

SISTEMA DE HIPOTERMIA TERAPÊUTICA MODERADA: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÕES NA HIPÓXIA ENCEFÁLICA

Bruna Helena Silva dos Santos, Henrique da Silva Ribeiro, Raphael Lopes Pinheiro

Faculdade de Tecnologia de Ribeirão Preto (FATEC-RP)

¹brunahelenasantos@gmail.com ²henriqueribeiorp@gmail.com;
³raphael.pinheiro@usp.br;

Resumo: A hipotermia terapêutica é eficaz no tratamento de condições neurológicas graves em recém-nascidos, como a encefalopatia hipóxico-isquêmica, ao reduzir o metabolismo cerebral e prevenir danos neuronais. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de hipotermia terapêutica acessível, utilizando um microcontrolador ESP32, controle PID, módulos de Peltier e sensores de temperatura. A revisão bibliográfica aborda a importância da regulação térmica e os desafios de acesso a equipamentos de resfriamento nos centros médicos. A montagem do protótipo inclui circuito com condensador, bomba, módulo Peltier e termômetro, visando a temperatura ideal para tratamento neonatal. O desempenho será avaliado por testes específicos que garantem a eficácia e segurança do equipamento.

Palavras-chave: Hipotermia Terapêutica, Hipóxia Encefálica, Tratamento, Peltier.

1. Introdução

A hipotermia terapêutica é uma técnica que envolve o resfriamento controlado do corpo, utilizada em tratamentos cirúrgicos, asfixia perinatal, traumatismo cranioencefálico, AVC e pós-parada cardiorrespiratória. Esse resfriamento pode ser sistêmico, envolvendo todo o corpo, ou seletivo, em partes específicas (Gasparini, 2020). Segundo Varon e Acosta (2008), a hipotermia terapêutica é eficaz e tem sido empregada desde os anos 1950, ganhando reconhecimento como neuroprotetora no início do século XXI.

Esse método tem se mostrado eficaz no tratamento da hipóxia encefálica em recém-nascidos, ao reduzir o metabolismo cerebral, a produção de radicais livres e inibir a apoptose neuronal, minimizando o edema e a extensão de lesões cerebrais (Papazian, 2018).

Apesar de existirem técnicas de resfriamento invasivas e não invasivas, o acesso a dispositivos de hipotermia de qualidade e custo acessível ainda é limitado em várias

regiões. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de um equipamento de hipotermia terapêutica acessível para recém-nascido, incluindo o levantamento teórico, compreensão do funcionamento deste e verificar se protótipo é viável e de baixo custo.

2. Revisão bibliográfica

A regulação térmica é crucial para a sobrevivência e estabilidade dos recém-nascidos (RN). De acordo com o Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), a temperatura corporal é determinada pelo equilíbrio entre a produção, manutenção e dissipação de calor, essenciais para a homeostase. Nos prematuros, esse equilíbrio pode ser comprometido, resultando em aumento das perdas de calor e redução na produção térmica. Isso ocorre devido às peculiaridades fisiológicas dos RN.

Quando a perda de calor excede a capacidade de produção, a temperatura corporal do RN cai abaixo da faixa normal (36,5 a 37°C), levando à hipotermia. A Organização Mundial da Saúde (1997) classifica a hipotermia conforme sua gravidade:

- Hipotermia leve: temperatura entre 36,0 e 36,4°C.
- Hipotermia moderada: temperatura entre 32,0 e 35,9°C.
- Hipotermia grave: temperatura abaixo de 32,0°C.

Porém para RN com asfixia perinatal, a hipotermia terapêutica (HT) é uma opção eficaz para prevenir sequelas neurológicas. A encefalopatia hipóxico-isquêmica (EHI), resultado de eventos hipóxicos-isquêmicos, afeta 1 a 8 em cada 1000 nascidos vivos em países desenvolvidos e até 26 em países em desenvolvimento (Tassinari, 2020). A EHI ocorre em duas fases: a fase primária, com falha energética nas células devido à falta de oxigênio, seguida pela fase secundária, que causa danos irreversíveis no sistema nervoso central após um período de latência (Silveira e Procianny, 2015).

Essa condição afeta até 8% dos RN, com sérios impactos neurológicos, como deficiência cognitiva e paralisia cerebral (Douglas-Escobar; Weiss, 2012; Yildiz et al., 2017). Globalmente, a EHI é responsável por 6% a 9% das mortes neonatais, com altas taxas de mortalidade e complicações neuropsicológicas nos sobreviventes (Boylan et al., 2020; Mcquilen; Ferriero, 2006).

A HT, considerada o único tratamento neuroprotetor para EHI, deve ser iniciada nas primeiras seis horas de vida e mantida por até 72 horas para reduzir o metabolismo cerebral, a acumulação de aminoácidos citotóxicos e radicais livres, prevenindo danos cerebrais (Mota, Miranda e Graf, 2020).

Existem diferentes técnicas de resfriamento, tanto invasivas quanto não invasivas.

As abordagens não invasivas, como cobertores de ar e colchões de água, são mais simples e de baixo custo, mas mais lentas, o que aumenta o risco de complicações. Métodos invasivos, como dispositivos intravasculares, permitem resfriamento mais rápido (Gasparini, 2020).

Apesar das opções de resfriamento, muitos centros médicos enfrentam desafios devido à falta de dispositivos acessíveis e de alta qualidade, além da necessidade de mais pesquisa e treinamento especializado para melhorar os resultados clínicos (Dumont et al., 2024). O desenvolvimento de sistemas que induzam rapidamente a hipotermia, mantenham a temperatura estável e permitam o reaquecimento controlado é essencial para um tratamento eficaz (Gasparini, 2020).

A HT modula processos inflamatórios, reduz a excitotoxicidade, previne a morte celular, mitiga o estresse oxidativo e preserva a barreira hematoencefálica, sendo fundamental para a proteção cerebral em recém-nascidos com EHI (Almeida; Pavione et al., 2023).

No mercado atual, os seguintes fornecedores disponibilizam equipamentos para a realização do tratamento por meio de hipotermia terapêutica, conforme demonstrado no quadro. Esses equipamentos variam em termos de potência, faixa de temperatura e métodos de aplicação, atendendo a diferentes necessidades clínicas para a indução de hipotermia terapêutica. As relações desses equipamentos podem ser verificadas na figura 1.

Fabricante	Equipamento	Potência	Tipo de aplicação	Modo	Faixa de temperatura
Medivance, Inc	Artic Sun 5000	750W	Pads de gel Não-invasivo	Adulto e pediátrico	4 a 42°C
Belmont Medical Technologies	CritiCool	350W	Vestimenta flexível (CureWrap) - Não-invasivo	Adulto e pediátrico	5 a 40°C
Gentherm	Blanketrol III	800W	Cobertor Não-invasivo	Adulto e pediátrico	4 a 42 °C
Life Recovery System	ThermoSuit	750W	Imersão em água Não-invasivo	Adulto	10 a 40°C
BrainChill	BrainCool	ND	Pads com BC Cool (líquido de refrigeração biológicos e atóxico) Não-invasivo	Adulto	33 a 38,5
BrainChill	Rhinochill	ND	Intra-nasal Invasivo	Adulto	Redução de 2,6°C na temperatura cerebral e de 1,6°C na temperatura central
Zoll	Thermogard XP	575W	Cateter intra-venoso Invasivo	ND	0 a 42 °C

Figura 1 - Equipamentos disponíveis. Autores (2024)

3. Métodos e Materiais

3.1 Visão geral do Projeto

Com base no diagrama apresentado (Figura 2), os componentes que comporão o equipamento estão detalhados.

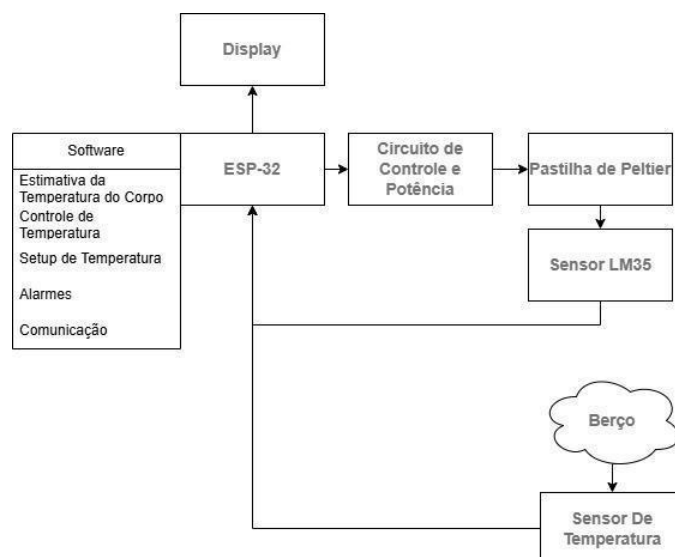


Figura 2 – Diagrama. Autores (2024)

3.2 Componentes

Display:

Conectado ao ESP-32 este componente permite ao usuário visualizar informações sobre a temperatura e ajustar o set-point (ponto de ajuste) da temperatura desejada. Ele facilita a interface com o sistema, mostrando dados em tempo real e recebendo comandos.

ESP-32:

O ESP32 foi escolhido como unidade central do sistema devido à sua capacidade de gerenciar múltiplas entradas e saídas, além do suporte a Bluetooth e Wi-Fi, facilitando a integração com outros dispositivos e o envio de dados, como o monitoramento remoto de temperatura e o ajuste do set-point.

- Controlador central: gerencia a comunicação com todos os componentes.
- Funções do software incluído:
 - Estimativa da Temperatura Corporal: Analisa os sensores para determinar a temperatura do recém-nascido.
 - Configuração de Temperatura: Permite ajustar o setpoint diretamente pelo display.

- Alarmes: Dispara alertas caso a temperatura ultrapasse os limites de segurança.
- Comunicação: Conexão com dispositivos via Bluetooth ou Wi-Fi para monitoramento e ajustes remotos.

Circuito de Controle e Potência:

Controla a energia fornecida à pastilha de Peltier, garantindo que ela opere de forma segura e eficiente. Este circuito regula a potência para aquecer ou resfriar, de acordo com as instruções do ESP-32 e o feedback dos sensores de temperatura.

Pastilha de Peltier

A pastilha de Peltier é um dispositivo termoeletrônico que realiza aquecimento ou resfriamento conforme necessário, ajustando a temperatura de acordo com os comandos do ESP-32. A escolha dessa tecnologia se deu por sua rápida resposta a mudanças de temperatura e eficiência em criar um gradiente térmico, essencial para manter o ambiente controlado. A potência foi estimada considerando o equilíbrio entre a capacidade de resfriamento para atingir as temperaturas desejadas e a energia disponível no sistema, possibilitando um controle eficaz em intervalos críticos para a hipotermia terapêutica.

Segundo a ASHRAE®, citada por Gasparini (2020), o metabolismo basal de um adulto em repouso gera cerca de 100 W de calor. Em termos de área, 1 m² equivale a 58,15 W/m² de superfície da pele. Considerando que o sistema é voltado para recém-nascidos e comparando potências de equipamentos disponíveis, optou-se pelo uso de um conjunto de 4 placas de Peltier, totalizando uma potência de 288 W, apropriada para o alcance de temperaturas terapêuticas.

Sensor LM35:

Responsável por medir a temperatura ambiente próxima à pastilha de Peltier. Fornece leituras de alta precisão ao **ESP-32**, ajudando no controle térmico para que a pastilha de Peltier ajuste a temperatura de forma adequada.

O sistema, como um todo, permite um controle automático da temperatura, com feedback constante dos sensores para ajustar o funcionamento da pastilha de Peltier e manter a temperatura desejada, essencial para o tratamento de hipotermia em recém-nascidos.

4. Desenvolvimento

Foi montada a placa a partir da ferramenta de simulação e Design Proteus, e a partir

disso foi realizada a elaboração e aquisição da lista de compras de itens necessários para construção do equipamento.

4.1 Simulação

No primeiro passo, montou-se um circuito de simulação para validar o conceito e o código do sistema, utilizando os componentes descritos anteriormente. A simulação permitiu verificar o controle de temperatura, com os sensores alertando quando a temperatura ultrapassava o nível ideal definido para o tratamento. O código foi programado para acionar todo o sistema a partir do microcontrolador ESP32, que funciona como o "cérebro" do sistema. A energia é regulada por controladores de tensão, garantindo que a corrente ideal seja enviada ao sistema.

O fluxo do sistema envolve a ativação da bomba, que circula a água, empurrando-a pelo circuito até chegar ao módulo de Peltier. Esse módulo reduz a temperatura da água, que, ao circular pelo sistema, entra em contato com um colchão onde o recém-nascido estará, garantindo a manutenção da temperatura adequada para o tratamento. Na figura 3 é possível visualizar o sistema.

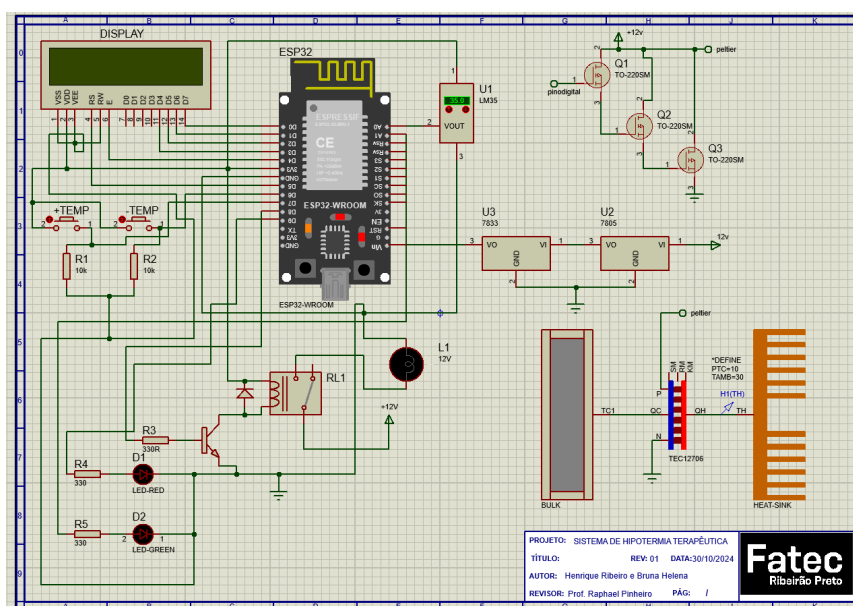


Figura 3 - Simulação. Autores (2024)

4.2 Captura do Esquemático

O esquemático foi dividido em microcontrolador, reguladores, controle bomba, controle peltier e as conexões.

4.2.1 – Reguladores de Tensão

Os reguladores controlam e garantem que a energia no circuito seja segura e

eficiente, ajustando a potência de aquecimento e resfriamento conforme as instruções do microcontrolador. Na figura 4 é apresentado o sistema de reguladores.

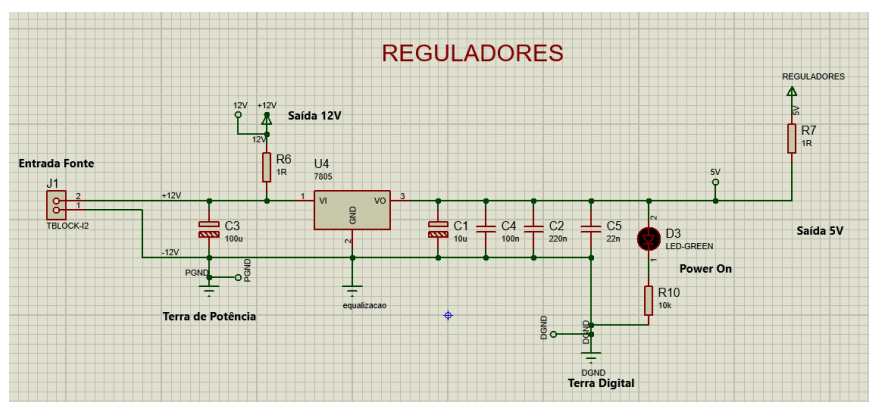


Figura 4 – Reguladores. Autores (2024)

4.2.2 – Microcontrolador

O microcontrolador executará os comandos programados para controlar a bomba, assegurando o funcionamento ideal para o tratamento. A figura 5 apresenta o microcontrolador e seus pinos já definidos.

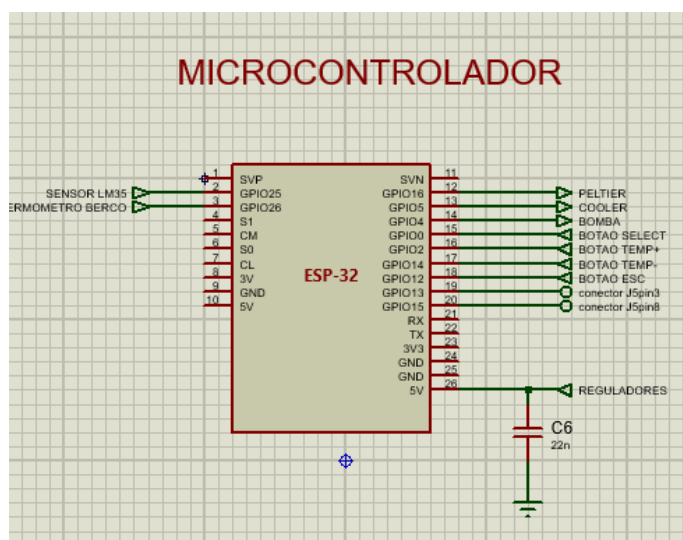


Figura 5 – Microcontrolador. Autores (2024)

4.2.3 – Controle da Bomba d'Água

O controle da bomba é responsável por circular a água pelo circuito, direcionando-a ao módulo Peltier e retornando-a resfriada ao sistema. Esse controle é apresentado na figura 6 a seguir;

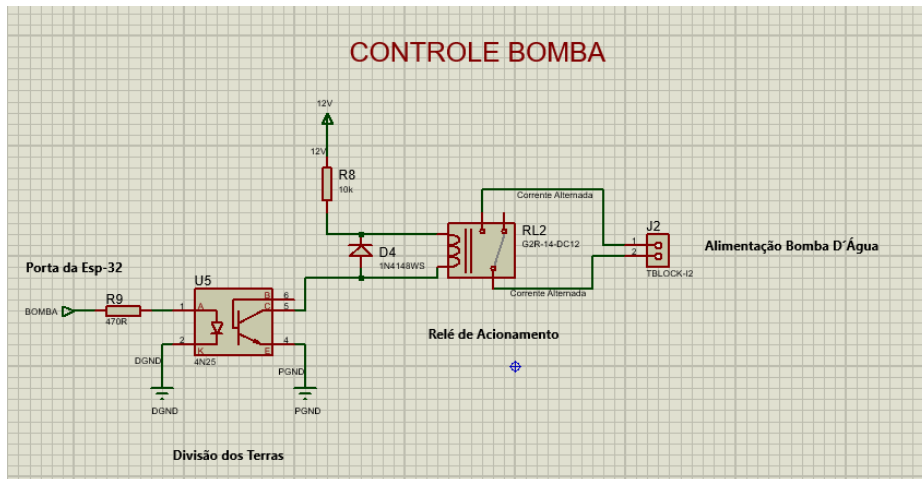


Figura 6 – Controle bomba. Autores (2024)

4.2.4 – Controle do Peltier

O peltier tem a função de resfriar a água que é circulada no sistema, deixando-a na temperatura ideal para realizar o tratamento. No circuito visualizado na figura 7 é possível verificar os componentes que são utilizados.

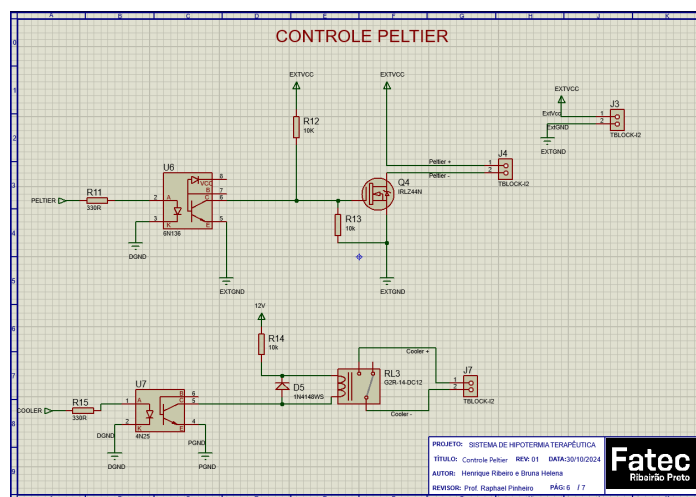


Figura 7 – Controle peltier. Autores (2024)

4.3 Design da PCB

O ARES (Advanced Routing and Editing Software) é o módulo do Proteus voltado para o design de PCB (placa de circuito impresso). Ele permite converter o esquemático capturado em um layout físico, definindo a disposição dos componentes e as trilhas que os conectam na

placa. A figura 8 mostra a placa projetada.

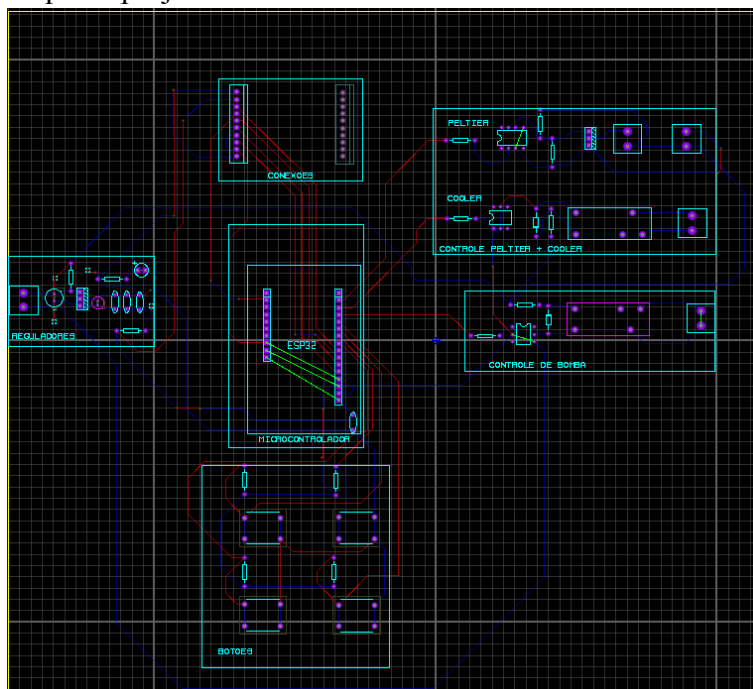


Figura 8 – PCB. Autores (2024)

4.3.1 Visualização 3D da PCB

A visualização 3D no design de PCB é uma funcionalidade oferecida por alguns softwares, como o ARES no Proteus, permitindo ver uma representação tridimensional da placa antes de sua fabricação. Ao final, o design da PCB visualizado na figura 9 pode ser exportado para arquivos Gerber, utilizados na fabricação industrial da placa.

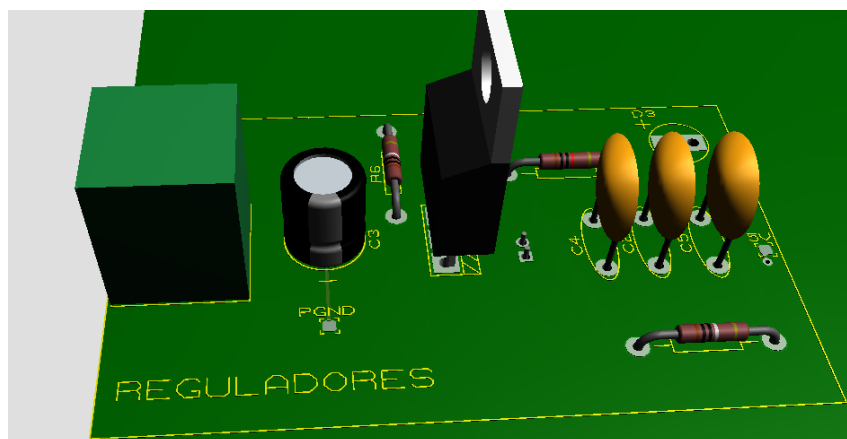


Figura 9 – PCB 3D. Autores (2024)

4.4 Montagem do Protótipo

Para montar o circuito, utilizamos um condensador de ar condicionado para gerar o resfriamento da água. uma bomba esguicho de para-brisa de 12 V, uma fonte de alimentação chaveada e um refrigerador de Peltier. O sistema foi monitorado, registrando

uma temperatura ambiente inicial de 33,3°C. Após 2 minutos e 41 segundos de funcionamento, atingiu a temperatura mínima de 26,1°C, mantendo-se nesse valor por 1 minuto e 3 segundos. Em seguida, a temperatura subiu gradualmente até estabilizar em 27,7°C, sem apresentar variações, durante um período de 5 minutos. Na figura 10 a seguir pode visualizar o sistema anterior descrito.

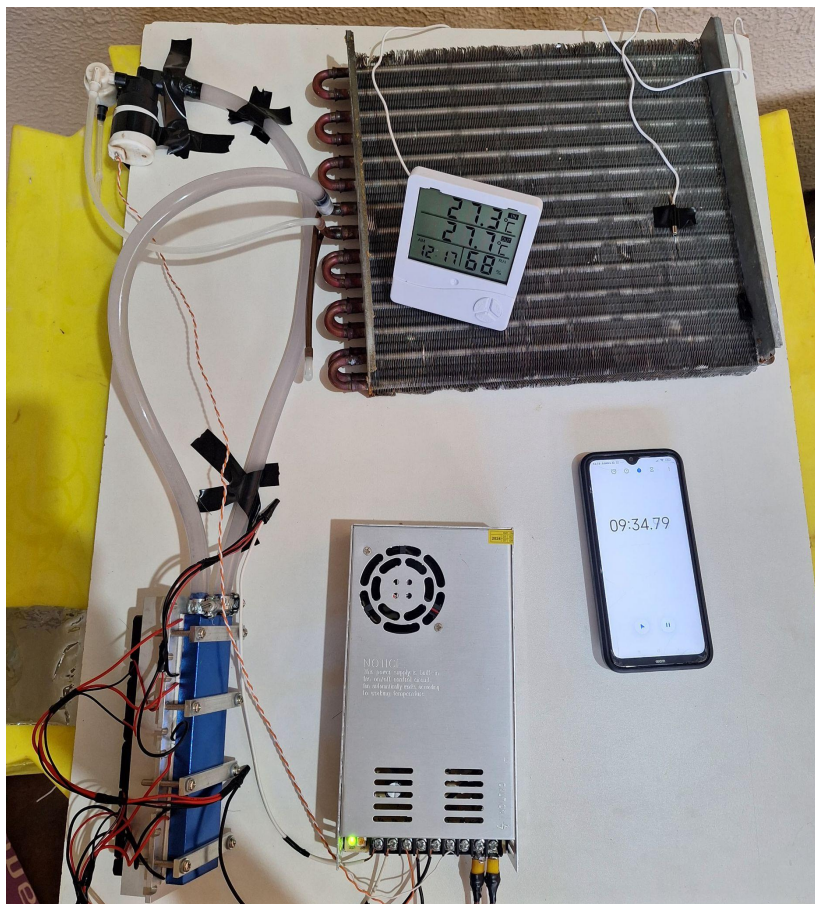


Figura 10 – Circuito de resfriamento. Autores (2024)

4.5 Diagrama Simplificado do Código

O código foi desenvolvido para controlar os módulos de Peltier responsáveis pelo resfriamento e monitorar a temperatura, assegurando que ela se mantenha dentro do intervalo ideal para o tratamento. A figura 13 a seguir mostra o diagrama do código com as informações de como funciona.

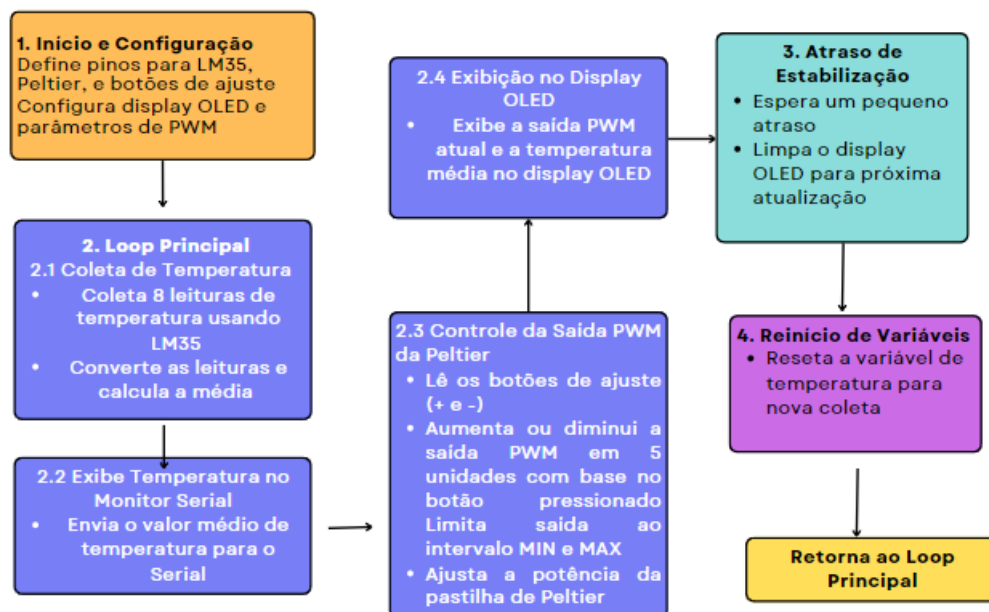


Figura 13 – Diagrama do Código. Autores (2024)

5. Propostas Futuras

Serão realizados os seguintes testes no sistema de controle de temperatura para comprovar sua eficácia:

Hump Up: medição do tempo necessário para o sistema atingir a temperatura alvo, avaliando a rapidez de resposta.

Estabilidade: monitoramento prolongado para verificar se a temperatura se mantém estável, sem flutuações significativas.

Transiente: avaliação do tempo de estabilização do sistema após uma alteração de temperatura, observando sua resposta a mudanças abruptas.

Uniformidade: verificação da distribuição uniforme da temperatura no equipamento, garantindo a consistência térmica.

Esses testes fornecerão dados essenciais para avaliar o desempenho do sistema e identificar áreas para otimização, visando aprimorar a eficiência e confiabilidade do tratamento terapêutico.

6. Conclusão

- É possível desenvolver um equipamento de hipotermia terapêutica acessível, demonstrando a viabilidade de um protótipo de baixo custo.
- O levantamento teórico confirma os benefícios da hipotermia terapêutica, reforçando sua eficácia para neonatos com encefalopatia hipóxico-isquêmica.

- A técnica contribui para a redução de danos neurológicos e melhora os prognósticos de saúde dos recém-nascidos tratados.

7. Referências

- Brasil. Ministério da Saúde. Além da sobrevivência: práticas integradas à atenção ao parto, benéficas para a nutrição e a saúde de mães e crianças. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. 50p.
- Dumont, Fani Elesbão et al. Estratégias Neuroprotetoras em Neonatos Pré-termo internados em uma Unidade de Terapia Intensiva Neonatal: uma Revisão Integrativa. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, v. 6, n.7, p. 1164-1178, 2024.
- Gasparini, R. T. Desenvolvimento de um sistema de indução e manutenção de hipotermia terapêutica moderada para o tratamento de traumatismo cranioencefálico. 2020.
- Mcquillen P. S.; Ferreiro, D. M. Perinatal Subplate Neuron Injury: Implications for Cortical Development and Plasticity. *Brain Pathology*, v. 15, n. 3, p. 250–260, 5 abr. 2006.
- Papazian, O. (2018). Encefalopatia Hipóxica-Isquêmica Neonatal. *MEDICINA (Buenos Aires)*, 78(supl.2), 36-41.
- Pereira, W. R. C. Avaliação da repercussão da hipotermia terapêutica passiva nos aspectos cardiopulmonares e neurológicos em pacientes com asfixia neonatal. 2021.
- Quinellato, E. Manutenção da Temperatura Corporal de Recém-Nascidos na Unidade de Terapia Intensiva Neonatal, 2014.
- Silveira, RC & Procionay, RS. Hypothermia therapy for newborns with hypoxic ischemic encephalopathy. *Jornal de Pediatria (Rio de J)*. 2015; 91 S78-83.
- Silva, Jeciel Cicero da. Avaliação das Condições das Incubadoras da Maternidade Escola Januário Cicco, 2022.
- Tassinari, Isadora D'Ávila. Administração de Lactato Como Agente Neuroprotetor em Ratos Neonatos Ao Modelo De Hipóxia-Isquemia Encefálica, 2020.