

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR DIAMANTINO MARQUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM CALORÍMETRO DIDÁTICO DE
BAIXO CUSTO**

PONTA GROSSA

2022

VICTOR DIAMANTINO MARQUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM CALORÍMETRO DIDÁTICO DE
BAIXO CUSTO**

DEVELOPMENT OF A LOW-COST DIDACTIC CALORIMETER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do departamento de engenharia química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Postigo.

**PONTA GROSSA
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTOR DIAMANTINO MARQUES

DESENVOLVIMENTO DE UM CALORÍMETRO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 24/junho/2022

Matheus Pereira Postigo

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcos André Bechlin

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aline Coqueiro

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

AGRADECIMENTOS

Desde o início da minha jornada universitária tive a sorte de contar com pessoas que estiveram ao meu lado quando eu mais precisei. Amizades, conselhos e orientações que pretendo levar para o resto da vida. Deixo aqui esclarecido meus mais sinceros agradecimentos primeiramente aos meus familiares, principalmente minha mãe, pelo apoio psicológico e financeiro nessa jornada.

Obrigado meus queridos amigos, Jun Sakakibara e Roberto Camargo, pelo auxílio durante os projetos e trabalhos que realizamos juntos, e por tornarem esta trajetória divertida.

Por fim, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Matheus Postigo que me motivou durante todo o processo de minha formação e contribuiu para este projeto tomar forma.

Parafraseando Isaac Newton, se cheguei até aqui foi porque me apoiei nos ombros dos gigantes.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo realizar a construção de um calorímetro didático de baixo custo para a realização de experimentos nas aulas de laboratório de Engenharia Química, visto que o instrumento disponibilizado possui restrições de uso que dificultam a realização de aulas práticas. Foram empregadas tecnologias acessíveis como a utilização de microcontroladores (Arduino) para o controle dos sensores e a impressão 3D para modelar e construir partes essenciais do equipamento. No sistema de isolamento foi utilizado espuma de poliuretano com espessura de aproximadamente 10mm além da carcaça impressa com preenchimento giróide. O sistema de agitação foi composto de um motor DC 5V e três modelos de pás de agitação impressas em PETG. A calibração do sensor de temperatura foi feita tomando como referência um termômetro de mercúrio do laboratório de Química Analítica da instituição, e, para calcular a capacidade calorífica do aparelho foi replicado o método das misturas. Obteve-se como resultado um calorímetro com capacidade calorífica média de 82,86 Cal/°C, não podendo ser desconsiderado no balanço energético do sistema. Apesar disto, seu uso se faz justificado por ser um equipamento portátil e poder ser utilizado numa ampla faixa de temperatura ambiente.

Palavras-chave: calorímetro; microcontroladores; impressão 3D; prototipagem.

ABSTRACT

The present academic work aimed to develop a low-cost didactic calorimeter in order to carry out experiments in chemical engineering laboratory classes, seeing that the instrument available has restrictions of use that make it difficult to conduct practical classes. Accessible technologies were used, such as the use of microcontrollers (Arduino) to control the sensors and 3D printing to model and build essential parts of the equipment. In the insulation system, polyurethane foam with a thickness of approximately 10 mm was used in addition to the printed housing with gyroid filling. The stirring system was composed of a 5V DC motor, and three models of propellers printed on PETG. The calibration of the temperature sensor was performed using a mercury thermometer from the institution's Analytical Chemistry laboratory as a reference, and the method of mixtures was replicated to calculate the heat capacity of the equipment. The result was a calorimeter with an average heat capacity of 82.86 Cal/°C, which cannot be disregarded in the energy balance of the system. Despite this, its use is justified because it's portable, and it also can be used in a wide range of ambient temperature.

Keywords: calorimeter; microcontrollers; 3D printing; prototyping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Bomba Calorimétrica IKA C200.....	11
Figura 2: Frasco de decomposição.	12
Figura 3: Estação de preenchimento de oxigênio.....	12
Figura 4: Processo de estereolitografia.	16
Figura 5: Processo de modelagem por fusão e deposição.	16
Figura 6: Esquema de termopar.....	17
Figura 7: Termopar real.	18
Figura 8: Arduino Uno.....	19
Figura 9: Sensor de Temperatura DS18B20.....	20
Figura 10: Módulo controlador de rotação.....	20
Figura 11: Módulo contador de rotação – TCRT 500.....	21
Figura 12: Eixo do motor com faixa para contador de rotação.....	21
Figura 13: Guias para posicionamento do vaso calorimétrico	22
Figura 14: Pá de agitação adaptado do modelo naval.	23
Figura 15: Pá de agitação modelo espiral.....	23
Figura 16: Pá de agitação modelo Lily Impeller.....	24
Figura 17: Carcaças da caixa de comando e vaso calorimétrico.....	25
Figura 18: Modelos de pás impressos em PETG.....	25
Figura 19: Mensagem de Início	26
Figura 20: Verificação do Sistema OK.....	27
Figura 21: Apresentação dos dados de temperatura.....	27
Figura 22: Verificação de Sistema Não Ok.....	27
Figura 23: Aviso de erro	28
Figura 24: Base para junção.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Dados Antes da 1ª Calibração	29
Gráfico 2: Diferença antes da 1ª Calibração	30
Gráfico 3: Dados após a 1ª Calibração	30
Gráfico 4: Diferença após a 1ª Calibração	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
3	JUSTIFICATIVA.....	9
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
4.1	CALORIMETRIA	10
4.2	CALORÍMETROS LABORATORIAIS	11
4.3	PLACAS DE PROTOTIPAGEM	13
4.3.1	Tipos de placas de prototipagem	13
4.3.1.1	Arduíno	13
4.4	IMPRESSÃO 3D.....	15
4.5	SENSORES DE TEMPERATURA.....	17
5	MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1	MATERIAIS	18
5.2.	METODOLOGIA.....	24
5.2.1	Desenvolvimento do Design.....	24
5.2.2	Interface do usuário.....	26
5.2.3	Eletrônica	28
5.2.4	Calibração do sensor de temperatura	29
5.2.5	Cálculo da Capacidade Calorífica	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
7	CUSTOS DE PRODUÇÃO.....	36
8	REFERÊNCIAS.....	37
	ANEXO 1 – Código do Programa Controlador (IDE Arduino)	39

1 INTRODUÇÃO

Criado com o objetivo de facilitar o entendimento em transferência de calor, o calorímetro laboratorial é um aparelho que permite estudar a quantidade de calor trocada entre dois corpos. Isolado termicamente, para impedir que o ambiente externo influencie a troca de calor interna, o aparelho possui características que são definidas pelo modo de operação e pelo material utilizado em sua construção (SANTOS, 2011, p. 47).

O desenvolvimento de equipamentos didáticos utilizando plataformas de prototipagem está se tornando cada vez mais comum. Esse tipo de instrumentação possibilita um baixo custo na produção, e ainda uma precisão adequada para fins educativos, além de permitir o controle de diversos sensores utilizados no cotidiano de um laboratório.

A plataforma Arduino, mais utilizada para estes casos, teve o seu uso difundido rapidamente no campo da engenharia, o que permitiu que o compartilhamento de conhecimento por meio das bibliotecas expandisse cada vez mais. Assim, esta metodologia com abordagem prática serve de auxílio para o ensino de diversas disciplinas que abrangem desde programação até a física, gerando alternativas para métodos mais eficientes de aprendizagem.

Outra possibilidade que cresce de forma exponencial no auxílio do ensino é o uso da impressão 3D. Principalmente porque assegura a materialização rápida de objetos tridimensionais, assim como sua alteração e seu redimensionamento, criando objetos que também permitem alterações. Daí vem o grande fluxo de informações que dão suporte ao crescimento acelerado dos métodos de prototipagem rápida (TRAMONTANO; JUNIOR, 2015, p. 350).

Por fim, este projeto será utilizado como base para a implementação de uma bancada de prototipagem para o laboratório da Incubadora de Inovações da UTFPR-PG. Neste ambiente o aluno poderá construir protótipos, estimular a criatividade e colaborar para a melhoria do ambiente interno da universidade, bem como para ações de extensão, alinhando o propósito tecnológico da instituição com uma vertente recente da nova engenharia que é a inovação.

2 OBJETIVOS

- **Geral**

- ✓ Desenvolver um calorímetro de escala laboratorial para fins didáticos.

- **Específicos**

- ✓ Estudar calorímetros comerciais e construídos localmente para compreender suas propriedades fundamentais;
- ✓ Adaptar todas as ideias possíveis às capacidades de construção da UTFPR;
- ✓ Utilizar o projeto como base para implementação da bancada de prototipagem da incubadora da UTFPR-PG;
- ✓ Construir ao menos um protótipo de calorímetro a ser usado em aulas práticas;
- ✓ Estabelecer parcerias com professores e pesquisadores interessados em usar o protótipo;
- ✓ Incentivar o estudo de soluções práticas para problemas internos da comunidade da UTFPR-PG.

3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica pois se faz necessário observar os problemas que podem ser resolvidos no ambiente interno da universidade, de modo a auxiliar na melhoria da estrutura do ensino para as próximas turmas. Equipamento deste tipo oferecem uma facilidade maior de utilização devido a sua portabilidade, e neste caso específico, conta com a vantagem de se poder trabalhar numa larga faixa de temperatura ambiente. Além disso, o trabalho estimula a resolução de problemas utilizando tecnologias acessíveis que serão cada vez mais comuns na indústria e no ambiente universitário. Buscou-se com este projeto estimular uma cultura acadêmica de benefício mútuo, onde o aprendizado seja transformado em melhorias internas que tornem o ensino cada

vez melhor, na forma de parcerias contínuas. Assim, podemos construir ao longo do tempo uma instituição cada vez mais colaborativa.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 CALORIMETRIA

A busca por uma definição de calor e suas propriedades percorre toda a história desde que se percebeu a importância de tal assunto para termodinâmica. Atualmente, definimos o calor como a energia transferida entre um sistema e sua vizinhança devido a diferença de temperatura entre o sistema e uma parte de sua vizinhança (HALLIDAY et al., 1993, p.183). Assim como na teoria, existe uma definição matemática para o fluxo de calor que segundo Callen (1985) é:

$$\delta Q = dU + PdV \quad (1)$$

As notações diferentes se dão pela característica de que Q é uma diferencial não-exata. Porém, as variações de energia, ou seja, de Q são dependentes do processo, tornando-as diferenciais exatas.

Para relacionar a quantidade de calor recebido e a elevação de temperatura em um corpo utilizamos o conceito de capacidade térmica, ou seja, a quantidade de calor necessária para elevação unitária de temperatura (BARBOSA, 2016, p. 20). É importante lembrar que esta propriedade pode variar de acordo com as características do material. Em notação diferencial podemos escrever:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (2)$$

Se considerarmos que um corpo possui uma certa massa m, podemos ainda obter a equação do calor específico:

$$dQ = mcdT \quad (3)$$

Onde:

$$c = \frac{C}{m} \quad (4)$$

A manipulação matemática destas fórmulas juntamente com a interpretação física está por trás da modelagem dos diferentes tipos de calorímetros laboratoriais, configurando os softwares de operação.

4.2 CALORÍMETROS LABORATORIAIS

Apesar da ascensão dos calorímetros didáticos de baixo custo os calorímetros laboratoriais são essenciais em estudos e experimentos mais complexos. As bombas calorimétricas, que medem o calor de combustão de certas substâncias exigem mais cuidados ao serem fabricadas por trabalharem com gases inflamáveis. O modelo utilizado nas aulas experimentais (Figura 1) é composto por uma célula de medição, frasco de decomposição e estação de preenchimento de oxigênio (WEBSITE IKA, 2020).

Figura 1: Bomba Calorimétrica IKA C200.



Fonte: IKA (2020)

A célula de medição permite ser controlada por computador, além de transferir os arquivos facilmente com a utilização de um software como o C 6040

CalWin. O frasco de decomposição (Figura 2) é constituído de aço inoxidável e disponibilizado em diferentes volumes. A faixa de medição máxima de energia é de 40000 J. Já a estação de preenchimento de oxigênio (Figura 3) é um suporte metálico que trabalha a uma pressão média de 40 bar (WEBSITE IKA, 2020).

Figura 2: Frasco de decomposição.



Fonte: IKA (2020)

Figura 3: Estação de preenchimento de oxigênio.



Fonte: IKA (2020)

Este tipo de equipamento exige condições de funcionamento que na maioria das vezes não são cumpridas nas condições climáticas da região, como por exemplo temperatura ambiente a 25°C, implicando em uma experiência incompleta para o discente. Desta forma, buscaremos solucionar este problema combinando sensores e placas de prototipagem para formar um sistema que possa ser utilizado em uma faixa de temperatura superior.

4.3 PLACAS DE PROTOTIPAGEM

O avanço da tecnologia permite, além de muitas coisas, o aprimoramento do ensino nos cursos superiores, e principalmente na engenharia. Inserir métodos tecnológicos em salas de aulas pode preparar o novo engenheiro para o novo mercado, onde os meios digitais para a solução de problemas estão cada vez mais presentes.

Para atender esta nova demanda as placas de prototipagem estão sendo cada vez mais utilizadas por professores e alunos, pois permitem solucionar problemas de forma simples e eficaz, além de exercitar a criatividade. Os microcontroladores, responsáveis pela fama deste tipo de tecnologia no ensino, são considerados um computador completo em miniatura criado em um único circuito integrado. Seus componentes e unidades de processamento permitem executar tarefas das mais variadas formas, desde memórias de leitura à conversão de sinais analógico/digital. Combinando o microcontrolador com sensores e outros dispositivos é possível monitorar sistemas, alterar condições de processos e testar diversas possibilidades em pequena escala, daí a grande contribuição para a engenharia moderna (ARAÚJO; CAVALCANTE; DA SILVA, 2019, p.39).

4.3.1 Tipos de placas de prototipagem

As placas de prototipagem podem se diferenciar de diversas maneiras, pelo tamanho, funcionalidade, capacidade de processamento e aplicação. Conhecer essa distinção facilita na escolha da placa que mais se adequa a um projeto. Dentre a classe de microprocessadores Arduino, temos algumas categorias discutidas a seguir.

4.3.1.1 Arduíno

Esta classe de microprocessadores é a mais conhecida no mundo da prototipagem; isso se dá pela facilidade na linguagem de programação, compatibilidade com outros aparelhos e custo-benefício. O quadro abaixo ilustra os principais tipos de Arduino e suas diferenças:

Quadro 1. Tipos de Arduino

	Arduino Uno	Arduino Mega 2560	Arduino Due	Arduino Nano	Arduino Pro Mini
Micro Controlador	ATmega328	ATmega2560	AT91SAM3X8E	ATmega168 ou ATmega328	ATmega168
Portas Digitais	14	54	54	14	14
	Arduino Uno	Arduino Mega 2560	Arduino Due	Arduino Nano	Arduino Pro Mini
Portas PWM	6	15	12	6	6
Portas analógicas	6	16	12	8	8
Memória	32 Kb	256 Kb	512 Kb	16 Kb ou 32 Kb	16 Kb
Clock	16 Mhz	16 Mhz	84 Mhz	16 Mhz	8 Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	USB Mini-B	Serial/ Módulo USB externo
Conector Para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Tensão de operação	5V	5V	3.3V	5V	3.3V ou 5V
Corrente máxima	40 mA	40Ma	130 mA	40 mA	40 mA

Fonte: Docero (2019)

O Arduino Uno geralmente é a primeira escolha para fins didáticos por possuir muitas portas de entrada e compatibilidade com uma grande quantidade

de shields que são placas de circuito contendo outros dispositivos, como display de LCD e receptores GPS (MCROBERTS, 2011, p. 24).

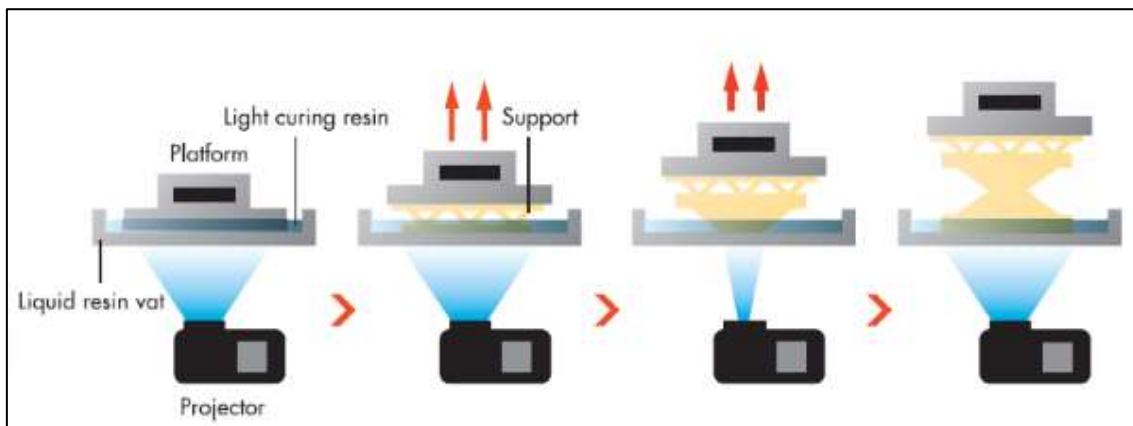
Como visto no quadro, os modelos basicamente se diferenciam pelos microprocessadores, sendo o Arduino Due o mais potente neste quesito. Já os modelos Nano e Pro mini são recomendados para projetos permanentes com pouca necessidade de processamento, uma vez que suas portas não são encaixadas, mas soldadas nos pinos.

Para o desenvolvimento do calorímetro, a utilização de uma placa de prototipagem é indispensável, uma vez que será preciso controlar sensores de temperatura, utilizar display LCD e ainda controlar a agitação do sistema. Além da parte de programação é preciso levar em conta a estrutura do objeto, o design do recipiente, da hélice de agitação e do suporte que sustentará o sistema. Na parte estrutural a impressão 3D poderá auxiliar no desenvolvimento de um design mais preciso, trazendo soluções práticas para otimizar o sistema.

4.4 IMPRESSÃO 3D

Segundo Aguiar (2014), a técnica da impressão 3D como conhecemos hoje teve início quando Charles W. Hull registrou sua primeira patente, em 1984. O método chamado estereolitografia (em inglês, stereolithography, SLA), também conhecido como impressão em resina, consiste em solidificar camadas de um fotopolímero utilizando a luz (Figura 4). O aparelho é constituído de um recipiente que contém a resina, uma plataforma de suporte e um projetor de luz. O processo começa com a plataforma imersa na resina, e à medida que as camadas são solidificadas o movimento vertical é realizado para solidificar a próxima camada.

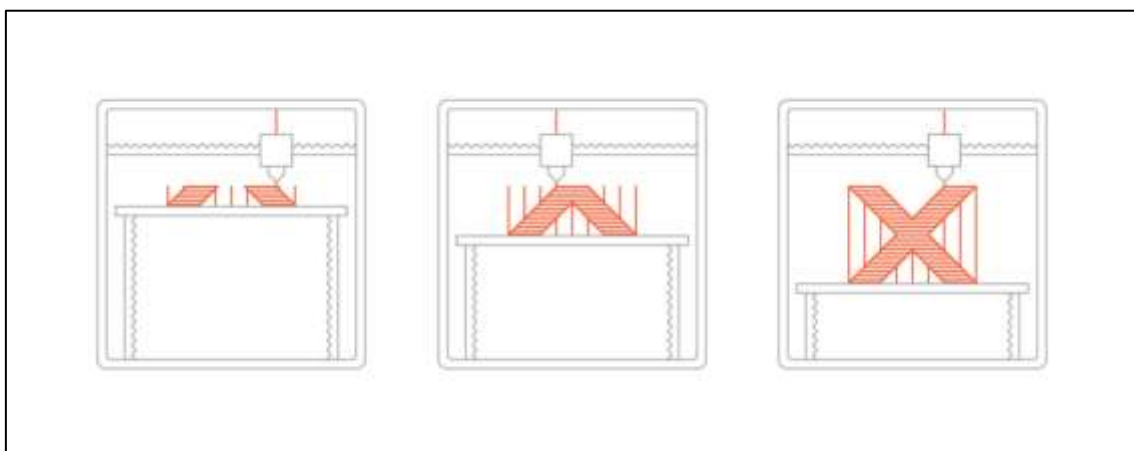
Figura 4: Processo de estereolitografia.



Fonte: 3Dprint.com (2019)

Ainda citando Aguiar (2014), o próximo a contribuir para a evolução da impressão 3D foi Scott Crump, em 1989. Seu equipamento baseou-se no método de modelagem por fusão e deposição (em inglês, fused deposition modeling FDM), que consiste basicamente em derreter o material (geralmente termoplásticos) no bico de impressão e depositá-lo, camada por camada, até a formação do objeto tridimensional (Figura 5). Além disso, Crump adicionou um terceiro eixo que permite o movimento do bico para cima e para baixo, utilizando as três dimensões.

Figura 5: Processo de modelagem por fusão e deposição.



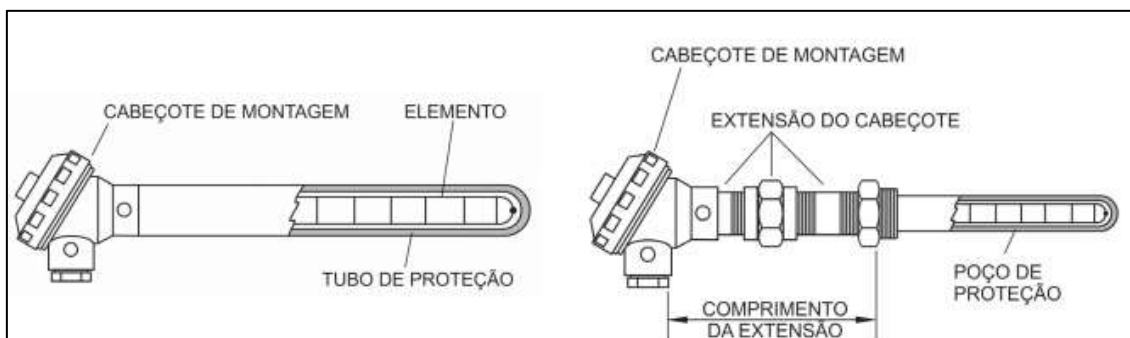
Fonte: tobuya3dprinter.com (2014)

O método FDM se difundiu rapidamente no universo da engenharia por ser relativamente fácil e ágil. Apesar de ser considerado um método com baixa resolução se comparado ao SLA, o volume de impressão se torna o fator chave na escolha entre as técnicas, pois o tempo de impressão em FDM é menor. Desta forma, a impressão em SLA se restringiu a projetos cuja resolução e resistência são essenciais como por exemplo, próteses dentárias (MOTTI, 2018).

4.5 SENSORES DE TEMPERATURA

A medição da temperatura está presente na maioria dos processos químicos industriais, desde a produção de papel até a cerveja artesanal, sendo uma das variáveis mais importantes da indústria. Neste ramo, os termopares são os sensores mais utilizados devido a sua simplicidade e confiabilidade. Seguindo a definição de Lúcia Moreira (2002), o termopar (Figura 6 e 7) é um transdutor que compreende dois fios dissimilares, unidos em uma das extremidades. Nesta classe de equipamento existem diversos tipos, sendo diferenciados basicamente pelos metais que compõem os filamentos.

Figura 6: Esquema de termopar



Fonte: Adaptado de *Sense: Sensors & Instruments* (2015)

Figura 7: Termopar real.

Fonte: Camp-Controles (2020)

Já para os projetos laboratoriais didáticos a escolha do medidor de temperatura não se baseia apenas na confiabilidade. O custo também é uma variável importante. Para projetos com orçamento baixo a calibração correta pode ajudar a contornar parte do problema de falta de recursos. Sabendo disso, uma alternativa para sensores de temperatura são os modelos one-wire (Figura 9, p.16). Basicamente, os sensores captam a mudança de temperatura do sistema e enviam a informação para um dispositivo relacionado a medição da variável, neste caso, o sensor será conectado a plataforma Arduino. Os detalhes deste modelo de sensor serão comentados na seção metodologia.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

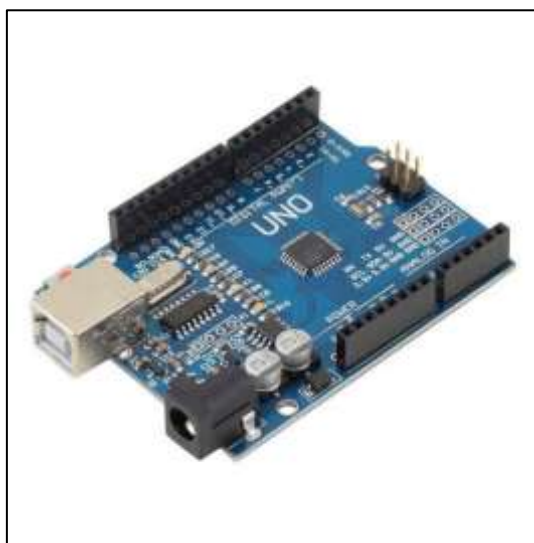
5.1 MATERIAIS

O aparelho foi desenvolvido na bancada de prototipagem da incubadora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta grossa (UTFPR-PG). O sistema será composto basicamente pelo vaso calorimétrico, caixa de comando, agitador, sensor de temperatura, microcontrolador Arduino Uno, módulo contador de giros e display LCD. Todos a serem escolhidos buscando o melhor custo-benefício para o equipamento, sem perder eficiência.

Foi utilizado o PLA (Polylactic acid) para a impressão 3D da carcaça que reveste o vaso calorimétrico e a caixa de comandos. Este material possui ponto de fusão de aproximadamente 150°C, e calor específico de 1800 J/Kg.K (Xometry, 2018). Propriedades que atendem as necessidades do equipamento. Dessa forma, conseguimos modelar a carcaça de acordo com as nossas necessidades. Além disso, este material possui resistência mecânica suficiente para o propósito que será utilizado neste projeto.

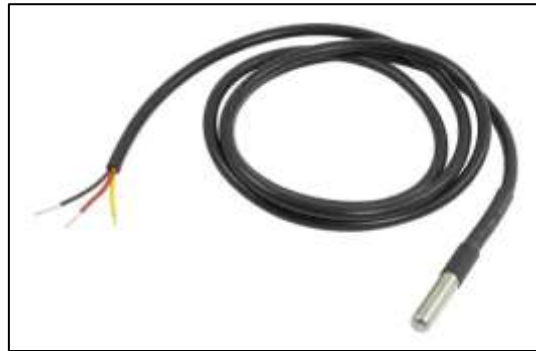
O Arduino Uno (Figura 8) foi escolhido pois permite em primeiro momento diversos testes, possuindo portas suficientes para a quantidade de shields que serão utilizados. Operado na linguagem de programação C/C++, este microcontrolador é open source, isso permite que a biblioteca disponibilizada forneça bastante conteúdo auxiliares para o desenvolvimento de um código completo e robusto (OLIVEIRA et al., 2016).

Figura 8: Arduino Uno



Fonte: Eletrogate (2020)

Existem diversos tipos de sensores compatíveis com Arduino. Para medir a temperatura foi escolhido o modelo digital DS18B20 tipo sonda (Figura 9), pois trabalha na faixa de -55 °C a +125 °C, com precisão de $\pm 0,5$ °C entre -10 °C a +85 °C.

Figura 9: Sensor de Temperatura DS18B20

Fonte: LEINZA (2020)

Além dos sensores, outros componentes elétricos serão necessários: módulo gerador de sinal pwm, módulo contador de giros, resistores ($4K\Omega$), jumpers e display LCD. Eles serão fornecidos pela bancada de prototipagem da Incubadora da UTFPR-PG. Para controlar a rotação do motor DC utilizado, fizemos uso do módulo gerador de sinal pwm de modelo 5A, 90W (Figura 10). Este sinal varia a magnitude do pulso elétrico enviado ao motor, fazendo assim com que sua rotação aumente ou diminua.

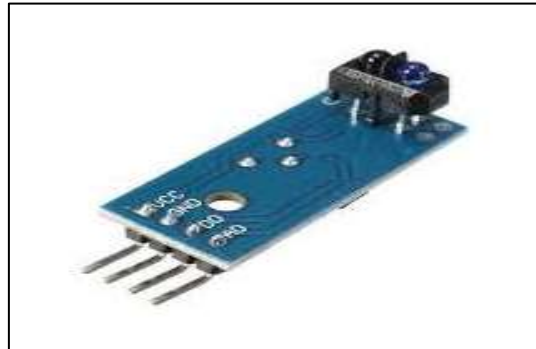
Figura 10: Módulo controlador de rotação

Fonte: Usina Info (2022)

Na intenção de deixar o sistema completo e fornecer mais dados ao usuário, foi incluído um módulo contador de giros (Figura 11) no eixo do motor. Dessa forma, conseguimos extrair a informação de rotações por minuto (RPM), podendo fazer análises de influência desta variável na distribuição de temperatura. Foi impresso no eixo de rotação uma faixa branca (Figura 12),

quando esta passa pelos leds do sensor o mesmo utiliza a diferença de coloração para captar as rotações, interpretando os movimentos através do código de programação instalado na placa Arduino.

Figura 11: Módulo contador de rotação – TCRT 500



Fonte: Easytronics (2022)

Figura 12: Eixo do motor com faixa para contador de rotação



Fonte: Autoria própria (2022)

O vaso calorimétrico é o ambiente no qual as substâncias serão trabalhadas e a medição de temperatura será feita. Levamos em consideração, ao escolher o material, fatores como troca de calor com o ambiente externo, características das substâncias a serem utilizadas e resistência ao calor.

Escolheu-se fazer o vaso calorimétrico em alumínio. O material é relativamente mais robusto se comparado a alguns plásticos. O vaso foi desenhado de modo a ter volume de aproximadamente 500 ml, com diâmetro interno de 72 mm e parede com espessura de 2 mm. Feito pelo processo de usinagem no laboratório mecânico da instituição de ensino.

Após selecionado o material, fez-se o isolamento da parede externa do vaso. Utilizou-se camada espuma de poliuretano entre as paredes do vaso e a carcaça externa do equipamento com espessura aproximada de 7 mm para que a troca de calor com o ambiente externo seja a mínima possível, facilitando a modelagem física do calorímetro. Com gabaritos feitos na impressora 3D (Figura 13), posicionou-se o vaso na carcaça para a aplicação da espuma expansiva.

Figura 13: Guias para posicionamento do vaso calorimétrico

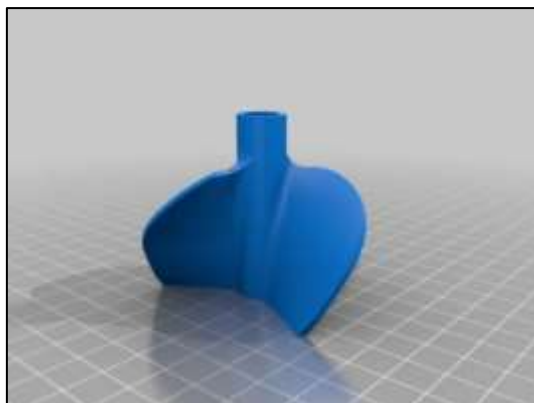


Fonte: Autoria própria (2022)

Utilizou-se a impressão 3D para suprir a necessidade de peças essenciais para a construção do aparelho, como por exemplo, a carcaça para o vaso calorimétrico e display, assim como proteções para o motor e eixo de agitação. Além de contribuir para um design exterior que poderá facilitar o manuseio.

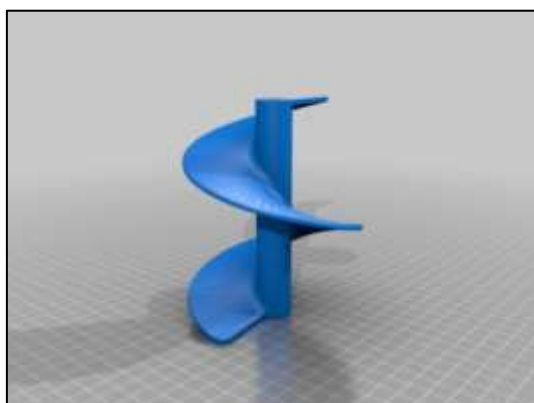
A prototipagem rápida permitida pela máquina de impressão presente na bancada de prototipagem da Incubadora da UTFPR-PG acrescentou mais utilidades para o calorímetro. Foram impressas pás de agitação de diferentes designs (Figura 14,15 e 16), assim, podem ser feitos estudos relacionados à distribuição de temperatura para cada modelo, podendo relacionar o design da pá e eficiência de agitação. Assim como a influência da turbulência nas possíveis reações.

Figura 14: Pá de agitação adaptado do modelo naval.



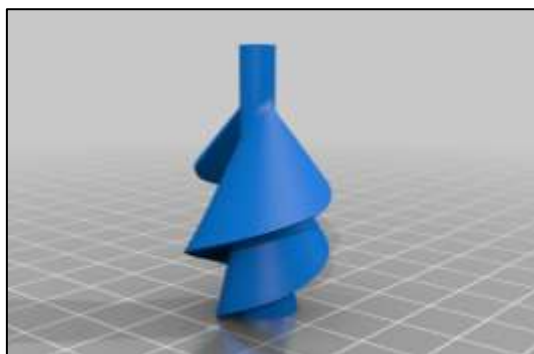
Fonte: Thingiverse (2017)

Figura 15: Pá de agitação modelo espiral.



Fonte: Thingiverse (2015).

Figura 16: Pá de agitação modelo *Lily Impeller*.



Fonte: Thingiverse (2020)

Vale ressaltar que o modelo Lily Impeller possui características diferentes de agitação. Segundo Integza (2020), foi criada por Jay Harman em 1996, teve seu modelo baseado na sequência de Fibonacci. Ao contrário dos outros modelos, este promove a sucção do fluido ao impeli-lo. Seu design estimula a criação de um vórtex acelerando a agitação. Este modelo foi escolhido com o intuito de verificar se era possível conseguir o mesmo nível de agitação com uma rotação menor, se comparado aos outros modelos, movimentando a solução com um mínimo de turbulência.

5.2. METODOLOGIA

5.2.1 Desenvolvimento do Design

Para fazer o desenho 3D do projeto, foi utilizado o software Fusion 3D. Seu conceito foi pensado de forma a facilitar a utilização, manutenção e leitura dos dados obtidos. Para isso, fez-se separado a caixa de comando (Figura 17) e o vaso calorimétrico. A tampa tem esquema de roscas para o fechamento, além de uma camada de EVA para fortalecer o encaixe de ambas as partes. Com entradas para o sensor de temperatura, termômetro e pás de agitação. Além disso, conta com um encaixe para a proteção do motor com espaço para o contador de rotação.

Figura 17: Carcaças da caixa de comando e vaso calorimétrico.



Fonte: Autoria própria (2022)

A caixa de comandos é onde está concentrado todo o sistema eletrônico do equipamento, contendo o Arduino, Display LCD e o módulo controlador de rotação do motor, assim como suas conexões. O acesso para reparos e manutenção se dá pela parte inferior da caixa, conectada com o restante da carcaça por meio de encaixe. Foram impressas também três modelos de pás agitadoras, como mostra a Figura 18.

Figura 18: Modelos de pás impressos em PETG.



Fonte: Autoria própria (2022)

As pás foram impressas em PETG, por ter um melhor desempenho em altas temperaturas, uma vez que diversas reações são exotérmicas e o calor excessivo pode amolecer facilmente o PLA. Sua extensão é composta pela haste que faz o encaixe com o eixo do motor. Os modelos foram adaptados de agitadores de tintas, estes tipos de configuração são desenvolvidos para realizar a homogeneização da mistura, por isso, pode-se esperar que as mesmas façam uma boa distribuição de temperatura durante a agitação.

5.2.2 Interface do usuário

Em virtude de facilitar a utilização do equipamento, foi empregado um display com mensagens simples no momento da inicialização do sistema, seguidas de avisos do funcionamento correto do sistema, assim como alertas em caso de algum erro de conexão com o sensor de temperatura. Erros relacionados ao funcionamento do motor não foram incluídos pois o mesmo não possui uma conexão não relacionada ao Arduino, impossibilitando a identificação de qualquer mal funcionamento. Nestes casos, o usuário deverá se atentar se o motor está funcionando antes de iniciar o experimento. As figuras abaixo ilustram as mensagens de início:

Figura 19: Mensagem de Início



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 20: Verificação do Sistema OK



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 21: Apresentação dos dados de temperatura



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 22: Verificação de Sistema Não Ok



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 23: Aviso de erro

Fonte: Autoria própria (2022)

5.2.3 Eletrônica

Todo o controle é realizado pela placa Arduino, e para conectar os sensores a ele o circuito eletrônico foi montado da seguinte maneira:

A alimentação do sensor de temperatura e do módulo contador de rotação foi feita pelo próprio Arduino (5V). Com a saída 2 para o módulo e saída 3 para o sensor, ambas com sinal pwm. Para o completo funcionamento do sensor de temperatura foi preciso conectar um resistor de 4K Ω entre os fios de alimentação e o sinal pwm.

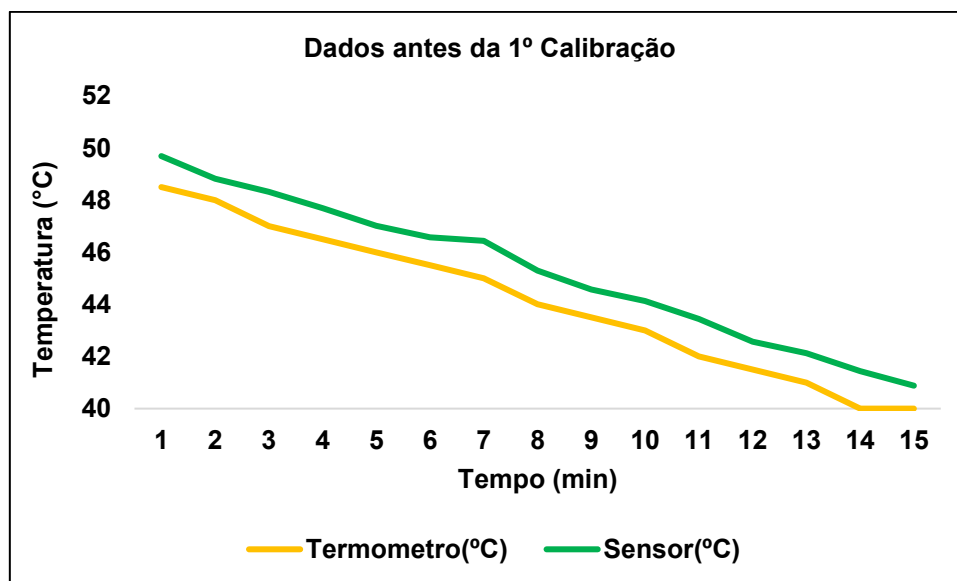
Para alimentar o módulo controlador de rotações e o motor, a fiação foi ligada diretamente nos pinos da fonte de alimentação, pois a placa Arduino possui apenas duas saídas de 5V, insuficientes para ligar o motor, display e os módulos.

O código escrito com todas as especificações de entradas e saídas, assim como as condicionais que comandam a lógica do sistema estão descritos no Anexo 1.

5.2.4 Calibração do sensor de temperatura

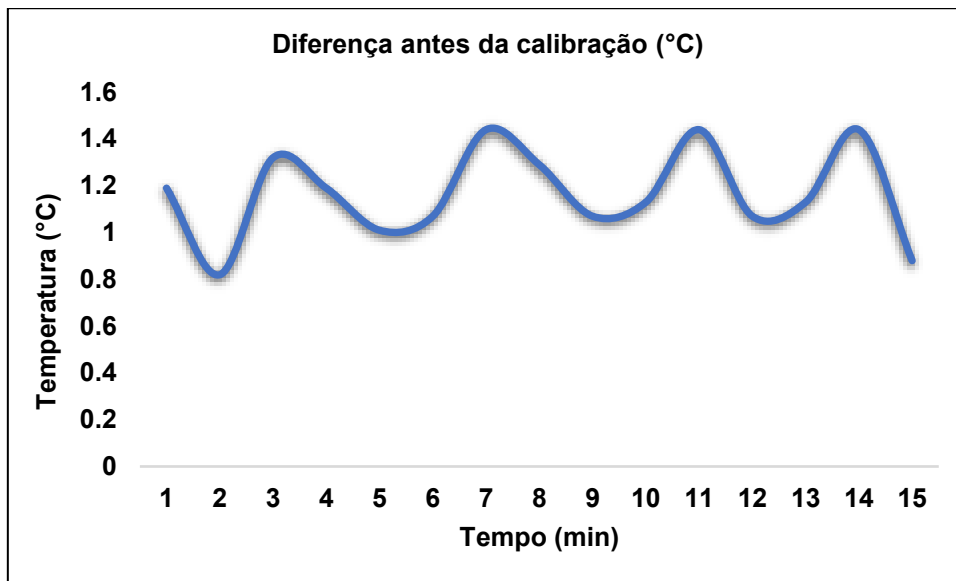
Como referência para realizar a calibração do sensor de temperatura foi utilizado como referência um termômetro de mercúrio do laboratório da instituição com capacidade de medição até 150 °C. Foi colocado 200 ml de água aquecida no calorímetro e fechado. Em seguida, monitorou-se a medição de temperatura do sensor e do termômetro, simultaneamente. Com os dados, calculou-se a diferença de marcação entre ambos e adicionou-se ao código do sensor. Vale considerar que no segundo experimento foi adicionado ao sistema 50ml de água a temperatura ambiente com o intuito de verificar a funcionalidade do sensor em diferentes faixas de temperatura. Pode-se ver nos gráficos abaixo os resultados da calibração:

Gráfico 1: Dados Antes da 1ª Calibração



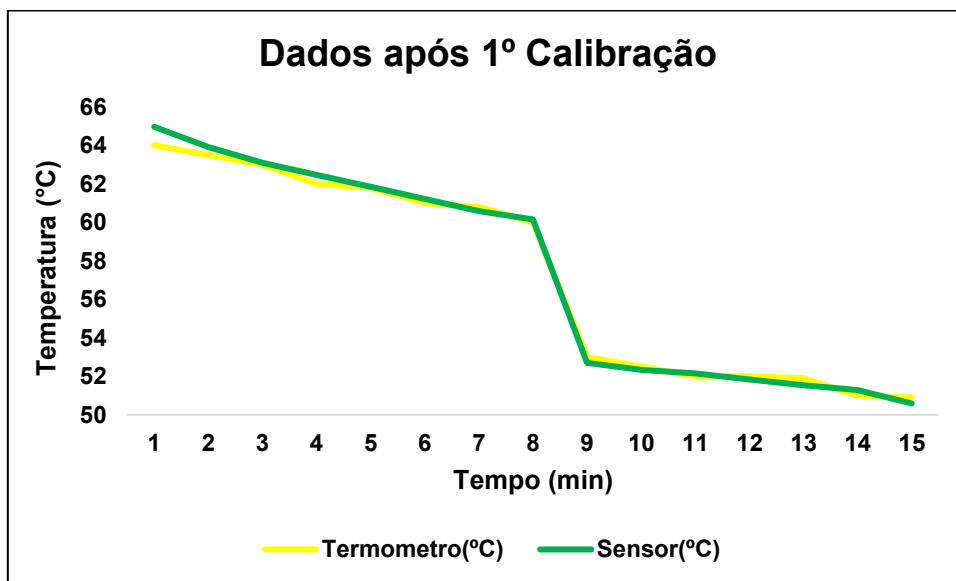
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 2: Diferença antes da 1ª Calibração



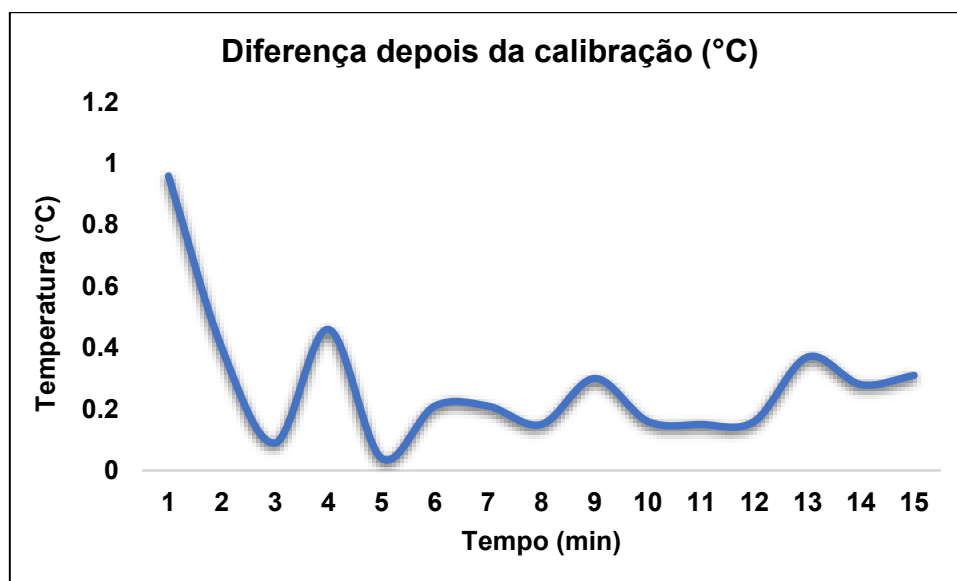
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 3: Dados após a 1ª Calibração



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 4: Diferença após a 1ª Calibração



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se pelos gráficos que a diferença da medição entre o sensor de temperatura e o termômetro diminuiu após a calibração, ficando dentro da faixa de especificação de tolerância do equipamento, que é de $\pm 0,5$ °C entre -10 °C e 85 °C, atingindo o objetivo do procedimento. Dessa forma, garantimos a qualidade de medição do equipamento. Todavia, foi previsto no design da tampa um local para adição do termômetro para comparação durante os experimentos.

5.2.5 Cálculo da Capacidade Calorífica

Após a montagem do sistema, foi medida a capacidade térmica do calorímetro utilizando o método das misturas baseado nos estudos de Oliveira et al., (2016). Para isso, levaremos em conta um dos princípios da calorimetria: Quando dois corpos trocam calor entre si, a quantidade de calor cedida por um é a mesma quantidade recebida por outro, quando estão termicamente isolados e sem a interferência de corpos externos (RODRIGUES, 1998, p.321). Sabendo disso, podemos calcular a capacidade térmica do calorímetro da seguinte maneira:

$$Q_{\text{água}} = Q_{\text{calorímetro}} \quad (5)$$

A Capacidade térmica do calorímetro é:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (6)$$

A quantidade de calor cedido ou recebido é:

$$Q = mc\Delta T \quad (7)$$

Daí, temos:

$$c m_F (T_F - T_E) + C_{\text{calorímetro}} (T_A - T_E) = c m_Q (T_E - T_Q) \quad (8)$$

Onde:

c = calor específico da água;

m_F = massa da água em temperatura fria;

m_Q = massa da água em temperatura quente;

T_A = Temperatura ambiente da água;

T_F = Temperatura da água fria;

T_Q = Temperatura da água quente;

T_E = Temperatura em equilíbrio do sistema;

$C_{\text{calorímetro}}$ = Capacidade calorífica do calorímetro.

O experimento foi realizado da seguinte maneira: Para os dois primeiros experimentos, foi medido um volume de 100 ml de água em temperatura ambiente e adicionada ao calorímetro. Após, 200 ml de água foi medido para a uma temperatura quente (aproximadamente 60 °C) e adicionada ao calorímetro. Neste momento acionou-se a agitação para melhor distribuição de temperatura. Para o terceiro experimento, repetiu-se o procedimento alterando a quantidade de água que foram iguais para ambas as temperaturas: 150 ml. Com a temperatura de equilíbrio da mistura (T_E) e quantidade de água utilizada (m_A e

mF) utilizou-se a equação (8) para calcular a capacidade calorífica do calorímetro (OLIVEIRA et al., 2016).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do método das misturas citado na metodologia buscou-se calcular a Capacidade Calorífica (Ccal) do equipamento. O procedimento foi realizado em triplicata e os resultados estão expressos na tabela abaixo:

Tabela 1: Resultados dos experimentos

Experimento	T _F (°C)	T _A (°C)	T _Q (°C)	T _E (°C)	M _F (g)	M _Q (g)	C _{cal} (Cal/°C)
1	29,0	17,0	60,0	34,5	199,8	100,3	82,0
2	29,0	17,0	60,0	34,5	199,8	100,3	82,0
3	16,0	17,0	62,0	34,1	151,0	149,6	84,5
Capacidade Calorífica Média							82,8
Desvio Padrão							1,4

Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo a literatura, para podermos desconsiderar o equipamento no balanço energético sem alteração significativa dos resultados, é necessária uma capacidade calorífica entre 15 a 25 Cal/°C (RUIZ, p. 177, 1987). Os dados da tabela acima nos mostram que não conseguimos chegar em uma configuração para tornar nosso calorímetro ideal. Dessa forma, ele deverá ser considerado no balanço energético ao executar os experimentos de cálculo de calores específicos de metais.

Em relação a agitação, não foi possível realizar estudos mais profundos sobre o modelo Lily Impeller devido a imprevistos no contador de rotações e o tempo reduzido que houve para a construção do projeto. Além disso, não se pôde afirmar com confiabilidade o número de rotações com o método utilizado inicialmente. Porém, seu desenho é promissor, com boa capacidade de agitação sem turbulência excessiva. Sua complexidade baseada na sequência de Fibonacci, no entanto, foi compensada pela disponibilidade de modelos online. Obrigado, Integza!

Visando tornar o equipamento cada vez mais robusto, sugerimos como implementações futuras uma análise no sistema de isolamento do calorímetro, adicionando mais camadas de material isolante na parte externa do vaso calorimétrico para tentar diminuir a capacidade calorífica equipamento.

Ao mesmo tempo, recomendamos uma nova versão do equipamento, mais simples, apenas com o módulo controlador de rotação e o motor, uma vez que se pode substituir o sensor de temperatura por um termômetro facilmente. O contador de rotações também pode ser eliminado, pois para este sistema a agitação não precisa ser monitorada com dados precisos, pode-se apenas controlar para que não haja turbulência durante o experimento, deixando fixa a velocidade de rotação se necessário.

Além disso, é recomendado adicionar ao sistema uma base (Figura 19) para evitar a movimentação das partes no momento do experimento.

Figura 24: Base para junção



Fonte: Autoria Própria (2022)

Por fim, apesar dos contratemplos, podemos concluir que este projeto cumpriu com os seus objetivos. Desenvolvendo um equipamento que poderá ser utilizado nas aulas práticas de calorimetria fazendo as devidas considerações. Em complemento, não foi possível desenvolver a bancada de prototipagem como esperado, devido ao momento conturbado que passamos nos últimos anos. Mas espera-se que este projeto fomente a utilização de cada vez mais tecnologias acessíveis no ensino não apenas da física, mas em qualquer disciplina com espaço para tal. Sabe-se a importância da interdisciplinaridade na formação de um novo profissional, e de forma simples e eficaz, projetos como este exercitam habilidades complementares essenciais para se destacar no mercado de trabalho.

7 CUSTOS DE PRODUÇÃO

Seguindo o objetivo do projeto, conseguiu-se desenvolver um equipamento com baixo custo se comparado aos equipamentos de laboratórios semelhantes. A maior parte dos custos estão relacionados aos sensores utilizados e aos componentes do sistema eletrônico. Como se pode observar na Tabela 2, a estrutura externa do equipamento produzidas por máquinas de impressão 3D se prova viável para esta utilização.

Tabela 2: Orçamento do projeto em junho de 2022.

Referência	Nome	Valor (R\$)
Usina Info	Jumper Macho-Fêmea Kit 20 peças	21,76
Usina Info	Protoboard 1660 pontos	125,95
Usina Info	Arduino Uno + cabo USB	56,91
Usina Info	Mini motor DC N20	17,36
Usina Info	Sensor de temperatura DS18B20 (3 unidades)	59,58
Usina Info	<i>Display</i> LCD 16x2	22,27
Material Próprio	<i>Módulo</i> PWM	25,00
Material Próprio	<i>Filamento</i> PLA	70,00
Material Próprio	<i>Filamento</i> PETG	18,00
Total	-	416,83

Fonte: Autoria própria (2022)

Após pequenos aperfeiçoamentos do calorímetro, os arquivos 3D, instruções de montagem e códigos de programação serão disponibilizados gratuitamente através da plataforma Thingiverse a fim de fortalecer o alcance desse tipo de projeto.

8 REFERÊNCIAS

AGUIAR, Leonardo De Conti Dias; YONEZAWA, Wilson Massashiro.

Construção De Instrumentos Didáticos Com Impressoras 3D. Disponível em <http://sinect.com.br/anais2014/anais2014/artigos/tic-no-ensino-aprendizagem-de-ciencias-e-tecnologia/01409583389.pdf>. Acesso em 17 out. 2020.

ARAUJO, Warley Monteiro; CAVALCANTE, Maxwell Machado; DA SILVA, Rogério Oliveira. ***Visão geral sobre microcontroladores e prototipagem com arduino.*** Disponível em <http://revista.faculdadeprojecao.edu.br/index.php/Projecao4/article/view/1357/1062>. Acesso em 06 set. 2020.

BARBOSA, Rafael Rodrigues. ***Desenvolvimento de um calorímetro utilizando uma placa de prototipagem eletrônica de hardware livre para o ensino de física.*** Disponível em <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3867>. Acesso em 26 ago. 2020.

DA SILVA, Osmar Henrique Moura; LABURÚ, Carlos Eduardo. ***Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula.*** Disponível em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/9076/8458>. Acesso em 06 set. 2020.

HALLIDAY, David, *et al.* ***Fundamentos de Física Volume 2.*** 9º Ed. Editora LTC. 2011.

IKA designed for scientists. ***IKA calorímetros C 200.*** Disponível em <https://www.ika.com/pt/Produtos-Lab-Eq/Calorimetros-csp-330/C-200-cpdt-8802500/>. Acesso em 06 set. 2020.

INTEGZA. ***Golden Ratio Turbine 3D Printed.*** Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=BxNHOMJGcj0>. Acesso em 23 jun. 2022.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio; ORLANDO, Tailan. ***Comparação Entre Três Tipos De Sensores De Temperatura Em Associação Com Arduino.*** Disponível em http://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/151_587.pdf. Acesso em 06 set. 2020.

MCROBERTS, Michael. ***Arduino Básico.*** São Paulo: Novatec Editora, 2011. Disponível em https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4287597/mod_resource/content/2/Ardu%C3%ADno%20B%C3%A1sico%20-%20Michael%20McRoberts.pdf. Acesso em 26 ago. 2020.

MOREIRA, Lúcia. ***Medição de Temperatura Usando-se Termopar.*** Disponível em <https://ceramicaindustrial.org.br/article/587657157f8c9d6e028b467d/pdf/ci-7-5-587657157f8c9d6e028b467d.pdf>. Acesso em 12 out. 2020.

OLIVEIRA, Ewerton C. L. ***A utilização da placa de prototipagem Arduino como ferramenta de incentivo e aprimoramento da formação do engenheiro em programação aplicada.*** Disponível em <http://eneds.net/anais/index.php/edicoes/eneds2014/paper/viewFile/443/389>. Acesso em 9 set. 2020.

SANTOS, D. N. ***Calorimetria no ensino de física com materiais de baixo custo.*** Disponível em http://www.fisicajp2.unir.br/uploads/48059049/arquivos/TCC_DAVI_DO_NASCIMENTO_SANTOS_2011_1982119691.pdf. Acesso em 12 out. 2020.

TRAMONTANO, Marcelo; JUNIOR, Anibal P. ***Ressignificando o modelo físico: impressão 3D e ensino de projeto de arquitetura.*** Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Tramontano/publication/301453846_Ressignificando_o_modelo_fisico_impressao_3D_e_ensino_de_projeto_de_arquitetura/links/5859038708ae64cb3d490d93.pdf. Acesso em 12 out. 2020.

RUIZ, Alberto Ibañez; PIMENTEL, Jorge Roberto. ***Laboratório caseiro: Calorímetro didático de fácil construção.*** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 4, n. 3, p. 175-178, 1987.

XOMETRY. ***Data Sheet: PLA (Polylactic Acid).*** Disponível em < www.xometry.eu > Acesso em 20 jun. 2022.

ANEXO 1 – Código do Programa Controlador (IDE Arduino)

```
//=====//
// --- Bibliotecas --- //

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

//=====//
// --- Mapeamento de Hardware --- //

#define ONE_WIRE_BUS 3

//=====//
// --- Declaração de Objetos --- //

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1;
LiquidCrystal_I2C lcd (0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);

//=====//
// --- Protótipos de Funções --- //

void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress); // mostra o
endereço do sensor

//=====//
// --- Variáveis Globais --- //

float value=0;
```

ANEXO 1 – Continuação

```
float rev=0;
int rpm;
int oldtime=0;
int time;
//int sec;

void isr() //interrupt service routine
{
rev++;
}

float tempMin = 999; // armazena a temperatura mínima
float tempMax = 0; // armazena a temperatura máxima

void setup() {

lcd.begin(16,2);
lcd.setCursor(0,0);//initialize LCD
lcd.print("Hello!");

attachInterrupt(0,isr,RISING); //attaching the interrupt

sensors.begin();

// Localiza e mostra endereco de sensores //
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Ola, Aguarde");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("um segundo.");
```

ANEXO 1 – Continuação

```
delay(2000);
lcd.clear();

if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
{ lcd.setCursor (0,0);
  lcd.print("Sensor nao");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("encontrado!");
  delay(5000) ;
  lcd.clear() ;
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Verifique o");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("sistema");
  delay(5000);
  lcd.clear();}

else
{ lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Sensor de TEMP ");
//  lcd.print(sensors.getDeviceCount (), DEC);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("OK.");
  delay(5000) ;
  lcd.clear() ;}

} //end setup
```

ANEXO 1 – Continuação

```
//=====//  
// --- Loop Infinito --- //  
  
void loop() {  
  
  if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))  
  { lcd.setCursor (0,0);  
    lcd.print("Sensor nao");  
    lcd.setCursor(0,1);  
    lcd.print("encontrado!");  
    delay(5000) ;  
    lcd.clear() ;  
    lcd.setCursor(0,0);  
    lcd.print("Verifique o");  
    lcd.setCursor(0,1);  
    lcd.print("sistema");  
    delay(5000);  
    lcd.clear();}  
  
  else  
  //Lê a informação do sensor  
  { sensors.requestTemperatures();  
    float tempC = sensors.getTempC(sensor1);  
    float TempCorrigida = tempC + 0.652;  
  
    //Mostra dados no serial monitor  
  
    lcd.setCursor(0,0) ;  
    lcd.print("Temp C:");  
    lcd.print(TempCorrigida);
```

ANEXO 1 – Continuação

```
lcd.print("C");
delay(100);

// --- Código do sensor de rotações --- //
delay(1000);
detachInterrupt(0);           //Interrompe o pulso para o sensor
time=millis()- oldtime;      //Encontra o Tempo
rpm=(rev/time)*60000;        //Calcula RPM
oldtime=millis();           //Salva tempo atual
rev=0;
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("RPM ");
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print( rpm);
attachInterrupt(0,isr,RISING);}
}
```