

Development of a Biochemical Oxygen Demand Incubator Prototype based on Thermoelectric Effect with Monitoring System

Shirley Carla Chamby Espejo, Samara Silva de Souza and Oswaldo Hideo Ando Junior

Abstract—In the last decades various internal refrigeration or heating equipment has been developed mainly for a specific use, such as refrigerators air conditioning and freezers each with technology for temperature control. The incubator's greenhouses were originally developed to incubate long-lasting biochemical oxygen demand (BOD) tests. The objective of this work was to build a low-cost BOD incubator and to technically evaluate temperature control through an adjustment to the electrical current in the system supply in addition to wireless monitoring. The project consisted of the dimensioning and projection of the materials for the refrigeration system, the realization of the algorithm that connects the physical part with the logical part of the system, with the development of hardware and software using Arduino to the 3D mechanical part. with the construction of the incubator for the validation of the complete system. It is concluded that the use of thermoelectric TEC1-12706 was possible with the variables presented for the cooling of a small volume. Thus, the prototype of the BOD incubator achieved a minimum temperature of 13 °C and maximum of 40 °C with an approximate error of 0.2 °C. Our BOD system presented an excellent control system through a smartphone that helps in experiments in the laboratory to guarantee the ideal temperature. In addition, the incubator is inexpensive portable and lightweight.

Index Terms—Thermoelectric, Biochemical Oxygen Demand incubator, monitoring system, BOD.

I. INTRODUÇÃO

Os avanços da ciência e da tecnologia trouxeram inúmeros benefícios para diferentes áreas do conhecimento permitindo a obtenção de serviços mais confiáveis com maior qualidade e segurança. Os processos que envolvem reações biológicas e químicas são em geral dependentes da temperatura, necessitando de uma temperatura ideal para a manutenção e conservação do material [1].

Um equipamento que merece destaque são as incubadoras

Artigo Submetido: 07/05/2020. Os autores agradecem o apoio e fomento à pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processo N° 307223/2017-5 e N° 407531/2018-1) e da Universidade Federal de Integração da América Latina – UNILA (Programa Institucional Agenda Tríplice - Edital PRPPG 137/2018).

S. C. C. Espejo, Departamento de Engenharia de Energias, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu - PR, Brasil, shirley.espejo@aluno.unila.edu.br

S. S. Souza, Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UFTPR), Dois Vizinhos -PR, Brasil, samarasouza@uftpr.edu.br

O. H. Ando Junior, Departamento de Engenharia de Energias, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu - PR, Brasil, oswaldo.junior@unila.edu.br

de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) ou mais conhecidas como BOD (*Biochemical Oxygen Demand*). Em função de sua confiabilidade e flexibilidade as DBO são usadas nas mais diversas aplicações: (i) crescimento de plantas germinação, (ii) incubação de culturas biológicas, (iii) armazenamento de reagentes entre outros. Uma das principais vantagens das BODs, é que elas oferecem aos pesquisadores a possibilidade de simular diversas condições climáticas para cultivo e desenvolvimento do material biológico [2].

A partir das tecnologias envolvidas em processos de refrigeração e aquecimento nota-se que atualmente a maioria dos equipamentos para uso em laboratório é fundamentada em modelos que utilizam compressores ou gases refrigerantes, as quais na maioria dos casos são prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, esses sistemas convencionais apresentam baixa precisão no controle de temperatura, atraso na resposta e uma manutenção constante.

Os módulos termoeletrônicos são dispositivos que podem operar tanto para gerar energia (efeito seebeck) como para gerar um gradiente de temperatura (efeito peltier) [3]–[6]. O efeito peltier é resultante do gradiente de temperatura em uma junção de dois semicondutores de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado[6]–[9]. A refrigeração termoeletrônica seu princípio de funcionamento basea-se no efeito peltier tendo como vantagem frente ao método baseado em compressores sua precisão e exatidão na estabilização do controle de temperatura, baixa custo de manutenção por não possuir fluidos ou partes móveis e excelente relação watt por kilo [10]. O efeito peltier tem-se quando a passagem da corrente é do tipo-n para o tipo-p temos refrigeração e se a corrente passa do tipo-p para o tipo-n temos aquecimento, se a direção da corrente for invertida, invertemos o lado quente e lado frio [11]. Dentre os materiais termoeletrônicos destaca-se o telureto de bismuto (Bi_2Te_3) e suas ligas que vem sendo amplamente utilizados por serem bons materiais termoeletrônicos, fortemente dopado para criar excesso (tipo-n) ou uma deficiência (tipo-p) de elétrons e apresenta um baixo custo [4]–[6], [12], [13].

Na Fig. 1 é apresentado o módulo termoeletrônico com os elementos semicondutores altamente impurificados que possuem características elétricas em série mediante condutores de cobre [9, 10]. Para isolar os condutores de cobre, é colocada uma placa cerâmica, utilizada como isolante. As

pontes de cobre de cada lado são unidas termicamente (principalmente alumina), mas estão isoladas eletricamente entre eles. O módulo termoeétrico moderno consta de uma variedade de termopares conectados em serie. Além do comportamento do módulo termoeétrico, é possível alterar o lado frio pelo lado quente, ao inverter a polarização da diferença de potencial [14], [16]–[19].

Para evitar o superaquecimento das placas, o uso de dissipadores de calor e ventiladores é obrigatório para ambos os lados [20]. A potência elétrica aplicada nos terminais é transformada irreversivelmente em calor e deve dissipar-se de maneira efetiva, assim o módulo termoeétrico transfere calor de maneira reversível, de um lado ao outro [14]. Geralmente para regular os módulos termoeétricos são utilizados métodos PWM (pulso com modulação), onde a intensidade de corrente é controlada. A principal vantagem é a alta eficiência de resistir correntes maiores. O controle da tensão é um método habitual, mas apenas é utilizada em um controle de chaves ligado/desligado simples [2].

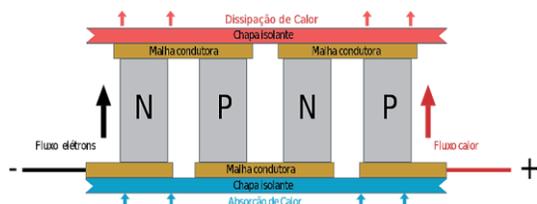


Fig. 1. Estrutura de um módulo termoeétrico.

Existem diferentes estudos sobre refrigeração termoeétrica com aplicação de dispositivos termoeétricos bem como o desenvolvimento de dispositivos com o uso de módulos termoeétricos em diferentes áreas como medicina, transporte, militar e aeroespacial [21].

França [22], desenvolveu uma caixa incubadora para a conservação de componentes de sangue. A incubadora de plaquetas teve como propósito o controle de monitoramento da temperatura interna. O projeto adotou um controle de um termoeétrico (TEC 1-12706) através de um micro controlador Arduino, tentando conservar a temperatura ideal de 20 a 24 °C. O protótipo desenvolvido se mostrou eficiente para o controle da temperatura. Apesar da inviabilidade do uso de plaquetas o sistema se mostrou funcional quanto ao uso de uma bolsa soro simulando as plaquetas. O projeto apresentou uma estabilização de temperaturas e viabilidade do sistema de controle adotado.

Almeida [23], propôs a construção de uma adega climatizada que serve para armazenar vinhos com qualidade durante o seu envelhecimento. A adega deveria permanecer numa faixa de 6°C até 18°C evitando alterações bruscas. Os autores criaram um sistema que permitia o controle da climatização e localização dos mesmos. Para isso foi utilizado módulos termoeétricos para fazer a climatização, utilizou-se linguagem Java para controle de temperatura e adicionou-se um banco de dados MySQL para fazer um sistema de vinhos, para um dimensionamento de três compartimentos.

Maestrelli [24] apresentou a possibilidade de um protótipo de escala reduzida para um sistema de refrigeração de ambientes residenciais. O estudo compreendeu a parte

mecânica, elétrica e térmica, através da montagem de um protótipo para reduzir consequentemente custos de instalação, como é o caso do compressor em tecnologias convencionais. A validação do protótipo deu negativo, devido o rendimento dos módulos. A utilização de um TEC-12706 nas condições previstas teve baixa eficiência. Nesse estudo sugeriu-se a aplicação de arranjos diferentes para que se possibilite maximizar a eficiência dos dispositivos.

Dall’Agnol & Kraemer [25] efetuaram medições de temperatura do ar no interior de uma geladeira construída utilizando pastilhas termoeétricas, medindo as temperaturas de objetos (garrafa de 500ml de água, refrigerante e cerveja). Segundo o estudo leva-se um tempo considerável para chegar a uma temperatura de estabilização, o que torna ineficiente para refrigerar alimentos, porém com capacidade relativa para conservação.

Barbosa & Esmeraldo [26], apresentaram um sistema de refrigeração de ambientes internos de computadores do tipo desktop, utilizando o mesmo princípio de funcionamento do Water Coolers, com o uso de termoeétricos. O sistema foi gerenciado por um subsistema de controle, o qual busca baixar a temperatura interna com um sistema de refrigeração ao estabelecer uma temperatura limite. Sendo utilizado um Arduino para o desenvolvimento do subsistema de controle. De acordo com o estudo o sistema proposto pode ser utilizado em gabinetes desktop possibilitando a refrigeração dos componentes internos.

Godoy[27] apresentou um projeto de construção e desenho de uma câmara incubadora com TEC 1-12706 a partir do efeito termoeétrico para refrigeração de vacinas e atingir 5 °C em um tempo de 90 minutos. No estudo considerou-se dois módulos termoeétrico para 25 W. Inicialmente construiu-se uma câmara de refrigeração para evitar perdas e para um melhor aproveitamento dos módulos termoeétricos (TEC).

Uma busca pelo banco de dados de propriedade intelectual verificou-se a existência de patentes referente a sistema de resfriamento e controle de temperatura aplicado a incubadoras de demanda bioquímica de oxigênio.

A patente CN 10394177 8B, um protótipo desenvolvido por Dou Hongyan Ji Xinming refere-se a um dispositivo térmico de preservação biológica, para exames e análises clínicas, a partir de uma incubadora miniatura com um sistema de controle de temperatura PID [28].

Na patente ES 2341063 BI, um sistema aplicado para a refrigeração de fluidos por métodos termoeétricos foi crido por Alberto Ramos Bardi. O sistema é capaz de estabilizar temperatura de um fluido em circulação entre margens reguláveis, que vão desde -10 °C até +25 °C. São formados por um, dois, três ou mais trocadores de temperatura controlados por um sensor e uma unidade de controle que disponha de uma fonte [29].

A patente EP 3047219 B1, um sistema de refrigeração de câmaras e superfícies é apresentado. O sistema consiste de uma câmara com um duto e um fluido para resfriar o sistema por convecção forçada, utilizado como trocador de calor para manter as temperaturas internas. Além de um controlador disposto a manter a temperatura interna [30].

Nas aplicações que requerem estabilidade térmica, os módulos termoeétricos são mais adequados, pois a conversão termoeétrica é realizada sem partes móveis e apresenta uma excelente precisão no controle da temperatura de refrigeração.

Neste sentido, esse trabalho apresenta uma proposta de desenvolvimento de uma incubadora de demanda biológica de oxigênio de baixo custo com um sistema de monitoração. O projeto consistiu desde o desenvolvimento do hardware, software, representação gráfica 3D e construção da BOD para finalmente avaliar o comportamento da incubadora em condições reais e validar o sistema através do monitoramento a partir de um aplicativo desenvolvido para smartphone. Destaca-se ainda que a presente invenção também pode ser utilizada como bancada didática para o ensino de bioengenharia e microbiologia [31][31]–[33].

II. METODOLOGIA

A Fig. 2 apresenta o fluxograma para a construção do projeto que se divide em quatro etapas principais.

Na etapa A, realizou-se uma pesquisa bibliográfica que contemplou publicações e banco de dados de patentes existentes, com a finalidade de conhecer tecnologias disponíveis para uma incubadora de demanda bioquímica de oxigênio.

Na etapa B foi desenhado um diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura, além da montagem dos componentes adquiridos em relação ao micro controlador no caso Arduino Uno®.

Na etapa C foi desenvolvido o software utilizado para a programação do micro controlador com o IDE (*Integrated Development Environment*) uma ferramenta livre disponível na pagina Arduino®[34]. Foi estabelecida no software a compilação mediante linguagem de programação C++ desenvolvido exclusivamente para componentes compatíveis com o micro controlador. Foi realizado uma relação entre as etapas B e C, para verificar a viabilidade técnica do sistema completo, considerado que a partir da programação no micro controlador é possível ter uma comunicação com o estado real das temperaturas.

Na etapa D foi realizada a representação em 3D com o software Autodesk Inventor® e a construção da caixa incubadora com material PS (poliestireno) e isolamento de espuma expansiva. Por fim, apresenta-se a validação do produto, com a união das etapas B, C e D.

III. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO

A. Sistema de refrigeração

Nesta parte do estudo o sistema de refrigeração é baseado pelo efeito Peltier, e com base no módulo termoeétrico TEC1-12706 foi desenvolvido um modelo computacional com o método de elementos finitos para simular os fenômenos envolvidos. A TEC1-12706 é um dispositivo econômico e de fácil manipulação. O módulo TEC1-12706 tem 127 pares do tipo P e N de dimensões 40 x 40 mm cada um, o qual alcança até uma variação de temperatura (ΔT) de 70°C. Ele foi desenhado para atingir a refrigeração e aquecimento até 100°C, e apresenta as seguintes características técnicas: voltagem, corrente e resistência de (16V), corrente (6.1A) e resistência (2.2Ω) [35].

A modelagem foi desenvolvida em COMSOL Multiphysics®, uma plataforma de simulação que engloba todas as etapas do fluxo de trabalho para modelagem e para produzir modelos precisos e confiáveis. O comportamento da temperatura é observado na Fig. 3. As condições iniciais para modelagem são: (i) Transferência de tensão nas junções do termoeétrico para um efeito Fourier; (ii) Estado estacionário; (iii) Utilizou-se Telureto de Bismuto como material.

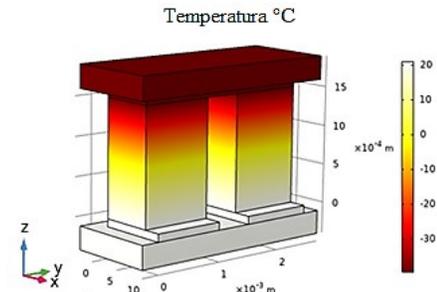


Fig. 3. Modelagem do efeito termoeétrico no COMSOL.

O modelo geométrico é uma representação de uma liga de Telureto de bismuto. Sabendo que a tensão gerada é proporcional do tipo p-n, eles são ligados em série através das junções de cobre. As dimensões do TEC 1-12706 são em unidades milimétricas sendo 0,6 mm de espessura.

Para se conhecer o calor gerado é importante saber a diferença de potencial que circula através do condutor P e N, Esse fenômeno de transferência de calor é explicado pela lei de Fourier e diferencial de temperatura gerada [12].

O fluxo de calor eliminado no lado frio é bombeado para o lado quente, o qual pode ser representado pelas seguintes equações [36]

$$\dot{Q}_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K_t (T_h - T_c) \tag{1}$$

$$\dot{Q}_h = \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R - K_t (T_h - T_c) \tag{2}$$

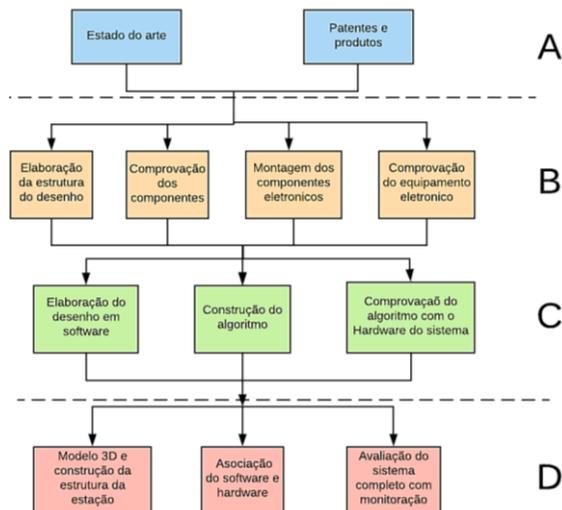


Fig. 2. Fluxograma da metodologia de execução do projeto.

Onde α é o coeficiente Seebeck (V/K), K é a condutância térmica, R é a resistência elétrica do módulo, T_h e T_c são as temperaturas no lado quente e no lado frio do módulo termoeletrico. Como elemento de apoio a transferência de calor tem-se o uso de dissipadores de calor de alumínio fixado em ambas as faces do módulo termoeletrico conforme Fig. 4.

O sistema utilizado para o resfriamento deste protótipo é composto de dois módulos termoeletricos, 4 ventiladores, dois para cada lado, dois dissipadores grandes e dois dissipadores pequenos, mostrados na Fig. 5.

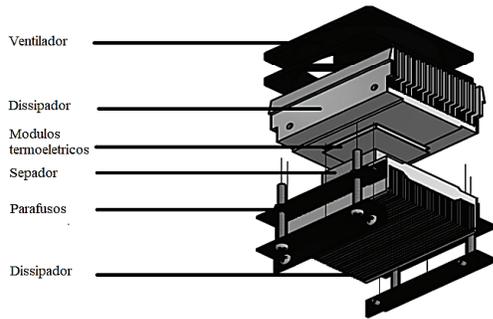


Fig. 4. Estrutura do sistema de refrigeração.

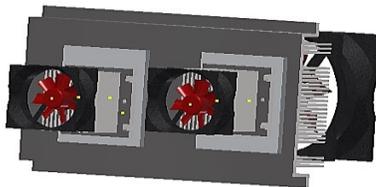


Fig. 5. Dissipadores do sistema de refrigeração.

B. Desenvolvimento de Hardware

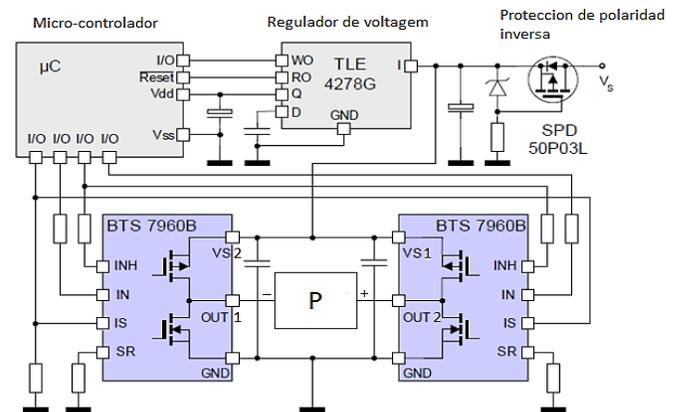
O desenvolvimento do sistema de controle foi definido para controlar altas correntes na faixa de 3 até 42 A, e para isso foi escolhido um circuito elétrico com funcionamento de ponte H. O dispositivo que foi usado é o BTS-7960, um circuito de eletrônica de potência do tipo chopper de classe E, que converte a fonte fixa de corrente contínua em uma tensão de corrente contínua variável. O chaveamento do componente usualmente é utilizado pelo método PWM [37]. A modulação por largura de pulso conhecida como PWM, é uma técnica que modifica o ciclo de trabalho de uma sinal periódica para controlar alguma quantidade de energia que é enviada a uma carga [38]. A denominação da ponte H é devido à forma das chaves e à carga que tem o circuito.

A Fig. 6 apresenta a configuração de uma ponte H simples, e seu funcionamento é chaveamento de componentes eletrônicos, usualmente utilizando o método PWM.

O BTS-7960 utilizado como controle de corrente é conectado a célula TEC 1-12706, dessa maneira o efeito Peltier fará com que se resfrie um lado e aqueça o outro lado [21]. O controle foi feito através de Arduino Uno, de acordo com o algoritmo delineado na (Fig. 9), sendo que a variação da corrente dependerá da temperatura interna da caixa.

Na Fig. 7 são apresentados o sistema elétrico, o dispositivo Arduino Uno e o sensor de temperatura DSB1820. A escolha desse sensor foi devido ao ele fornecer maior precisão no

momento de amostrar os dados. Eles estabelecem uma comunicação serial para coletar dados mediante a temperatura em graus Celsius. O controle da corrente ocorre através do BTS-7960, que funciona pelo método PWM, que por sua vez controla a pastilha TEC1-12706. Essa pastilha é a mais usada pela sua versatilidade e economia do componente. Além disso, é utilizado um LCD I2C com display de cristal líquido que é o mais comum e disponível para Arduino. É um dispositivo fácil de integrar e utilizado para obter as temperaturas internas da BDO. Finalmente com a configuração *bluetooth* é possível transmitir e receber dados através da comunicação sem fio, sendo utilizado para a criação de comunicação *wireless* para a troca de informações com a plataforma utilizada.



Ponte H de alta corrente

Fig. 6. Circuito elétrico de ponte H do dispositivo BTS 7960.

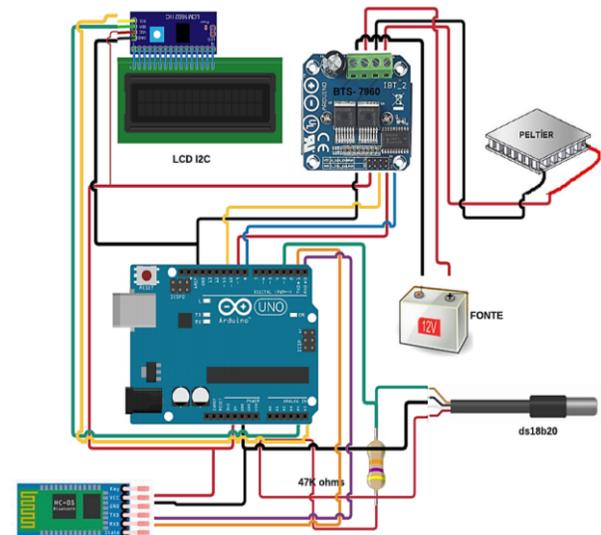


Fig. 7. Estrutura elétrica com todos os seus componentes.

C. Desenvolvimento do software

O desenvolvimento do software foi baseado na relação entre a temperatura e a corrente. O atuador deve controlar a corrente através da temperatura interna, até ele atingir a temperatura desejada. O fluxograma conforme Fig. 8 representa o funcionamento do algoritmo.

Inicialmente é solicitado introduzir a temperatura de referências no *set-point* e depois é acionado a leitura do sensor DS1820. O BTS 7960 e o LCD (tela de visualização das

temperaturas) são acionados e conseqüentemente a ponte H trabalha em ligar e desligar o fluxo de corrente que passa através de cada terminal. Caso a temperatura for maior que a temperatura do *set-point*, ele aciona a terminal 1 e desliga o terminal 2 e segue novamente a leitura do sensor de

temperatura. Se a temperatura for menor que o *set-point*, o terminal 1 desliga e o terminal 2 liga. Se ele estiver em uma faixa de temperatura próxima ele desliga e liga o terminal 1 e 2 a cada 3 segundos e após faz um loop desde o início.

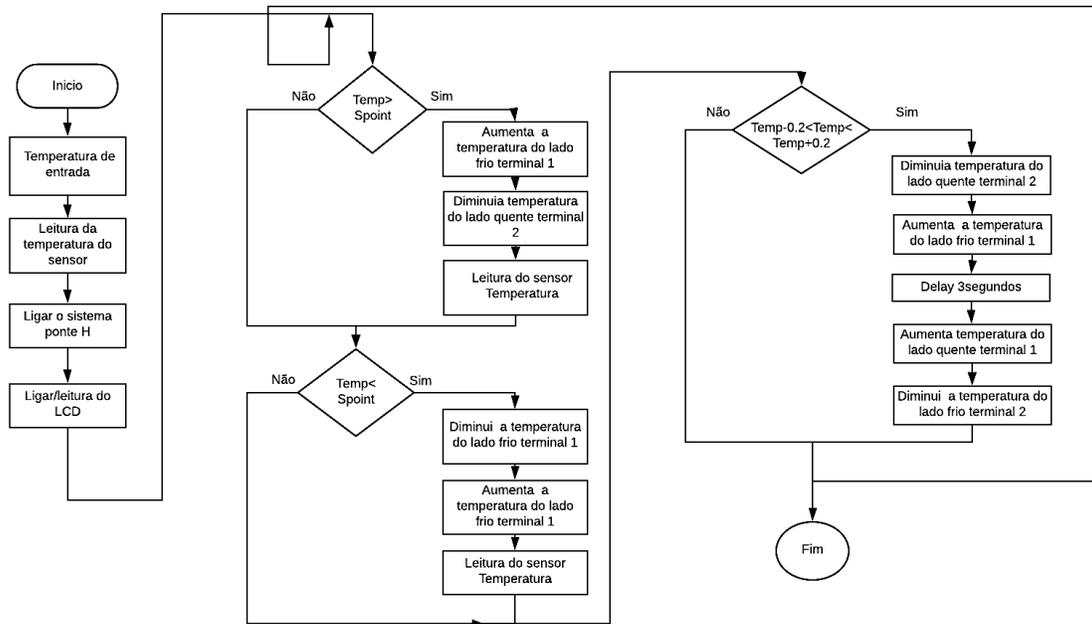


Fig. 8. Fluxograma do software.

Para o dispositivo *bluetooth*, só é preciso utilizar as bibliotecas respectivas de comunicação e leitura de temperatura. No *Smartphone* é necessário baixar o aplicativo de comunicação App Temp, uma das aplicações criadas para este projeto. A aplicação monitora as temperaturas internas da caixa e mostra a temperatura de *setpoint*. É apenas necessário ativar o *bluetooth* no telefone para ele encontrar o dispositivo HC-6, e a informação da temperatura aparecem na tela do *smartphone*, conforme pode ser visto na Fig. 9.

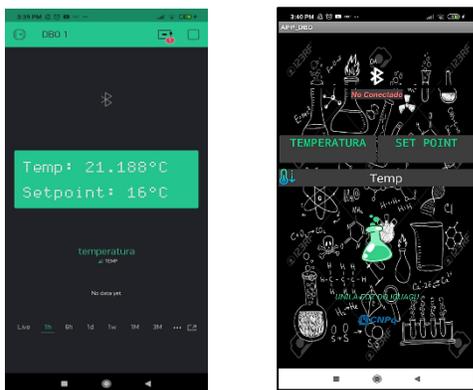


Fig. 9. Demonstrativo das telas dos aplicativos desenvolvidos.

D. Desenvolvimento Mecânico

O desenvolvimento da incubadora BOD tem uma geometria com arestas de encaixe fácil. O material selecionado foi uma chapa de poliestireno (PS) considerado um material resistente. Este tópico é subdividido em carga térmica e modelo 3D.

1) Carga térmica

Para o desenvolvimento da caixa foram consideradas as perdas de calor. A energia necessária é dada pela transmissão de calor do interior ao exterior, sendo considerados os três fenômenos mecânicos de transporte de calor: (i) Condução; (ii) Convecção e (iii) Radiação. A radiação é desprezível, já que se situa longe de qualquer fonte de radiação que possa afetar significativamente.

Nesse sentido para o estudo térmico do sistema de transmissão foi considerado três resistências térmicas: (i) Resistência térmica por condução ($R_{Totcond}$), (ii) Resistência térmica por convecção interna ($R_{convint}$), (iii) Resistência térmica por convecção externa ($R_{convext}$).

A soma das resistências térmicas em série tem como resultado a resistência térmica total do sistema ($R_{total_termico}$), representado pela equação 3:

$$R_{total_termico} = R_{tot_cond} + R_{conv_int} + R_{conv_int} \quad (3)$$

O resultado anterior pode ser expresso como coeficiente global de transferência de calor, $U \times A$ conforme a equação 4:

$$U \times A = \frac{A}{R_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{R_{Totcond}}{A_{int}} + \frac{R_{convext}}{A_{ext}} + \frac{R_{convint}}{A_{int}}\right)} \quad (4)$$

Onde U é o coeficiente global de transmissão de calor (W/km^2) e A_{int} e A_{ext} correspondem a área interna e externa da parede, respectivamente. A carga térmica que se deve superar é dado pela equação 5.

$$Q = U \times A \times (\Delta T) \quad (5)$$

Onde Q refere-se ao calor transferido entre as paredes.

2) Resistência térmica por condução

O estudo de balanço de energia na geometria quadrática trabalha em três dimensões, ou seja, foi realizado um cálculo de calor transferido em x , y e z . A relação de temperatura é composta pela temperatura interna e externa. A transferência de calor unidimensional de uma placa plana em função da coordenada x , y e z é transmitida pela direção da coordenada.

Conforme a Lei de Fourier a transferência de calor por condução das paredes é dada pela Equação 6.

$$Q = -k_{cond} A \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Onde a k_{cond} é a condutividade térmica do material, Q é a taxa de calor a través do material, A área transversal do material exposto à diferença de temperatura e $\frac{dT}{dx}$ corresponde ao gradiente de temperatura em relação a x .

Utilizando a relação de resistência térmica da difusão de calor por condução que depende de cada material utilizado temos a Equação 7:

$$R_{total_cond} = \frac{e}{k} \quad (7)$$

Onde e corresponde a espessura do material e k a condutividade térmica específica de cada material.

Considera-se estado estacionário e despreza-se o efeito bidimensional do fluxo de calor nos terminais do material. Para o cálculo do balanço energético foi utilizado um balanço de calor nas direções de x , y e z , onde as resistências de cada material são calculados para obter uma resistência condutiva total do sistema, conforme mostrado na equação 8.

$$R_{Tcondutiva} = R_{con_a} + R_{con_b} = \frac{e_a}{k_a} + \frac{e_b}{k_b} \quad (8)$$

Onde $R_{Tcondutiva}$ é a resistência total condutiva, R_{con_a} resistência do poliestireno, R_{con_b} a resistência do isopor, e_a e e_b são as espessuras do poliestireno e do isopor respectivamente, k_a condutividade térmica do poliestireno e k_b condutividade térmica do isopor.

3) Resistência térmica por convecção

A Equação 9 descreve como o fluxo de calor por convecção pela lei de Newton dada:

$$Q = -h A \Delta T \quad (9)$$

Onde Q calor transferido em wattios, h o coeficiente de convecção em W/Km^2 , A é a area e ΔT é o gradiente de temperatura.

4) Coeficiente de performance (COP)

O coeficiente de performance (COP) é um parâmetro necessário para analisar o sistema de refrigeração. O efeito de refrigeração é analisado a partir de energia consumida e a capacidade do ciclo em retirar o calor. Dessa maneira permitirá dimensionar e obter as dimensões da caixa. Assim o objetivo é a remoção do calor interno para ser refrigerado a

partir do coeficiente COP encontrado na *datasheet* do módulo termoeletrico TEC-12706. A Equação 10 refere-se ao coeficiente de performance COP.

$$COP = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia consumida}} = \frac{q_L}{w_{net}} \quad (10)$$

Sendo, q_L o calor externo e w_{net} entrada de trabalho aplicado para gerar as temperaturas.

5) Representação gráfica em 3D

A representação em 3D foi realizada com o software de apoio Autodesk Inventor®. O material (PS) tem 0,3 mm de espessura, o modelo da caixa apresenta as seguintes medidas 330x260x220 mm na parte externa e na parte interna 300x245x180 mm, sendo considerado 10,4 mm de espaço para o isolante. Na Fig. 10.a é apresentado as peças dos desenhos da caixa externa. Na Fig.10 verifica-se as 5 faces de encaixe, uma abertura na parte interior onde é colocado o sistema de refrigeração, além da monitoração na parte inferior frontal. A Fig. 10.b apresenta a construção com os encaixes das peças cortadas a laser para maior precisão.

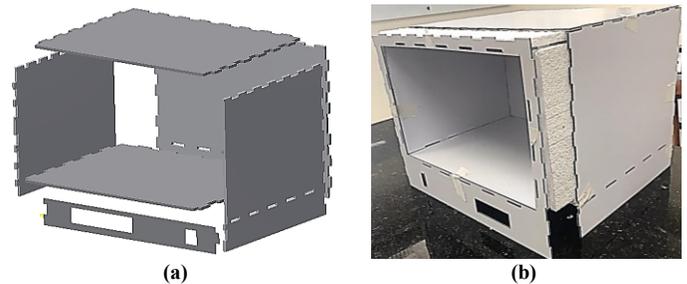


Fig. 10. Demonstrativo do (a) Projeto 3D da BOD e (b) Protipação da BOD.

No protótipo conforme a Fig.11, é utilizada uma tela LCD, para mostrar as temperaturas internas, o sensor de temperatura foi localizado no meio da caixa interna e foi adicionado um botão de ligado e desligado do sistema eletrônico. A parte elétrica fica localizada na parte inferior da caixa conectando todos os sensores e dispositivos.

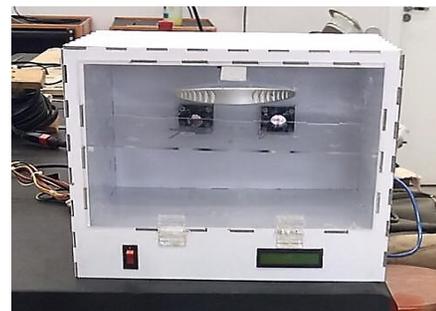


Fig. 11. Demonstrativo do protótipo final da BOD.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema desenvolvido trata-se de uma incubadora tipo BOD capaz de atingir uma temperatura mínima de 13°C de modo constante, considerando que as temperaturas podem ser controláveis.

A avaliação do protótipo foi realizada experimental em comparação a um padrão. A aquisição dos dados da incubadora BOD pode ser vista conforme Fig. 12. Destaca-se

que para o sistema atingir o seu limite de temperatura de resfriamento de 13°C o mesmo levou cerca de 70 minutos de teste permanecendo constante e estabilizado. Sendo que a temperatura ambiente se encontrava a 30°C e a BOD à vazia.

Com base na análise experimental pode-se identificar o comportamento do sistema de controle da incubadora BOD sendo seu desempenho adequado.

Destaca-se ainda que em condições laboratórias com temperatura controlada (20-24°C) a incubadora conseguirá estabilizar temperaturas menores (cerca de 3-7°C) ao valor obtido sob ensaio tendo em visto que os módulos termoeletrônicos trabalham com gradiente de temperatura e não temperatura absoluta.

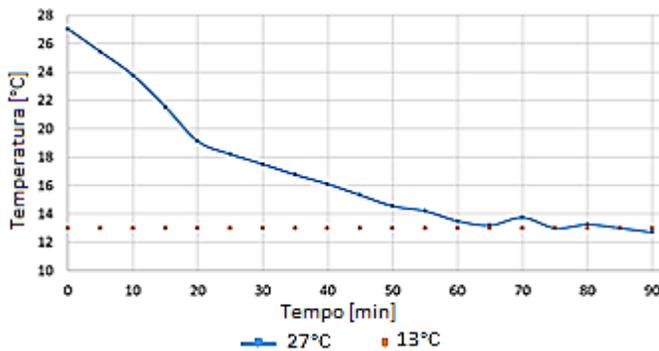


Fig. 12. Demonstrativo da temperatura mínima alcançada no interior da BOD.

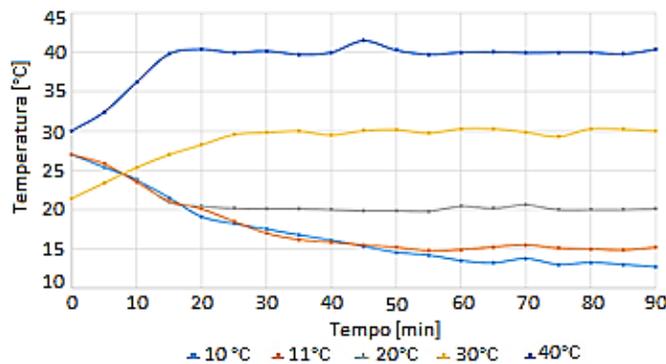


Fig. 13. Controle da temperatura interna em função do tempo.

Além disso, foi avaliado o sistema de controle, realizando-se a validação em diferentes condições de operação (temperaturas).

Na Fig. 13 apresenta-se os demonstrativos do comportamento do controle da BOD partindo da temperatura ambiente para ensaios com duração de 90 minutos com medidas a cada 5 minutos para set's de temperaturas entre 10 °C a 40 °C.

O sistema de controle realizado pelo dispositivo BTS7960 foi validado já que se conseguiu controlar temperaturas altas e baixas, proporcionando um erro aproximado de 2%, que consiste em torno de 0,2 °C. Apenas na temperatura de 10°C, não se consegue atingir, pois ocorre uma perda de energia pela transferência de calor.

Na Fig. 14 é apresentada o desempenho do sistema de controle ao estabilizar a mínima temperatura de 13 °C e o comportamento PWM do sistema.

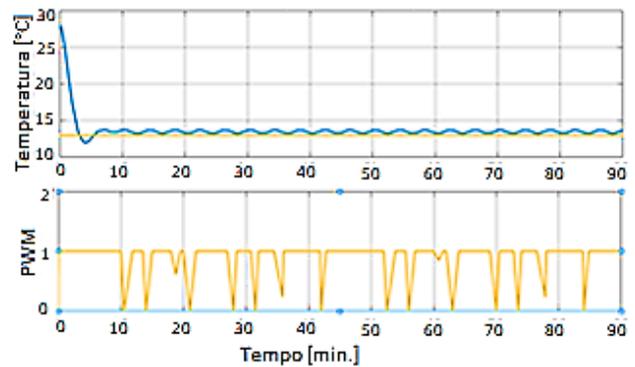


Fig. 14. Controle da temperatura e o sinal PWM em função do tempo.

A. Validação e Resultados dos Ensaio

A Fig.15 apresenta as temperaturas analíticas e experimentais em função do calor absorvido no modulo termoeletrico.

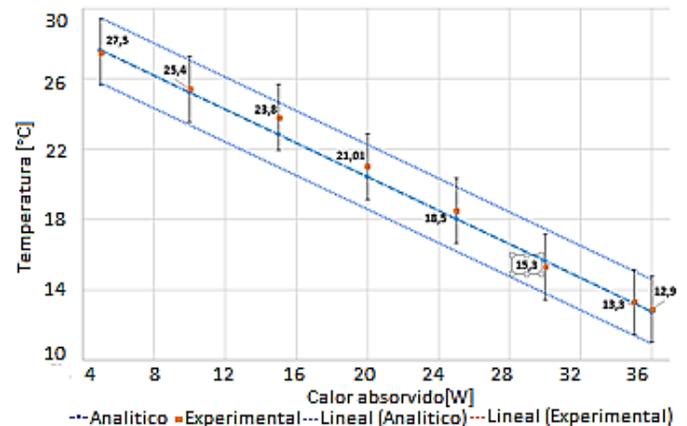


Fig. 15. Demonstrativo da temperatura mínima alcançada no interior da BOD.

Ao analisar os dados da Fig. 15 pode-se observar que a temperatura varia proporcionalmente com o calor dissipado. Quando se compara os valores com a linha de tendência dos resultados analíticos tem-se que o erro é de 2%, a linha de tendência aplicada nos dados da parte experimental mostra uma correlação com a linha de tendência analítica, $R_{\text{experimental}}=0,98$, através dos dados recoletados gênero-se uma função lineal experimental ($y = - 0,4794x + 30$), o que implica uma grande relação na parte analítica e experimental que representa uma variação máxima na medida de $\pm 1.87\%$ em função do valor de referência.

Quanto ao sistema de refrigeração e seu desempenho estima-se o coeficiente de performance (COP) do protótipo desenvolvido. Para isso, assumi-se que a área A_{total} pode ser calculada a partir da soma das áreas de cada parte interna (largura de 0,2 m e comprimento de 0,2 m) e parte externa interna (largura de 0,3 cm e comprimento de 0,3 m) obtendo assim uma área total externa de 0,3 m² e interna 0,4 m².

As constantes de condutividade térmica e espessuras da espuma expansiva e de 0,03 (kJ/mK) e a espessura de 0,01 m. Enquanto que as constantes de condutividade térmica e espessuras do poliestireno (PS) e de 0,026 (kJ/mK) e a espessura de 0,003 m. [39]. Com estes dados é possível calcular a transferência térmica global a partir da equação 4.

$$U \times A = \frac{A}{R_{total}} = \frac{0,35}{(0,32 + 0,079)} + \frac{0,42}{0,35} \quad (11)$$

$$U \times A = 2,1 \text{ W/K} \quad (12)$$

A Fig. 16 apresenta os dados do módulo termoeletrico TEC1-1276, obtidos do datasheet. No gráfico mostra o calor dissipado Q_c em função da diferença de temperatura.

Avaliando-se a corrente atingida no experimento, estabelecida em 4 amperes e a diferença de temperatura em 37 °C aproximadamente obtemos 18 W de potência dissipada. O uso de dois termoeletricos no sistema, duplica o valor da potência final em 36 W.

A temperatura mínima que a BOD alcança analiticamente é de 12,74 °C sendo que (Fig. 13) experimentalmente a temperatura chegou a 13 °C. Para estimar o rendimento do sistema na condição de temperatura mínima é necessário obter a potência consumida pela BOD. Sendo que os dois módulos termoeletricos TEC 1-12706 consomem 92,64 W, os dois Cooler (ø4 cm e 4,5 CFM) consomem 2,16 W e os dois Cooler (ø9 cm e 33 CFM) consomem 4,8 W.

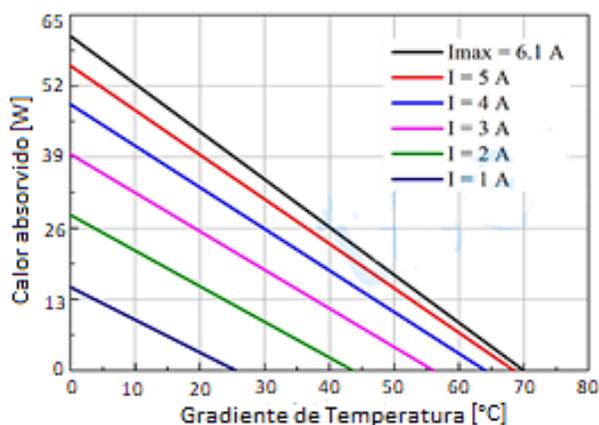


Fig. 16. Calor absorvido Q_c (W) em função do gradiente de temperatura (°C).

Portanto, a potência total consumida pela BOD é a soma dos consumos individualizados, ou seja, a P_{total} igual a 99,60 W. Com base nos dados obtidos e utilizando a equação 10 tem-se que o COP da incubadora BOD é de 0,36.

V. CONCLUSÕES

O protótipo da incubadora BOD com uso do módulo termoeletrico TEC1-12706 e um sistema de monitoração com controle via *smartphone*, apresenta resultados satisfatórios tornando-se uma ferramenta funcional no laboratório de microbiologia.

O protótipo foi validado experimentalmente obtendo curvas dinâmicas no tempo apresentando variação de temperatura após a estabilização do sistema com erro máximo de 2% e temperatura mínima de operação de 13°C e a temperatura máxima de 40 °C podendo atingir valores mais altos. O sistema de controle consegue estabilizar perfeitamente com temperaturas permanecendo constantes. Os resultados experimentais mostram que a incubadora BOD consegue atingir 13 °C com dois módulos termoeletricos. Para chegar a

temperaturas mais baixas necessita-se de melhorias, como por exemplo, trocar ou aumentar a espessura do isolante. Porém devido a sua fácil manipulação e o baixo peso comparado a madeira ou aço, a escolha do material foi adequada.

O sistema apresenta o valor da temperatura atual e a temperatura esperada na tela do LCD. A programação e o funcionamento dos diferentes dispositivos de controle e do produto com o arduino uno foram satisfatórios. O uso do módulo termoeletrico também foi vantajoso. Apesar de serem menos eficientes que os sistemas de compressão, possuem precisão no controle de temperatura, sendo simples, de fácil manipulação e baixa manutenção. Logo, conclui-se que a incubadora BOD com sistema de monitoramento trata-se de uma excelente ferramenta para uso Laboratorial para cultivo microbiológico em plataforma aberta (*Open Source*) e de baixo custo quando comparados aos sistemas comerciais.

Do ponto de vista de produto, destaca-se que a BOD desenvolvida trata-se de um sistema extremamente preciso para controle da temperatura por utilizar a tecnologia dos módulos termoeletricos para refrigeração em substituição ao sistema convencional baseado em compressores.

Adicionalmente, tem-se que como beneficio do uso desta tecnologia, o fato de não ter partes móveis ser de facil manutencao, não utilizar produtos quimicos facil de transporte, peso reduzido e ser um produto customizavel a necessidade do pesquisador tanto em volume como em condições de operação pois devido ao sistema de monitoramento e possível ter o historico das condições das amostras de fungos, vírus e bacterias como criar rampas com condições variáveis ou ciclagem termica. Estima-se que o custo da BOD foi de USD 105.00. Porém, se comparar o custo de desenvolvimento da BOD com os sistemas comerciais a venda no mercado nacional custam de R\$ 2.500,00 a mais de R\$ 30.000,00.

Logo, compreendendo que o desenvolvimento proposto pode ser uma ferramenta de trabalhado útil e viável a toda comunidade científica Brasleira e da América Latina. Os autores estão disponibilizando gratuitamente e na integra todos os documentos e materiais necessários para replicar e construir a BOD. O conteúdo está disponível para *download* no link: <https://portal.unila.edu.br/doutorado/ppgies/produtotecnologico>.

Por fim, destaca-se ainda que a presente invenção também pode ser utilizada como bancada didática para o ensino de bioengenharia e microbiologia.

REFERÊNCIAS

- [1] M. S. C. P.-M. Bento, "Building B.O.D. incubator from recycled material for use in botanic research and lectures," pp. 703–717, 2018.
- [2] C. Mallmann, M. G. Soares, and R. D. Pereira, "Sistema de refrigeração Peltier para ensino de controle de processos químicos," 2016.
- [3] Y. W. Chang, C. C. Chang, M. T. Ke, and S. L. Chen, "Thermoelectric air-cooling module for electronic devices," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 13, pp. 2731–2737, Sep. 2009.
- [4] O. Ando Junior, N. Calderon, and S. de Souza, "Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery," *Energies*, vol. 11, no. 6, pp. 1555, Jun. 2018.
- [5] C. L. Izidoro, O. H. Ando Junior, J. P. Carmo, and L. Schaeffer, "Characterization of thermoelectric generator for energy harvesting," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 106, pp. 283–290, Aug. 2017.

- [6] L. R. Kramer, A. L. O. Maran, S. S. de Souza, and O. H. Ando Junior, "Analytical and Numerical Study for the Determination of a Thermoelectric Generator's Internal Resistance," *Energies*, vol. 12, no. 16, pp. 3053, Aug. 2019.
- [7] L. B. Silverio, "Análise de um condicionado de ar automotivo utilizando o efeito termoelétrico," Universidade de Taubaté, 2012.
- [8] O. H. Ando, C. L. Izidoro, J. M. Gomes, J. H. Correia, J. P. Carmo, and L. Schaeffer, "Acquisition and Monitoring System for TEG Characterization," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 11, pp. 7, 2015.
- [9] A. L. O. Maran, N. C. Henao, E. A. Silva, L. Schaeffer, and O. H. Ando Junior, "Use of the Seebeck Effect for Energy Harvesting," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 9, pp. 4106–4114, Sep. 2016.
- [10] Fernandes, M. Borges, and Silva, "Teste da viabilidade da construção de um banho térmico de refrigeração utilizando modulo peltier," Universidade de São Paulo, 2015.
- [11] J. José and A. Giner, "Medida de parámetros termoeléctricos en un sistema constituido por dispositivos Peltier-Seebeck," pp. 6, 2015.
- [12] C. Platero, L. Castedo, M. Ferre, and Vicente, "Control clásico y moderno sobre células Peltier en un entorno didáctico," pp. 7, 2010.
- [13] H. Zou, D. M. Rowe, and S. G. K. Williams, "Peltier effect in a co-evaporated Sb₂Te₃(P)-Bi₂Te₃(N) thin film thermocouple," *Thin Solid Films*, vol. 408, no. 1–2, pp. 270–274, Apr. 2002.
- [14] Binder, "La moderna tecnología de refrigeración Peltier Resumen," pp. 1–15, 2013.
- [15] A. Sandoval, E. Espinosa, and Barahona., "Celdas Peltier: Una alternativa para sistemas de enfriamiento con base en semiconductor," p. 9, 2012.
- [16] C. B. Vining, "Semiconductors are cool," *Nature*, vol. 413, no. 6856. Nature Publishing Group, pp. 577–578, 11-Oct-2001.
- [17] G. Min and D. M. Rowe, "Ring-structured thermoelectric module," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 8, pp. 880, Jun. 2007.
- [18] G. Chen, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, J. P. Fleurial, and T. Caillat, "Recent developments in thermoelectric materials," *Int. Mater. Rev.*, vol. 48, no. 1, pp. 45–66, 2003.
- [19] S. Karabetoglu, A. Sisman, Z. Fatih Ozturk, and T. Sahin, "Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures," *Energy Convers. Manag.*, vol. 62, pp. 47–50, Oct. 2012.
- [20] A. A. Antonio Farias, A. Freitas, L. S. Machado, and Edfranklin De Souza, "Refrigeração utilizando pastilhas de efeito peltier," *HOLOS*, p. 7, 2010.
- [21] C. Rubio Ramírez, G. M. Lizarazo, and E. Vera Duarte, "Termoelectricidad: uso de las celdas peltier en el campo de la refrigeración y sus principales aplicaciones," *INVENTUM*, vol. 12, no. 22, pp. 9–16, Nov. 2017.
- [22] G. R. França, "Incubadora de plaquetas utilizando pastilhas termoelétricas Peltier," 2017.
- [23] A. G. Almeida, "Adega climatizada para vinhos utilizando a célula de peltier," 2013.
- [24] M. Eversile, "Desenvolvimento de um sistema de condicionamento de ar utilizando modulos termoelétricos.," 2015.
- [25] A. Dall'agnol, H. Zuardi, N. Kassius, K. Daniel, and M. Tatsch, "Geladeira Peltier," 2009.
- [26] C. Barbosa, "Um sistema de refrigeração baseado em water coolers e peltier para gerenciamento da temperatura de computadores desktop," *Revista Acta Kariri - Pesquisa e Desenvolvimento*, vol. 1, no. 1, pp. 7, 01-Nov-2016.
- [27] L. F. Godoy Vaca, "Diseño, construcción y evaluación energética de una cámara con celdas Peltier (efecto termoeléctrico) para refrigeración de vacunas," 2016.
- [28] Dou Hongyan Ji Xinming, "Micro incubator temperature control system and method," 26-Mar-2014.
- [29] A. Ramos Bardi, "Dispositivo para la refrigeracion de un fluido por metodos termoelétricos.," 2007.
- [30] P. B. McCain, Jesse W. Edwards, "Sistemas caloportadores mejorados para enfriar cámaras y superficies," 2014.
- [31] M. M. Pandini, A. Diogo Spacek, J. M. Neto, and O. H. Ando Junior, "Design of a Didactic Workbench of Industrial Automation Systems for Engineering Education," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 8, pp. 1384–1391, 2017.
- [32] M. A. J. Coelho, J. Mota Neto, A. Diogo Spacek, and O. H. Ando Junior, "Learning Improvement in Electronics Disciplinary using a Didactic Workbench," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 1, pp. 83–88, Jan. 2016.
- [33] L. Boaroli, A. D. Spacek, C. L. Izidoro, J. Mota Neto, E. Maestrelli, and O. H. Ando Junior, "Data Monitoring and Hardware Control for App Android by Bluetooth Communication for Laboratory Teaching in Electrical Engineering Courses," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 1, pp. 31–39, Jan. 2017.
- [34] "Arduino - Home." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Accessed: 17-Nov-2019].
- [35] L. Thermonamic Electronics(Jiangxi) Corp., "Specification of Thermoelectric Module." [Online]. Available: www.thermonamic.com.cn. [Accessed: 17-Nov-2019].
- [36] G. A. Mannella, V. La Carrubba, and V. Brucato, "Peltier cells as temperature control elements: Experimental characterization and modeling," *Appl. Therm. Eng.*, 2014.
- [37] C. Duvivier *et al.*, "Projeto de um sistema eletrônico para controle de motores de alta potencia por PWM," 2004.
- [38] J. Posada, "Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación.," in *El Hombre y la Máquina*, 2005, pp. 15.
- [39] Protolab, "Protolab - Tabela de Condutividade Térmica de Materiais de Construção." [Online]. Available: <http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>. [Accessed: 09-Apr-2020].



Shirley Carla Chamby Espejo graduada em Engenharia de Energia e Mestranda da Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGIES) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA. Atuou como bolsista de monitoria na área de circuitos elétricos e como bolsista de Iniciação Científica (PIBITI – CNPq) na área de Energy Harvesting. Atualmente se dedica a pesquisa e desenvolvimento de self-powered aplicados a sensores autônomos.



Samara Silva de Souza graduada em Engenharia Química pela Universidade do Sul de Santa Catarina. Mestrado e Doutorado em Engenharia Química, na área de desenvolvimento de processos químicos e biotecnológicos pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atua nas áreas de Biomateriais, Microbiologia, Engenharia de Tecidos e Engenharia Biomédica. Atualmente é Professora Adjunta-A do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR



Oswaldo Hideo Ando Junior graduado em Engenharia Elétrica e Especialização em Gestão Empresarial pela Universidade Luterana do Brasil - ULBRA. Mestrado e Doutorado em Engenharia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Professor do Curso de

Engenharia de Energias da Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA. Atualmente é consultor ad hoc da FFAPESC, CNPq, FAPPR, ANEEL e Editor da Revista IEEE América Latina.