrica de alimentação é aquela que fornece uma tensão positiva e uma tensão negativa, em relação a um terminal em comum (terra). Por exemplo, uma fonte que tenha os terminais -5Vcc, 0Vcc e +5Vcc é uma fonte simétrica. O zero é o ponto comum da fonte. A partir dele, podemos obter 5 volts positivos para um lado e 5 volts negativos para outro. Esta é a simetria presente nesse tipo de fonte.

meio de apenas um fio (MAXIM INTEGRATED, 2019). A Figura 29 ilustra o esquema de ligação de um conjunto formado por cinco sensores, ligados à porta digital 10 do Arduino.

Ao final da montagem desse circuito, faça a comunicação lógica entre a placa e o computador, utilizando o cabo USB que acompanha o Arduino.



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

5.1.3 Procedimentos de programação

5.1.3.1 Programação do Arduino com software para computador (IDE)

Outra alteração que faremos em relação ao experimento anterior com o sensor LM35 é a substituição da interface de programação e do próprio equipamento em que o *software* será utilizado. No lugar do aplicativo ArduinoDroid para *smartphones* com Android, utilizaremos o Arduino IDE em um *notebook* com Windows. Além de obtermos uma vantagem na velocidade de processamento dos dados, o uso do *notebook* se faz necessário porque desejamos que os valores de temperatura enviados pelos sensores sejam armazenados em uma planilha do Microsoft Excel.

5.1.3.2 Download e instalação do software (IDE)

Baixe a versão mais recente do Arduino IDE⁴³, escolhendo a opção adequada para o sistema operacional do seu computador. Após baixar, instale o *software* conforme as instruções do programa instalador.

5.1.3.3 Download da ferramenta para aquisição de dados do Arduino pelo Microsoft Excel

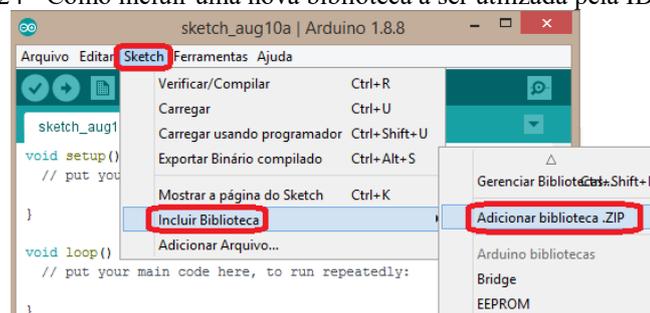
Conforme mencionamos anteriormente, desejamos que os dados enviados pelos sensores de temperatura ao Arduino sejam armazenados em uma planilha do Microsoft Excel para nos auxiliar na interpretação dessas informações. Para isso, baixe a ferramenta PLX-DAQ⁴⁴, descompacte o conteúdo da pasta e execute o arquivo instalador (*plx_daq_install.exe*).

5.1.3.4 Instalação de novas bibliotecas no Arduino

O uso do sensor DS18B20 exige que façamos a instalação de duas bibliotecas para uso na IDE Arduino (interface de programação). Essas bibliotecas contêm instruções específicas para esse dispositivo.

Baixe os arquivos compactados (ZIP) das bibliotecas *OneWire*⁴⁵ e *DallasTemperature*⁴⁶. Na sequência, inicie a IDE Arduino que você instalou no seu computador e siga o seguinte caminho: **Sketch >> Incluir Biblioteca >> Adicionar biblioteca.ZIP**. Inclua as duas bibliotecas que você baixou (uma de cada vez). Veja a Figura 30.

Figura 124 - Como incluir uma nova biblioteca a ser utilizada pela IDE Arduino



Fonte: O Autor (2021)

⁴³ Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>.

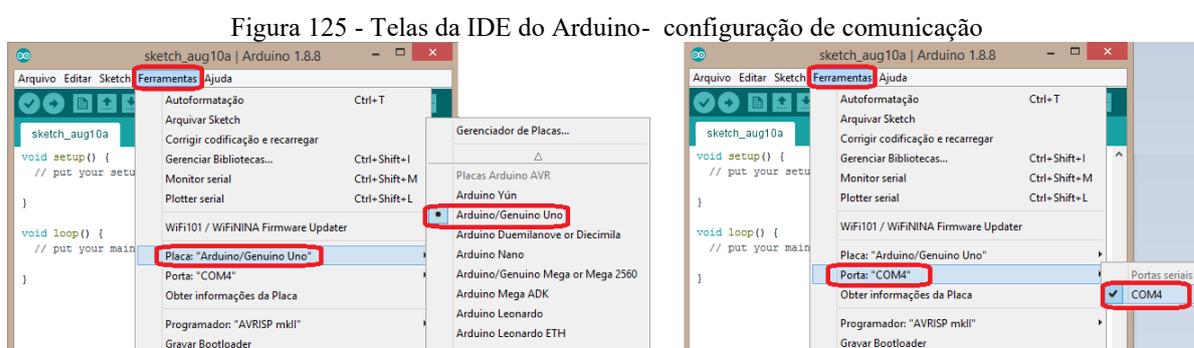
⁴⁴ Disponível em: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>.

⁴⁵ Disponível em: <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire>.

⁴⁶ Disponível em: <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>.

5.1.3.5 Configuração do software (IDE) para a comunicação do Arduino com o computador

Nesta etapa, vamos configurar a comunicação do Arduino com o computador (Figura 31). Acesse **Ferramentas >> Placa** e escolha a versão do seu Arduino (nosso caso é o Uno R3). Por último, acesse **Ferramentas >> Porta** e selecione a porta de comunicação a ser utilizada pelo computador (nosso caso é a COM4). É possível que o Arduino IDE faça o reconhecimento automático da placa conectada ao computador. Caso isso não ocorra, siga o procedimento indicado neste parágrafo.



Fonte: O Autor (2021)

5.1.3.6 Sketch para identificação dos endereços dos sensores

Se todos os sensores DS18B20 são ligados a uma única porta digital da placa de Arduino, como o microcontrolador sabe de qual dispositivo ele está recebendo informações? A resposta é que esse tipo de sensor sai de fábrica com um número de identificação (endereço com 64 bits de comprimento) que é lido pelo microcontrolador. Vamos descobrir os endereços dos sensores utilizando o *sketch* abaixo.

Sketch - Identificando os endereços dos sensores DS18B20

```
// sketch_08_01_OneWire_List
#include <OneWire.h>

OneWire bus(10);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
```

```

byte address[8]; // 64 bits
while (bus.search(address))
{
  for(int i = 0; i < 7; i++)
  {
    Serial.print(address[i], HEX);
    Serial.print(" ");
  }
  // checksum OK or Fail
  if (OneWire::crc8(address, 7) == address[7])
  {
    Serial.println(" CRC OK");
  }
  else
  {
    Serial.println(" CRC FAIL");
  }
}
}

void loop()
{
}

```

Fonte: MONK, 2013⁴⁷

Compile (1) e carregue (2) o *sketch* acima na memória do microcontrolador para ler os endereços de cada sensor (Figura 32).

Figura 126 - Botões para compilar e de upload do sketch.



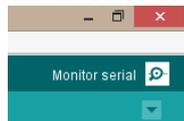
Fonte: O Autor (2021)

⁴⁷ Disponível em:

https://github.com/simonmonk/ArduinoNextSteps/blob/master/ArduinoNextSteps/sketch_08_01_OneWire_List/sketch_08_01_OneWire_List.ino.

No canto superior direito da tela do Arduino IDE tem um botão para acionar o monitor serial, que é o local onde podemos visualizar as informações enviadas pela placa de Arduino ao computador (Figura 33).

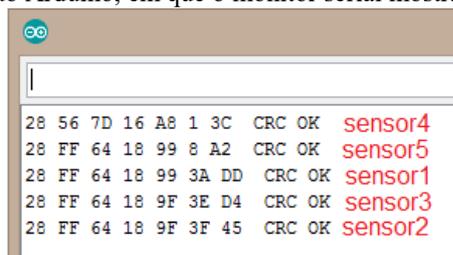
Figura 127 - Ícone do botão do monitor serial.



Fonte: O Autor (2021)

Ao clicarmos no referido botão, surge na tela a relação de dispositivos conectados ao pino digital 10 da placa de Arduino. As anotações em vermelho foram feitas à medida que os sensores eram conectados um de cada vez (Figura 34).

Figura 128 - Tela da IDE do Arduino, em que o monitor serial mostra os endereços dos sensores.



Fonte: O Autor (2021)

5.1.3.7 Sketch para a leitura dos dados dos sensores

Os dados dos sensores de temperatura serão coletados por meio do *sketch* abaixo. Copie e cole essas instruções para o Arduino IDE. Depois, compile e carregue esse último *sketch* na memória do microcontrolador da placa de Arduino.

Sketch - Programa para ler as temperaturas indicadas pelos sensores

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

const int busPin = 10;

OneWire bus(busPin);
```

```
DallasTemperature sensors(&bus);
DeviceAddress sensor1;
DeviceAddress sensor2;
DeviceAddress sensor3;
DeviceAddress sensor4;
DeviceAddress sensor5;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
  {
    Serial.println("Sensor 1 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor2, 1))
  {
    Serial.println("Sensor 2 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor5, 2))
  {
    Serial.println("Sensor 5 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor4, 3))
  {
    Serial.println("Sensor 4 não encontrado!");
  }
  if (!sensors.getAddress(sensor3, 4))
  {
    Serial.println("Sensor 3 não encontrado!");
  }
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL, instante,sensor1,sensor2,sensor3,sensor4,sensor5");
  delay(1000);
}

void loop(){
  sensors.requestTemperatures();
  float tempC1 = sensors.getTempC(sensor1);
  float tempC2 = sensors.getTempC(sensor2);
  float tempC3 = sensors.getTempC(sensor3);
  float tempC4 = sensors.getTempC(sensor4);
  float tempC5 = sensors.getTempC(sensor5);
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(tempC1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(tempC2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(tempC3);
```

```

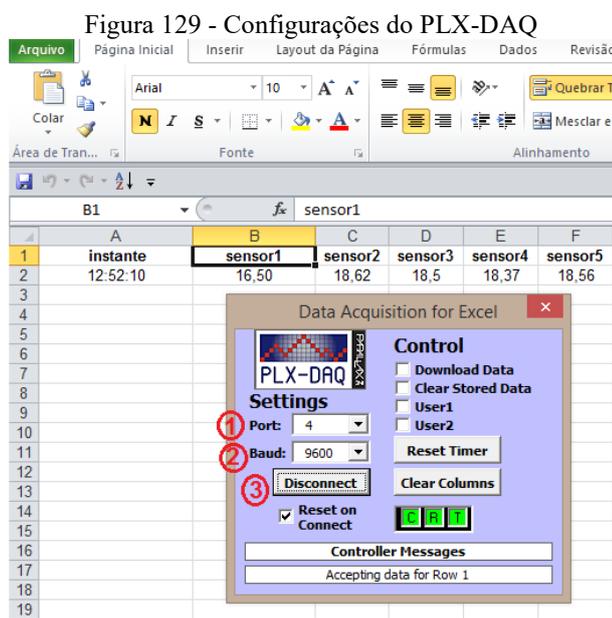
Serial.print(",");
Serial.print(tempC4);
Serial.print(",");
Serial.println(tempC5);
delay(30000);
}

```

Fonte: Adaptado pelo Autor, a partir de MONK, 2013.

5.1.4 Manuseio do experimento e coleta de dados

Considerando que todas as montagens e configurações estejam concluídas corretamente, chegou o momento de operar o conjunto. Comece abrindo o aplicativo PLX-DAQ e o configure da seguinte forma: (1) Informe a porta de comunicação utilizada pelo computador; (2) Informe a taxa de transmissão “Baud” (nosso caso é 9600); e (3) Clique no botão que inicia a conexão. Veja a Figura 35.



Fonte: O Autor (2021)

Assim que a conexão é configurada no PLX-DAQ, imediatamente, você pode observar que os dados dos sensores de temperatura são enviados para uma planilha do Microsoft Excel. Agora, basta ligar os circuitos do resistor (fonte quente) e da pastilha Peltier (fonte fria), que o calor irá fluir do primeiro para a segunda. Enquanto isso, à medida que o tempo passa, os

sensores eletrônicos medirão as temperaturas nos seus respectivos pontos de localização ao longo da barra de alumínio.

5.1.4.1 Selecionando dados do regime estacionário

Assim que você liga os circuitos do resistor, da pastilha Peltier e dos sensores, é possível perceber duas características da variação de temperatura na barra de alumínio: ela varia de acordo com a posição onde se localiza cada sensor e, também, varia com o passar do tempo. Se você esperar o suficiente (cerca de vinte minutos), vai começar a perceber que a temperatura de cada sensor apresentará uma tendência a se estabilizar em determinado valor. Ou seja, a variação da temperatura deixa de depender do tempo e passa a depender somente da posição em que é medida. Quando chega esse momento, dizemos que o calor está sendo conduzido pela barra em regime estacionário.

Mantenha o experimento energizado para que o calor continue fluindo em regime estacionário por cerca de dez minutos. Colete os dados desse período e calcule uma média aritmética para a temperatura de cada sensor. Anote as temperaturas médias de cada sensor na tabela abaixo.

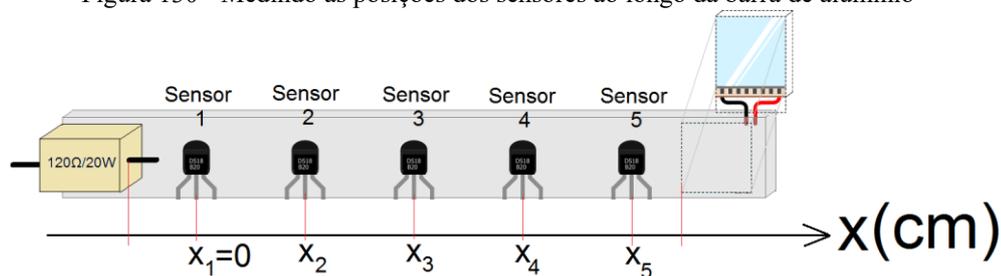
Tabela 6 - Temperatura de cada sensor

Sensores	Posição $x(\text{cm})$	Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$
Sensor 1	$x_1 = 0$	$T_1 =$
Sensor 2	$x_2 =$	$T_2 =$
Sensor 3	$x_3 =$	$T_3 =$
Sensor 4	$x_4 =$	$T_4 =$
Sensor 5	$x_5 =$	$T_5 =$

Fonte: O Autor (2021)

Ainda na mesma tabela, meça com uma régua e anote as posições de cada sensor, tomando como referência o sensor 1, para o qual faremos: $x_1 = 0$ (Figura 36).

Figura 130 - Medindo as posições dos sensores ao longo da barra de alumínio



Fonte: O Autor (2021)

5.1.5 Análise dos dados

5.1.5.1 Construindo um gráfico $T=f(x)$

Utilize uma folha de papel milimetrado e, com os dados da tabela acima, construa um gráfico da temperatura T em função da posição x de cada sensor [$T=f(x)$].

- Represente o eixo da temperatura na vertical no intervalo de 0 a 100°C.
- Represente o eixo da posição na horizontal no intervalo de 0 a 20cm.
- Marque os pontos experimentais com os dados da tabela acima.
- Trace uma reta que melhor se aproxima dos pontos marcados.

5.1.5.2 Obtendo a equação da condução de calor com o gráfico desenhado na folha de papel milimetrado

No procedimento anterior, foi sugerido o desenho de uma reta, porque a equação de Fourier para a condução do calor em regime estacionário descreve uma função linear.

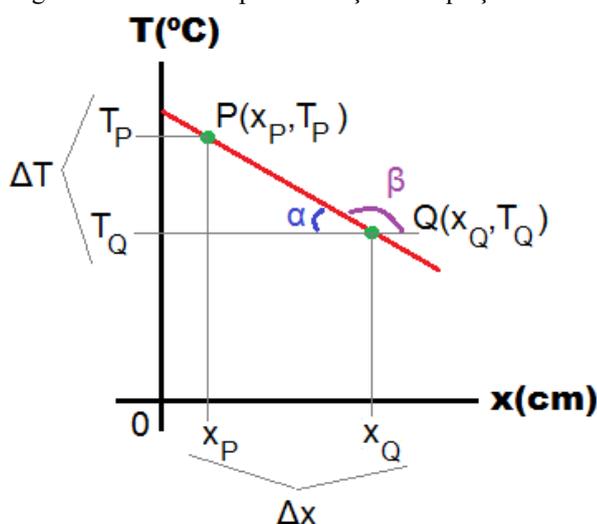
$$\frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{(T_1 - T_n)}{(x_1 - x_n)} \quad \rightarrow \quad \text{se } x_1 = 0, T_n = T \text{ e } x_n = x, \text{ então:}$$

$$\frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{(T_1 - T)}{(0 - x)} \quad \rightarrow \quad \frac{Q}{\Delta t} = -\kappa A \frac{(T_1 - T)}{-x} \quad \rightarrow \quad \left(\frac{1}{\kappa A \Delta t} \right) Q x = T_1 - T$$

$$T(x) = - \underbrace{\left(\frac{1}{\kappa A \Delta t} Q \right)}_{\text{constante } (a)} x + T_1 \quad \text{Equação 4}$$

Marque dois pontos sobre a reta que você desenhou e encontre o coeficiente angular da equação (constante a). Veja a Figura 37.

Figura 131 - Método para obtenção da equação da reta



Fonte: O Autor (2021)

Em que:

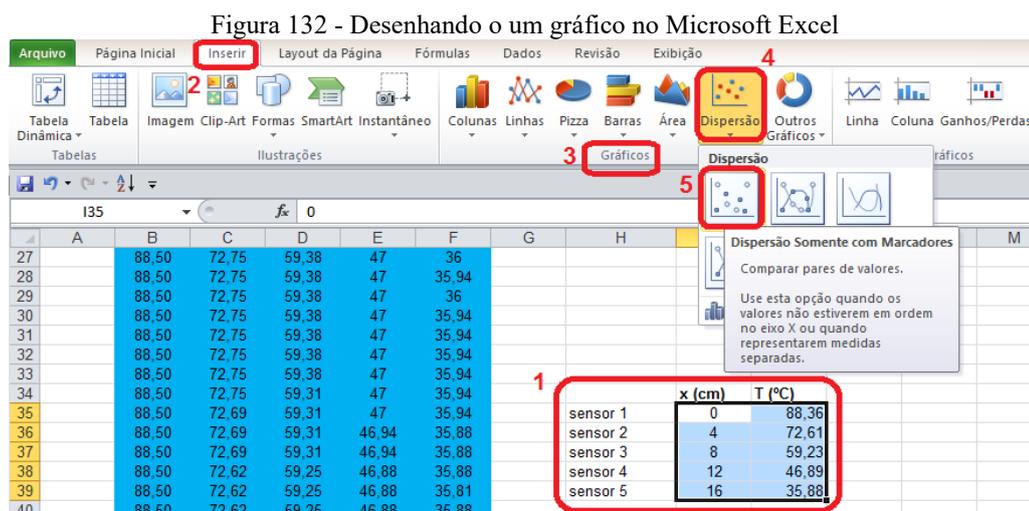
$$a = \tan \beta = -\tan \alpha = -\frac{\Delta T}{\Delta x} = -\frac{(T_P - T_Q)}{(x_Q - x_P)} \quad \text{Equação 5}$$

Em seguida, observe o ponto em que a sua reta intercepta o eixo da temperatura (onde $x=0$). Esse é o coeficiente linear (b) da reta e deve ser um valor próximo à temperatura do sensor 1 (T_1). Substitua os valores encontrados para “ a ” e “ b ” e escreva a equação para a condução do calor, referente ao experimento realizado. Neste caso: $T(x) = ax + b$.

Anote a sua equação aqui:

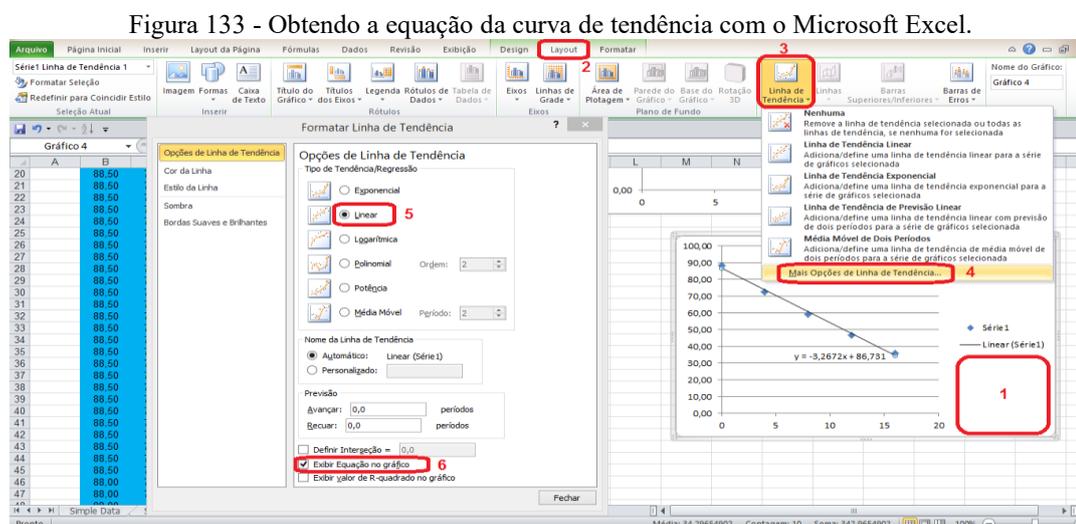
5.1.5.3 Obtendo a equação da condução de calor com o programa Microsoft Excel

Existe também a possibilidade de obter a equação acima com o auxílio da mesma planilha de dados gerada pelo Microsoft Excel. Neste caso, (1) digite na referida planilha os dados da tabela 1. Depois, na aba “Inserir” (2), escolha entre os gráficos (3) a opção “Dispersão” (4) e finalize clicando em “Dispersão somente com marcadores” (5). Veja a Figura 38.



Fonte: O Autor (2021)

Após a execução desses passos, o Microsoft Excel irá gerar um gráfico com os dados selecionados na planilha. Clique uma vez sobre a área do gráfico gerado para selecioná-lo (1). Na sequência, abra a aba “Layout” (2), clique em “Linha de Tendência” (3) e escolha a opção “Mais opções de Linha de Tendência...” (4). Na janela que se abre, escolha a opção “Linear” (5) e marque a opção “Exibir equação no gráfico” (6). Veja a Figura 39.



Fonte: O Autor (2021)

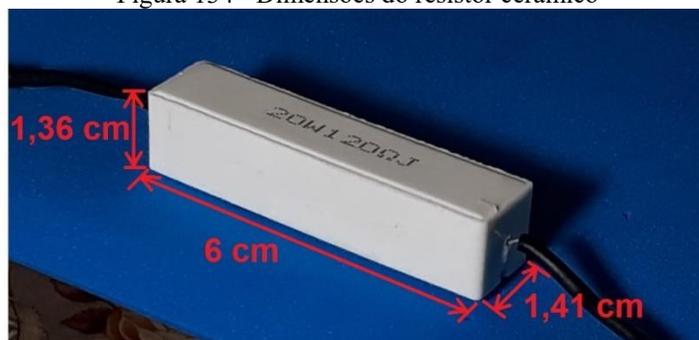
5.1.5.4 Estimativa da corrente de calor que atravessa a barra de alumínio

Meça a queda de tensão sobre o resistor (com um voltímetro) e a corrente elétrica que passa por ele (com o amperímetro que já está no circuito). Anote os valores lidos e multiplique um pelo outro para encontrar a potência medida experimentalmente.

$U_T =$ V (volts)	$I_T =$ A (ampères)	$P_T = U_T \times I_T \cong$ W (watts) ou $\frac{J}{s}$ (joules por segundo)
---------------------	-----------------------	--

A potência encontrada nos diz quanto calor (em Joules) o resistor está dissipando a cada segundo. Mas, nem todo esse calor é transferido para a barra de alumínio. Na verdade, a maior parte dele se perde para o ar ambiente do local onde o experimento está sendo realizado. Tudo o que podemos fazer é estimar quanto desse calor dissipado é transferido para o metal da barra. Para isso, sugerimos considerar que o calor transferido para a barra seja proporcional à área da superfície do resistor que está em contato direto com a barra de alumínio. Portanto, com uma régua, vamos medir as arestas de um dos nossos resistores (que tem o formato de um prisma retangular) e calcular a sua área de superfície. Veja a Figura 40.

Figura 134 - Dimensões do resistor cerâmico



Fonte: O Autor (2021)

Área lateral 1: $A_1 =$ cm^2	Área lateral 2: $A_2 =$ cm^2	Área lateral 3: $A_3 =$ cm^2	Área lateral 4: $A_4 =$ cm^2	Área lateral total ⁴⁸ : $A_T = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$ $=$ cm^2
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

⁴⁸Considerando que o filamento resistivo se localiza ao longo do comprimento longitudinal do resistor, estamos ignorando as duas superfícies onde se encontram os terminais do resistor.

Agora, vamos calcular a proporção que, teoricamente, a superfície do resistor em contato com a barra dissiparia de calor (P_{face}):

$$\frac{A_T}{A_{face}} = \frac{P_T}{P_{face}}$$

$$\frac{Q}{\Delta t} = P_{face} = W \quad \text{Equação 6}$$

Sabendo que a barra de alumínio utilizada tem seção retangular de medidas iguais a 0,33cm e 1,3cm; dado que a condutividade térmica κ do alumínio a 27°C é igual a $2,37 \frac{J}{cm.s.^{\circ}C}$; e considerando a corrente térmica estimada $\frac{Q}{\Delta t}$: vamos determinar o coeficiente angular “a” que esses valores teóricos nos oferecem, referente à equação do calor.

$$a = -\frac{1}{\kappa A} \frac{Q}{\Delta t} = -\frac{1}{2,37 \frac{J}{cm.s.^{\circ}C} \cdot (0,33 \times 1,3) cm^2} \cdot P_{face} = - \frac{^{\circ}C}{cm}$$

5.1.6 Reflexões sobre o experimento

As perguntas abaixo foram aplicadas como instrumento de avaliação da aprendizagem.

- 1) Diga com as suas palavras o que, afinal, você compreendeu sobre a lei de Fourier para a condução de calor em metais? Tente escrever o máximo que conseguir para expressar da melhor forma a sua compreensão sobre essa lei.
- 2) Que informação nos oferece o coeficiente angular “a” da equação obtida?
- 3) Utilize a equação encontrada e calcule a temperatura da barra num trecho sobre o resistor e em outro trecho sobre a pastilha Peltier.
- 4) Por que o valor experimental e o valor teórico que foram encontrados para o coeficiente angular “a” não são mais próximos? Que fatores contribuem para essa diferença?
- 5) Na sua opinião, o uso de equipamentos tecnológicos como a placa de Arduino contribuiu para a sua compreensão sobre o processo de condução de calor? Justifique.
- 6) Na sua opinião, as discussões estimuladas pelo uso do experimento contribuíram para a sua compreensão sobre o processo de condução de calor? Justifique.

5.2 TABELA DE DADOS – PARTE 1 (COLETA DOS ALUNOS)

Dados elétricos	
Tensão sobre o resistor:	V (volts ou joules por coulomb)
Corrente do resistor:	A (ampères ou coulombs por segundo)
Tensão sobre a pastilha:	V (volts ou joules por coulomb)
Corrente sobre a pastilha:	A (ampères ou coulombs por segundo)

Dados da temperatura no regime estacionário (°C)				
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
Médias				

Sensores	Posição x(cm)	Temperatura T(°C)
Sensor 1	$x_1 = 0$	$T_1 =$
Sensor 2	$x_2 =$	$T_2 =$
Sensor 3	$x_3 =$	$T_3 =$
Sensor 4	$x_4 =$	$T_4 =$
Sensor 5	$x_5 =$	$T_5 =$

5.3 ROTEIRO DO ALUNO – PARTE 2 (OBTENÇÃO DA LEI DE FOURIER A PARTIR DA CONSTRUÇÃO DE UM GRÁFICO COM DADOS EXPERIMENTAIS)

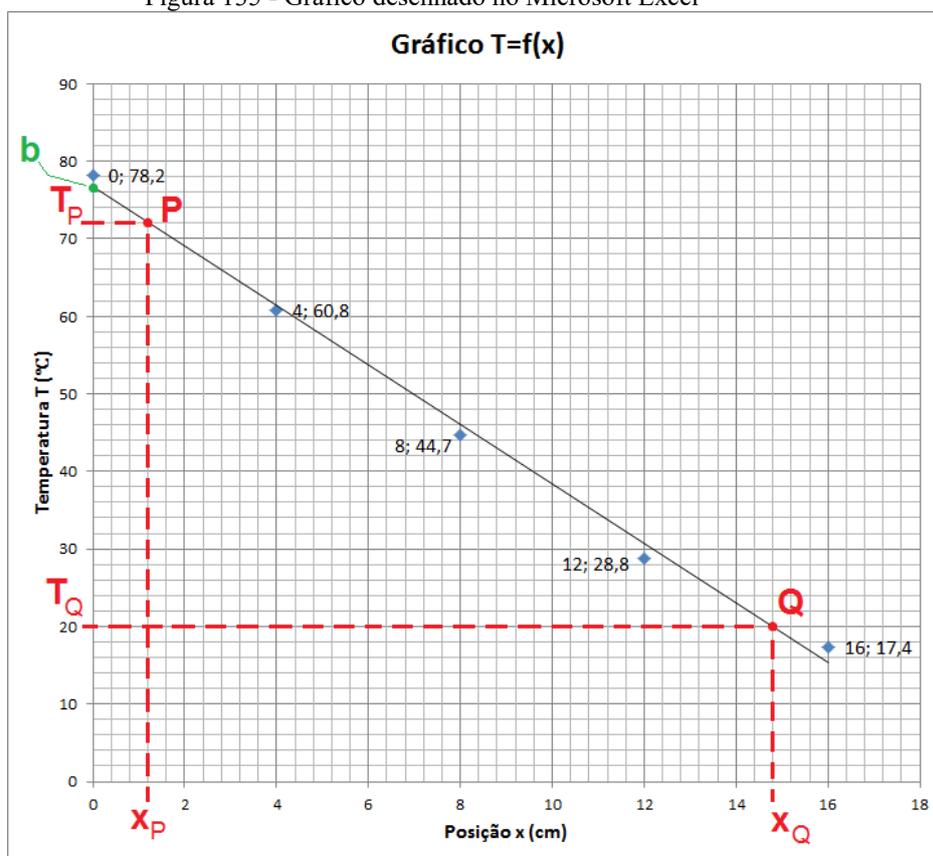
5.3.1 Construção do gráfico da temperatura em função da posição

Utilize os dados coletados sobre as temperaturas ao longo da barra de alumínio e construa numa folha de papel milimetrado um gráfico da temperatura em função da posição em que se localizava cada sensor do experimento utilizado na última aula.

5.3.2 Obtendo a equação da condução de calor para o experimento realizado

O estudantes que não construíram os seus próprios gráficos, devem utilizar o que está disponibilizado abaixo (Figura 41).

Figura 135 - Gráfico desenhado no Microsoft Excel



Fonte: O Autor (2021)

1) Escolha dois pontos (P e Q) sobre a linha de tendência do seu gráfico e anote as coordenadas de cada um:

- $T_P = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_Q = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$
- $x_P = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$
- $x_Q = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$

2) Calcule o coeficiente angular “a” da reta:

$$a = - \left(\frac{T_P - T_Q}{x_Q - x_P} \right)$$

$$a = - \frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}}$$

3) Observe o ponto onde a reta intercepta o eixo T e anote o coeficiente linear “b” da reta:

- $b = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$

4) Substitua os valores encontrados para “a” e “b” e escreva a função linear encontrada no seu gráfico: $T(x) = ax + b$

Anote a sua equação aqui:

5) Teste a sua equação, calculando abaixo a temperatura na posição $x = 4\text{cm}$.

5.3.3 A Lei de Fourier

A Lei de Fourier para a condução de calor em regime estacionário, tal como a aplicamos em nosso experimento, é representada pela equação abaixo:

$$T(x) = - \left(\frac{\phi}{\kappa A} \right) x + T_1$$

Em que:

- ϕ é o fluxo de calor, ou corrente térmica: $\phi = \frac{Q}{\Delta t}$. Ou seja, a quantidade de calor Q que atravessa o material por um determinado intervalo de tempo Δt .

- 6) Vamos utilizar os dados da corrente e da tensão elétricas medidas no resistor para estimar o fluxo de calor que percorre a barra (nessa estimativa, estamos considerando que $\frac{1}{4}$ da potência dissipada pelo resistor seja transmitida para a barra de alumínio):

$$\phi \cong \frac{V \times I}{4} = \quad \frac{J}{s}$$

- κ é a condutividade térmica do material. A condutividade térmica do alumínio, a 27°C , é igual a $2,37 \frac{J}{\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}}$.
- A é a área da seção transversal do material que está conduzindo o calor. No caso da nossa barra:

$$A = 13\text{mm} \times 3,3\text{mm} = 1,3\text{cm} \times 0,33\text{cm} = 0,429\text{cm}^2$$

Observe que a equação que você obteve é a própria Lei de Fourier para a situação proposta no nosso experimento. O coeficiente angular a corresponde ao termo $-\left(\frac{\phi}{\kappa A}\right)$ e o coeficiente linear b corresponde a T_1 .

- 7) Utilize os valores de ϕ , κ e A , calcule o termo $-\left(\frac{\phi}{\kappa A}\right)$ e compare com o coeficiente angular a obtido experimentalmente.

$$-\left(\frac{\phi}{\kappa A}\right) = - \quad \frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}}$$

5.4 QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM SOBRE A CONDUÇÃO DE CALOR

Após uma sequência de encontros que envolveu execução de experimento, construção de gráfico, dedução de equação e apresentação da Lei de Fourier, chegou o momento de avaliar o que foi aproveitado desse processo. Responda as questões abaixo sem consultar o colega ou fontes da internet. Utilize apenas as suas anotações.

- 1) Diga com as suas palavras o que, afinal, você compreendeu sobre a lei de Fourier para a condução de calor em metais? Tente escrever o máximo que conseguir para expressar da melhor forma a sua compreensão sobre essa lei.
- 2) No que diz respeito ao fenômeno físico da condução de calor, que informação nos oferece o coeficiente angular “a” da equação obtida a partir do gráfico que você desenhou?
- 3) Na sua equação, o valor encontrado para o coeficiente angular “a” é diferente do resultado obtido no cálculo do termo $-\left(\frac{\phi}{\kappa A}\right)$, que pertence à Lei de Fourier. Cite os fatores que contribuem para essa diferença.
- 4) Utilize a sua equação e calcule a temperatura da barra de alumínio num trecho sobre o resistor (faça $x = -1$ cm) e em outro trecho sobre a pastilha Peltier (faça $x = 19$ cm).
- 5) Na sua opinião, a realização do experimento sobre o processo de condução de calor e as discussões que vieram na sequência contribuíram para a sua compreensão desse fenômeno físico? Justifique.
- 6) Você consegue identificar outros conhecimentos relacionados com a Física que foi possível aprender durante a discussão sobre o processo de condução de calor? (Cite, por exemplo, conceitos, procedimentos e/ou ideias aprendidas sobre o uso de tecnologias e matemática.)

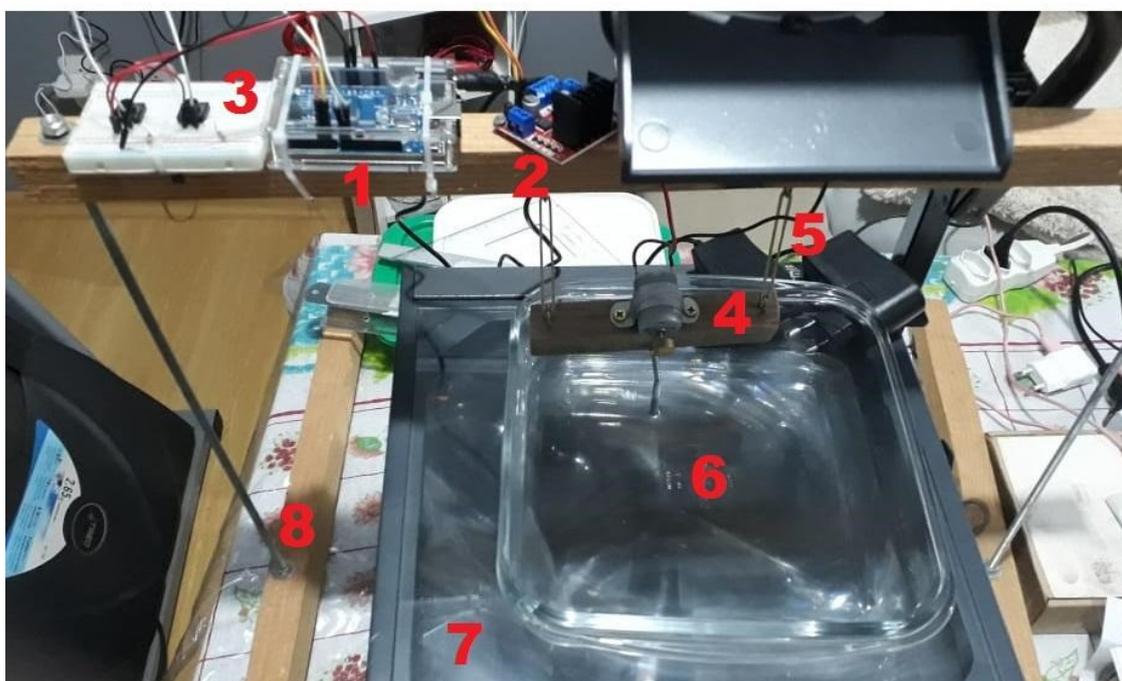
6 QUARTA ATIVIDADE - INTRODUÇÃO AOS FENÔMENOS ONDULATÓRIOS PARA O ESTUDO DA RADIAÇÃO TÉRMICA

(Duração prevista: 2 horas-aula de 40 minutos cada, em sequência.)

6.1 APRESENTAÇÃO

Este experimento se propõe a permitir a discussão sobre alguns fenômenos ondulatórios em uma superfície d'água, especialmente a reflexão, a absorção e a transmissão. É de nosso interesse particular avançar nas aulas seguintes em discussões sobre a ação da radiação térmica nos corpos. Dessa forma, optamos pela construção desse conhecimento prévio utilizando ondas mecânicas para, em seguida, traçarmos um paralelo com as ondas eletromagnéticas. A Figura 42 mostra a cuba de ondas utilizada para a discussão sobre as ondas mecânicas na superfície d'água. Na seção seguinte, passemos aos detalhes da sua construção.

Figura 136 - Experimento da cuba de ondas



Fonte: O Autor (2021)

6.2 PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM

6.2.1 Lista de materiais

A cuba de ondas é constituída pelos seguintes elementos:

- 1) Placa de Arduino UNO.
- 2) Módulo Ponte H com circuito integrado L298N para a alimentação de um motor de corrente contínua (cc).
- 3) Conjunto de controle constituído por: 1 protoboard, 2 botões, 2 resistores de 1 k Ω (quilo-ohm) e fios para as ligações.
- 4) Conjunto oscilador constituído por: 1 motor cc com carga fora de centro no eixo, 1 base de madeira, 1 abraçadeira metálica, 2 parafusos, 2 ganchos metálicos, 2 elásticos de borracha, 1 parafuso em “L” para ser o atuador na superfície d’água.
- 5) Duas fontes de 9 Vcc/1A para a alimentação da placa de Arduino e para o Módulo Ponte H.
- 6) Uma cuba de vidro com água.
- 7) Um retroprojektor de slides.
- 8) Conjunto de suporte constituído por: 3 travessões de madeira, 2 barras roscadas (50 cm cada), 8 conjuntos de porcas e arruelas para fixação, 2 ganchos metálicos, 4 pés.
- 9) Furadeira e broca para madeira.

6.2.2 Construção do gerador de oscilações

A base da cuba de ondas é composta por dois travessões de madeira. Nas extremidades de cada travessão, foram fixados pés de plástico. No centro de cada travessão, um furo passante é feito com furadeira para atravessar a barra roscada. Veja a Figura 43.

Figura 137 - Bases da cuba de ondas



Fonte: O Autor (2021)

A fixação das barras roscadas aos travessões é feita com porcas e arruelas, conforme a Figura 44.

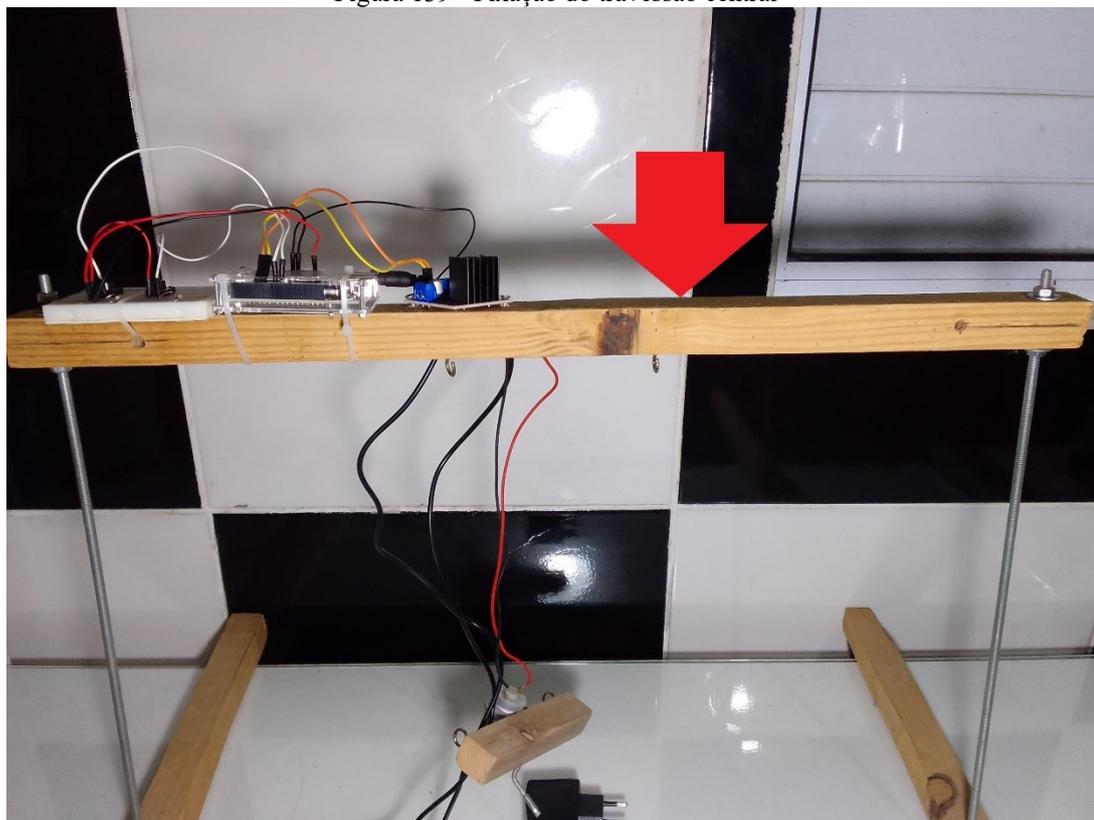
Figura 138 - Detalhe da fixação das barras roscadas com porca e arruela



Fonte: O Autor (2021)

Num terceiro travessão, utilize a furadeira para fazer furos passantes em suas extremidades e prenda-o às barras roscadas da base com porcas e parafusos. Veja a Figura 45.

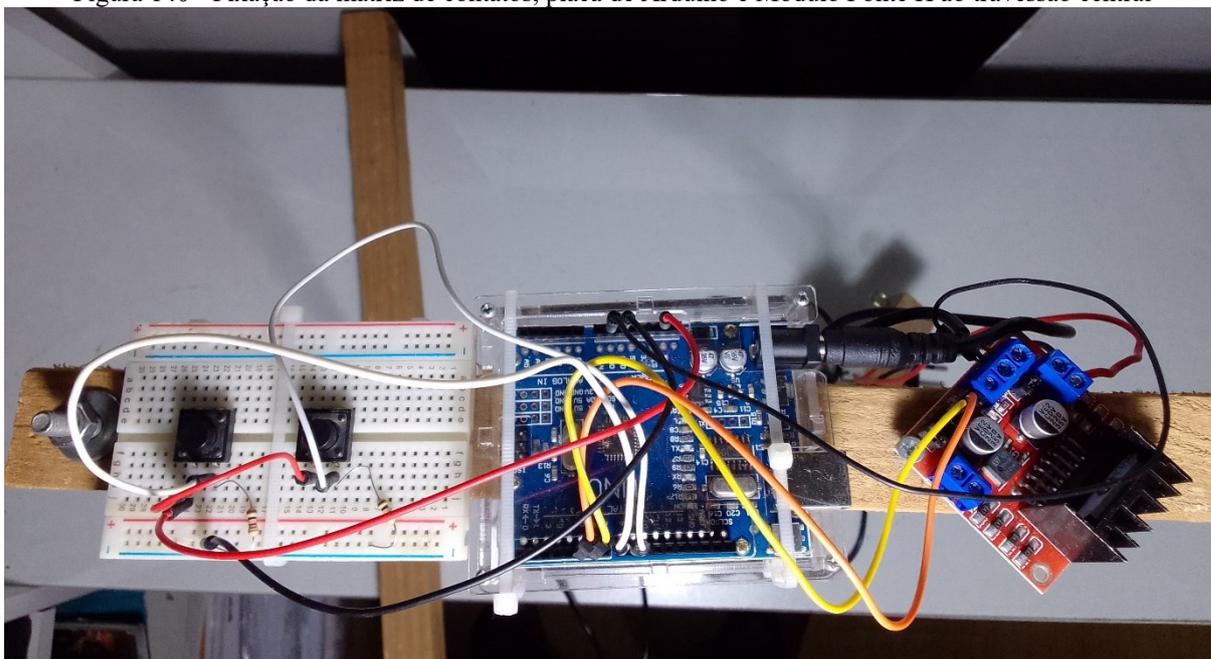
Figura 139 - Fixação do travessão central



Fonte: O Autor (2021)

Na parte superior do travessão central, utilize braçadeiras de nylon para fixar a matriz de contatos (protoboard) e a placa de Arduino. O Módulo Ponte H pode ser fixado com um parafuso. Veja a Figura 46.

Figura 140 - Fixação da matriz de contatos, placa de Arduino e Módulo Ponte H ao travessão central



Fonte: O Autor (2021)

Na parte inferior do travessão central, fixe dois ganchos metálicos, deixando uma distância de 12 centímetros entre eles (Figura 47).

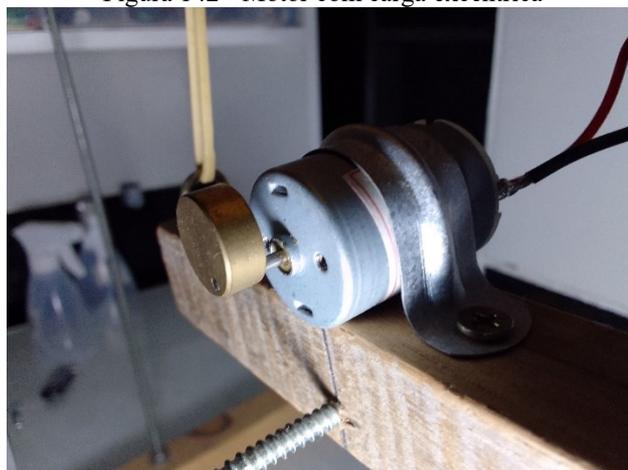
Figura 141 - Fixação dos ganchos ao travessão central



Fonte: O Autor (2021)

O principal responsável pelas oscilações na superfície d'água é um pequeno motor elétrico com um cilindro fixado em posição excêntrica, como mostrado na Figura 48.

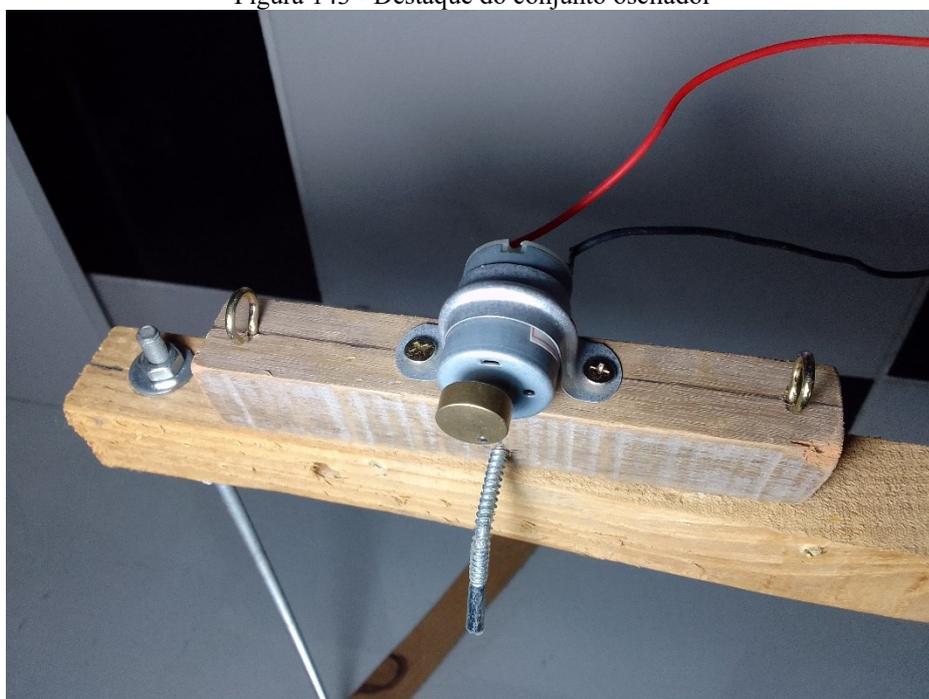
Figura 142 - Motor com carga excêntrica



Fonte: O Autor (2021)

Utilize uma braçadeira metálica e dois parafusos para fixar esse motor a uma base de madeira, com cerca de 15 centímetros de comprimento. A esta mesma base, também, são fixados dois ganchos metálicos nas extremidades, distantes cerca de 12 centímetros um do outro. Por último, um parafuso em “L” é fixado à face central da referida base, para servir como o elemento atuador sobre a superfície d’água. Veja a Figura 49.

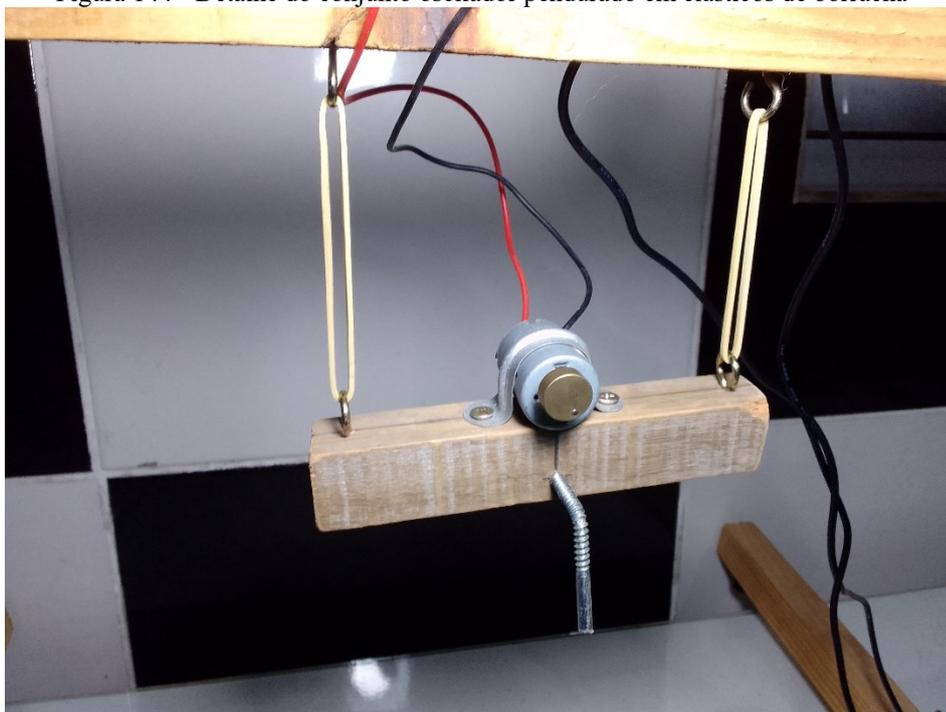
Figura 143 - Destaque do conjunto oscilador



Fonte: O Autor (2021)

Pendure o conjunto oscilador no travessão central, utilizando elásticos de borracha que se prendem aos ganchos metálicos (Figura 50).

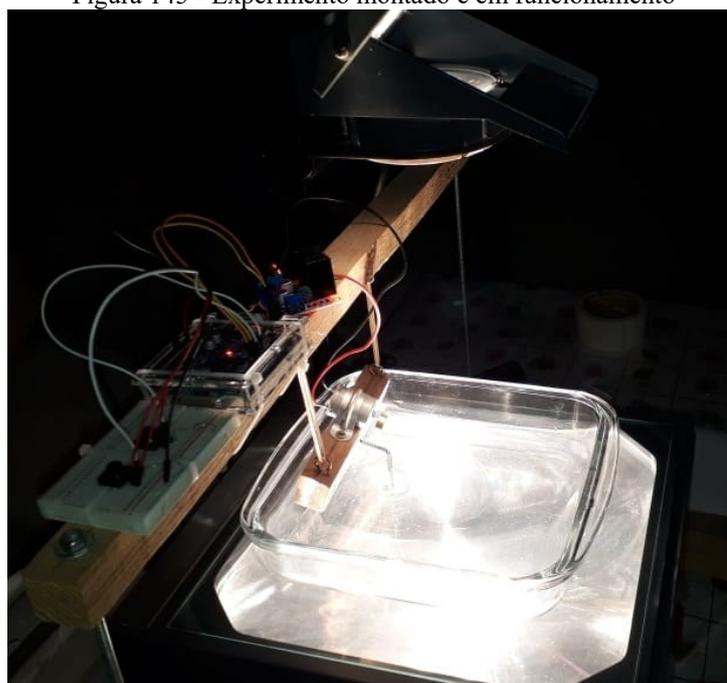
Figura 144 - Detalhe do conjunto oscilador pendurado em elásticos de borracha



Fonte: O Autor (2021)

O vão livre abaixo do travessão central é o lugar onde será posicionado o projetor com a cuba de vidro. Observe, ainda, que é possível regular a altura desse travessão, alterando a posição das porcas e das arruelas de fixação. Veja a Figura 51.

Figura 145 - Experimento montado e em funcionamento

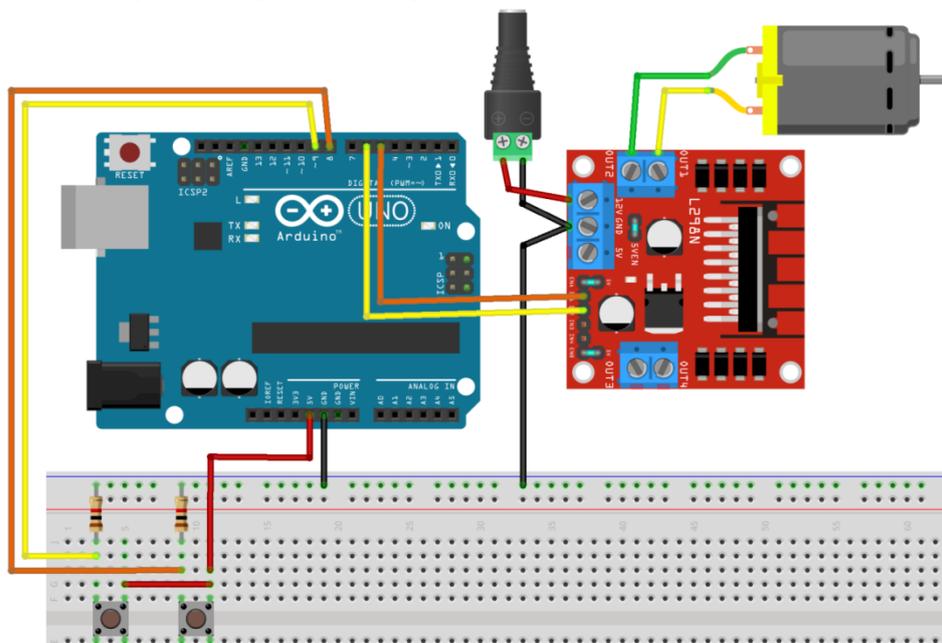


Fonte: O Autor (2021)

6.2.3 Esquema de ligação

A placa de Arduino, a ponte “H”, os botões de controle e o motor devem ser conectados conforme o esquema de ligação da Figura 52.

Figura 146 - Esquema de ligação dos componentes eletroeletrônicos da cuba de ondas



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

6.2.4 Programação do Arduino

O Sketch abaixo controlará a velocidade do motor, por meio da saída de sinal PWM⁴⁹ do Arduino.

Sketch - Controle de velocidade PWM com botões

```
int pin_aumenta = 8; // pino conectado ao botão que aumenta a velocidade do motor.
int pin_diminui = 9; // pino conectado ao botão que diminui a velocidade do motor.
int pin_pwm = 5; // pino determinado para a saída do sinal PWM.
int estado_botao_aumenta = 0; // variável que armazena o estado do botão que aumenta a
velocidade do motor.
int estado_botao_diminui = 0; // variável que armazena o estado do botão que diminui a
velocidade do motor.
```

⁴⁹ *Pulse With Modulation* (Modulação em Largura de Pulso).

```

int cont = 100; // variável de "contagem" da velocidade iniciada com valor 100.

void setup() {
  Serial.begin(9600); // inicia a comunicação serial da placa de Arduino com o computador.
  pinMode(pin_aumenta, INPUT); // define o pin_aumenta como uma entrada digital.
  pinMode(pin_diminui, INPUT); // define o pin_diminui como uma entrada digital
}

void loop() {
  estado_botao_aumenta = digitalRead(pin_aumenta); // Variável armazena valor lido em
pin_aumenta.
  estado_botao_diminui = digitalRead(pin_diminui); // Variável armazena valor lido em
pin_diminui.
  if(cont<53) {
    cont=53; // estabelece limite mínimo de velocidade.
  }
  else if (cont>255) {
    cont=255; // estabelece limite máximo de velocidade.
  }
  else if (estado_botao_aumenta == HIGH){
    ++cont; // incrementa variável cont, se o botão de aumento da velocidade for pressionado.
  }
  else if (estado_botao_diminui == HIGH) {
    --cont; // decrementa variável cont, se o botão de diminuição da velocidade for pressionado.
  }
  Serial.println(cont); // exibe valor da variável cont no monitor serial.
  analogWrite(pin_pwm, cont); // envia para pin_pwm um sinal PWM com largura útil
determinada pela variável cont.
  delay(100); // interrompe o processamento em 100 milissegundos.
}

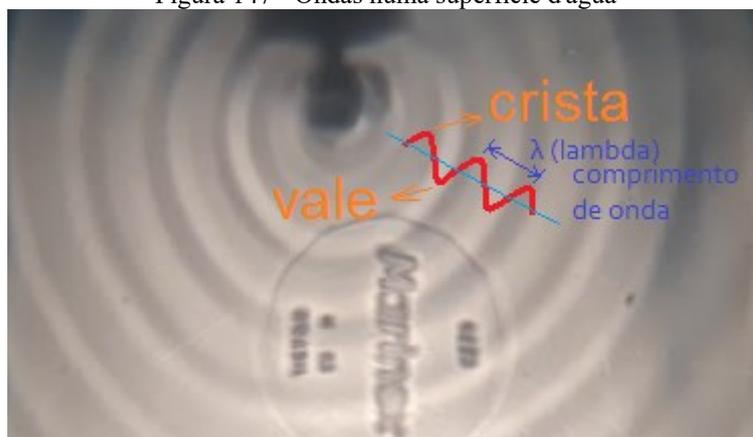
```

Fonte: O Autor (2021)

6.3 EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO E DISCUSSÃO SOBRE AS OBSERVAÇÕES

Após alimentar a placa de Arduino e o circuito do motor, varie a frequência de oscilação das ondas por meio dos botões de controle. Mostre as consequências de uma frequência mais alta e de uma frequência mais baixa para a distância entre as cristas e vales da ondas formadas (Figura 53).

Figura 147 - Ondas numa superfície d'água



Fonte: O Autor (2021)

A partir dessa primeira demonstração, solicite que os alunos respondam às seguintes perguntas:

- 1) O que difere o movimento de uma partícula do movimento de uma onda?
- 2) O que ocorre com a frequência e com o comprimento das ondas, quando aumentamos a velocidade de rotação do motor?
- 3) O que ocorre com a frequência e com o comprimento das ondas, quando diminuimos a velocidade de rotação do motor?

Demonstre aos alunos o que acontece quando colocamos um obstáculo rígido, como uma régua metálica, na trajetória das ondas (Figura 54) e peça que:

- 4) Descrevam o fenômeno da reflexão.

Figura 148 - Reflexão das ondas após incidirem sobre uma barreira rígida

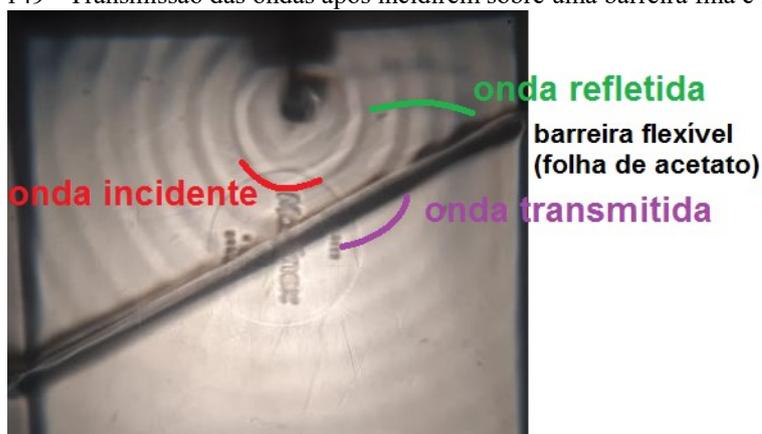


Fonte: O Autor (2021)

Demonstre aos alunos o que acontece quando colocamos um obstáculo flexível, como uma folha fina de acetato, na trajetória das ondas (Figura 55) e peça que:

5) Descrevam o fenômeno da transmissão de uma onda.

Figura 149 - Transmissão das ondas após incidirem sobre uma barreira fina e flexível



Fonte: O Autor (2021)

Demonstre aos alunos o que acontece quando colocamos um obstáculo esponjoso, como um pedaço de espuma, na trajetória das ondas (Figura 56) e peça que:

6) Descrevam o fenômeno da absorção de uma onda.

Figura 150 - Absorção das ondas após incidirem sobre uma barreira esponjosa



Fonte: O Autor (2021)

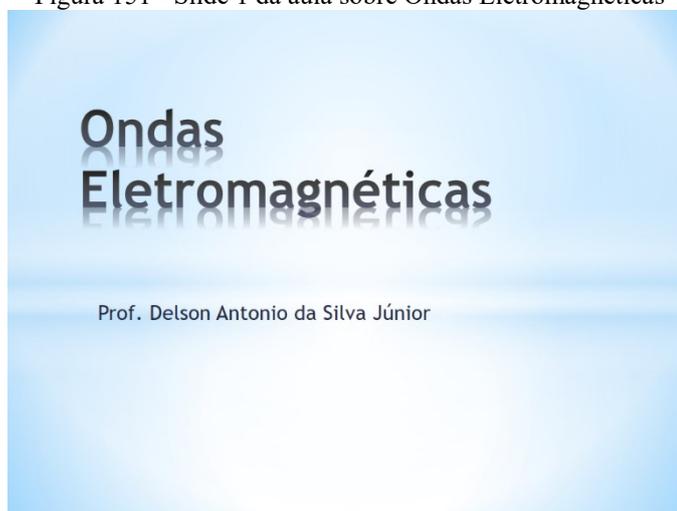
7 QUINTA ATIVIDADE – AULA EXPOSITIVA SOBRE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

(Duração prevista: 2 horas-aula de 40 minutos cada, em sequência.)

7.1 NOTAS DE AULA

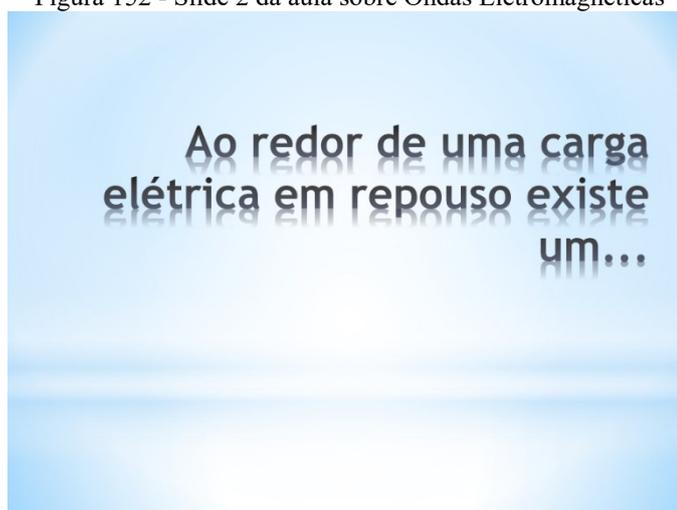
Seguem as notas da aula expositiva que abordou o tema das ondas eletromagnéticas, que é subsídio para as discussões sobre a radiação térmica.

Figura 151 - Slide 1 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



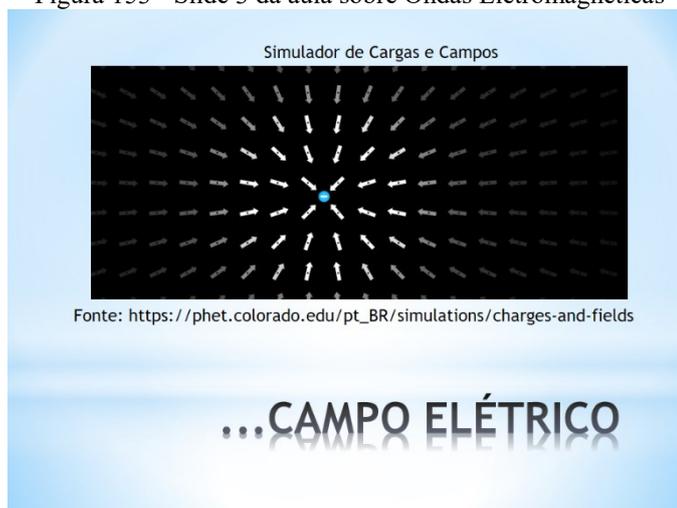
Fonte: O Autor (2021)

Figura 152 - Slide 2 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



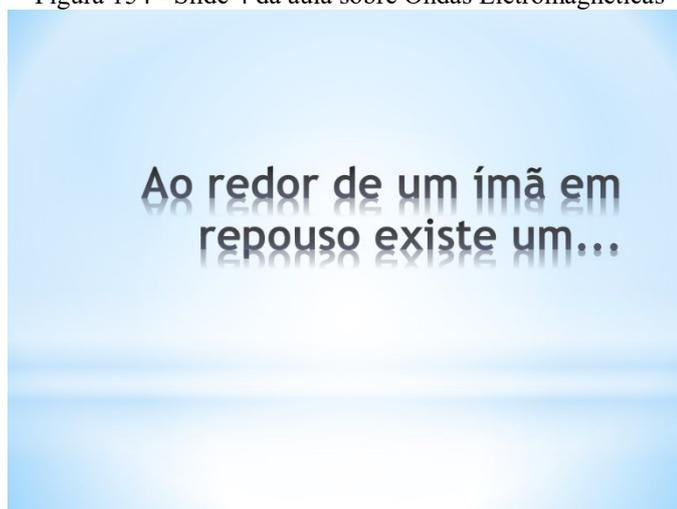
Fonte: O Autor (2021)

Figura 153 - Slide 3 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 154 - Slide 4 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



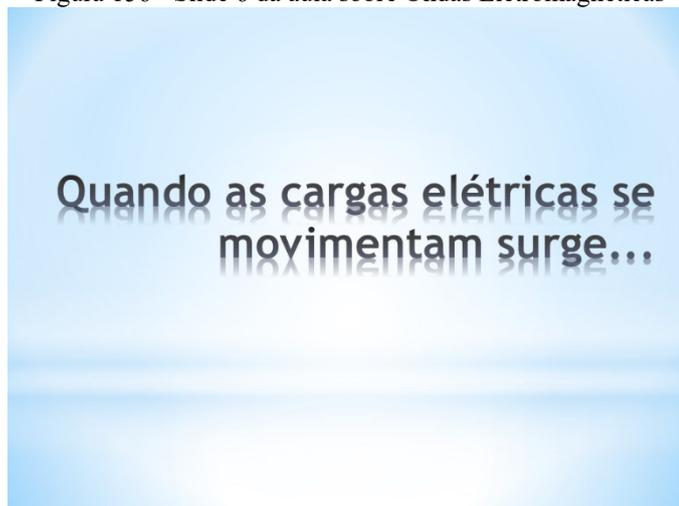
Fonte: O Autor (2021)

Figura 155 - Slide 5 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 156 - Slide 6 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



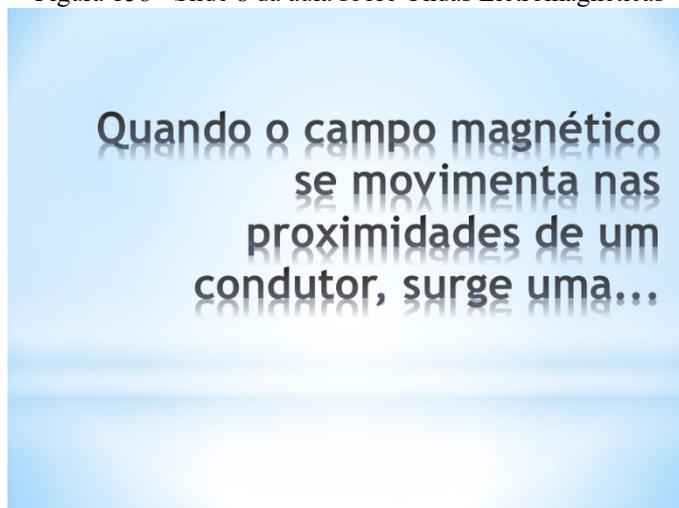
Fonte: O Autor (2021)

Figura 157 - Slide 7 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



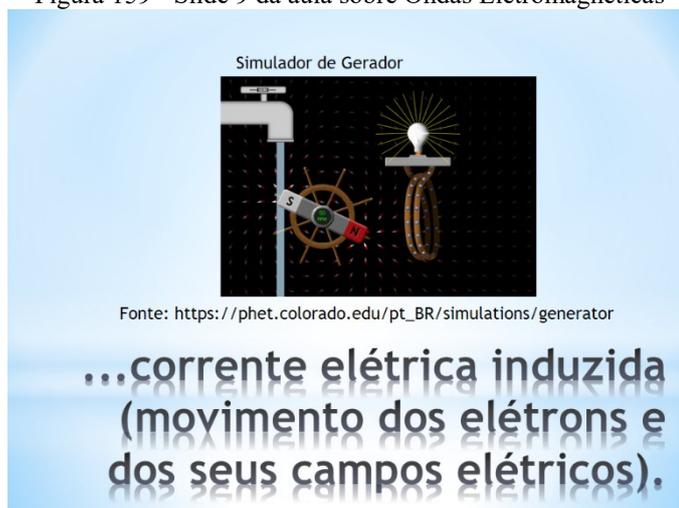
Fonte: O Autor (2021)

Figura 158 - Slide 8 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



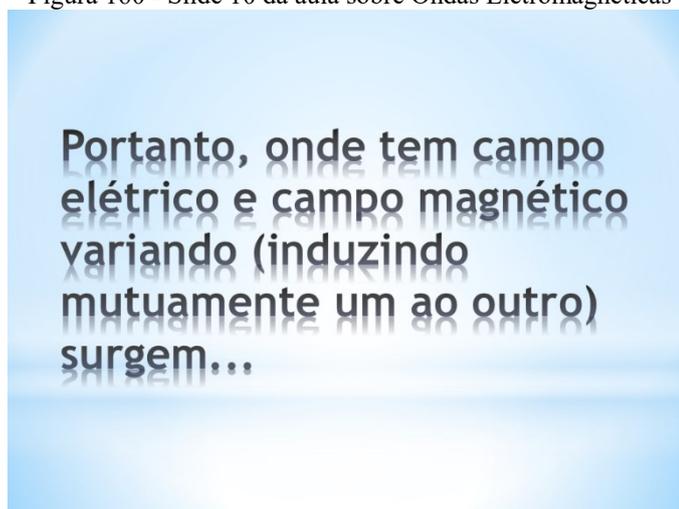
Fonte: O Autor (2021)

Figura 159 - Slide 9 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



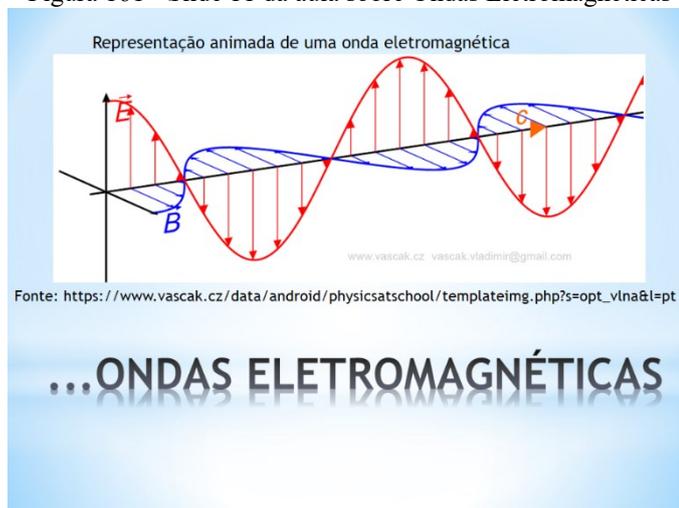
Fonte: O Autor (2021)

Figura 160 - Slide 10 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 161 - Slide 11 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 162 - Slide 12 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas

Modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio: a origem dos fótons de luz

Simulador de modelos do átomo de hidrogênio



Fonte:
https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/hydrogen-atom

- * Energia do elétron em uma órbita n:
- * $E(n) = -\frac{1}{n^2} \times 13,6 \text{ eV}$ (elétron - volt)
- * Energia de um fóton:
- * $hf = \Delta E$
Energia do fóton diferença de energia entre órbitas
- * $hf = E_{\text{órbita maior}} - E_{\text{órbita menor}}$
- * Em que:
- * $h \cong 4,135667 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ (constante de Planck);
- * f é a frequência do fóton.

Fonte: O Autor (2021)

Figura 163 - Slide 13 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas

* Exemplo:

* Calcule o comprimento de onda do fóton emitido pelo átomo de hidrogênio quando o seu elétron transita da 2ª para a 1ª órbita.

* 1º Passo:

- * $E(1) = -\frac{1}{1^2} \times 13,6 \text{ eV} = -13,6 \text{ eV}$
- * $E(2) = -\frac{1}{2^2} \times 13,6 \text{ eV} = -3,4 \text{ eV}$
- * $\Delta E = E_2 - E_1 = -3,4 - (-13,6) = 10,2 \text{ eV}$

* 2º Passo:

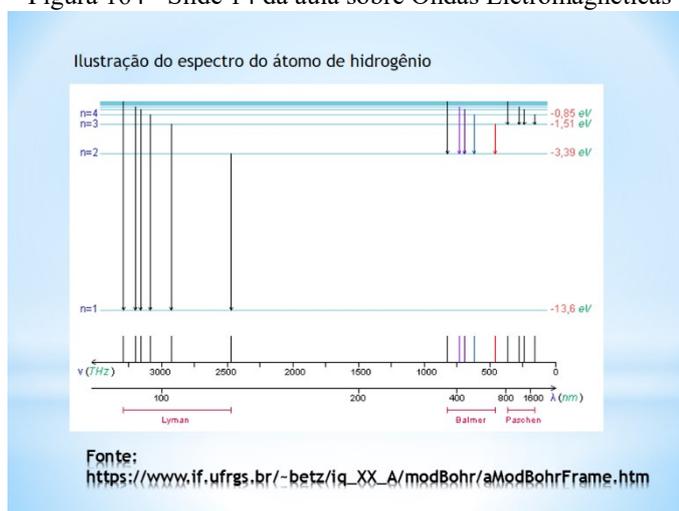
- * $hf = 10,2 \text{ eV}$
- * $f = \frac{10,2 \text{ eV}}{4,135667 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}}$
- * $f \cong 2,466 \times 10^{15} \text{ Hz}$

* 3º Passo:

- * $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,466 \times 10^{15} \frac{1}{\text{s}}}$
- * $\lambda = 1,216 \times 10^{-7} \text{ m} = 121,6 \times 10^{-9} \text{ m} = \mathbf{121,6 \text{ nm}}$

Fonte: O Autor (2021)

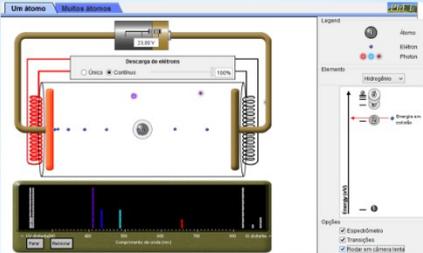
Figura 164 - Slide 14 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 165 - Slide 15 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas

Simulador de lâmpadas de descarga

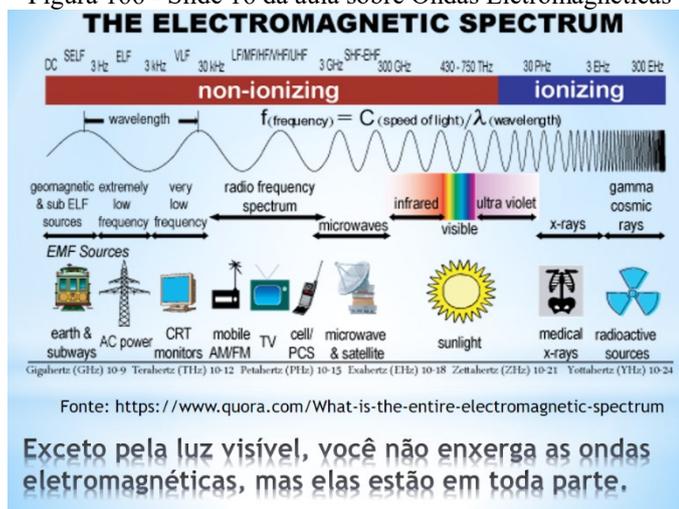


Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/discharge-lamps

Outra forma de alterar o nível de energia de um elétron

Fonte: O Autor (2021)

Figura 166 - Slide 16 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 167 - Slide 17 da aula sobre Ondas Eletromagnéticas

***Referências:**

- * GRIFFITHS, David J.. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2010.
- * KELLER, Frederick J.; GETTYS, W. Edward; SKOVE, Malcom J.. **Física**. São Paulo: Pearson Universidades, 1998. 2 v.
- * TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2001.

Fonte: O Autor (2021)

7.2 REFLEXÕES SOBRE O CONTEÚDO ESTUDADO

Ao final das discussões, deve ser solicitado que os alunos respondam às questões abaixo:

- 1) Por que, ao contrário da onda mecânica, uma onda eletromagnética não precisa de um meio físico para se propagar? Ou seja, o que está oscilando na propagação desse segundo tipo de onda?
- 2) De onde vêm as ondas eletromagnéticas?
- 3) O que o calor tem a ver com as ondas eletromagnéticas?

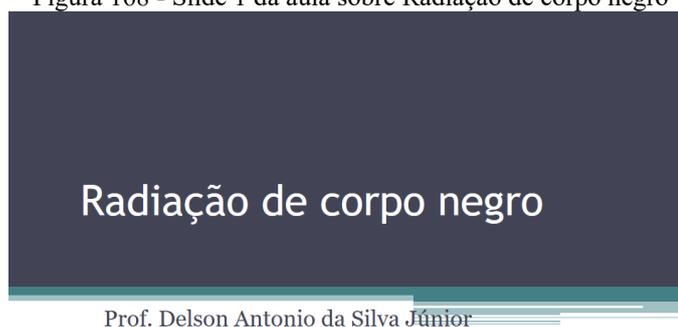
8 SEXTA ATIVIDADE – AULA EXPOSITIVA SOBRE RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

(Duração prevista: 2 horas-aula de 40 minutos cada, em sequência.)

8.1 NOTAS DE AULA

Seguem as notas da aula expositiva que abordou o tema da radiação de corpo negro, que é subsídio para as discussões sobre a radiação térmica dos corpos.

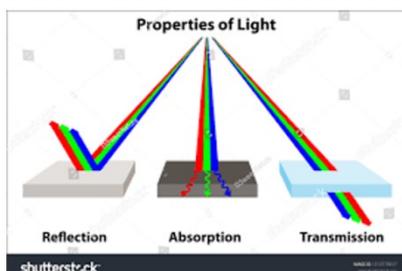
Figura 168 - Slide 1 da aula sobre Radiação de corpo negro



Fonte: O Autor (2021)

Figura 169 - Slide 2 da aula sobre Radiação de corpo negro

Quando a luz (e a radiação com outras frequências) encontra um obstáculo, ela pode ser refletida, transmitida ou absorvida, podendo ocorrer mais de um efeito simultaneamente.

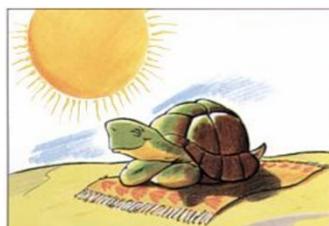


Fonte da figura: <https://www.shutterstock.com/tr/image-vector/how-light-works-properties-reflection-absorption-1313379017>

Fonte: O Autor (2021)

Figura 170 - Slide 3 da aula sobre Radiação de corpo negro

Quando a radiação eletromagnética é absorvida por um corpo, a temperatura dele **aumenta**.

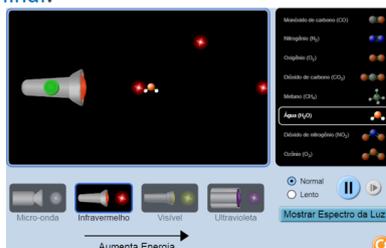


Fonte da figura: https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mefoo8/mefoo8_02/Beatriz/irradiacao.htm

Fonte: O Autor (2021)

Figura 171 - Slide 4 da aula sobre Radiação de corpo negro

Mas, o aquecimento de um corpo faz os seus átomos oscilarem. Na estrutura dos átomos, estão os elétrons que, quando oscilam, emitem radiação térmica (ondas eletromagnéticas na faixa de frequência do infravermelho). Ao emitir radiação, a temperatura do corpo **diminui**.



Fonte da figura: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/molecules-and-light

Fonte: O Autor (2021)

Figura 172 - Slide 5 da aula sobre Radiação de corpo negro

A partir de 600°C, o corpo aquecido começa a emitir radiação na faixa do espectro correspondente à luz visível.



Fonte da figura:
https://pt.wikipedia.org/wiki/Irradia%C3%A7%C3%A3o_t%C3%A9rmica#/media/Ficheiro:Hot_metalwork.jpg

Fonte: O Autor (2021)

Figura 173 - Slide 6 da aula sobre Radiação de corpo negro

Conhecendo a temperatura de um corpo, é possível calcular a quantidade de calor que está saindo dele e vice-versa.

$$\bullet R = \sigma T^4 \quad (\text{Lei de Stefan-Boltzmann}),$$

- Em que:
- **R** é a potência irradiada por unidade de área;
- $\sigma = 5,6705 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ (constante de Stefan);
- **T** é a temperatura do corpo.

Fonte: O Autor (2021)

Figura 174 - Slide 7 da aula sobre Radiação de corpo negro

Exemplo:

- Sabendo que a Terra recebe (em média) 1366 W/m² de energia do Sol, calcule uma estimativa da temperatura na superfície dessa estrela.
- **Dados:**
- Distância Terra-Sol: 149 600 000 km;
- Raio do Sol: 696 340 km;
- Área de superfície de uma esfera: $A=4\pi r^2$

Fonte: O Autor (2021)

Figura 175 - Slide 8 da aula sobre Radiação de corpo negro

Solução:

- Se desejássemos saber a temperatura do Sol medida na Terra, bastaria calcular:

$$T = \sqrt[4]{\frac{R}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1366}{5,6705 \times 10^{-8}}} \cong 394K \cong 121^\circ\text{C}$$

- Mas, desejamos saber a temperatura do Sol em sua superfície. Neste caso, precisamos:

Fonte: O Autor (2021)

Figura 176 - Slide 9 da aula sobre Radiação de corpo negro

Solução:

- Passo 1: Calcular a potência total emitida pelo Sol.
- Considere uma esfera, cujo raio tenha o valor da órbita da Terra em torno do Sol. A sua área será:
- $A_{esf} = 4\pi r^2 = 4\pi \times (1,496 \times 10^{11})^2 \cong 2,812 \times 10^{23} m^2$
- Se essa esfera emite 1366 W/m², então a potência total emitida por ela será:
- $P_T = 1366 \frac{W}{m^2} \times 2,812 \times 10^{23} m^2 \cong 3,841 \times 10^{26} W$

Fonte: O Autor (2021)

Figura 177 - Slide 10 da aula sobre Radiação de corpo negro

Solução:

- Passo 2: Calcular a potência emitida por área da superfície do Sol.
- Área da superfície solar:
- $A_{Sol} = 4\pi r^2 = 4\pi \times (6,9634 \times 10^8)^2 \cong 6,093 \times 10^{18} m^2$
- Potência por área na superfície solar (R):
- $R = \frac{P_T}{A_{Sol}} = \frac{3,841 \times 10^{26} W}{6,093 \times 10^{18} m^2} \cong 6,304 \times 10^7 \frac{W}{m^2}$

Fonte: O Autor (2021)

Figura 178 - Slide 11 da aula sobre Radiação de corpo negro

Solução:

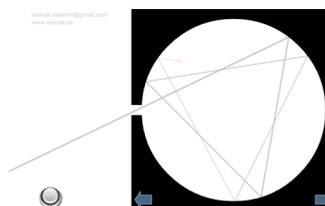
- Passo 3: Calcular a temperatura na superfície do Sol.

$$• T = \sqrt[4]{\frac{R}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{6,304 \times 10^7}{5,6705 \times 10^{-8}}} \cong 5774K \cong 5501^\circ\text{C}$$

Fonte: O Autor (2021)

Figura 179 - Slide 12 da aula sobre Radiação de corpo negro

A Lei de Stefan-Boltzmann se aplica a um corpo que absorve toda a radiação incidente sobre ele (comportamento idealizado): CORPO NEGRO



Fonte:
https://www.vasecak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_model&l=pt

Fonte: O Autor (2021)

Figura 180 - Slide 13 da aula sobre Radiação de corpo negro

Corpos reais emitem e absorvem a taxas menores que o corpo negro

- Para um corpo real emitindo radiação térmica, a Lei de Stefan-Boltzmann recebe um termo adicional:

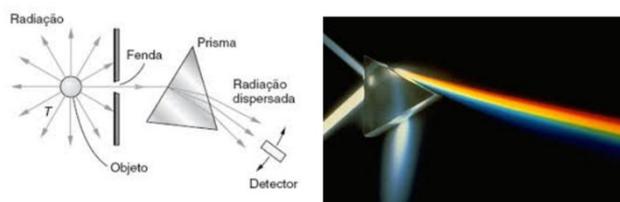
$$• R = \epsilon \sigma T^4$$

- ϵ é a emissividade do corpo. Seu valor varia de zero (não emite nada) a 1 (emite como um corpo negro).

Fonte: O Autor (2021)

Figura 181 - Slide 14 da aula sobre Radiação de corpo negro

Como separar os diferentes comprimentos de onda da radiação emitida por um corpo aquecido?



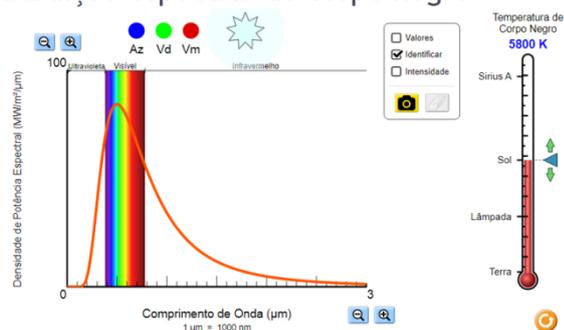
Fonte da figura: Livro "Física Moderna", de Paul A. Tipler e Ralph A. Llewellyn, LTC, 2001.

Fonte da figura: <http://labman.phys.utk.edu/phys222core/modules/m7/dispersion.html>

Fonte: O Autor (2021)

Figura 182 - Slide 15 da aula sobre Radiação de corpo negro

Resultado dessa separação: Curva da distribuição espectral do corpo negro



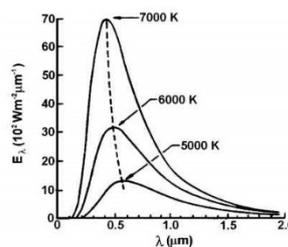
Fonte da figura: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/blackbody-spectrum

Fonte: O Autor (2021)

Figura 183 - Slide 16 da aula sobre Radiação de corpo negro

Lei de deslocamento de Wien

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T}$$



Fonte: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>

Fonte: O Autor (2021)

Figura 184 - Slide 17 da aula sobre Radiação de corpo negro

Exemplo:

- A temperatura na superfície do Sol é aproximadamente 5800K, e as medidas da distribuição espectral da luz solar mostram que o astro se comporta como um corpo negro, a não ser para comprimentos de onda muito pequenos. Supondo que o Sol seja um corpo negro ideal, qual é o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação emitida é máxima?
- (Fonte: “Física Moderna”, de Paul A. Tipler e Ralph A. Llewellyn, LTC, 2001.)

Fonte: O Autor (2021)

Figura 185 - Slide 18 da aula sobre Radiação de corpo negro

Solução:

$$\bullet \lambda_{\max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{5800} \cong 4,997 \times 10^{-7} m \cong 499,7 \times 10^{-9} m \cong 499,7 nm$$

Comprimento de onda na faixa do espectro correspondente à luz visível.

Fonte: O Autor (2021)

Figura 186 - Slide 19 da aula sobre Radiação de corpo negro

Referências

- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3^a. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- EISBERG, Robert Robert. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. São Paulo: Gen Ltc, 1979.

Fonte: O Autor (2021)

8.2 REFLEXÕES SOBRE O CONTEÚDO ESTUDADO

Ao final das discussões, deve ser solicitado que os alunos respondam às questões abaixo:

- 1) O que acontece quando uma molécula de água absorve um fóton de luz infravermelho?
- 2) Qual é a diferença entre o corpo negro e um corpo real?
- 3) Sabendo que a temperatura do seu corpo é de aproximadamente $36,5^{\circ}\text{C}$ ($309,5\text{K}$), calcule a potência irradiada por área (R) e o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação emitida é máxima ($\lambda_{\text{máx}}$).

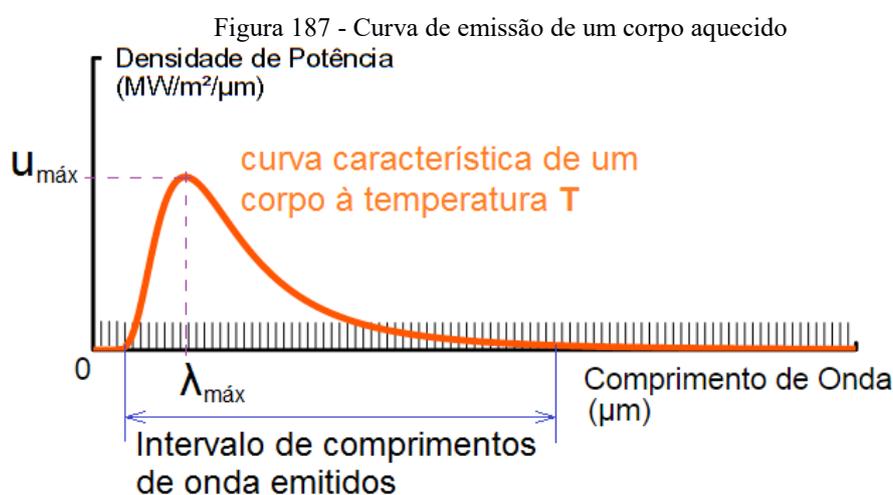
9 SÉTIMA ATIVIDADE - EMISSÃO E ABSORÇÃO DE CALOR POR UM CORPO CLARO E POR UM CORPO ESCURO

(Duração prevista: 4 horas-aula de 40 minutos cada, sendo 2 para a realização do experimento e coleta de dados, e 2 para o término das discussões e avaliação da aprendizagem.)

9.1 ROTEIRO DO PROFESSOR

9.1.1 Introdução teórica

Os corpos aquecidos emitem radiação eletromagnética, porque a agitação térmica das suas partículas promove o movimento de cargas elétricas. Se conseguirmos separar os diferentes comprimentos de onda emitidos por esse corpo e, além disso, se formos capazes de medir a quantidade de energia (densidade de potência) irradiada por esses comprimentos de onda, então obtemos uma curva como a da ilustração abaixo.



Fonte: O Autor (2021)

A curva da figura 93 mostra que um corpo aquecido emite radiação eletromagnética num determinado intervalo de comprimentos de onda, que depende da temperatura T (em kelvins) em que ele se encontra. O comprimento de onda para o qual a densidade de potência é máxima ($\lambda_{\text{máx}}$) pode ser obtido por meio da Lei de Wien:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,002898}{T} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 7}$$

J\~{a} a pot\~{e}ncia irradiada por \~{a}rea (R) que um corpo \~{a} temperatura T emite \~{e} dada pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \sigma T^4 \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 8}$$

Em que σ \~{e} a constante de Stefan e o seu valor \~{e} $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$ (TIPLER e LLEWELLYN, 2001).

A Lei de Stefan-Boltzmann como foi apresentada acima fornece a pot\~{e}ncia por \~{a}rea emitida por um corpo ideal, que \~{e} capaz de emitir toda a energia que ele absorveu anteriormente. E essa energia absorvida corresponde a toda radia\c{c}\~{a}o que incidiu sobre ele, pois esse corpo te\~{o}rico n\~{a}o reflete. Um corpo como esse \~{e} chamado pelos f\~{i}sicos de corpo negro. J\~{a} um corpo real, quando comparado ao corpo negro, emite radia\c{c}\~{a}o com valor reduzido pela emissividade ϵ :

$$R = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 9}$$

A emissividade de um corpo real assume valores no intervalo: $0 \leq \epsilon < 1$.

9.1.2 Procedimentos de montagem

9.1.2.1 Descri\c{c}\~{a}o do experimento

Neste experimento, propomos estudar as caracterfsticas da radia\c{c}\~{a}o t\~{e}rmica emitida por duas chapas de alum\~{i}nio: uma pintada com tinta preta e outra com a superf\~{i}cie polida (sem nenhum revestimento). Ligaremos uma l\~{a}mpada no interior de uma caixa de isopor para fornecer a radia\c{c}\~{a}o que incidir\~{a} sobre os objetos de estudo. O brilho da l\~{a}mpada (relacionado \~{a}

potência elétrica) será controlado por um circuito dimmer⁵⁰. No lado oposto ao da lâmpada são feitas duas aberturas quadradas na caixa de isopor para que a radiação proveniente da lâmpada chegue até as chapas de alumínio. A medição da temperatura será realizada por um par de sensores para cada chapa de alumínio. Esse par será composto por um sensor de temperatura infravermelho (MLX90614) e por um sensor de temperatura de contato (DS18B20). As leituras fornecidas por esses sensores fornecerão subsídios para a discussão sobre o fenômeno da radiação térmica.

9.1.2.2 *Lista de materiais*

Esse experimento foi construído com os seguintes materiais:

- 4) Caixa de isopor de 3 litros com tampa;
- 5) Receptáculo para lâmpada padrão E27;
- 6) Lâmpada incandescente 220 V, 100 W, rosca E27;
- 7) Controlador de potência (*dimmer*);
- 8) Chapas de alumínio 3 cm x 5 cm x 2 mm (espessura);
- 9) Lata de tinta *spray* da cor preta;
- 10) Matriz de contatos (protoboard);
- 11) Duas placas de Arduino UNO;
- 12) Dois sensores de temperatura infravermelhos MLX90614;
- 13) Dois sensores de temperatura de contato DS18B20;
- 14) Fita térmica;
- 15) Seis resistores de 4,7 k Ω ;
- 16) Dois capacitores de 0,1 μ F;
- 17) Fios para conexões;
- 18) Uma barra roscada;
- 19) Seis pares de porcas e arruelas lisas da medida da barra roscada;
- 20) Placa de madeira quadrada, 17 cm x 17 cm;
- 21) Quatro pés de plástico para móveis;

⁵⁰ Um circuito dimmer controla a potência elétrica a ser disponibilizada para a carga (lâmpada incandescente), por meio de “recortes” que podem ser realizados na curva senoidal da tensão elétrica que a alimenta. Quanto mais “recortes”, menor a tensão da carga e, conseqüentemente, menor a sua potência e o brilho da lâmpada.

- 22) Um pedaço de cabo de vassoura com 4 cm de comprimento;
- 23) Ferro de solda;
- 24) Estanho;
- 25) Espaguete termo retrátil;
- 26) Soprador térmico;
- 27) Um bastão de silicone (cola quente);
- 28) Pistola de cola quente;
- 29) Braçadeiras de nylon;
- 30) Alicate de bico;
- 31) Alicate de corte;
- 32) Estilete;
- 33) Fita isolante;
- 34) Meio metro de fio rígido 1,5 mm².

9.1.2.3 *Construção do experimento*

Começamos os preparos com a montagem da caixa de isopor. Primeiramente, utilize o receptáculo como um molde e marque a sua circunferência em uma das faces laterais mais estreita da caixa de isopor. Em seguida, utilize um estilete para cortar o disco de isopor na marca realizada. Na sequência, atravesse a parede da caixa de isopor com o receptáculo, deixando a entrada da lâmpada para dentro e os pontos das ligações elétricas para fora. Na face oposta à da lâmpada, utilize caneta e estilete para abrir duas aberturas. Cada uma delas tem o formato quadrado, com 2 centímetros de lado, e estão separadas lateralmente por mais 4 centímetros. Veja a Figura 94.

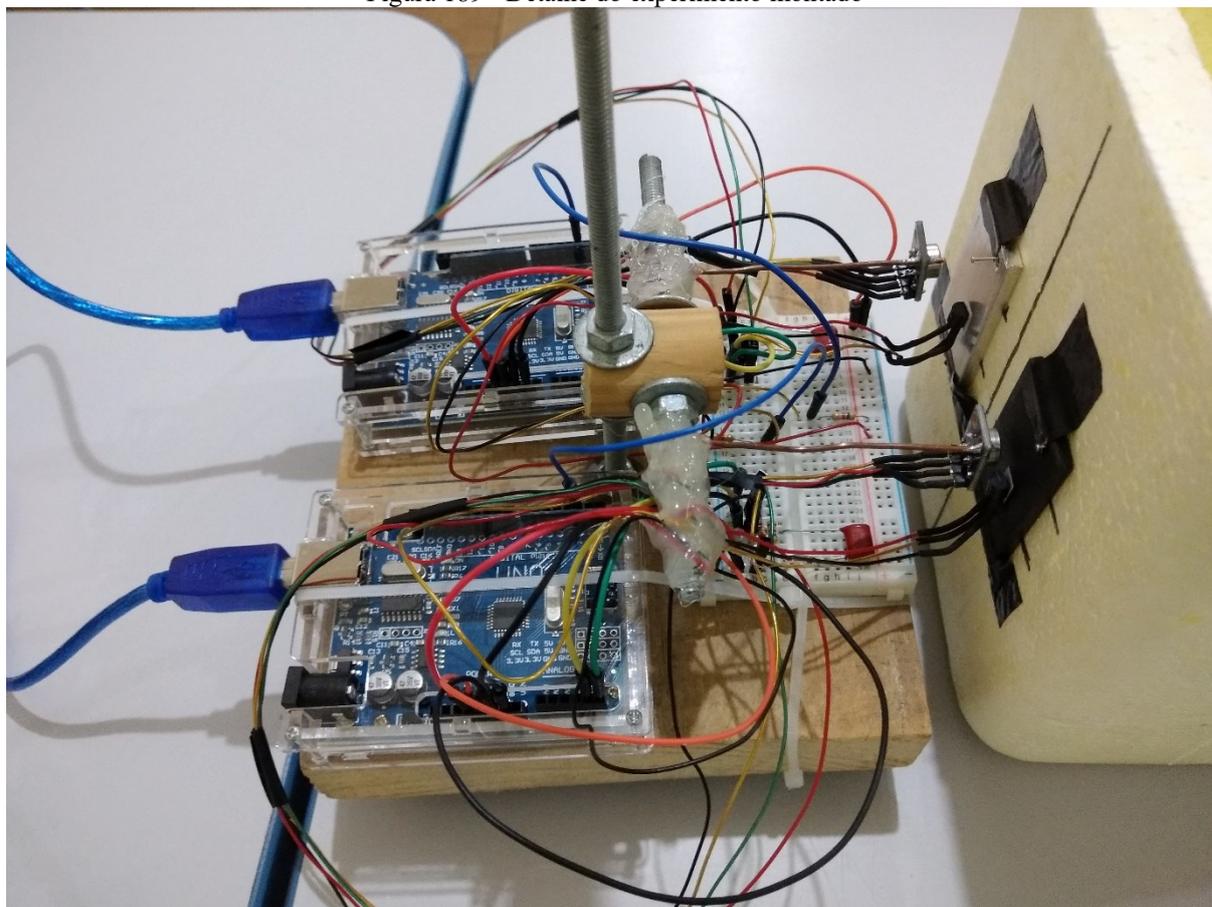
Figura 188 - Preparo da caixa de isopor



Fonte: O Autor (2021)

A Figura 95 mostra o restante do experimento, na qual podemos ver que as chapas de alumínio foram fixadas à caixa de isopor, cada uma na direção de um dos furos quadrados, com o auxílio de tiras de fita isolante. Repare que uma das chapas foi pintada com tinta preta. Os sensores de contato (DS18B20) foram fixados às chapas com o auxílio de fita térmica. Os sensores infravermelhos (MLX90614) devem ficar a uma distância inferior a 1 cm das suas respectivas chapas de alumínio. Para isso, cada sensor foi suspenso por uma haste de fio de cobre rígido, que estava fixada ao suporte do experimento.

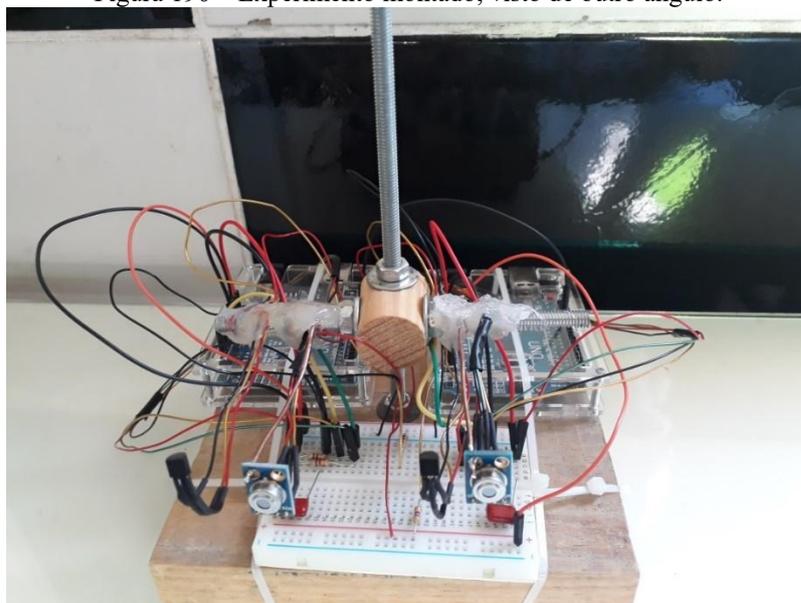
Figura 189 - Detalhe do experimento montado



Fonte: O Autor (2021)

Ainda na Figura 95, observe que a matriz de contatos (proto-board) e as placas de Arduino foram fixadas à base do experimento com o auxílio de braçadeiras de nylon. Quanto à referida base, esta é composta por uma placa quadrada de madeira, na qual foram fixados quatro pés de plástico (um em cada canto) em sua face inferior. No centro da placa, uma barra roscada foi fixada na posição vertical, com o auxílio de porcas e arruelas. Em um pequeno pedaço de cabo de vassoura, foram feitos dois furos que o atravessam diametralmente, sendo um deles para ser atravessado pela barra roscada vertical e o outro para ser atravessado por um pedaço de barra roscada na posição horizontal. Foi no pedaço de barra roscada horizontal que foram fixadas as hastes de suporte dos sensores infravermelhos e, também, onde foi aplicada cola quente para manter os fios dos sensores na posição mais conveniente. A Figura 96 mostra outro ângulo do experimento montado.

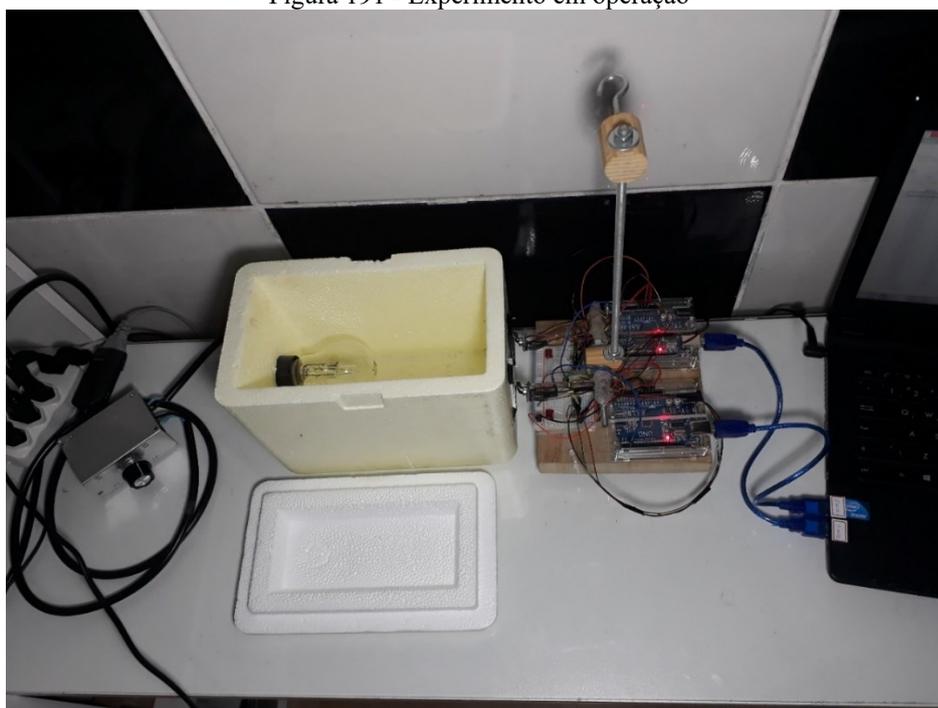
Figura 190 – Experimento montado, visto de outro ângulo.



Fonte: O Autor (2021)

A Figura 97 mostra o experimento completo. À esquerda, temos o controlador da potência da lâmpada (*dimmer*), em uma caixa metálica com um potenciômetro no seu painel frontal. Ao centro, está a caixa de isopor e o conjunto do suporte com as placas de Arduino e os sensores. À direita se encontra o *notebook* utilizado para programar o Arduino e para coletar os dados durante a execução da experiência.

Figura 191 - Experimento em operação

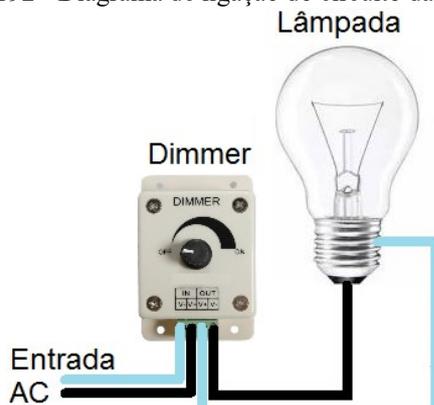


Fonte: O Autor (2021)

9.1.2.4 Montagem do circuito da lâmpada

O diagrama de ligação da lâmpada ao controlador *dimmer* é mostrado na Figura 98.

Figura 192 - Diagrama de ligação do circuito da lâmpada

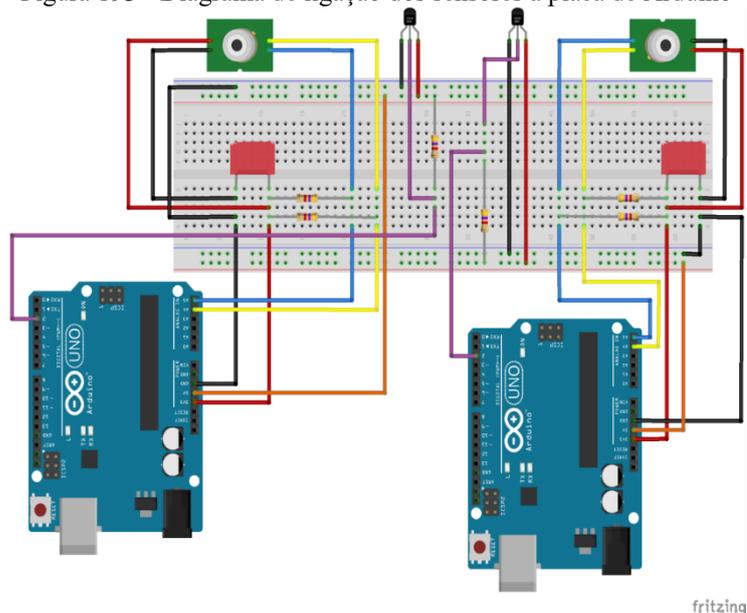


Fonte: O Autor (2021)

9.1.2.5 Conexão dos sensores à placa de Arduino

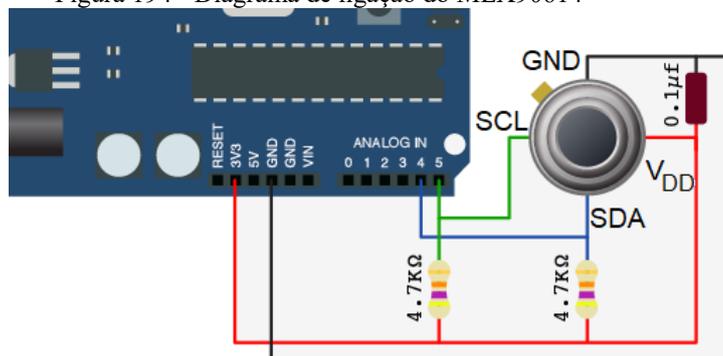
O diagrama da Figura 99 mostra como os sensores devem ser conectados à placa de Arduino. Complementarmente, a Figura 100 detalha a ligação do sensor MLX90614.

Figura 193 - Diagrama de ligação dos sensores à placa de Arduino



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

Figura 194 - Diagrama de ligação do MLX90614



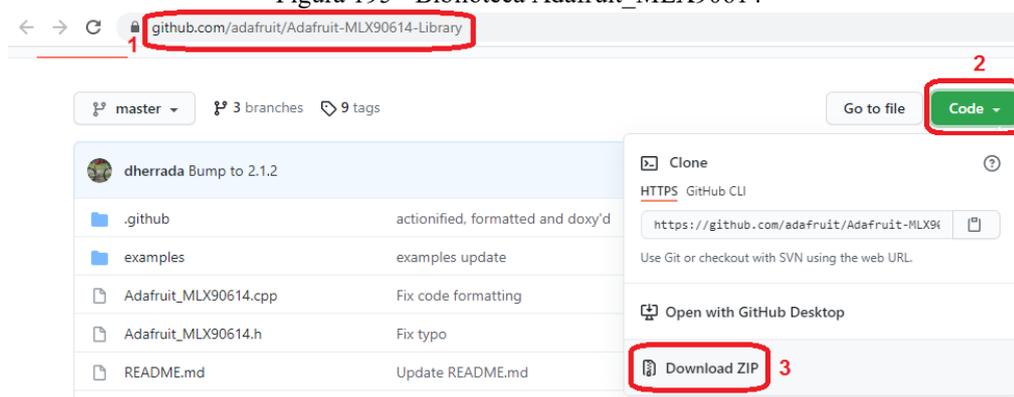
Fonte: Página Artilharia Digital⁵¹

9.1.3 Procedimentos de Programação do Arduino

9.1.3.1 Instalação de novas bibliotecas no Arduino

O uso do sensor MLX90614 fica mais fácil quando instalamos a biblioteca Adafruit_MLX90614⁵² (Figura 101). Acesse o endereço indicado (1), abra o menu “Code” (2) e clique em “Download ZIP” (3). Salve o arquivo baixado em uma pasta da sua preferência.

Figura 195 - Biblioteca Adafruit_MLX90614

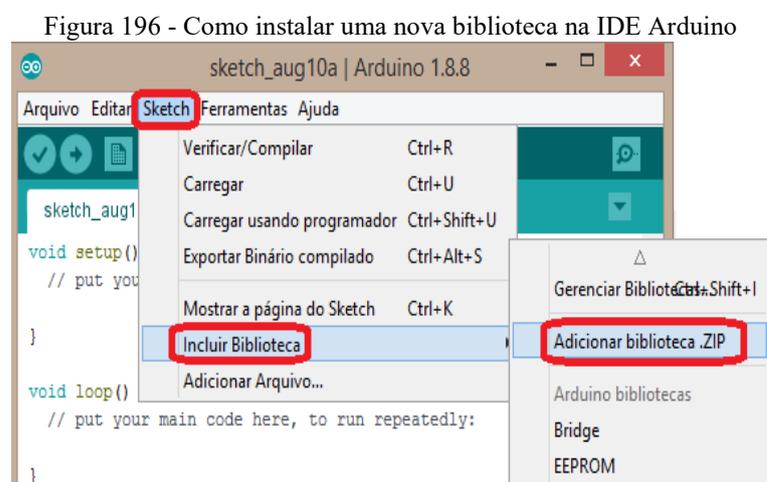


Fonte: O Autor (2021)

⁵¹ Disponível em: <https://www.artilhariadigital.com/2014/11/Medir-temperatura-com-sensor-infravermelho-MLX90614-e-Arduino.html>.

⁵² Disponível em: <https://github.com/adafruit/Adafruit-MLX90614-Library>.

A instalação da biblioteca baixada pode ser realizada no Arduino IDE acessando **Sketch >> Incluir Biblioteca >> Adicionar biblioteca .ZIP** (Figura 102). Na janela que se abre, acesse a pasta onde você salvou o arquivo baixado e o selecione.



Fonte: O Autor (2021)

Ao término desses passos, já deveria ser possível carregar o programa do sensor MLX90614 no Arduino e vê-lo funcionar. Se você tentar isso, irá se deparar com um erro na etapa de compilação do *sketch*. Dessa forma, é preciso instalar uma segunda biblioteca, cuja função é estabelecer o protocolo de comunicação entre o sensor MLX90614 e o microcontrolador da placa de Arduino, a Adafruit_I2CDevice. Ela faz parte de um pacote de bibliotecas chamado Adafruit_BusIO. Mas, a sua instalação convencional também não fez o programa do referido sensor funcionar. Após algumas tentativas e erros, tivemos sucesso seguindo os seguintes passos:

- 1) Renomeie a pasta da biblioteca Adafruit-MLX90614-Library-master para **Adafruit_MLX90614**. Você precisará localizar essa pasta no seu computador.
- 2) Siga os mesmos procedimentos utilizados para baixar a biblioteca Adafruit_MLX90614, agora, para baixar a biblioteca **Adafruit_BusIO**⁵³. Importante: Neste caso, não a instale pela IDE Arduino.
- 3) Descompacte o conteúdo da biblioteca recém-baixada em uma pasta da sua preferência.

⁵³ Disponível em: https://github.com/adafruit/Adafruit_BusIO.

4) Abra a pasta descompactada da biblioteca Adafruit_BusIO, copie todo o seu conteúdo e cole dentro da pasta da biblioteca Adafruit_MLX90614.

5) Reinicie o Arduino IDE.

9.1.3.2 Sketch para coleta dos dados do objeto preto

O protocolo I2C utiliza as portas analógicas A4 e A5 da placa de Arduino para a comunicação com o sensor MLX90614, por meio dos seus contatos SDA (Serial DATA) e SCL (Serial CLOCK), respectivamente. Como utilizaremos dois sensores desse tipo, precisaremos de duas placas de Arduino. Observe que, adicionalmente, utilizamos um sensor DS18B20 para compararmos com o sensor MLX90614, mas o seu uso é opcional. O *sketch* abaixo deve ser carregado na memória do microcontrolador da placa de Arduino que irá monitorar a temperatura do objeto preto.

Sketch - Programação para leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto pintado de preto

```
#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor_DS18B20;

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  sensors.getAddress(sensor_DS18B20, 0);
  while (!Serial);

  Serial.println("Comparando MLX90614 e DS18B20");

  if (!mlx.begin()) {
    Serial.println("Error connecting to MLX sensor. Check wiring.");
    while (1);
  };
};
```

```

Serial.println("CLEARDATA");
                                                                                               Serial.println("LABEL,
Hora,MLX90614_Ambiente,MLX90614_Objeto,DS18B20_Objeto");
  delay(1000);
}

void loop(void) {

  sensors.requestTemperatures();
  float tempC1 = sensors.getTempC(sensor_DS18B20);

  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(mlx.readAmbientTempC());
  Serial.print(",");
  Serial.print(mlx.readObjectTempC());
  Serial.print(",");
  Serial.println(tempC1);
  delay(3000);
}

```

Fonte: O Autor (2021)

9.1.3.3 Sketch para coleta dos dados do objeto branco

A placa de Arduino que irá receber os dados dos sensores que monitoram a temperatura do objeto branco deve ter o seguinte programa carregado na memória do seu microcontrolador:

Sketch - Programação para leitura dos sensores que monitoram a temperatura do objeto polido

```

#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor_DS18B20;

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  sensors.getAddress(sensor_DS18B20, 0);
}

```

```

while (!Serial);

Serial.println("Comparando MLX90614 e DS18B20");

if (!mlx.begin()) {
  Serial.println("Error connecting to MLX sensor. Check wiring.");
  while (1);
};

Serial.println("CLEARDATA");
Serial.print("ROW,SET,10000");
Serial.println("LABEL,
Hora,MLX90614_Ambiente,MLX90614_Objeto,DS18B20_Objeto");
delay(1000);
}

void loop() {

sensors.requestTemperatures();
float tempC2 = sensors.getTempC(sensor_DS18B20);

Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print(mlx.readAmbientTempC());
Serial.print(",");
Serial.print(mlx.readObjectTempC());
Serial.print(",");
Serial.println(tempC2);

delay(3000);
}

```

Fonte: O Autor (2021)

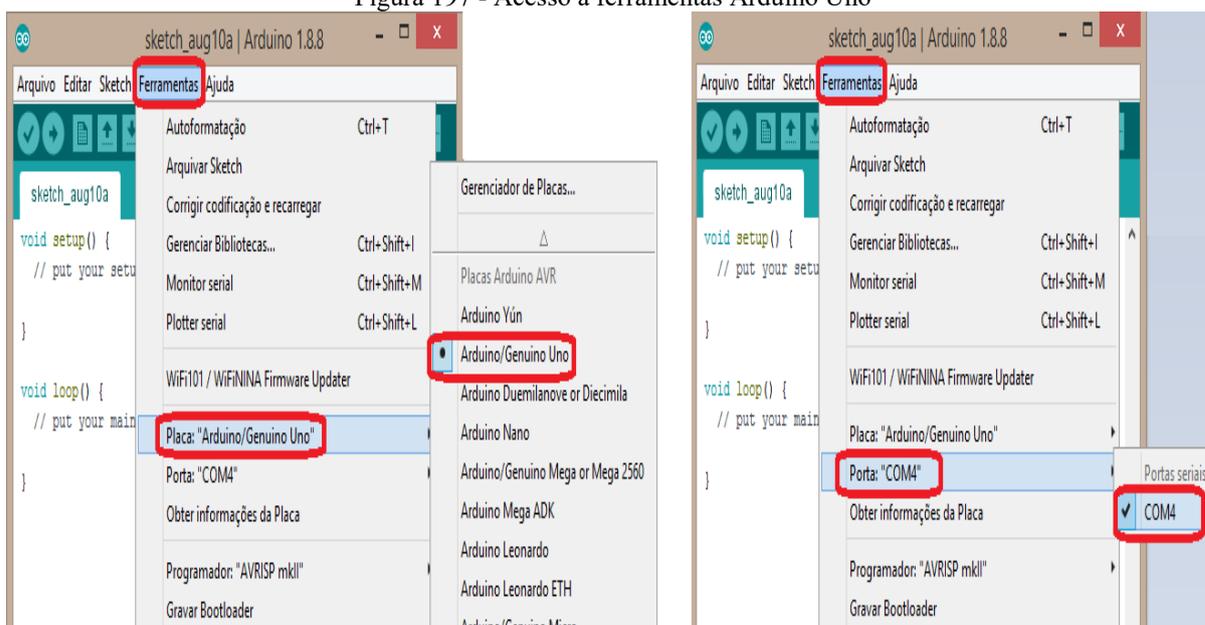
9.1.3.4 Configuração do software (IDE) para a comunicação do Arduino com o computador

Se você estiver utilizando um computador com duas portas USB's disponíveis, poderá programar as duas placas de Arduino simultaneamente. Basta conectar cada placa a uma porta diferente (por exemplo: COM4 e COM5, para quem utiliza o Windows).

Dica importante: Após escrever os *sketches* de cada placa, salve-os e feche a IDE Arduino. Reabra cada *sketch* clicando no ícone individual de cada arquivo. Se você abrir os *sketches* a partir de uma mesma IDE, não será possível selecionar portas diferentes para cada placa.

Acesse **Ferramentas >> Placa** e escolha a versão do seu Arduino (nosso caso é o Uno R3). Por último, acesse **Ferramentas >> Porta** e selecione a porta de comunicação a ser utilizada pelo computador (Figura 103). Repita esses passos para a outra placa de Arduino, escolhendo uma porta diferente.

Figura 197 - Acesso a ferramentas Arduino Uno

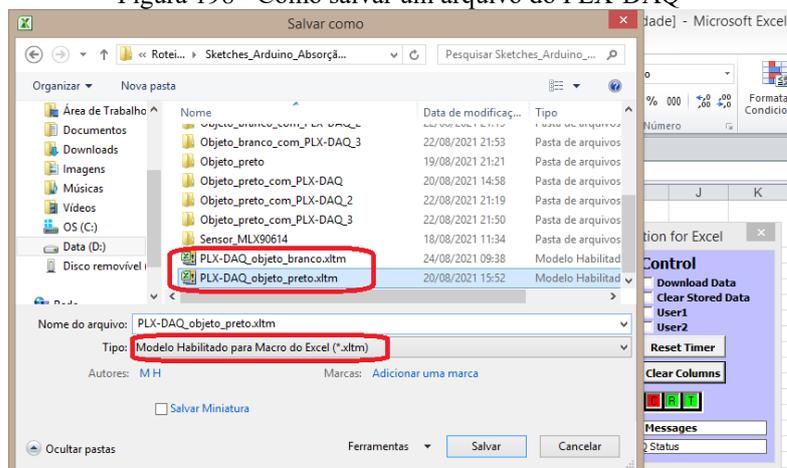


Fonte: O Autor (2021)

9.1.4 Manuseio do experimento

Abra o PLX-DAQ e salve dois arquivos diferentes, um para cada placa de Arduino. Ao salvar, escolha o tipo “Modelo Habilitado para Macro do Excel (*.xltm)”. Em seguida, feche os arquivos e os reabra a partir dos seus ícones individuais. Veja a Figura 104.

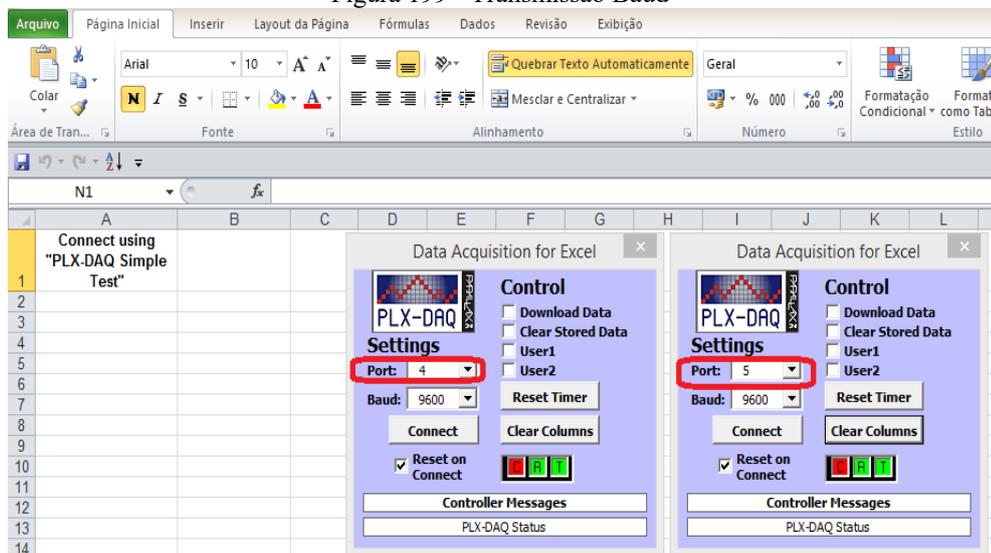
Figura 198 - Como salvar um arquivo do PLX-DAQ



Fonte: O Autor (2021)

Informe a porta de comunicação do computador, à qual cada placa de Arduino está conectada. Depois, selecione a taxa de transmissão “Baud” (nosso caso é 9600) e clique no botão que inicia a conexão (*Connect*). Veja a Figura 105.

Figura 199 - Transmissão Baud



Fonte: O Autor (2021)

A princípio, você poderá pensar que os dados serão armazenados em cada uma das planilhas que foram abertas. Mas, na verdade, os dados transmitidos pelas duas placas são armazenados pelo PLX-DAQ na planilha que estiver ativa em primeiro plano na sua tela. No entanto, esses dados aparecerão em posições diferentes da planilha. Nas primeiras linhas, você verá os dados coletados do sensor que monitora a temperatura do objeto preto. Os dados da

temperatura do objeto branco irão aparecer nas mesmas colunas, porém em linhas posicionadas mais abaixo. Observe que utilizamos a instrução “*Serial.print("ROW,SET,10000");*” no *sketch* carregado na placa de Arduino que recebe dados do objeto branco. Essa instrução faz com que os dados dessa última placa sejam armazenados a partir da linha n.º 10000 da planilha do Excel.

9.1.5 Execução do experimento

- I. Após preparar a montagem do experimento, gire o potenciômetro do *dimmer* até que a lâmpada comece a brilhar com pouca intensidade.
- II. Inicie a coleta dos dados com o auxílio de um computador e observe a variação da temperatura em cada chapa de alumínio.

ROTEIRO DO ALUNO

9.1.6 Discussões sobre o experimento e avaliação da aprendizagem

- 1) Enquanto os dados são coletados, pense e responda: Como é possível que o sensor infravermelho consiga medir a temperatura de um objeto sem fazer contato com ele? Ou seja, qual é a grandeza física que está sendo medida e convertida em temperatura?
- 2) Observe a variação das temperaturas das duas chapas de alumínio e responda:
 - a) Em qual delas a temperatura sobe mais rápido e em qual delas a temperatura sobe mais devagar?
 - b) Por que ocorre essa diferença na variação da temperatura das duas chapas?
- 3) Quando a temperatura das duas chapas de alumínio parar de variar, utilize a equação abaixo e calcule a emissividade de cada uma delas.

$\epsilon = \frac{T_{infraverm}^4 - T_{ambiente}^4}{T_{contato}^4 - T_{ambiente}^4}$		Equação 10
Valor encontrado para a chapa preta:	Valor encontrado para a chapa polida:	

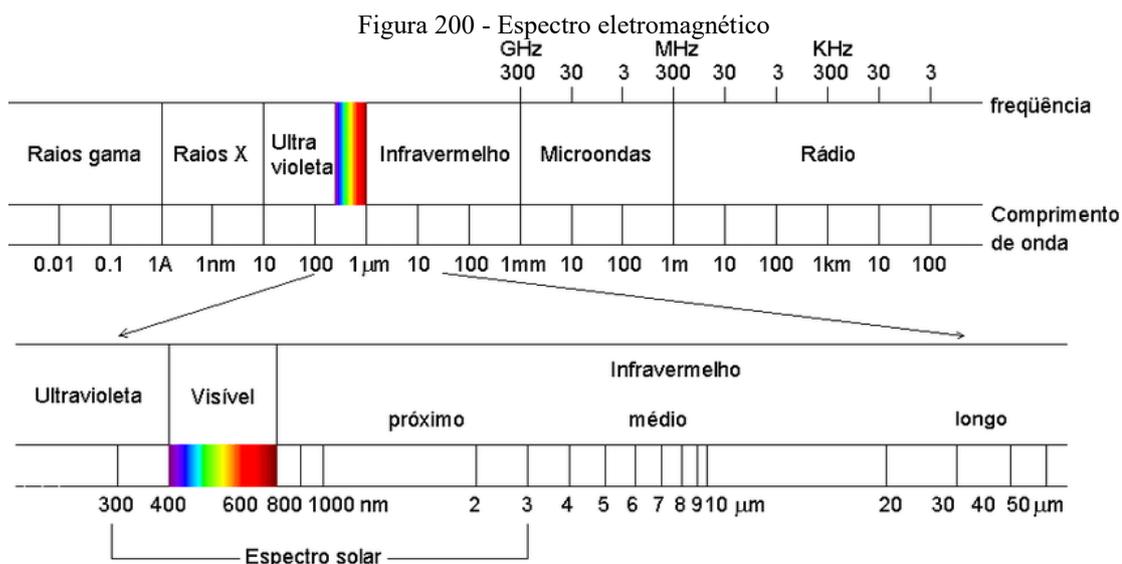
- 4) O valor da emissividade encontrado para o objeto escuro foi maior que a unidade. Na prática, isso significaria que o objeto escuro emite mais energia do que ele absorve, o que não pode estar correto. Aponte as possíveis razões para essa aparente inconsistência do experimento.
- 5) Aplique a Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 9) e calcule a potência por área que cada chapa de alumínio está emitindo:

$R = \epsilon \sigma T^4$	
Valor encontrado para a chapa preta:	Valor encontrado para a chapa polida:

- 6) Aplique a Lei de Wien (Equação 7) e calcule o comprimento de onda para o qual a densidade de potência é máxima ($\lambda_{m\acute{a}x}$):

$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,002898}{T}$	
Valor encontrado para a chapa preta:	Valor encontrado para a chapa polida:

- 7) Marque no diagrama abaixo as posições correspondentes aos comprimentos de onda encontrados no item 5. Faça uma marca para cada chapa e identifique à qual cada um pertence.



Fonte: Publicação na página Research Gate.⁵⁴

⁵⁴ Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/280977893_ABSORTANCIA_SOLAR_DE_SUPERFICIES_OPACAS_METODOS_DE_DETERMINACAO_E_BASE_DE_DADOS_PARA_TINTAS_LATEX_ACRILICA_E_PVA.

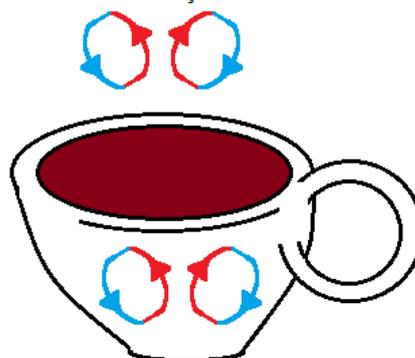
10 OITAVA ATIVIDADE - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

(Duração prevista: 2 horas-aula de 40 minutos cada, em sequência.)

10.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Se uma xícara de café quente for deixada ao ar livre por um determinado período de tempo, a sua temperatura reduzirá gradativamente até se igualar à temperatura do ambiente (Figura 85). Desconsiderando as quantidades de calor trocadas entre o café e o material do qual a xícara é feita, entre a xícara e a sua base de apoio e entre a xícara e o ar ambiente, vamos focar somente na troca de calor entre o café e o ar ambiente para discutir o processo de convecção. Neste, podemos falar do movimento de dois fluidos: o do café e o do ar ambiente. As partículas do café que estão mais aquecidas tendem a se movimentar para cima, por ação da força de empuxo, já que elas são menos densas que as partículas mais frias. Quando atingem a superfície, essas partículas do café transferem o calor para o ar ambiente, que está a uma temperatura mais baixa. Ao transferirem esse calor, as partículas reduzem o seu volume, ficando mais densas. Ao ficarem mais densas, as partículas descem por ação da força da gravidade e dão espaço para as partículas mais aquecidas que estão subindo. No que diz respeito ao ar ambiente, ocorrerá o mesmo processo. As partículas do ar que receberam o calor do café ficarão mais volumosas e, conseqüentemente, menos densas. Dessa forma, a força de empuxo prevalecerá sobre a força da gravidade e essas partículas aquecidas do ar subirão. Ao subirem, as partículas aquecidas do ar dão espaço para as partículas mais frias, que são mais densas e que, por isso, estão descendo (já que a força da gravidade prevalecerá sobre a força de empuxo no caso dessas últimas). Repare que esse movimento repetitivo faz com que a porção mais aquecida do café sempre esteja em contato com a porção mais fria do ar ambiente. Esse processo se repetirá até que a temperatura do café e a temperatura do ar ambiente alcancem o mesmo valor, ou melhor, até que se atinja o equilíbrio térmico entre os três elementos: café, ar e xícara.

Figura 201 - Movimento de Convecção
movimento de convecção do ar ambiente



movimento de convecção do café

Fonte: O Autor (2021)

A convecção descrita acima é chamada de natural. Se provocarmos o movimento do fluido por outros meios, assoprando o café, por exemplo, a convecção passa a ser do tipo forçada. Tanto um tipo, quanto o outro, pode ser estudado com o auxílio da Lei de Resfriamento de Newton (Equação 11).

$$P = h \cdot A \cdot \Delta T$$

Equação 11

Em que:

- P é a potência retirada de uma superfície por convecção, medida em W (watts);
- h é o coeficiente de transferência de calor, medido em $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$;
- A é a área da superfície em resfriamento, medida em m^2 ; e
- ΔT é a variação da temperatura sofrida pela superfície, medida em $^\circ C$.

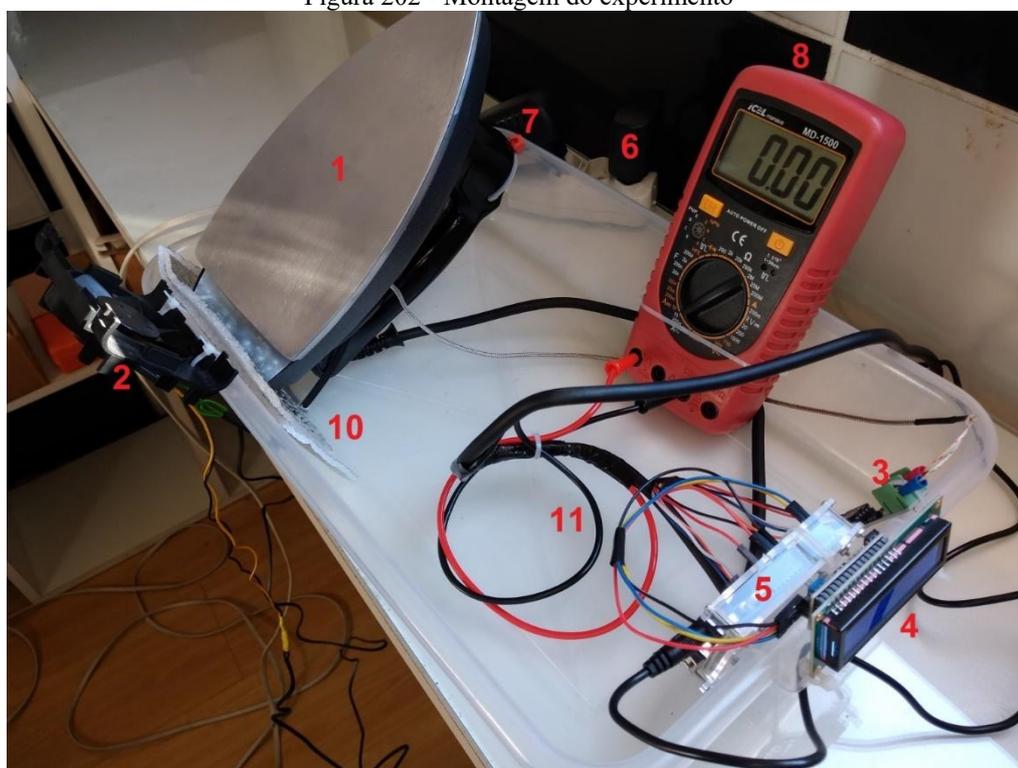
O coeficiente de transferência de calor “ h ” traz embutido em si fatores como: a velocidade, a densidade, a viscosidade dinâmica e a condutividade térmica do fluido; e, ainda, depende se o escoamento é laminar ou turbulento, além da distância a partir do início do escoamento sobre a superfície.

10.2 PROCEDIMENTOS

10.2.1 Descrição do experimento

A Figura 108 mostra a montagem final do experimento. A proposta é aquecer a chapa de um ferro de passar e, em seguida, promover o seu resfriamento por meio de um ventilador. Aqui, o Arduino coleta os dados de temperatura, medidos por um sensor termopar, instalado no interior do eletrodoméstico. Um multímetro permite monitorar a corrente elétrica que passa no circuito da resistência.

Figura 202 - Montagem do experimento



Fonte: O Autor (2021)

10.2.2 Lista de materiais

Os materiais utilizados na montagem desse experimento estão relacionados abaixo:

1. Um ferro de passar roupa;
2. Um ventilador utilizado para resfriar processadores de computador (cooler);

3. Um sensor termopar acompanhado do módulo MAX6675;
4. Um módulo display de LCD 16x2 com placa de comunicação I2C associada;
5. Uma placa de Arduino Uno;
6. Uma fonte de 9 Vcc para alimentação da placa de Arduino;
7. Uma fonte de 12 Vcc para alimentação do ventilador;
8. Um multímetro capaz de medir corrente de até 10 A de corrente alternada (ca);
9. Um multímetro capaz de medir tensão de até 600 Vac (não aparece na ilustração);
10. Um pedaço 15x5 cm de espuma térmica;
11. Fios de cobre para conexões;
12. Braçadeiras de nylon; e
13. Um computador com a IDE do Arduino instalada e um cabo USB (não aparecem na ilustração).

10.2.3 Construção do experimento

O primeiro passo para a montagem desse experimento é abrir o ferro de passar para alojar o sensor termopar no seu interior. Assim, desejamos que a convecção forçada não interfira diretamente sobre esse sensor, mas somente sobre o lado externo da chapa metálica. As Figuras 109 e 110 mostram o local escolhido para a fixação do referido sensor. Observe que é preciso encontrar uma passagem para o cabo do sensor ser levado para fora do ferro de passar.

Figura 203 Vista do sensor termopar com o fundo da tampa intermediária do ferro virado para baixo



Fonte: O Autor (2021)

Figura 204 - Vista do sensor termopar com o fundo da tampa intermediária do ferro virado para cima



Fonte: O Autor (2021)

Após a instalação do sensor, remonte o ferro de passar e fixe-o à base do experimento. Em seguida fixe os demais componentes (multímetro, placa de Arduino, display, módulo MAX6675 e ventilador) sobre a mesma base, observando que o ventilador precisa ficar de frente para a chapa do ferro de passar. Todos os componentes foram fixados com o auxílio de braçadeiras de nylon. Veja Figura 111.

Figura 205 - Detalhe das posições de cada componente do experimento

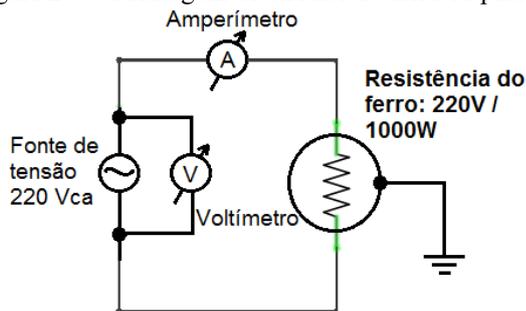


Fonte: O Autor (2021)

10.2.4 Montagem do circuito do ferro de passar

A Figura 112 apresenta o esquema de ligação do circuito da resistência elétrica do ferro de passar.

Figura 206 - Montagem do circuito do ferro de passar

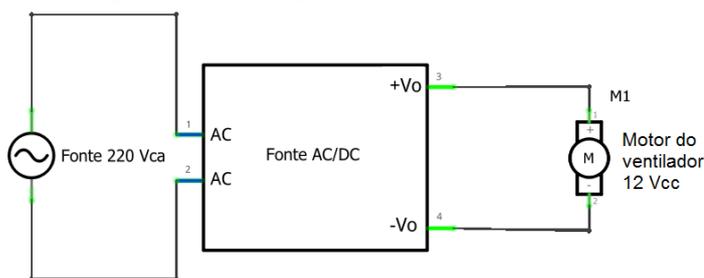


Fonte: O Autor (2021)

10.2.5 Montagem do circuito do ventilador

A Figura 113 mostra o circuito de acionamento do ventilador, em que a tensão da rede elétrica ($220 V_{ca}$) é convertida por uma fonte ($12 V_{cc}$), antes de alimentar o motor.

Figura 207 - Montagem do circuito do ventilador

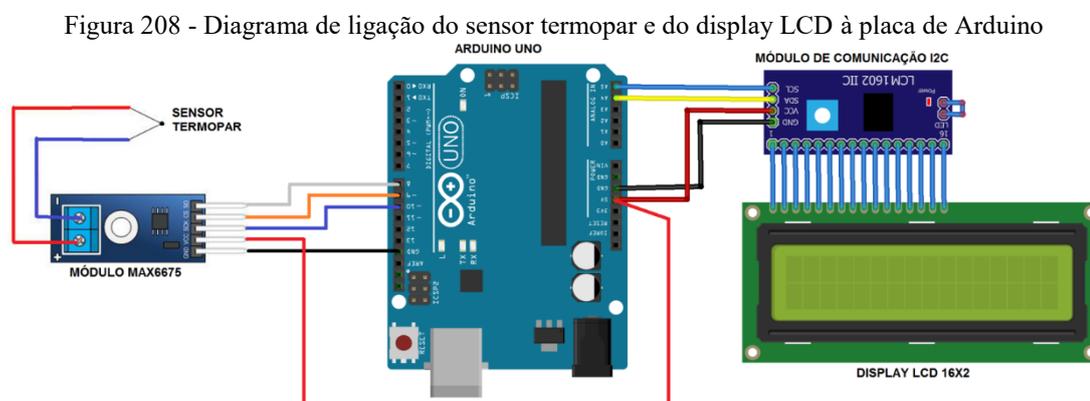


Fonte: O Autor (2021)

10.2.6 Montagem do circuito para ligação do sensor e do display placa de Arduino

A Figura 114 mostra como o módulo MAX6675 deve ser ligado à placa de Arduino. Este módulo converte a leitura do sensor termopar em sinais digitais para o microcontrolador

do Arduino. A mesma figura também apresenta a ligação da placa de interface do *display* de cristal líquido.



Fonte: O Autor com o auxílio do Programa Fritzing (2021)

10.3 PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO COM *SOFTWARE* PARA COMPUTADOR (IDE)

10.3.1 Instalação de novas bibliotecas no Arduino

Se ainda não estiverem disponíveis na IDE instalada no seu computador, baixe e adicione as seguintes bibliotecas: `Wire.h`⁵⁵, `LiquidCrystal_I2C.h`⁵⁶ e `max6675.h`⁵⁷.

10.3.2 *Sketch* para o funcionamento do experimento

Estabeleça a comunicação entre o seu computador e a placa de Arduino, utilizando um cabo USB. Depois, compile e carregue o código abaixo na memória do microcontrolador. Este é o *sketch* que fará as temperaturas medidas pelo sensor termopar aparecerem no *display*. Após este procedimento, você não precisará mais do computador, tendo em vista que a variação da temperatura poderá ser observada pelo referido *display*.

Sketch - Programa para apresentar dados do sensor termopar em um display LCD

```
#include <Wire.h>
```

⁵⁵ Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/reference/wire>.

⁵⁶ Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/liquidcrystal-i2c/>.

⁵⁷ Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/max6675-library/>.

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <max6675.h>

#define endereco 0x3F // Endereços comuns: 0x27, 0x3F
#define colunas 16
#define linhas 2

int ktcSO = 8;
int ktcCS = 9;
int ktcCLK = 10;

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
LiquidCrystal_I2C lcd(endereco, colunas, linhas);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Hora,Temperatura");
  delay(1000);
}

void loop(){
  lcd.clear();
  lcd.print("Temperatura: ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(ktc.readCelsius());
  lcd.print("*C");
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.println(ktc.readCelsius());
  delay(5000);
}

```

Fonte: Adaptado pelo Autor, a partir de OLIVEIRA (2018) e ARDUINO E CIA (2016).

10.4 MANUSEIO DO EXPERIMENTO, COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

- 1) Ligue a fonte que alimenta a placa de Arduino e anote a temperatura indicada no display. Essa é a temperatura inicial T_i da chapa do ferro de passar roupa.

$$T_i = \text{____}^{\circ}\text{C}$$

- 2) Ligue o circuito do ferro numa tomada de 220Vca e anote:

- a tensão U , lida no voltímetro: $U = \text{ ______ } V$
- a corrente I , lida no amperímetro: $I = \text{ ______ } A$

3) Utilize os dados acima para calcular a potência dissipada pela chapa do ferro:

$$P = U \times I = \text{ ______ } W$$

4) Aguarde a temperatura do ferro se estabilizar e anote a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}$ atingida:

$$T_{m\acute{a}x} = \text{ ______ } ^\circ C$$

5) Agora, podemos observar que a potência dissipada pela resistência do ferro fez a chapa metálica sofrer uma variação de temperatura ΔT_{aquec} igual a:

$$\Delta T_{aquec} = T_{m\acute{a}x} - T_i = \text{ ______ } ^\circ C$$

6) Mantendo o circuito do ferro energizado, ligue o circuito do ventilador. Observe que a temperatura da superfície T_{superf} metálica começa a reduzir até se estabilizar. Anote o valor em que T_{superf} se estabilizou.

$$T_{superf} = \text{ ______ } ^\circ C$$

7) Apesar de reduzir em relação à temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}$, a temperatura da superfície T_{superf} metálica continuará menor que a temperatura inicial T_i . Isso ocorre, porque a resistência do ferro continua dissipando calor, enquanto o ventilador realiza a convecção forçada. Calcule a variação da temperatura nesse resfriamento (ΔT_{resf}) da chapa metálica:

$$\Delta T_{resf} = T_{m\acute{a}x} - T_{superf} = \text{ ______ } ^\circ C$$

8) Considerando que a potência P dissipada pela resistência do ferro é capaz de provocar uma variação de temperatura igual a ΔT_{aquec} e que a potência retirada por convecção P_{convec} promove uma variação de temperatura igual a ΔT_{resf} , adotamos a regra de proporção abaixo para estimar o calor dissipado pelo ventilador a cada segundo.

$$\frac{P_{convec}}{P} = \frac{\Delta T_{resf}}{\Delta T_{aquec}} \quad \text{ou} \quad P_{convec} = \frac{\Delta T_{resf}}{\Delta T_{aquec}} \cdot P$$

$$P_{convec} = \text{ ______ } W$$

- 9) Sabendo que o calor retirado (por segundo) da chapa por convecção (P_{convec}) é dado pela Lei de resfriamento de Newton (equação 1), e que a área de superfície A da chapa metálica⁵⁸ do ferro tem o valor aproximado de $0,022\text{m}^2$, vamos estimar o valor do coeficiente de transferência de calor h :

$$h = \frac{P_{convec}}{A \cdot \Delta T_{resf}}$$

$$h = \frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

10.5 AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM

- 1) Discuta e explique o que ocorre com o calor gerado na resistência do ferro em cada uma das situações abaixo. Faça uma análise do fluxo de calor e das conseqüentes variações de temperatura ocorridas na superfície da chapa metálica do ferro e no ar ambiente próximo ao referido aparelho.
 - a. Primeira situação: quando somente o circuito da resistência elétrica do ferro está ligado.
 - b. Segunda situação: quando o circuito da resistência e o circuito do ventilador estão simultaneamente ligados.
 - c. Terceira situação: se, após o aquecimento da chapa metálica, desligarmos o circuito da resistência e mantermos apenas o circuito do ventilador ligado.

- 2) Que tipo de informação o coeficiente de transferência de calor h nos fornece? Multiplique o valor encontrado para h pelo valor da área A e diga quanto calor precisa ser retirado por convecção para que a temperatura da chapa reduza em 1°C .

- 3) Que fatores poderiam ser modificados no nosso experimento para melhorar a eficiência do processo de convecção forçada? Formule hipóteses, mesmo que não possam ser testadas.

⁵⁸ Se essa informação não estiver disponibilizada pelo fabricante no manual do produto, pode-se adotar o seguinte método para o cálculo dessa área: Contorne a curva de uma das bordas da chapa com um lápis em cima de uma folha de papel milimetrado. Anote as coordenadas de vários pontos (quanto mais pontos, melhor) sobre a curva traçada e construa uma tabela no Microsoft Excel. Solicite que este programa trace a linha de tendência e mostre a equação polinomial que melhor se ajusta à curva real. Calcule a área sob a curva, integrando a equação obtida entre os limites dados pelo comprimento da chapa do ferro. Esta será a área da metade da chapa. Multiplique o valor por dois e encontre a área total desejada. Esta não é uma discussão para se ter com os alunos do ensino médio. Portanto, leve este valor pronto para a sala de aula.

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este produto educacional apresentou uma pequena parte de incontáveis possibilidades existentes com o uso da plataforma Arduino. Espera-se que a leitura desse material tenha encorajado mais professores a utilizarem essa tecnologia. Substituindo componentes externos, é possível utilizar a mesma placa e realizar diferentes demonstrações experimentais de Física, durante todo o ano letivo. Dessa forma, esse recurso pode ser tornar uma ferramenta útil ao educador que atue numa escola sem laboratório, mas que anseie por realizar experimentos e tornar as suas aulas mais dinâmicas.

Apesar deste produto ter o objetivo principal de potencializar a aprendizagem do estudante, a sua utilização em sala de aula também apresentará benefícios ao professor. Primeiro, porque a curiosidade despertada no aluno, pelo experimento, pode promover o seu engajamento no aprendizado de determinado conceito. Deve ser consenso entre professores que conduzir aulas com alunos engajados na atividade proposta é muito mais simples e prazeroso para todos. Segundo, porque o processo de planejamento de uma atividade experimental contribui para o aprendizado do próprio professor. Além de se capacitar no uso de uma nova tecnologia, durante a montagem e os testes práticos, o docente precisará buscar soluções para os problemas que surgirem e precisará refletir sobre os resultados obtidos, relacionando-os à teoria a ser ensinada.

O melhor aproveitamento deste material se dará conforme as condições de aplicação oferecidas pela escola. Atividades experimentais demandam tempo de planejamento e de execução. Quanto ao planejamento, se quase toda a carga horária do professor for ocupada com atividades no interior da sala de aula, ele se sentirá desestimulado a preparar trabalhos mais elaborados, como os experimentos didáticos. Quanto à execução, considerando que a carga horária reservada semanalmente à disciplina de Física é de duas aulas, melhor seria que essas ocorressem em sequência. Atividades experimentais também demandam recursos materiais. Quanto maior a disponibilidade de placas de Arduino, componentes eletrônicos e outros acessórios, melhor a qualidade da aula por permitir a individualização das montagens. A situação ideal seria aquela em que pequenos grupos de alunos (com dois, ou três deles em cada grupo) pudessem realizar as suas próprias montagens e programações. Seria importante permitir que cometessem erros e buscassem soluções sozinhos, objetivando que desenvolvessem mais autonomia no processo de construção do próprio aprendizado. No entanto, a necessidade de

otimizar o tempo disponível e devido à quantidade limitada de materiais, as atividades experimentais apresentadas neste produto educacional têm um caráter demonstrativo, exceto pelos dois primeiros experimentos introdutórios sobre o Arduino.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, W. et al. Modelos do Átomo de Hidrogênio. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2011. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/hydrogen-atom/about>. Acesso em: Outubro 2021.
- AMORIM, H. S.; DIAS, M. A.; SOARES, V. Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, 12 Dezembro 2015. ISSN 1806-9126.
- ARDUINO. Built-in Examples - Blink. **Docs Arduino**, 2021. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/built-in-examples/basics/Blink>>. Acesso em: 3 Maio 2022.
- ARDUINO. Datasheet SKU: A000066. **Arduino Uno Rev3**, 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf?_gl=1*wo2p6k*_ga*NzExMTY5MzI4LjE2NTIyMTQxOTY.*_ga_NEXN8H46L5*MTY1Mzc2MzAxOS40LjEuMTY1Mzc2Mzg2My42MA>. Acesso em: 28 Maio 2022.
- ARDUINO. Overview of the Arduino IDE 1. **Arduino Docs**, 2022. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/Environment>>. Acesso em: 28 Maio 2022.
- ARDUINO E CIA. Como usar o módulo I2C com Arduino e display LCD 16x2. **Arduino e Cia**, 2016. Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/modulo-i2c-display-16x2-arduino/>>. Acesso em: Outubro 2021.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicología educativa Un punto de vista cognoscitivo**. 2ª. ed. México: Trillas, 1998.
- BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- BUNGE, M. **La Ciencia: Su método y su filosofía**. 4ª. ed. Buenos Aires: Sudamericana, 2001.
- CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2016.
- CONNOR, N. O que é o número Prandtl de água e ar – Definição. **Thermal Engineering**, 2019. Disponível em: <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-numero-prandtl-de-agua-e-ar-definicao/>>. Acesso em: 4 Maio 2022.
- CONNOR, N. O que é a Lei do resfriamento de Newton – Definição. **Thermal Engineering**, 2020. Disponível em: <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-a-lei-do-resfriamento-de-newton-definicao/>>. Acesso em: 4 Maio 2022.
- DUBSON, M. et al. Gerador. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2011. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/generator/about>. Acesso em: Outubro 2021.
- DUBSON, M. et al. Ímãs e Eletroímãs. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2011. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/magnets-and-electromagnets/about>. Acesso em: Outubro 2021.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3ª. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- MAXIM INTEGRATED. Data Sheet. **MAX6675**, 2002. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/signal-integrity/MAX6675.html>>. Acesso em: 28 Maio 2022.
- MAXIM INTEGRATED. Data Sheet. **DS18B20**, 2019. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

MELEXIS. Data Sheet. **MLX90614**, 2019. Disponível em: <<https://www.melexis.com/en/product/mlx90614/digital-plug-play-infrared-thermometer-to-can>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

MONK, S. simonmonk/ArduinoNextSteps. **GitHub**, 2013. Disponível em: <https://github.com/simonmonk/ArduinoNextSteps/blob/master/ArduinoNextSteps/sketch_08_01_OneWire_List/sketch_08_01_OneWire_List.ino>. Acesso em: 12 Maio 2022.

MONK, S. Utilizando mais de um sensor DS18B20 com o protocolo OneWire. **GitHub**, 2013. Disponível em: <https://github.com/simonmonk/ArduinoNextSteps/blob/master/ArduinoNextSteps/sketch_08_03_OneWire_DS18B20_2/sketch_08_03_OneWire_DS18B20_2.ino>. Acesso em: 12 Maio 2022.

MOREIRA, J. R. S. Transferência de calor. **Revista do Frio**, São Paulo, v. 91, p. 1-6, Dezembro 1997. Disponível em: <http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2014/10/Conveccao.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2022.

MOREIRA, M. A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS. **Textos de Apoio ao Professor de Física**, Porto Alegre, 23, março 2012. 22. Disponível em: <<https://ppgenfis.if.ufrgs.br/>>. Acesso em: 2022.

MOREIRA, M. A. A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. In: MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. 2ª. ed. São Paulo: E.P.U., 2019. Cap. 11, p. 159-173.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem Significativa - A Teoria de David Ausubel**. São Paulo: MORAES LTDA., 1982.

NOGUEIRA, D. Como utilizar o sensor LM35 com Arduino? **Blog AutoCore Robótica**, 2018. Disponível em: <<https://autocorerobotica.blog.br/utilizando-sensor-lm35-com-arduino/>>. Acesso em: 11 Maio 2022.

NUSSENZVEIG, M. H. **CURSO DE FÍSICA BÁSICA: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. São Paulo: Edgard Blücher, v. 2, 1981.

OLIVEIRA, E. Como usar com Arduino – Módulo MAX6675 Termopar Tipo K – 0º a 800°C. **Blog MasterWalker**, 2018. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-max6675-termopar-tipo-k-0o-a-800oc>>. Acesso em: Outubro 2021.

PARALLAX INC. Parallax Data Acquisition (PLX-DAQ). **Parallax**, 2020. Disponível em: <<https://www.parallax.com/plx-daq-updated-for-excel-windows-10-and-propeller-2-early-adopter-progress/>>. Acesso em: 12 Maio 2022.

PRÄSS, A. R. CONSTANTES FÍSICAS - Condutividade Térmica. **FISICANET**, 2020. Disponível em: <[https://www.fisica.net/constantes/condutividade-termica-\(k\).php](https://www.fisica.net/constantes/condutividade-termica-(k).php)>. Acesso em: 4 Maio 2022.

PURKAYASTHA, A. et al. Espectro de Corpo Negro. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2021. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/blackbody-spectrum/about>. Acesso em: Outubro 2021.

ROUINFAR, A. et al. Cargas e Campos. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2021. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/charges-and-fields/about>. Acesso em: Outubro 2021.

ROUINFAR, A. et al. Moléculas e Luz. **PhET Interactive Simulations - University of Colorado**, 2021. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/molecules-and-light/latest/molecules-and-light_pt_BR.html>. Acesso em: Outubro 2021.

STMICROELECTRONICS. Data Sheet. **L298**, 2000. Disponível em: <<https://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. LM35. **Online Data Sheet**, 2017. Disponível em: <<https://www.ti.com/document-viewer/LM35/datasheet/abstract#SNIS1592470>>. Acesso em: 28 Maio 2022.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2001.

TORRES, E. A. S. **Introdução ao Arduino como Ferramenta no Ensino de Física**, 2019. Disponível em: <<http://harpia.pbx-brasil.com/Disciplinas/Arduino/arduino.html>>. Acesso em: 20 novembro 2019.

VASCAK, V. Onda eletromagnética. **Física na escola**, 2018. Disponível em: <https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_vlna&l=pt>.

Acesso em: Outubro 2021.

APÊNDICE A - RESPOSTAS DAS PERGUNTAS PROPOSTAS AO FINAL DE CADA ATIVIDADE

PRIMEIRA ATIVIDADE - Conhecendo o Arduino

- 1) Eleva o pino digital 13 da placa de Arduino para o nível alto ($5 V_{cc}$). Conseqüentemente, o LED que está ligado a este pino se acende.
- 2) Rebaixa o pino digital 13 da placa de Arduino para o nível baixo ($0 V_{cc}$). Conseqüentemente, o LED que está ligado a este pino se apaga.
- 3) Interrompe o processamento do programa pelo tempo de 1000 milissegundos, antes de passar para a próxima linha de instrução.

SEGUNDA ATIVIDADE - Construindo um termômetro digital com o sensor LM35

- 1) É esperada uma leitura um pouco abaixo da temperatura corporal de $36,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, tendo em vista que esta medida é realizada em uma extremidade do corpo, como as mãos.
- 2) A troca de calor entre o sensor e a mão ocorre enquanto houver diferença de temperatura entre eles. O sentido dessa transferência de calor é do corpo de maior para o corpo de menor temperatura. Dessa forma, a temperatura sobe, enquanto o calor está se transferindo da mão para o sensor. E a temperatura se estabiliza quando o seu valor para o sensor fica igual ao da mão.
- 3) O sensor mede temperaturas negativas, a partir de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, se ele for alimentado por uma fonte simétrica. Como utilizamos uma fonte simples, não seria possível medir as temperaturas negativas de um freezer. Quanto ao forno, seria possível medir a temperatura até o limite de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme a especificação do fabricante. Acima desse valor, o que é comum para fornos, o componente seria danificado. A temperatura da chocadeira deve ficar próxima à temperatura corporal da galinha (algo em torno de $42\text{ }^{\circ}\text{C}$), ou seja, dentro dos limites permitidos para esse componente eletrônico.
- 4) A massa de um grão de milho isolado tem valor próximo da massa de um sensor. Como o calor transferido de um para o outro é proporcional à massa, essa transferência irá afetar a temperatura do corpo medido e, conseqüentemente, prejudicará a leitura do próprio sensor. Já na situação em que o corpo medido possui massa muito superior à massa do sensor, como o exemplo da água da piscina, o calor trocado entre eles é insignificante para

o primeiro. Isso significa que o sensor não interfere na medida e isso é desejável. No entanto, é preciso observar que a leitura obtida é um valor local, que pode não ser o mesmo em todos os pontos do corpo medido.

$$5) C = \text{analogRead}(A0)$$

TERCEIRA ATIVIDADE – CONDUÇÃO DE CALOR EM UMA BARRA METÁLICA

- 1) A Lei de Fourier nos oferece uma descrição matemática de como os valores de temperatura se distribuem por um corpo rígido, sobre o qual transita um fluxo de calor, devido à diferença de temperatura estabelecida em suas extremidades. Essa distribuição das temperaturas é linear ao longo do comprimento, se o fluxo de calor é constante e independente do tempo.
- 2) O coeficiente angular é a taxa de variação da temperatura em função da posição. No caso desse experimento, o coeficiente angular nos forneceu o valor de temperatura (em °C) que era decrescido a cada um centímetro de avanço na direção da fonte fria (pastilha Peltier).
- 3) Primeiramente, o fluxo de calor ϕ foi estimado com base na medição da potência elétrica dissipada pela resistência. No entanto, não é possível determinar com precisão o quanto dessa potência é transferida do resistor para a barra de alumínio. Outro fator que contribui para essa divergência é a condutividade térmica do material (κ). O valor utilizado $\left(2,37 \frac{J}{cm.s.^{\circ}C}\right)$ é válido para uma temperatura de 27 °C. Ou seja, trata-se de um fator dependente da temperatura, que não é a mesma em todos os pontos da barra. Logo, temos diferentes valores para a condutividade térmica e não apenas um.
- 4) Considerando que a equação obtida foi $T(x) = -3,82x + 76$, temos:

$$T(-1) = 79,82 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T(19) = 3,42 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

QUARTA ATIVIDADE - Introdução aos fenômenos ondulatórios para o estudo da radiação térmica

- 1) O movimento de uma partícula pode ser descrito pela posição e pela velocidade, em cada ponto da sua trajetória. No caso de uma onda, o movimento é espalhado. O que se propaga

no espaço é a energia. Quando se trata de uma onda mecânica, utilizamos a frequência de oscilação do meio físico para determinar características desse movimento.

- 2) Quando aumentamos a velocidade do motor, o atuador toca a superfície d'água um número maior de vezes por unidade de tempo. Ou seja, a frequência das oscilações aumenta e o comprimento de onda diminui.
- 3) Ocorre o oposto ao descrito anteriormente, ou seja, a frequência das oscilações diminui e o comprimento de onda aumenta.
- 4) Ao colidirem com um obstáculo rígido, as ondas incidentes retornam no sentido oposto ao qual vieram antes da colisão.
- 5) Ao colidirem com um obstáculo flexível, uma parte da energia da onda incidente é transmitida para o outro lado do mesmo. Neste caso, essa parte da energia transpassa o obstáculo. A outra parte da energia é refletida, conforme descrito na resposta da questão 4.
- 6) A energia das ondas incidentes foram absorvidas, após a colisão com um obstáculo esponjoso. Neste caso, as ondas não foram refletidas, nem transmitidas.

QUINTA ATIVIDADE – Aula expositiva sobre ondas eletromagnéticas

- 1) Porque a propagação de uma onda eletromagnética ocorre pela oscilação dos campos elétrico e magnético, que se induzem mutuamente.
- 2) As ondas eletromagnéticas têm origem na matéria. O átomo pode irradiar energia eletromagnética, tanto da sua eletrosfera, quanto do seu núcleo. Essa energia é liberada por diferentes processos. Destacamos em nossas discussões, o processo de transição de elétrons entre diferentes camadas da eletrosfera do átomo, no qual um fóton de luz surge quando o elétron muda de uma órbita mais externa para outra mais interna.
- 3) As partículas de qualquer corpo a uma temperatura acima de 0 kelvin estão em constante movimento. Dessa forma, os seus átomos emitem continuamente radiação térmica, cujas frequências podem abranger todo o espectro eletromagnético, dependendo da temperatura do corpo.

SEXTA ATIVIDADE – Aula expositiva sobre radiação de corpo negro

- 1) Ocorre um aumento na energia interna da substância, representado no simulador pelo aumento na vibração de uma única molécula.

- 2) O corpo negro é um modelo teórico que representa um objeto capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele. Diferentemente do comportamento ideal do corpo negro, o corpo real pode absorver, refletir e transmitir a radiação incidente, podendo ocorrer mais de um efeito simultaneamente.

3) $R = \sigma T^4$

$$= 5,6705 \times 10^{-8} \times 309,5^4 \cong$$

$$\cong 520,3 \frac{W}{m^2}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{309,5} \cong$$

$$\cong 9363 \text{ nm}$$

SÉTIMA ATIVIDADE - Emissão e absorção de calor por um corpo claro e por um corpo escuro

- 1) O sensor consegue medir a temperatura por causa da radiação infravermelha que ele recebe do corpo emissor. Tal radiação faz surgir uma tensão elétrica em componentes internos do sensor (termopilhas). Portanto, no sensor, temos a conversão do calor, manifestado em radiação infravermelha, em tensão elétrica.
- 2) a- A temperatura sobe mais rápido no objeto pintado de preto e sobe mais devagar no objeto polido.
b- Porque o objeto pintado de preto absorve a maior parte da radiação incidente, enquanto o objeto polido reflete a maior parte da radiação incidente.

3)

$$\epsilon_{escuro} = \frac{T_{infraverm}^4 - T_{ambiente}^4}{T_{contato}^4 - T_{ambiente}^4} = \frac{(44,45 + 273,15)^4 - (28,77 + 273,15)^4}{(33,63 + 273,15)^4 - (28,77 + 273,15)^4}$$

$$\cong \frac{1,865 \times 10^9}{0,5481 \times 10^9} \cong 3,4$$

$$\epsilon_{claro} = \frac{T_{infraverm}^4 - T_{ambiente}^4}{T_{contato}^4 - T_{ambiente}^4} = \frac{(27,69 + 273,15)^4 - (27,05 + 273,15)^4}{(32,69 + 273,15)^4 - (27,05 + 273,15)^4} \cong \frac{6,948 \times 10^7}{62,77 \times 10^7} \cong 0,11$$

- 4) A razão mais provável está no fato do sensor de contato não apresentar valores corretos para a aplicação na equação da emissividade. Isso se deve ao fato dele não possuir um isolamento térmico capaz de impedir que ele troque calor com o ambiente. Dessa forma, o sensor de contato repassa ao ar ambiente uma parcela considerável do calor recebido do objeto escuro, fazendo com que a sua leitura fique sempre abaixo da temperatura apontada pelo sensor infravermelho.
- 5) Adotando as temperaturas indicadas pelos sensores infravermelhos e, no caso da chapa pintada de preto, fazendo $\sigma = 1$, obtemos:

$$\begin{aligned} R &= \epsilon \sigma T^4 \\ &= 1 \times 5,6705 \times 10^{-8} \times (44,45 + 273,15)^4 \cong \\ &\cong 577 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

Adotando as temperaturas indicadas pelos sensores infravermelhos e, no caso da chapa polida, fazendo $\sigma = 0,11$, obtemos:

$$\begin{aligned} R &= \epsilon \sigma T^4 \\ &= 0,11 \times 5,6705 \times 10^{-8} \times (27,69 + 273,15)^4 \cong \\ &\cong 51 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

- 6) Chapa pintada:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,002898}{T} = \frac{0,002898}{44,45 + 273,15} \cong 9,12 \mu m$$

Chapa polida:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{0,002898}{T} = \frac{0,002898}{27,69 + 273,15} \cong 9,63 \mu m$$

OITAVA ATIVIDADE - Transferência de calor por convecção

- 1) **a** – Quando somente o circuito da resistência está ligado, a temperatura da superfície da chapa aumenta até atingir um determinado valor, no qual se estabiliza. O ar ambiente nas proximidades da chapa também se aquece e, em seguida, sobe pela ação da força de empuxo. Ao subir, esse ar aquecido dá lugar a uma porção de ar mais frio, que desce e repete o processo. No entanto, essa convecção natural não é capaz de provocar uma redução significativa na temperatura da chapa do ferro, porque a sua resistência continua convertendo energia elétrica em calor.
- b** – Na sequência, quando ligamos o circuito do ventilador e mantemos ligado o circuito da resistência, observamos que a temperatura da chapa do ferro diminui até um determinado valor. Essa queda na temperatura é consequência da convecção forçada, promovida pelo ventilador. O calor da chapa flui para a corrente de ar que passa sobre ela, fazendo a sua temperatura reduzir. Mas, como a resistência do ferro continua convertendo energia elétrica em calor, a temperatura da chapa não reduz até o valor da temperatura ambiente.
- c** - se, após o aquecimento da chapa metálica, desligarmos o circuito da resistência e mantermos apenas o circuito do ventilador ligado, a temperatura da chapa irá reduzir até atingir a temperatura ambiente. A convecção forçada consegue retirar calor da superfície da chapa com mais eficiência que a convecção natural, fazendo a temperatura reduzir num intervalo de tempo comparativamente menor.
- 2) O coeficiente de transferência de calor h nos diz quão eficiente é um determinado processo de retirada de calor por convecção. Ele nos diz quantos joules de calor são dissipados a cada segundo, por metro quadrado da superfície, para cada variação de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Considerando que h tenha sido $1411 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ e que a área A seja $0,022\text{ }m^2$:

$$P_{convec} = h \cdot A \cdot \Delta T_{resf}$$

$$P_{convec} = 1411 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C} \cdot 0,022\text{ }m^2 \cdot 1\text{ }^{\circ}C$$

$$P_{convec} \cong 31\text{ }W$$

- 3) Podemos substituir o ventilador utilizado por outro que nos permita aumentar a velocidade do fluido (ar). A distância a partir do início do escoamento sobre a superfície também é um fator que pode ser melhorado, aproximando o ventilador da chapa de ferro.

ANEXO A – DECRETO DO GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA N.º 1.408, DE 11/08/2021

11.08.2021 (QUARTA-FEIRA)

DIÁRIO OFICIAL - SC - N.º 21.582

PÁGINA 3

DECRETO N.º 1.408, DE 11 DE AGOSTO DE 2021

Dispõe sobre as atividades essenciais da Educação e regulamenta as atividades presenciais nas unidades das Redes Pública e Privada relacionadas à Educação Infantil, Ensino Fundamental, Nível Médio, Educação de Jovens e Adultos (EJA), Ensino Técnico, Ensino Superior e afins, durante a pandemia de COVID-19.

O GOVERNADOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA, no uso das atribuições privativas que lhe conferem os incisos I e III do art. 71 da Constituição do Estado e de acordo com o que consta nos autos do processo n.º SED 72624/2021,

CONSIDERANDO a declaração de emergência em saúde pública de importância internacional emitida pela Organização Mundial de Saúde (OMS), em 30 de janeiro de 2020, em decorrência da infecção humana pelo novo coronavírus (COVID-19);

CONSIDERANDO a Lei federal n.º 13.979, de 6 de fevereiro de 2020, que dispõe sobre as medidas para enfrentamento da emergência de saúde pública de importância internacional decorrente do coronavírus responsável pelo surto de 2019;

CONSIDERANDO a Portaria n.º 188/GM/MS, de 3 de fevereiro de 2020, que declara Emergência em Saúde Pública de Importância Nacional (ESPIN), em decorrência da infecção humana pelo novo coronavírus (2019-nCoV);

CONSIDERANDO o Decreto n.º 1.371, de 14 de julho de 2021, que declara estado de calamidade pública em todo o território catarinense, nos termos do COBRADE n.º 1.5.1.1.0 – doenças infecciosas virais, para fins de enfrentamento da pandemia de COVID-19, e estabelece outras providências;

CONSIDERANDO a importância e a necessidade da retomada das atividades sociais, econômicas e educacionais, respeitada a situação epidemiológica local, associada ao cumprimento das exigências para prevenção e mitigação da disseminação da COVID-19;

CONSIDERANDO as análises realizadas pelo Governo do Estado em relação à evolução da pandemia de COVID-19, nas diferentes regiões do Estado, combinadas com a disponibilidade de leitos e as condições da atual estrutura de saúde existente;

CONSIDERANDO a Portaria Conjunta SED/SES/DCSC n.º 750, de 25 de setembro de 2020, que determina a elaboração dos Planos de Contingência Municipais para a Educação, e dos Planos de Contingência Escolar para a COVID-19, a homologação dos Planos Escolares e a organização de Comitês Municipais e Comissões Escolares para o gerenciamento da COVID-19 na Área da Educação;

CONSIDERANDO a Portaria SES n.º 464, de 3 de julho de 2020, que instituiu o Programa de Descentralização e Regionalização das Ações de Combate à COVID-19;

CONSIDERANDO o disposto na alínea "d" do inciso III do art. 3º da Lei federal n.º 13.979, de 2020;

CONSIDERANDO que os trabalhadores da Educação foram enquadrados no grupo prioritário para vacinação contra a COVID-19, que foi disponibilizada para esses profissionais a partir de maio de 2021;

DECRETA:

Art. 1º Este Decreto estabelece as condições gerais para as atividades presenciais na área da Educação, para as etapas da Educação Básica, da Educação Profissional, do Ensino Superior e afins, nas redes pública e privada de ensino, durante a pandemia de COVID-19.

Art. 2º Cada rede de ensino, pública e privada, definirá a estratégia para o atendimento presencial, considerando todas as medidas sanitárias em vigor e incluindo os seguintes parâmetros:

I – uso obrigatório de máscara, conforme regulamentação específica, respeitados os limites de faixa etária e grupos específicos;

II – distância mínima de 1,0 m (um metro) a 1,5 m (um metro e meio) entre as pessoas em salas de aula, exceto

nos demais espaços, principalmente de alimentação, onde deve ser mantida distância de 1,5 m (um metro e meio) entre as pessoas;

III – ventilação natural dos ambientes; e

IV – o planejamento e o desenvolvimento das atividades presenciais do estabelecimento de ensino deverão estar em conformidade com a capacidade física de atendimento disponível.

§ 1º Cabe a cada rede de ensino, pública ou privada, estabelecer em seu Plano de Contingência Escolar para a COVID-19 (PlanCon-Edu/COVID-19) os critérios de alternância de grupos para o atendimento presencial, quando necessário.

§ 2º Prioritariamente, deverão exercer as atividades de ensino de forma remota os estudantes que se enquadrarem nas seguintes condições de risco:

I – gestantes e puérperas;

II – obesidade grave;

III – asma;

IV – doença congênita ou rara ou genética ou autoimune;

V – neoplasias;

VI – imunodeprimidos;

VII – hemoglobinopatia grave;

VIII – doenças cardiovasculares;

IX – doenças neurológicas crônicas; e

X – diabetes mellitus.

§ 3º Estudantes já imunizados, ainda que estejam enquadrados em grupo de risco, poderão retornar às atividades presenciais após 28 (vinte e oito) dias contados da data da aplicação da dose única ou da segunda dose da vacina contra COVID-19, de acordo com as orientações de cada fabricante, conforme definido no Calendário Estadual de Vacinação.

§ 4º Cabe a cada rede de ensino, pública ou privada, estabelecer em seu PlanCon-Edu/COVID-19 os critérios para o atendimento remoto.

Art. 3º O PlanCon-Edu/COVID-19 é um instrumento de planejamento e preparação da resposta ao desastre de natureza biológica caracterizado pela pandemia de COVID-19.

§ 1º Cada município e cada estabelecimento de ensino ou atividade educacional deverá elaborar e manter atualizado o PlanCon-Edu/COVID-19, conforme modelos estabelecidos em portaria conjunta da Secretaria de Estado da Educação (SED), Secretaria de Estado da Saúde (SES) e Defesa Civil (DC).

§ 2º O PlanCon-Edu/COVID-19 deverá ser acompanhado e monitorado em sua execução, assim como ser revisado e atualizado sempre que necessário, ficando suas versões numeradas e registradas e mantido o histórico das atualizações disponível para a autoridade sanitária competente.

§ 3º O retorno às atividades educacionais presenciais fica condicionado à homologação da primeira edição do PlanCon-Edu/COVID-19 no Comitê Municipal de Gerenciamento da Pandemia de COVID-19.

Art. 4º Para os estabelecimentos de ensino que possuem o PlanCon-Edu/COVID-19 homologado, as atividades educacionais presenciais estarão autorizadas, devendo ser rigorosamente seguidos todos os cuidados e regimentos sanitários estabelecidos pela SES e por atos de autoridade sanitária e educacional federal, estadual ou municipal, independentemente do nível de risco apresentado na Avaliação de Risco Potencial Regionalizado da COVID-19.

Art. 5º O estabelecimento de ensino deverá realizar o monitoramento diário dos trabalhadores e estudantes que apresentarem sinais e sintomas gripais em todos os turnos, isolando-os, e informar imediatamente as autoridades de saúde do município, para que sejam tomadas as medidas cabíveis para diagnóstico, rastreamento e monitoramento de contatos.

Art. 6º A vacinação contra a COVID-19 é obrigatória para todos os trabalhadores da Educação

(professores, segundos professores, auxiliares, equipe técnica, administrativa, pedagógica, limpeza, alimentação, serviços gerais, transporte escolar, terceirizados, estagiários e voluntários) que atuam na Educação Básica, na Educação Profissional, no Ensino Superior e afins das redes de ensino pública e privada, a partir da data em que a aplicação estiver disponível para o grupo prioritário e/ou a faixa etária, de acordo com o Calendário Estadual de Vacinação contra a COVID-19.

§ 1º Os trabalhadores da Educação que estiverem atuando em regime de trabalho remoto por fazerem parte de grupo de risco deverão retornar às atividades presenciais após 28 (vinte e oito) dias, contados da data da aplicação da dose única ou da segunda dose da vacina contra COVID-19, de acordo com as orientações de cada fabricante, conforme definido no Calendário Estadual de Vacinação.

§ 2º Os trabalhadores da Educação que estiverem atuando em regime de trabalho remoto por coabitarem com idoso ou pessoa portadora de doença crônica deverão retornar às atividades presenciais após 28 (vinte e oito) dias, contados da data da aplicação da dose única ou da segunda dose da vacina contra COVID-19 na pessoa com doença crônica com a qual o profissional coabita.

§ 3º Cópias dos comprovantes de vacinação deverão ser entregues à chefia imediata, para fins de registro e controle.

§ 4º A impossibilidade de se submeter à vacinação contra a COVID-19 deverá ser comunicada à chefia imediata e devidamente comprovada por meio de documentos que fundamentem a razão clínica da não imunização.

Art. 7º As trabalhadoras gestantes, conforme disposto no art. 1º da Lei federal n.º 14.151, de 12 de maio de 2021, permanecerão afastadas, ficando à disposição para exercer as atividades em seu domicílio, por meio de trabalho remoto ou outra forma de trabalho a distância.

Art. 8º Findo o prazo do estado de calamidade pública ocasionado pela pandemia de COVID-19, os efeitos deste Decreto deixam automaticamente de definir os critérios para o afastamento de trabalhadores, tanto os da Administração Pública Estadual em geral quanto os da Educação, que passarão a ser regidos estritamente pelos respectivos estatutos.

Art. 9º A SES, a SED e a DC deverão revogar ou adaptar seus atos normativos no prazo de até 5 (cinco) dias após a publicação deste Decreto.

Art. 10. As instituições de ensino de Educação Básica, Educação Profissional e Ensino Superior e afins das redes pública e privada de ensino terão até 30 (trinta) dias, a partir da data de publicação deste Decreto, para efetuar as readaptações necessárias.

Art. 11. Este Decreto entra em vigor na data de sua publicação e tem vigência limitada ao disposto no art. 1º do Decreto n.º 1.371, de 14 de julho de 2021.

Art. 12. Fica revogado o Decreto n.º 1.003, de 14 de dezembro de 2020.

Florianópolis, 11 de agosto de 2021.

CARLOS MOISÉS DA SILVA

Eron Giordani
Luiz Fernando Cardoso
André Motta Ribeiro
David Christian Busarello

Cod. Mat.: 757896

DECRETO N.º 1.409, DE 11 DE AGOSTO DE 2021

Nomeia Diretor Representante do Estado de Santa Catarina para a Diretoria do Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul (BRDE) e estabelece outras providências.

O GOVERNADOR DO ESTADO DE SANTA CATARINA, no uso das atribuições privativas que lhe conferem os incisos I e III do art. 71 da Constituição do Estado, conforme o disposto nos Atos Constitutivos do Sistema CODESUL/BRDE e o que consta nos autos do processo n.º SCC 15013/2021,

DECRETA:

ANEXO B – AUTORIZAÇÃO PARA PARTICIPAÇÃO DE PROFESSOR EXTERNO

OFÍCIO S/N

Curitibanos, 1º de setembro de 2021.

À Direção da Escola de Educação Básica Casimiro de Abreu
Rua Luís Dacol, 93, Centro
CEP: 89.520-120 – Curitibanos – SC

Assunto: Autorização para participação de professor externo.

Prezados Diretores,

Venho, por meio deste, solicitar autorização para que o Professor Dr. Evy Augusto Salcedo Torres possa acompanhar as minhas aulas de Física na EEB Casimiro de Abreu. Ele é o meu Orientador no curso do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) do Campus de Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina. Estou trabalhando com os alunos das turmas 2º7, 2º8, 2º9 e 2º10 o tema do calor com a utilização de sensores eletrônicos ligados a uma placa microcontrolada de Arduino (ver anexos 1, 2 e 3). Devido à distância, a participação do Professor Evy ocorreria de forma remota, por meio do Google Meet. A princípio, ele manifestou interesse em acompanhar a atividade que estou programando para o próximo dia 8 de setembro, mas aproveitei a oportunidade para solicitar que deixemos aberta a possibilidade dele participar de mais alguma aula. Por último, informo que a participação do professor orientador na aplicação do projeto de mestrado é condição obrigatória no MNPEF para obtenção da nota na disciplina de Estágio Supervisionado.

Respeitosamente,

Autorizado



EEB CASIMIRO DE ABREU
Clovis Ricardo Garbin
Diretor
Mat.: 296631-01-04
Portaria 89/14/01/2020


Delson Antonio da Silva Júnior
Professor
Matrícula 0999059-3-01

