

Controle de temperatura utilizando teto radiante

Guilherme Barros Castro

Jonas Lucchesi

Orientador: Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto

Escola Politécnica

Universidade de São Paulo

Novembro 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Castro, Guilherme Barros
Controle de temperatura utilizando teto radiante /
G.B.Castro,
J. Lucchesi. -- São Paulo, 2012.
55 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1. Temperatura (Controle) 2. Transferência de calor 3.
Termo-
eletricidade I. Lucchesi, Jonas II. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e
de Sistemas Mecânicos III. t.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos colegas Gustavo Coelho, Pedro Costa e Yuji Sasaki pelo suporte dado e ao orientador deste trabalho, professor doutor Marcos Barretto, pelos conselhos e excelente orientação durante todo o período de trabalho.

Resumo

O objetivo do trabalho é desenvolver um dispositivo de controle de temperatura de ambientes que tenha a capacidade tanto de aquecer quanto de resfriar o ambiente através do efeito termoeletrico.

A transferencia de calor, realizada pelo efeito termoeletrico de pastilhas de Peltier, aquecera ou resfriara agua. Assim, o efeito do teto radiante sera gerado a partir da troca de calor entre o ambiente e tubos, atraves dos quais escoara a agua. A capilaridade dos tubos acima do teto garantira uma troca de calor distribuıda com o ambiente.

Palavras chave: Teto Radiante, Controle de Temperatura, Efeito Peltier.

Abstract

The objective of this work is to develop a device of temperature control for indoor environments that has the capability of both heating and cooling them through the thermoelectric effect.

The heat transfer, realized by the thermoelectric effect from Peltier modules, will heat or cool water. Thereby, the radiant ceiling effect will be generated by the heat transfer between environment and tubes, whereby the water will flow. The capilarity of the tubes above the ceiling will ensure a well distributed hear transfer.

Keywords: Radiant Ceiling, Temperature Control, Peltier Effect.

Sumário

Resumo	ii
Abstract	iii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Requisitos	2
2 Solução Proposta	4
2.1 Descrição da Arquitetura	5
3 Fundamentação Teórica	7
3.1 Sensor de Temperatura	7
3.2 Efeito Peltier	9
3.3 Modelo Transferência de Calor	11
4 Modelagem e Controle	13
4.1 Definição do Modelo	13
4.2 Módulo de Controle	15
5 Simulação e Análise	19
5.1 Caso 1	20
5.2 Caso 2	21
6 Prototipagem	23
6.1 Partes Eletrônicas	23
6.1.1 PIC - PWM	24
6.1.2 Display e interação com o usuário	24

6.1.3	Ponte H	24
6.1.4	Comunicação por infravermelho	25
6.2	Protótipo	27
7	Testes	33
7.1	Teste inicial	33
7.2	Testes para seleção do dissipador	33
7.2.1	Primeiro teste dos dissipadores	34
7.2.2	Segundo teste dos dissipadores	34
7.2.3	Terceiro teste dos dissipadores	35
7.3	Teste final: controle em malha fechada	36
8	Conclusão	39
	Referências bibliográficas	42
A	Projeto de <i>hardware</i>	43
A.1	Circuito de controle	43
A.2	Circuito de potência	44
A.3	Código da comunicação por infra-vermelho	44
B	Desenho de Conjunto	46

Lista de Figuras

2.1	Vista ortogonal do projeto proposto	6
3.1	Sensor LM35 em sua Configuração Básica [8]	8
3.2	LM35: Configuração Full-Range [8]	8
3.3	LM35: Resposta Térmica [8]	9
3.4	Representação de um Módulo de Efeito Peltier [10]	10
3.5	TEC-12175 [10]	11
3.6	Esquema construtivo do sistema	12
4.1	Esquema construtivo do sistema	14
4.2	Diagrama: controle por PID	17
4.3	Diagrama: controle por LQR	17
4.4	Diagrama: controle por LQR com observador de estados	18
5.1	Temperatura ambiente	20
5.2	Corrente em cada pastilha de Peltier	21
5.3	Temperatura externa	21
5.4	Temperatura ambiente	22
5.5	Corrente em cada pastilha de Peltier	22
6.1	Diagrama de blocos	26
6.2	vista isométrica do reservatório	29
6.3	vista isométrica explodida do protótipo	30
6.4	Detalhe da interface humano-máquina e do microcontrolador	31
6.5	Volume fechado (caixa de isopor) a ser climatizado	31
6.6	Detalhe do sensoreamento distribuído na caixa	31
6.7	Circuitos de controle e de potência sobre a tampa da caixa fechada	32

6.8	Reservatório de água e tubos	32
7.1	Teste aletas - 1,5 A	34
7.2	Teste aletas - 4,5 A	35
7.3	Teste aletas - 6,5 A	35
7.4	Teste final	36
A.1	Projeto do circuito de controle	43
A.2	Projeto do circuito de potência	44

Lista de Tabelas

2.1	Matriz de decisão	5
4.1	Parâmetros utilizados	15
5.1	TEC 12175: Características	19

1. Introdução

O desconforto causado por altas ou baixas temperaturas prejudica o desempenho de atividades rotineiras essenciais como trabalhar e dormir. Em muitos lugares o uso de um equipamento capaz de resfriar ou aquecer o ambiente é indispensável. Além disso, há ambientes que possuem equipamentos capazes unicamente ou de aumentar ou de diminuir a temperatura, ou até que possuem dois equipamentos distintos, um para cada finalidade. Os sistemas mais baratos e populares no mercado são mal dimensionados para o ambiente em que devem atuar e possuem, portanto, um alto gasto de energia elétrica. Muitos dos sistemas disponíveis têm ainda efeitos indesejados, como o ressecamento do ar e a geração de ruídos. O passar do tempo agrava ainda mais o consumo energético e a geração de ruídos em tais sistemas, pois, por possuírem partes móveis, seu desgaste é acelerado. Além disso, alguns ambientes não comportam a instalação de equipamentos mais usuais como ar condicionado. Nesse contexto se insere a solução proposta, como uma opção alternativa no controle de temperatura em ambientes fechados.

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho é desenvolver um dispositivo de controle de temperatura de ambientes internos através do efeito termoeletrônico, com a finalidade de minimizar efeitos secundários e permitir tanto o resfriamento quanto o aquecimento. Para tal, será utilizado um sistema modular baseado no princípio da superfície radiante.

Após o desenvolvimento teórico de um modelo, do projeto do controle e da sua simulação e análise, será feito um protótipo para que seja validado o modelo teórico e analisados os resultados práticos e a viabilidade do dispositivo.

1.2 Requisitos

Após diversas discussões entre os membros do grupo, definiu-se uma lista de requisitos que atendem aos diversos aspectos formais do projeto, sendo eles:

- *A solução deve ser capaz tanto de resfriar quanto aquecer o ambiente.* O mesmo dispositivo deve ser capaz de atuar de ambas as formas, de acordo com a temperatura definida pelo usuário.

- *Permitir a seleção da Temperatura Desejada.* O controle do dispositivo deve atuar de forma a buscar aproximar a temperatura do ambiente à definida pelo usuário.

- *Controle implementável em um microprocessador simples.* Por razões de custo de fabricação, o controle deve ser implementável em um microprocessador PIC da família 16. A escolha desse circuito integrado como referência deve-se a disponibilidade prévia do mesmo, bem como experiências anteriores baseadas nele.

- *O dispositivo deve ser capaz de resfriar ou aquecer 10°C o ambiente, sendo a temperatura mínima alcançável de 22°C e a máxima de 28°C .* Tais valores foram arbitrados a partir de temperaturas confortáveis a uma pessoa.

- *Alcançar a temperatura definida em até duas horas.* O tempo de acomodação do sistema deve ser inferior ao definido, estando ele sob as condições de temperatura definidas no item anterior e considerando perdas de calor da ordem de 10% do calor total trocado.

Além dos já citados, diversos aspectos auxiliares foram levantados de modo a explicitar algumas características desejáveis no sistema. Tais aspectos não foram incluídos entre os requisitos formais para não limitar demasiadamente a concepção da solução.

- *Módulo Individual e Compacto.* A solução deve se caracterizar por unidades independentes. Entende-se por “compacto” um módulo com uma área superficial inferior a 2 m^2 .

- *Não necessitar de instalações na etapa construtiva do ambiente.* Diversas soluções requerem que medidas sejam tomadas na fase de construção do ambiente em que atua o sistema de refrigeração ou aquecimento. A solução escolhida deve permanecer adotável mesmo após a fase de acabamento.

- *Temperatura deve estar distribuída de modo a não gerar desconforto.* Evitando problemas recor-

rentes de conforto térmico causados por grandes variações de temperaturas espacialmente, define-se que a variação no ambiente não deve ser superior a 3°C .

- *Produto final com custo de fabricação inferior a R\$500,00/unidade.* Visando desenvolver um dispositivo competitivo, é importante buscar limitar o custo de fabricação do mesmo, tendo o valor sido arbitrado a partir dos produtos disponíveis no mercado para controle de temperatura.

2. Solução Proposta

Apesar da seção 2.1 descrever em detalhes a solução proposta, é necessário previamente definir algumas características desse sistema. O dispositivo consiste de tubulações escoando água a uma temperatura determinada por um controlador. Tais tubulações trocam calor com uma superfície do ambiente, podendo ser o teto, o piso ou mesmo as paredes. Aplicações que utilizam sistemas de aquecimento ou resfriamento similares a esse são chamados de piso ou teto radiantes. Diversas opções construtivas foram analisadas, tendo elas o posicionamento como a principal variante.

As alternativas consideradas foram posicionar o sistema no piso, no teto, nas paredes e, por fim, posicionar os atuadores térmicos diretamente em contato com o ar (sem o uso de um fluido intermediando o atuador termoeletrônico e o ambiente). Os critérios em que se basearam a análise foram:

- *Conforto*: Esse critério compreende os fatores homogeneidade da temperatura, ruído, possibilidade de circulação de ar no ambiente e influência na umidade do ar;
- *Instalação*: Considera a facilidade de realizar a instalação dos painéis propostos e eventuais problemas gerados por ela;
- *Manutenção*: Avaliação da dificuldade de se realizar manutenção;
- *Ampla Utilização*: Adaptabilidade da solução ao ser utilizada em diferentes ambientes e situações;
- *Custo*: Análise qualitativa do custo de aquisição e manutenção do dispositivo.

As alternativas foram ponderadas qualitativamente de acordo com cada critério através de uma escala de 1 a 5. A seguinte matriz de decisão representa a análise de tais opções:

Quanto ao conforto, a utilização de uma superfície radiante (SR) no piso recebeu maior ponderação comparada com posicioná-la no teto. Tal fato se deu porque usuários de piso radiante trocam

Critérios	Peso do critério	SR no piso	SR no teto	SR nas paredes	Fonte de calor
Conforto	4	4	3	2	2
Instalação	3	2	4	3	2
Manutenção	2	1	3	3	5
Ampla utilização	2	2	3	3	3
Custo	3	1	3	3	2
Resultados		2,21	3,21	2,71	2,57

Tabela 2.1: Matriz de decisão

calor com a superfície de forma direta - através dos pés-, o que constitui um grande fator de conforto. A vantagem de posicionar no teto em relação às demais alternativas foi referente à convecção natural durante o resfriamento, o que aumenta a homogeneidade da temperatura do ambiente.

Outro fator notório foi a ponderação consideravelmente menor de utilizar um piso radiante nos critérios de instalação, manutenção e custo. Isso ocorre porque o uso de um piso radiante requer um planejamento estrutural diferenciado do piso, que inevitavelmente acompanha os custos da solução e aumenta a complexidade da manutenção.

2.1 Descrição da Arquitetura

Para a realização do dispositivo, será utilizado o escoamento de água dentro de canos ou tubos de pequeno diâmetro posicionado no teto do ambiente, com o objetivo de gerar o efeito do teto radiante. O aquecimento ou resfriamento da água provoca uma alteração de temperatura uniforme no teto, alterando, como consequência, a temperatura do ambiente. A capilaridade adquirida pela construção do sistema com canos ao longo do teto possui ainda uma melhor eficiência na troca de calor.

Um pequeno tanque conectado com a rede de tubos armazenará água e permitirá seu aquecimento ou resfriamento através de placas que agem conforme o efeito de Peltier. Esse efeito termoelétrico corresponde à produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois condutores (ou

semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado. Ou seja, quando aplicada uma tensão nos terminais da placa, um de seus lados esfria e o outro esquentar. Quando o sinal da tensão é alternado, o lado que antes esfriava, passa a esquentar. A utilização desse efeito permite tanto aquecer quanto resfriar a temperatura ambiente através de um microcontrolador.

O sistema será modular, ou seja, para cada pastilha de Peltier haverá uma placa que abrigará o cano de cobre em formato de serpentina. A seguir está representada a modelagem do projeto, feita no *software* SolidWorks.

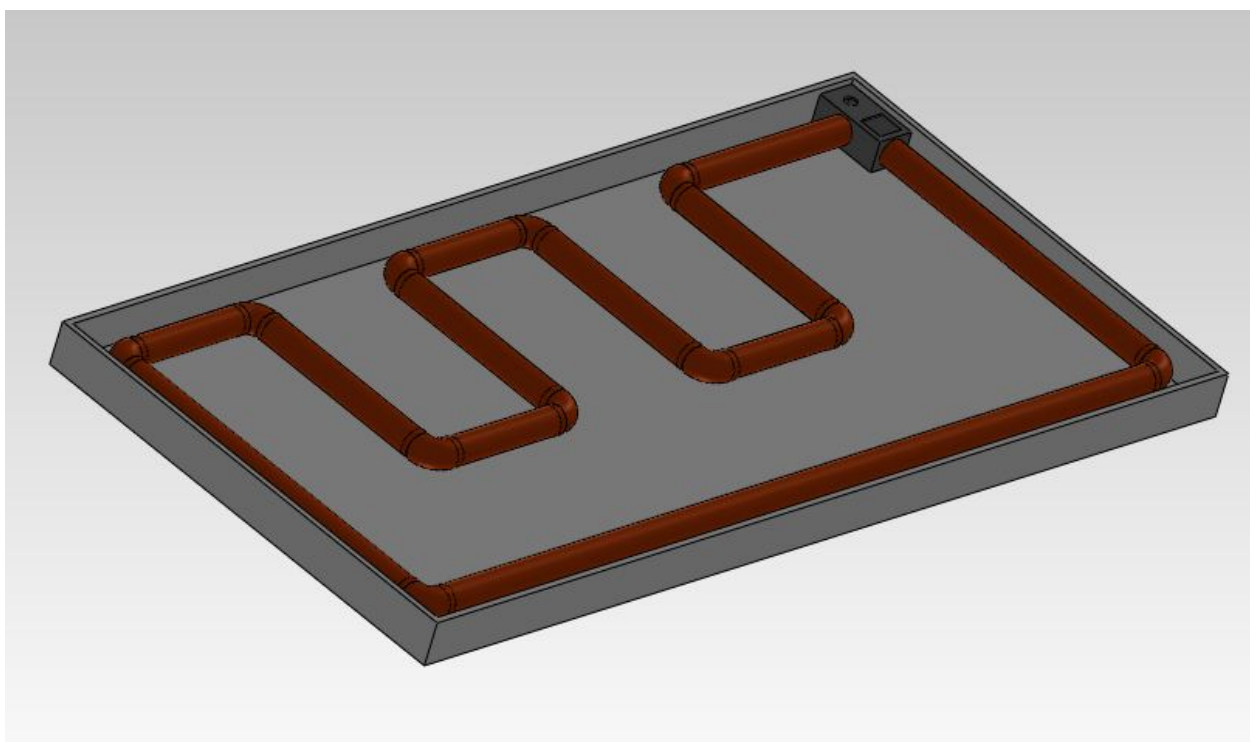


Figura 2.1: Vista ortogonal do projeto proposto

São necessários até dois sensores de temperatura para efetuar o controle – dependendo do tipo de controle escolhido – do sistema, um para medir a temperatura da água no tanque e outro para medir a temperatura do ar. O sensor a ser utilizado é o “LM35”. Ele possui alta precisão, baixo tempo de resposta e é facilmente integrado a microcontroladores. A escolha do microcontrolador será realizada quando forem disponíveis mais informações sobre o sistema. Um modelo comumente utilizado para esse tipo de aplicação é o “PIC 16f628a”. Para controlar a temperatura ambiente, será realizado o controle da corrente elétrica disponível no terminal das placas.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Sensor de Temperatura

Como explicitado na descrição inicial da arquitetura do sistema, serão necessários até dois módulos de sensoriamento, sendo um deles responsável por medir a temperatura da água, contida no reservatório em que atua a pastilha termoeletrica, enquanto o outro mede a temperatura do ar. Tais informações são utilizadas pelo controlador para ajustar a corrente elétrica a qual a pastilha está submetida. Porém, além dessa função essencial no sistema, os módulos de sensoriamento são também necessários em todos os testes preliminares previstos no projeto, e.g. da potência dissipada pelo módulo Peltier.

O principal componente de tal módulo é o circuito integrado LM35, um sensor de precisão cuja saída varia linearmente com a temperatura, ajustada esta para escala Celsius, sem a necessidade de qualquer tipo de calibração externa. Tal circuito é amplamente utilizado devido seu baixo custo e alta precisão. Como indicado pelo fabricante, a *National Semiconductor*, duas configurações diferentes são definidas, denominadas Básica e *Full-Range* [8], explicitadas a seguir.

A montagem Básica é apropriada para a medição de temperaturas entre $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sua acurácia varia entre 0.4 e 0.8 $^{\circ}\text{C}$, sendo a primeira para temperatura ambiente e a última para as mais elevadas. Sua montagem é mostrada na Figura 2, e sua leitura é imediata, bastando para tal apenas multiplicar o ganho 10 à voltagem em mV. Tal configuração é suficiente para a aplicação proposta, uma vez que não deve-se chegar próximo do ponto de fusão do fluido de refrigeração, sendo, portanto, a montagem prevista para o protótipo.

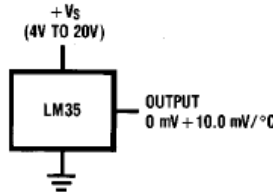


Figura 3.1: Sensor LM35 em sua Configuração Básica [8]

A configuração Full-Range, em contrapartida, apresenta uma faixa mais extensa de medição, sendo apropriada para temperaturas entre -55°C e 150°C . Sua precisão é ligeiramente menor que a anterior, porém ainda inferior a 1°C . Sua montagem também é simples, apesar de requerer uma fonte adicional e uma resistência, como indicado na Figura 3, sua leitura é feita do mesmo modo que na configuração Básica, com a diferença que eventualmente poderão surgir tensões negativas, referentes a temperaturas abaixo de zero. Essa configuração é, porém, mais indicada para os testes do que a anterior, por permitir que testes mais rigorosos sejam feitos e diferentes efeitos sejam observados, como discutidos na seção 7.

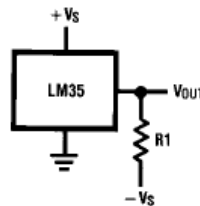


Figura 3.2: LM35: Configuração Full-Range [8]

Para a montagem da segunda configuração, é necessário definir os valores de V_s e R_1 . De acordo com o fabricante, o valor da resistência deve ser obtido a partir da seguinte fórmula:

$$R_1 = -V_s/50 \quad \mu A \quad (3.1)$$

Por fim, uma última observação a respeito do funcionamento do módulo de sensoriamento deve ser feita, esta a respeito do tempo de resposta do mesmo. A figura 3.3, também retirada do datasheet do componente, apresenta um gráfico representando a porcentagem do valor final medido pelo sensor ao longo do tempo para o caso específico de ar parado a temperatura ambiente. Nota-se que o tempo para que seja alcançado o valor correto medido é de 3 minutos, não havendo sobressinal significativo.

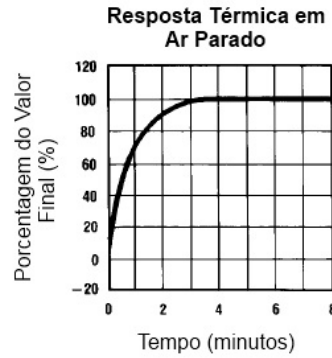


Figura 3.3: LM35: Resposta Térmica [8]

3.2 Efeito Peltier

Para que a escolha do atuador térmico seja devidamente realizada, é necessário levar em consideração os requisitos do sistema. A partir desses requisitos, chegou-se à conclusão de que a solução mais viável foi o uso de módulos de Peltier, comercialmente chamados de pastilhas termoeletrônicas. Dentre as outras possibilidades consideradas antes da definição do objetivo do projeto estavam o uso de bombas de calor convencionais e do próprio sistema de aquecimento a gás utilizado em algumas residências.

Pastilhas termoeletrônicas operam utilizando o efeito Peltier, que refere-se à um efeito aquecedor ou refrigerador quando uma corrente elétrica passa por dois condutores. Devido a essa diferença, surge um fluxo de calor entre as faces, de modo que a pastilha torna-se uma bomba de calor, absorvendo do ambiente exposto na face fria e transferindo-o para a face quente. Uma típica pastilha de Peltier conterá uma série de elementos semicondutores do tipo-p e tipo-n, como apresentado na Figura 5 [10].

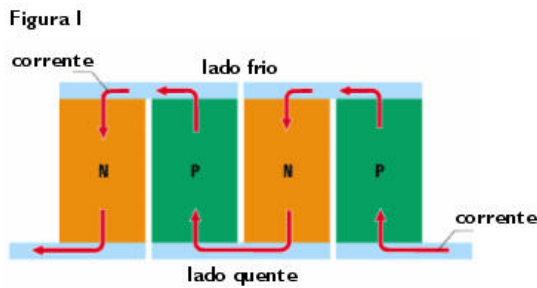


Figura 2

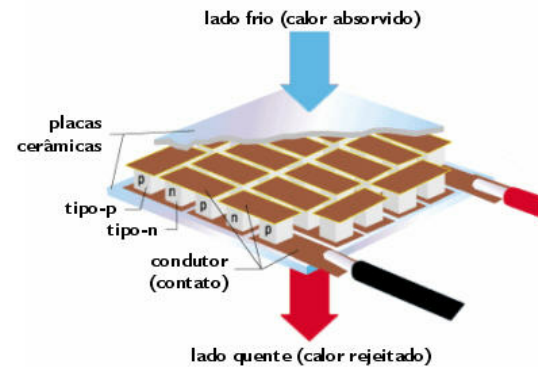


Figura 3.4: Representação de um Módulo de Efeito Peltier [10]

As vantagens dessa escolha centram-se na versatilidade de poder aquecer e resfriar através do mesmo dispositivo, precisando apenas controlar a corrente elétrica ao qual a pastilha está submetida, na facilidade de instalação e manutenção, devido ao tamanho reduzido e a não presença de partes móveis. Atualmente, essas pastilhas são amplamente utilizadas em resfriamento de microprocessadores, geladeiras portáteis, filtros de água residenciais, aquecedor de assentos automotivos entre outras aplicações.

Um fator de alta relevância na utilização desses dispositivos é a necessidade de projetar um bom sistema de dissipação de calor em ambas as faces da pastilha, por este ser o principal fator no rendimento da mesma. Além disso, existe também a possibilidade de ocorrer um superaquecimento caso a face quente acumule muito calor sem o dissipar, ocasionando uma transferência de parte desse calor para a face fria, que por sua vez começara também a aquecer. Tal situação não apenas compromete totalmente a aplicação, como também danifica o dispositivo.

O calor dissipado na face quente é equivalente à soma do calor retirado pela face fria (Q_{max}) com o calor dissipado pela resistência ($Q = V \times I$). Assim sendo, o dissipador de calor deve ser suficiente para dissipar a soma de tais quantidades de calor.

A figura a seguir mostra uma imagem do dispositivo.

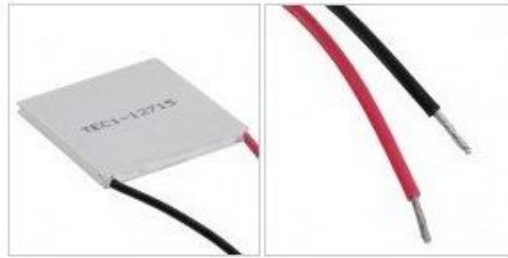


Figura 3.5: TEC-12175 [10]

3.3 Modelo Transferência de Calor

O modelo de transferência de calor possui dois objetivos principais diferentes. O primeiro visa fornecer ao sistema de controle um equacionamento da planta adequado para a estimativa da temperatura ótima da água na entrada do sistema. O segundo visa prover sustentação teórica às decisões de projeto, bem como testar a influência de eventuais hipóteses simplificadoras e, em última análise, permitir que eventuais adaptações sejam implementados visando aumentar a performance do sistema.

Nota-se, porém, que os diferentes objetivos possuem restrições e, por conseguinte, abordagens diferenciadas. Enquanto o segundo se beneficia da complexidade para realizar uma análise mais completa e precisa, o primeiro busca uma solução simples no tocante à implementação, mantendo o erro dentro de valores especificados, utilizando sempre que necessário linearizações e hipóteses simplificadoras coerentes. Tal se justifica pela limitação de processamento do microcontrolador utilizado, além de melhor análise e dimensionamento dos parâmetros de controle.

A literatura produzida a respeito de modelos que representam o funcionamento de um aquecimento ou resfriamento por teto (ou piso) radiante é vasta. Na sua maioria, o método de diferenças finitas e o método de elementos finitos são utilizados para análise. Através de um sistema similar ao reproduzido na Figura 7, X. Jin[1][5] desenvolve uma malha de diferenças finitas visando propor uma correlação para definição da transferência de calor na camada inferior, de modo a não ser mandatório

a solução das equações diferenciais para o cálculo da temperatura de superfície, ainda mantendo a acuracidade dos resultados obtidos. Utilizando ambos os métodos computacionais citados anteriormente, R. E. Hayes[2] desenvolve um modelo numérico bidimensional que, por sua vez, inclui não apenas perda de calor pelo ambiente como também a troca de ar com o meio externo, além de explorar detalhadamente tanto o equacionamento térmico quanto as rotinas iterativas. Muito importante também foram as conclusões obtidas por Sattari e Farhanieh[3], que estudaram os efeitos de cada parâmetro na performance do piso radiante, utilizando um sistema também similar ao proposto no presente projeto. Através deste estudo, pôde-se concluir que o diâmetro e o tipo do tubo são as variáveis que menos influenciam a resposta térmica, enquanto a espessura e o tipo de revestimento entre os tubos e a superfície representam os parâmetros mais importantes para o sistema. Além disso, observou-se que a radiação representava, de fato, o principal mecanismo de troca de calor (foram considerados os fenômenos de condução, convecção e radiação).

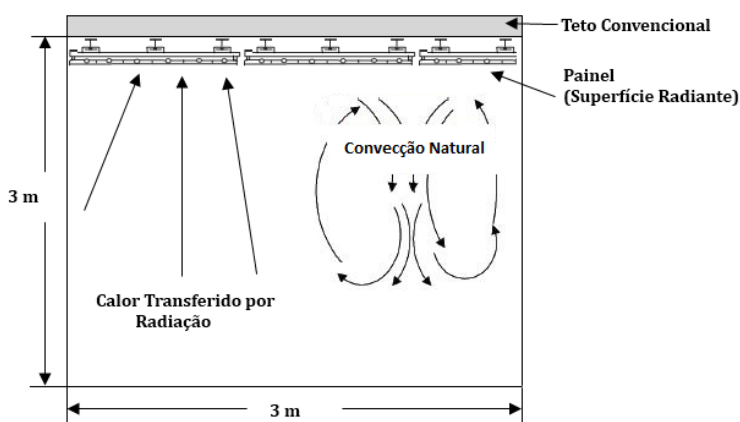


Figura 3.6: Esquema construtivo do sistema

Além dos citados, outros artigos apresentam também análises relativas à modelagem do sistema térmico e conclusões a respeito do uso de superfícies radiantes. Em Ran Gao et al.[4] é feita uma análise a respeito da homogeneidade da temperatura do ar em ambientes aquecidos por piso radiante, onde, através de métodos computacionais, mostra-se zonas em que a diferença de temperatura é abrupta, sendo essas próximas dos locais em que estão posicionadas as tubulações. Através de uma abordagem prática, J. Miriel et al.[6], testes ao longo de dois invernos e um verão são feitos utilizando teto radiante.

4. Modelagem e Controle

4.1 Definição do Modelo

O capítulo anterior citou estudos referentes a diferentes modelos para se estimar a temperatura na superfície bem como as demais variáveis de interesse, porém tais abordagens, como já citado, não são adequadas para implementação no sistema de controle, principalmente pelo alto nível de complexidade. Assim sendo, um modelo simplificado é necessário para a definição da função de transferência do sistema térmico.

A montagem do sistema consiste de tubos dispostos como apresentado na figura 3.6, considere-se que a superfície acima dos mesmos é isolada e, portanto, não há perdas de calor nesse sentido. A camada inferior aos tubos é composta de n camadas diferentes, cada uma com sua respectiva espessura e condutividade térmica, definindo-se, em seguida, a condutividade equivalente.

O método geral de análise é baseado no modelo de Capacitância Global, que relaciona a variação de temperatura ($\dot{T}$) com a sua capacitância (C) e fluxo de calor ($\dot{Q}$), da seguinte forma:

$$\dot{Q} = C * \dot{T} \quad (4.1)$$

A análise global do sistema é feita através de uma analogia entre sistemas térmico e elétrico, como amplamente discutida em [7]. As fórmulas de condução de calor em estruturas tubulares, condução de calor em superfícies planas e cálculo da capacitância global equivalente para a troca de calor entre a superfície do teto e o ar dentro do ambiente também foram retiradas da mesma fonte.

Dessa forma, o circuito elétrico resultante representa a transferência de calor total do sistema, sendo $\dot{Q}$ o fluxo de calor gerado pela placa de Peltier, T_{agua} a temperatura da água no tanque, C_{agua} a capacitância térmica da água, R_{cobre} a resistência térmica à condução de calor do cobre, T_{cobre} a

temperatura do cobre, R_{teto} a resistência térmica à condução de calor da interface entre os canos e o ambiente, C_{ar} a capacitância térmica do ar e T_{ar} a temperatura do ar.

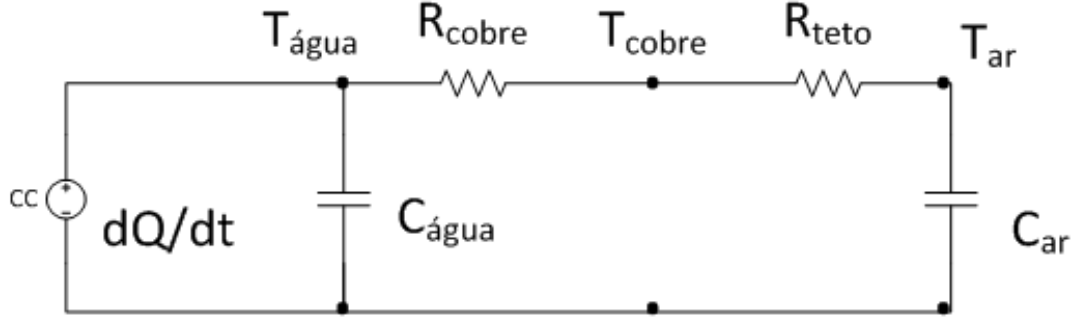


Figura 4.1: Esquema construtivo do sistema

É possível extrair desse modelo as seguintes equações de estado:

$$\begin{aligned}\dot{T}_{agua} &= \frac{1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{agua}c_{agua}}(T_{ar} - T_{agua}) + \frac{\Pi_{AB}}{m_{agua}c_{agua}}I \\ \dot{T}_{ar} &= \frac{1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{ar}c_{ar}}(T_{agua} - T_{ar})\end{aligned}\quad (4.2)$$

Sendo m_{ar} (m_{agua}) a massa de ar(água) contida no volume de ar/água a ser aquecido/resfriado, c_{ar} (c_{agua}) o calor específico do ar(água), π_{AB} o coeficiente de Peltier da placa e I a corrente no terminal da placa, onde

$$\dot{Q} = \Pi_{AB}I \quad (4.3)$$

$$C = mc \quad (4.4)$$

$$R = \frac{L}{AK} \quad (4.5)$$

L é a espessura do material, A a área em que ocorre troca de calor e K a condutividade térmica.

As equações diferenciais não consideram nenhuma forma de perda do sistema. Porém, uma troca de calor considerável com o exterior do ambiente se dá através de janelas. Para adicionar essa perda ao sistema, a equação (2) assume a forma:

$$\dot{T}_{ar} = \frac{1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{ar}c_{ar}}(T_{agua} - T_{ar}) - \frac{1}{m_{ar}c_{ar}R_{ext}}(T_{ar} - T_{ext}) \quad (4.6)$$

onde R_{ext} e T_{ext} são respectivamente a resistência térmica do vidro da janela e a temperatura externa.

Para os testes apresentados nas próximas seções, a interface entre os canos de cobre e o ambiente será considerada como uma única camada de um material que será determinado na próxima fase do projeto e cuja condutividade térmica será considerada, para efeitos de simulação, equivalente à do granito. As dimensões do ambiente são 3x3x3m e o material dos tubos é cobre. Demais constantes são apresentadas na tabela 4.1 [12].

Parâmetro	Valor
ρ_{agua}	$995kg/m^3$
ρ_{ar}	$1.2kg/m^3$
c_{agua}	$1.0032 * 10^3 J/kg * K$
c_{ar}	$4.18 * 10^3 J/kg * K$
K_{cobre}	$398W/m * K$
K_{teto}	$3.5W/m * K$
δ_{cobre}	$0.003m$
δ_{teto}	$0.015m$

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados

4.2 Módulo de Controle

Para projetar o sistema de controle, foram utilizadas as equações de estado obtidas na modelagem termodinâmica. Através das equações diferenciais foi feito um modelo no espaço de estados, utilizando como variáveis de estado as grandezas medidas (temperaturas da água no tanque e do ar no ambiente).

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{agua} \\ \dot{T}_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{agua}c_{agua}} & \frac{1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{agua}c_{agua}} \\ \frac{1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{ar}c_{ar}} & \frac{-1}{(R_{cobre} + R_{teto})m_{ar}c_{ar}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{agua} \\ T_{ar} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Pi_{AB}}{m_{agua}c_{agua}} \\ 0 \end{bmatrix} I \quad (4.7)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{agua} \\ T_{ar} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Após a análise do modelo, foi feita a implementação do seu controle no software de simulação Matlab, utilizando os tipos de controlador PID e dois diferentes desenvolvidos pelo método LQR(*Linear-Quadratic Regulator*) - com e sem observador de estados.

A resposta de todos os sistemas a uma entrada em degrau – equivalente à diferença entre a temperatura desejada e a atual no ambiente – é semelhante (graficamente imperceptível na escala de tempo do sistema). Portanto, chegou-se a conclusão de que um controlador do tipo PID é suficiente para controlar de forma eficiente o sistema. Os motivos que justificam a escolha são o custo e a complexidade de implementação do hardware e do software mais baixos de um controlador do tipo PID. Isso ocorre porque no sistema controlado por PID é necessário medir apenas a temperatura do ar para realizar o controle – enquanto que, no outro caso, seria necessário medir ou estimar também a temperatura da água. Para tanto, o sistema contaria ou com um sensor adicional, ou com um observador de estados, para estimar a temperatura da água, implementado em seu microcontrolador.

Os parâmetros do controlador foram determinados empiricamente em $K_P=10$, $K_I=0.05$ e $K_D=0$. Definindo os parâmetros do ambiente a ser aquecido/resfriado conforme citado no módulo de transferência de calor, pode-se simular o sistema e analisar sua eficácia.

Abaixo observa-se os diagramas dos controladores analisados realizados no *software* Matlab.

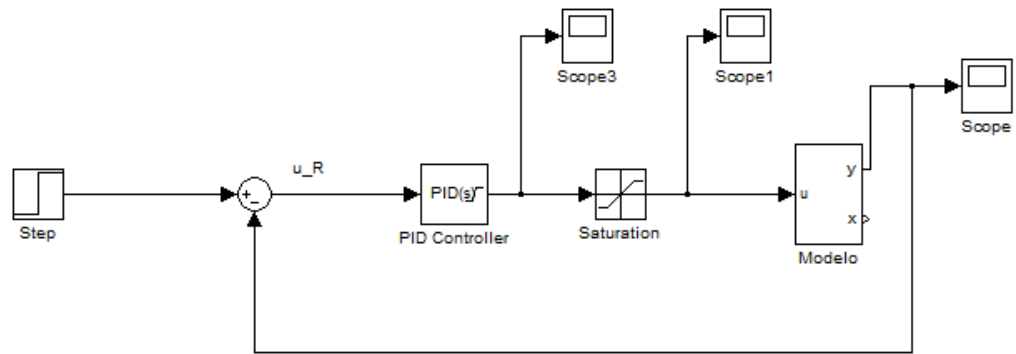


Figura 4.2: Diagrama: controle por PID

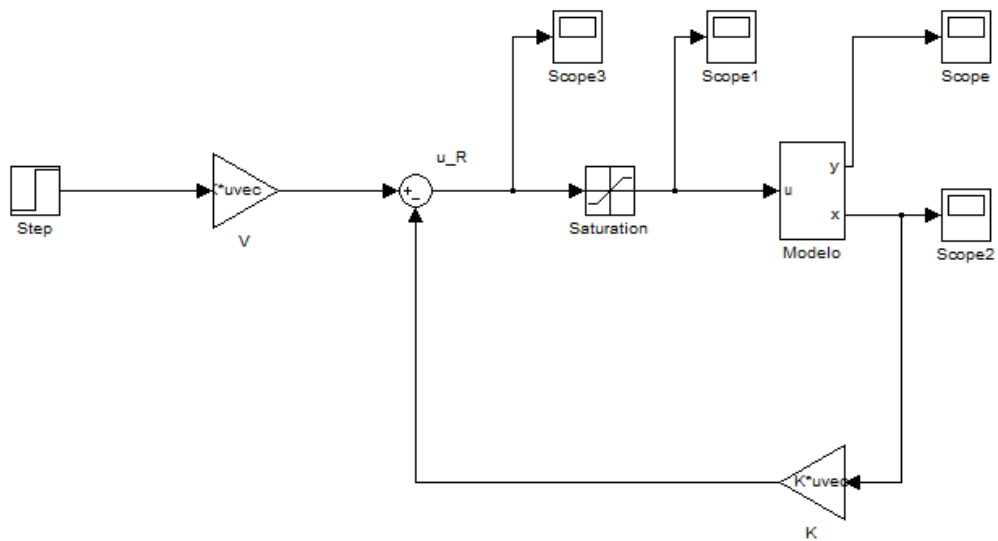


Figura 4.3: Diagrama: controle por LQR

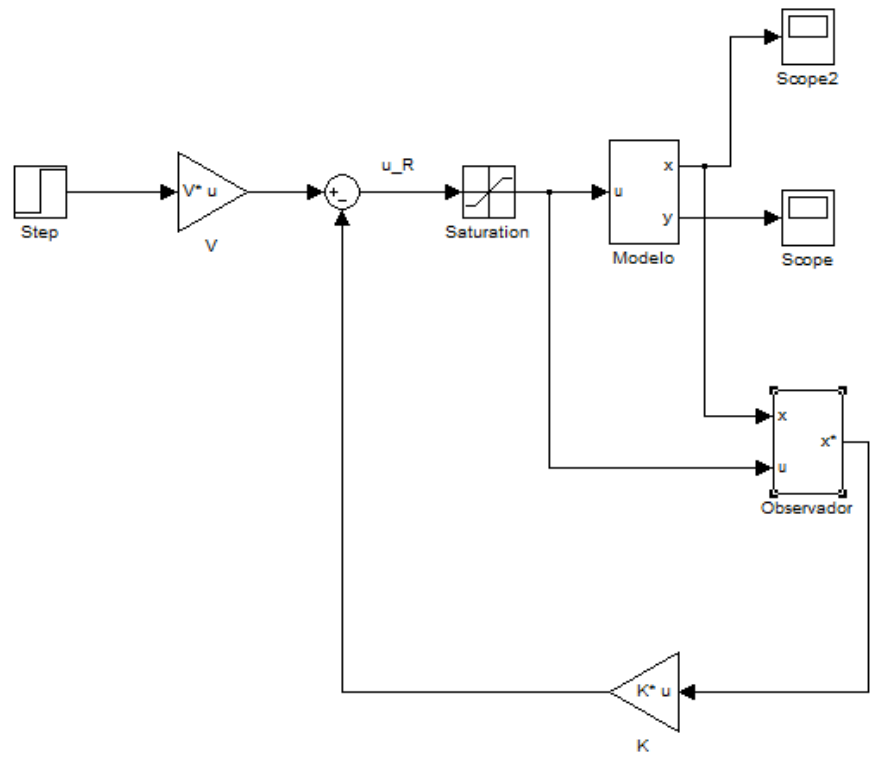


Figura 4.4: Diagrama: controle por LQR com observador de estados

5. Simulação e Análise

Para realizar a simulação, precisam ser determinados os parâmetros m_{ar} , m_{agua} , c_{ar} , c_{gua} , R_{cobre} , R_{teto} , R_{ext} e π_{AB} . Tais valores foram obtidos com auxílio da tabela 4.1 para a configuração do sistema em que um volume total de 2 litros de água é aquecido/resfriado; a água escoa por canos de cobre cuja meia circunferência superior determina a área de condução de calor para o ambiente e corresponde a 18 metros de canos de cobre com 4,2 centímetros de diâmetro externo e 0,1 centímetros de espessura; a área do teto é de 9 metros quadrados e o volume total de ar no ambiente é de 27 metros cúbicos; a janela de vidro possui 0,5 metros quadrados de área, 0,5 centímetros de espessura e condutividade térmica de 0,8 W/(m*K). Utiliza-se oito pastilhas de Peltier de potência elétrica de 230 Watts, cujos parâmetros estão apresentados na tabela abaixo - retirada do datasheet [9] fornecido pelo fabricante -, para aquecer/resfriar a água.

Item	Símbolo	Parâmetro
Máxima Temperatura de Operação	T	$90^{\circ}C$
Máxima Potência de Resfriamento	Q_{max}	$136W$
Máxima Diferença de Temperatura	ΔT_{max}	$70^{\circ}C$
Máxima Voltagem de Entrada	V_{max}	$15.4V$
Máxima Corrente	I_{max}	$15.0A$
Resistência	R	$0.75\Omega \pm 0.005\Omega$

Tabela 5.1: TEC 12175: Características

Foram simulados dois casos distintos para analisar o sistema.

5.1 Caso 1

O primeiro caso consta no aquecimento e na manutenção da temperatura do ambiente quando há uma diferença de temperatura constante para o exterior. Nessa simulação pretende-se comprovar a capacidade do sistema de manter a temperatura no nível desejado em casos extremos para o Brasil. Para tal, foram adotadas como temperatura interna desejada 20 graus Celsius e temperatura externa de 10 graus Celsius. A seguir pode-se observar a resposta do sistema ao aquecimento realizado pelas pastilhas de Peltier.

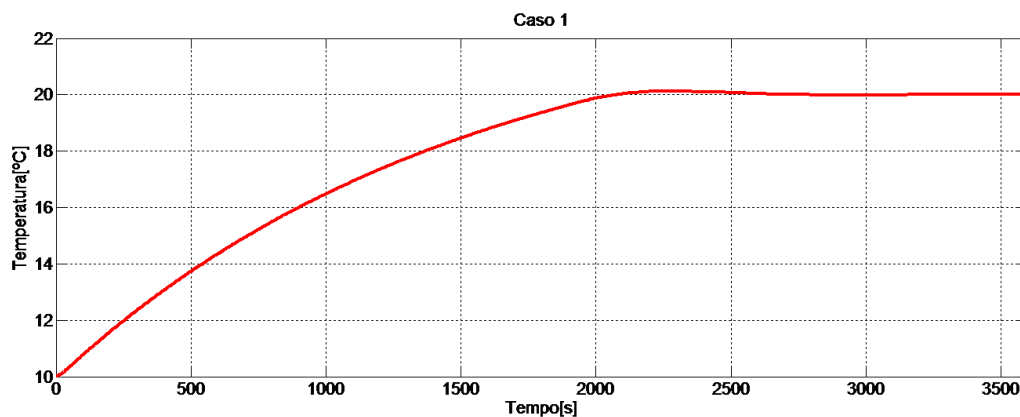


Figura 5.1: Temperatura ambiente

Observa-se que um aquecimento de 10 graus Celsius do ambiente em relação à sua temperatura inicial, possui um tempo de subida de aproximadamente 30 minutos, o que está dentro do esperado para esse tipo de sistema e para uma diferença de temperatura tão grande. Além disso, há uma melhora considerável no conforto térmico já dentro dos primeiros 10 minutos de funcionamento, período em que a temperatura sobe quase 5 graus Celsius.

Também é interessante observar o comportamento da corrente necessária em cada pastilha de Peltier.

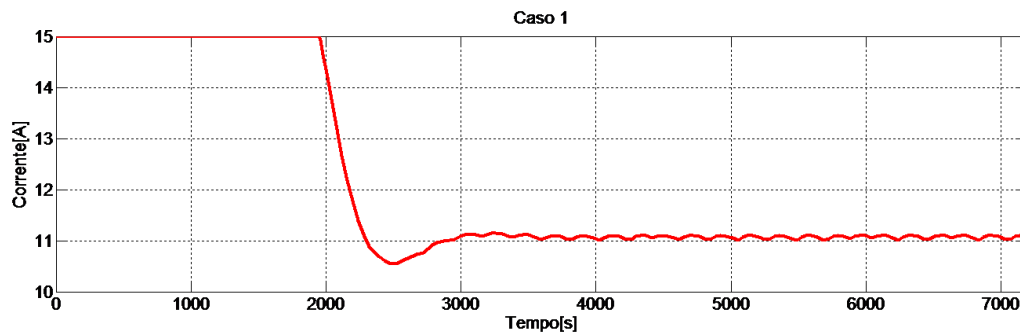


Figura 5.2: Corrente em cada pastilha de Peltier

Após a estabilização da temperatura ambiente, a corrente cai para, aproximadamente, 11 Amperes. Assim, pode-se chegar à conclusão de que o sistema é eficiente e possui potência reserva para casos ainda mais extremos.

5.2 Caso 2

O segundo caso a ser analisado consta na variação da temperatura externa durante um período de 24 horas, enquanto a temperatura interna desejada é de 20 graus Celsius. Deseja-se avaliar a robustez e estabilidade do sistema quando há variações no distúrbio externo por maiores períodos de funcionamento. O gráfico a seguir demonstra a variação da temperatura externa.

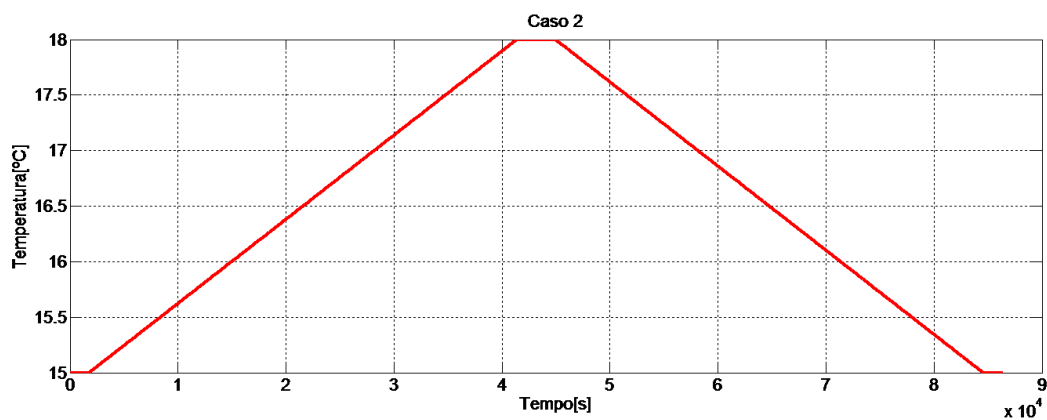


Figura 5.3: Temperatura externa

O comportamento da temperatura ambiente durante tal distúrbio externo pode ser analisado a partir do seguinte gráfico.

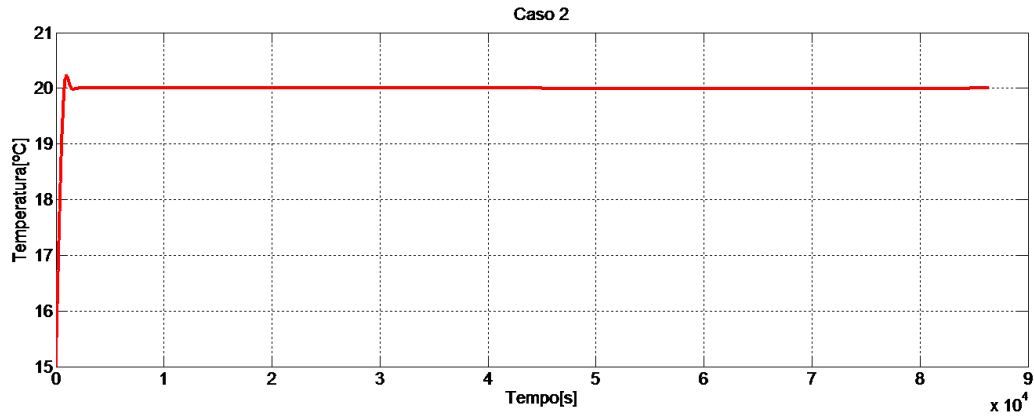


Figura 5.4: Temperatura ambiente

Como pode ser observado, a temperatura se mantém constante quando o sistema permanece em funcionamento durante as 24 horas. Assim, fica evidente que o sistema se comporta bem a variações de temperatura externa. O gráfico a seguir demonstra a corrente necessária em cada pastilha de Peltier para o funcionamento do sistema durante as 24 horas.

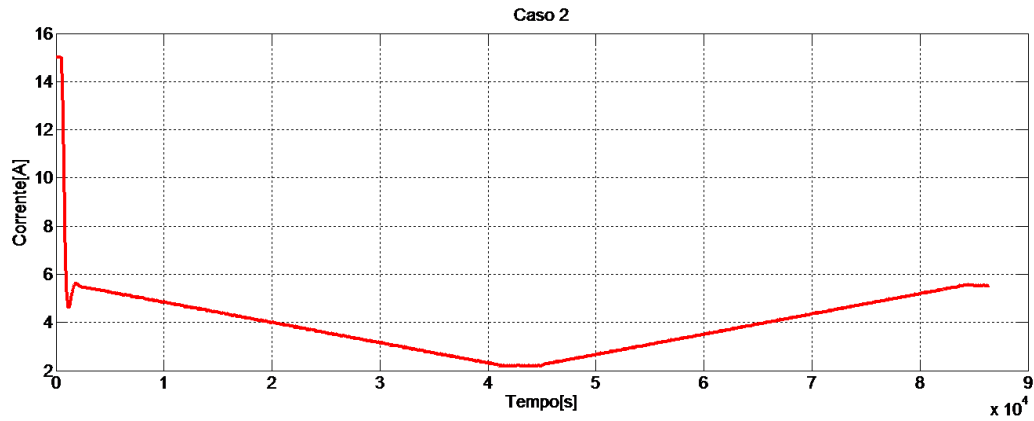


Figura 5.5: Corrente em cada pastilha de Peltier

Como visto, após a estabilização da temperatura ambiente, a corrente necessária para manter o ambiente aquecido é relativamente baixa - em comparação à sua capacidade total - e o sistema possui grande margem para se adaptar a diferentes condições de temperatura externa. O tempo de resposta do sistema é mais rápido do que a variação de temperatura no perfil analisado, portanto a corrente acompanha o perfil de temperatura.

6. Prototipagem

Com o objetivo de avaliar o dispositivo de um modo abrangente, foi definida uma série de diretrizes e testes a serem atendidos nessa etapa do projeto, como será discutido ao longo dessa seção. Tendo isso em vista e procurando otimizar a aquisição de dados relevantes da solução proposta, foi previsto o projeto, construção e teste de um protótipo, abordado na seção 6.2. O aparato eletrônico empregado e desenvolvido, incluindo um módulo para gerar o PWM que controla a corrente ao qual a Placa de Peltier está submetida, um módulo de sensoriamento com display numérico para representação da temperatura, um microprocessador para o controle e alguns subsistemas adjacentes, serão detalhadamente abordados na seção 6.1.

6.1 Partes Eletrônicas

A definição dos componentes eletrônicos para a fabricação e montagem da parte relativa ao hardware do sistema foi feita baseada na arquitetura escolhida e já descrita anteriormente, onde apenas os componentes essenciais para a modelagem teórica e explanação do sistema foram detalhados. Nesta seção do relatório, serão descritas as principais funcionalidades dos circuitos, assim como os componentes mais importantes envolvidos. Mais detalhes sobre os circuitos podem ser obtidos no apêndice através do esquema que representa o projeto de hardware.

Pode-se dividir o hardware do sistema em duas partes: circuito de controle e circuito de potência. No circuito de controle, como o próprio nome diz, estão todos os elementos responsáveis pelas diversas funções de controle, tanto matemático e lógico, quanto de interação com o usuário. No circuito de potência estão os elementos responsáveis pela amplificação da corrente de controle e pelo consequente funcionamento da pastilha de Peltier, através do efeito termoeletrônico.

6.1.1 PIC - PWM

O PIC utilizado é da família 16 – PIC16F887 – e faz parte do circuito de controle. Ele é responsável pela parte lógica do circuito e possui as funções de controle de todo o sistema. Uma das suas principais funções é a de geração de um PWM (Pulse Width Modulation), que tem a finalidade de servir de base para o PWM gerado pelo circuito de potência.

Habilitando o módulo PWM das portas digitais D5 e D7 – portas que podem ser utilizadas para essa função, além de Input/Output – e utilizando a função pré-definida do PIC para realização de PWM, pode-se controlar a corrente com a potência média desejada em ambos os sentidos. Deve-se atentar para o fato de que ambas as portas não podem estar habilitadas simultaneamente, pois cada uma é responsável pelo controle da corrente em um sentido. A partir de uma porcentagem necessária da potência total – calculada pelo controle implementado no PIC e posteriormente discretizada –, da frequência de funcionamento e da porta de saída, a função gera o PWM desejado.

6.1.2 Display e interação com o usuário

O display também faz parte do circuito de controle e tem a finalidade de informar ao usuário a temperatura atual do ambiente e a temperatura desejada definida no sistema, assim como permitir a mudança da temperatura desejada pelo usuário. Seu funcionamento engloba botões, para aumentar ou diminuir a temperatura desejada, e um LED, para informar ao usuário que a temperatura ambiente é equivalente – com precisão de 0.1 grau Celsius – à temperatura desejada, além de dois displays de sete segmentos, que geram dois dígitos em LED e permitem a leitura das temperaturas. Os dados recebidos dos botões e do sensor de temperatura são processados no PIC, que, por sua vez, gera uma resposta a ser enviada aos displays.

6.1.3 Ponte H

A Ponte H faz parte do circuito de potência e é responsável pelo acionamento da pastilha de Peltier. Ela recebe um PWM de baixa corrente do PIC e o transforma em um PWM de alta corrente. Para tanto, são necessários dois MOSFETs N-Channel (IRF5210) e dois P-Channel (IRLZ44N) montados na configuração de ponte H – que pode ser vista no apêndice A.2. Ambos possuem uma

impedância de entrada na ordem de mega Ohms e um alto ganho. Portanto, uma corrente na ordem de nano Amperes no gate do MOSFET o satura.

É importante salientar a presença das resistências de pull down – R7 e R8 na representação presente no apêndice –, responsáveis por descarregar o gate e garantir uma tensão de 0 Volts.

Devido às altas correntes de operação do sistema (até 10A) e baixas correntes de acionamento (máximo 25mA), os componentes utilizados para essa função foram os MOSFETs, e não transistores de potência. Os transistores de potência são mais baratos, porém, mesmo em configuração Darlington, operariam muito perto de seu limite máximo, sobreaquecendo-os e aumentando muito a resistência interna do sistema.

6.1.4 Comunicação por infravermelho

Com a finalidade de ampliar a interação entre o sistema e o usuário, ou seja, permitir a mudança da temperatura desejada a uma distância maior do painel de controle, foi adicionado ao circuito de controle um sensor de infravermelho – o TSOP 1838. Tal sensor, ao receber um sinal infravermelho, gera 5 Volts com uma determinada frequência, dependente do sinal infravermelho, em uma de suas portas. A frequência dessa tensão é então processada pelo PIC, comparada com as frequências pré-programadas e, dependendo da frequência do sinal, a lógica de controle tem uma reação – aumentar ou diminuir a temperatura desejada, por exemplo.

O receptor de sinais infra-vermelhos TSOP1838 é composto por um diodo do tipo PIN (o fotodetector do sistema), um pré-amplificador - que tem como função permitir a decodificação do sinal de saída do sensor diretamente por um microprocessador evitando falhas de comunicação - e um filtro banda, que limita o espectro de frequência recebido.

A integração do receptor ao hardware do restante do sistema é simples: um dos seus pinos é ligado à saída 5V do microprocessador; outro pino é ligado ao terra; e o último pino é ligado a uma das entradas digitais do microprocessador.

Através do diagrama de blocos a seguir, pode-se ver a interação entre partes internas do sensor e entender melhor seu funcionamento.

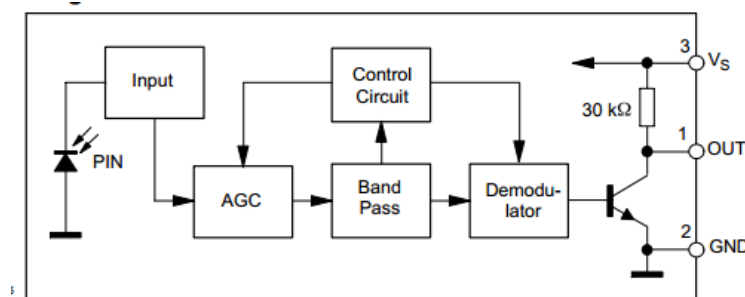


Figura 6.1: Diagrama de blocos

O sinal é recebido inicialmente por um diodo PIN, passando depois pelo AGC (Automatic Gain Control), cuja função é controlar o ganho do sinal, dependendo do sinal que chega ao controle do circuito. Esse processo de realimentação é realizado para que o ganho do sinal de entrada seja ajustado para eliminar ruídos. Ou seja, quando o sinal de entrada representa somente ruídos, o ganho automaticamente diminui e o circuito rejeita o sinal. Já quando o sinal representa dados úteis ao sistema, o ganho é aumentado.

Após isso, o sinal passa por um filtro de banda e por um demodulador, que envia o sinal, amplificado por um transistor, ao microprocessador conectado ao sensor. O mesmo sinal é enviado do filtro de banda para o controle do sensor, que ajusta o AGC e evita ao máximo ruídos.

Esses processos internos foram decisivos para a escolha do componente com a finalidade de realizar a comunicação via infra-vermelho. Um fotodiodo simples poderia ter sido utilizado em seu lugar, porém, não apresentaria as vantagens acima descritas, deixando o sistema muito suscetível à ruídos indesejáveis e à falhas de comunicação com o microprocessador.

Com a finalidade de realizar o processamento e a interpretação dos dados recebidos pelo sensor, foi utilizada uma biblioteca para tratamento de sinais de infra-vermelho. O código, demonstrado no anexo A.3 foi implementado no PIC do sistema.

O código recebe a entrada digital 22 do PIC, a qual foi conectada a saída do receptor IR. A biblioteca IRrecv consiste em duas partes: uma rotina de interrupção, que mede os tamanhos dos sinais modulados e dos espaços vazios - sem sinal - e os salva em um buffer; e uma rotina de decodificação que usa os dados salvos no buffer e os transforma em dados decodificados.

A biblioteca de decodificação utiliza vários protocolos para tentar decodificar o sinal armazenado. Assim que tal processo é realizado, uma estrutura que contém os dados originais, os dados

decodificados, o número de bits dos dados decodificados e o protocolo utilizado na decodificação é armazenada.

Portanto, podem ser programados comandos específicos para cada tecla do controle remoto - que possui um código único -, como aumentar ou diminuir a temperatura desejada ou ligar/desligar o climatizador.

Para calibrar o conjunto controle/receptor, o PIC foi programado para que fossem impressos os valores decodificados. Assim, ao apertar uma tecla no controle remoto, sabe-se qual é seu código e pode-se programar o comando desejado para aquela tecla.

6.2 Protótipo

Todos os testes previstos para esse protótipo têm como objetivo uma melhor compreensão dos efeitos físicos e a eficiência do projeto de subsistemas, auxiliando futuramente na concepção de projeto para a construção de um produto final.

Tendo isso em vista, foi definido um grupo de testes a ser atendido pelo protótipo, sendo levado em consideração desde sua concepção. Tais testes estão listados a seguir.

- 1) Testar como a temperatura da água em um pequeno reservatório varia com a corrente submetida na pastilha de Peltier;
- 2) Testar a eficiência dos métodos de dissipação de calor, em especial na face da pastilha de Peltier oposta à atuante, uma vez que esta configura um limitante na eficiência do conjunto;
- 3) Testar a eficiência do controle e outras partes eletrônicas.

Como pode ser observado, todos os itens citados possuem um caráter comparativo ou preparatório. Dessa forma, testes visando mensurar a troca de calor com o ambiente, a homogeneidade da temperatura no espaço, o consumo de energia, tempo de acomodação, influência de janelas e portas na eficiência do dispositivo, entre outros dessa natureza, não estão no escopo desse protótipo, uma vez que os cálculos em escala poderiam apresentar grandes distorções.

O protótipo busca a representação de duas regiões isoladas termicamente. A primeira, cuja temperatura será em função do controle na pastilha térmica, simula a atuação desta no ambiente

e, portanto, abriga o reservatório de água e a tubulação para a circulação desta, além de uma série de elementos necessários ao funcionamento do sistema que serão em breve descritos. A segunda região representa o ambiente que receberá o calor dissipado na face oposta à atuante da placa de Peltier, uma vez que o monitoramento da temperatura nessa circunstância é necessário tanto para a eficiência do sistema como para prevenção de falhas e possível superaquecimento do atuador térmico. Por esse motivo, tal região acomoda todos os componentes eletrônicos que dissipam calor e devem, portanto, ser separados da primeira. Por terem suas temperaturas acompanhadas, ambas as regiões são isoladas do ambiente por superfícies de isopor, bem como o interstício entre as mesmas. Além disso, aberturas em tais superfícies foram feitas simulando perdas de calor para o ambiente externo, aproximando-se, assim, das condições reais de funcionamento do produto sugerido.

O reservatório de água é constituído de um recipiente plástico, dentro do qual está fixado um termômetro de álcool específico para aquários, uma bomba de 1,5 W para realizar a circulação do fluido e uma aleta para melhor transferência de calor. Na face desse recipiente em contato com a aleta, foi feita uma abertura para a fixação da placa de Peltier, permitindo o contato direto entre esta e a aleta. Conectado ao reservatório está a tubulação na qual a água circula, seu diâmetro é, inicialmente, de 1/2", porém tal tubulação pode ser substituída através de adaptadores padrões para tubulações plásticas, assim como sua geometria também pode ser alterada, por não ser de material rígido, substituindo o molde de isopor que abriga a tubulação. Tal molde possui duas funções distintas, definir a geometria e atuar como mais um isolante entre as regiões fria e quente, aumentando a espessura de isopor e direcionando a troca de calor. A figura a seguir mostra a vista isométrica do subsistema de refrigeração/aquecimento.

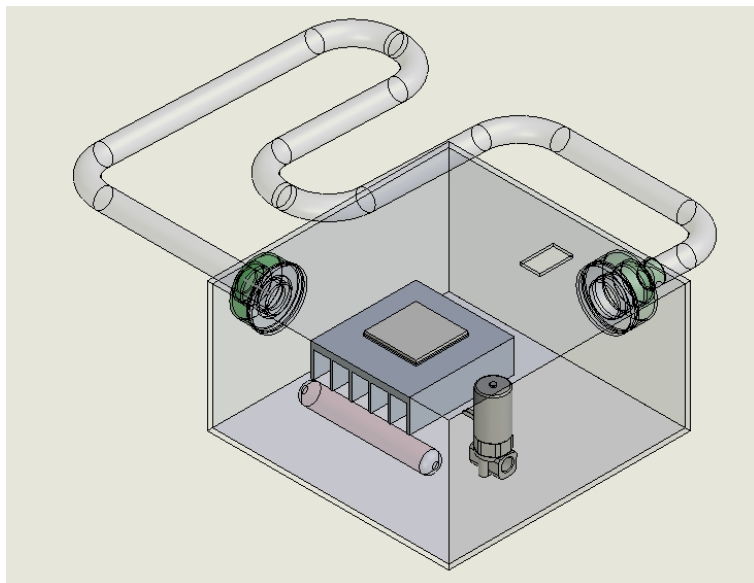


Figura 6.2: vista isométrica do reservatório

Enquanto isso, a região de dissipação possui dimensões reduzidas quando comparadas à última, por se tratar de um espaço que realmente deve existir na definição do produto e, por isso, deve ser dimensionado observando o requisito de módulo compacto. Visando dissipar o calor gerado, uma estrutura de aletas foi posicionada em contato com a pastilha térmica, assim como um *cooler* de computador fixado a tal estrutura. Nessa mesma região, estão posicionados também a fonte que converte 110V (tensão alternada) em 12V (tensão contínua), a ponte H e a placa de controle, todos descritos na seção Partes Eletrônicas. Dos componentes citados, aqueles que apresentaram maior dissipação de calor foram o atuador térmico e a ponte H.

A temperatura é monitorada através de 7 sensores, sendo 6 deles construídos a partir do circuito integrado LM35 e o outro o termômetro de álcool. Um desses sensores é posicionado junto à estrutura de aletas da dissipação, enquanto os outros 5 são distribuídos pela região de controle de temperatura, da seguinte forma:

- 1) No nível da tubulação e na posição central
- 2) A 1/3 da altura total da região monitorada e na posição central
- 3) A 2/3 da altura total da região monitorada e na posição central
- 4) No nível da tubulação e próximo a saída de água no reservatório
- 5) No nível da tubulação e próximo a entrada de água no reservatório

O sensor utilizado pelo controle é o referente ao item 1, pois este estaria, na proposta de um produto, na fronteira entre o módulo e o ambiente.

A figura a seguir mostra a vista isométrica explodida do protótipo. Para mais detalhes construtivos, consultar o anexo B, que contém o desenho de conjunto do mesmo.

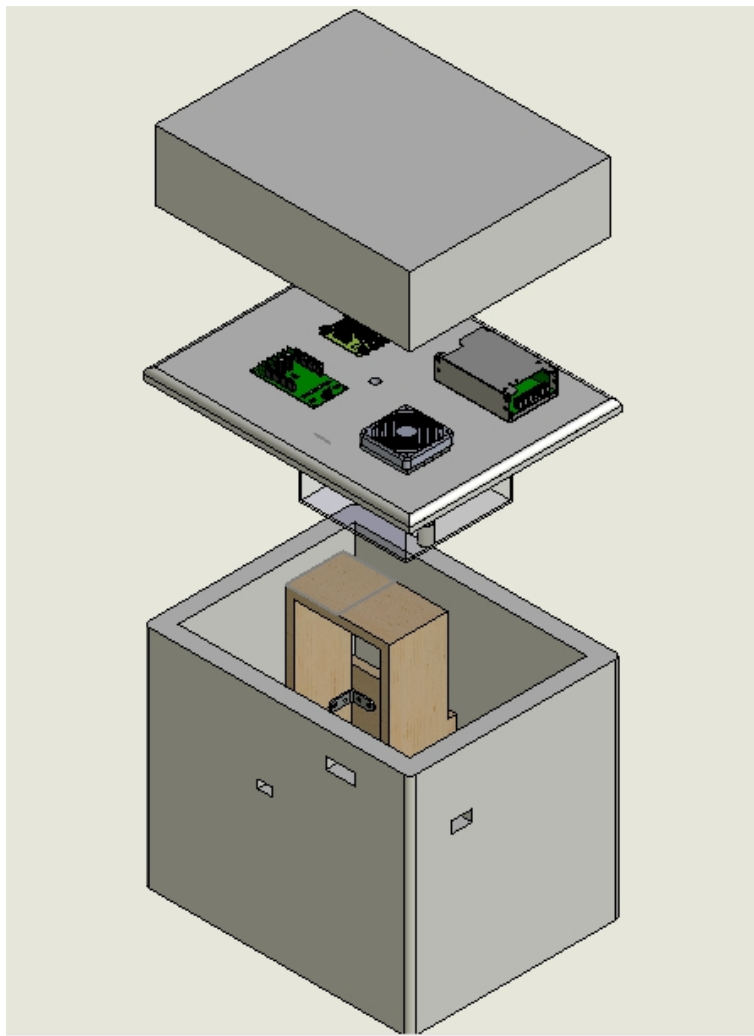


Figura 6.3: vista isométrica explodida do protótipo

Este protótipo foi construído com sucesso, apesar de ter apresentado grande dificuldade no quesito vedação de seus componentes, tendo sido alterado mais de uma vez até alcançar a configuração apresentada.

Abaixo pode-se observar alguns detalhes do protótipo construído.

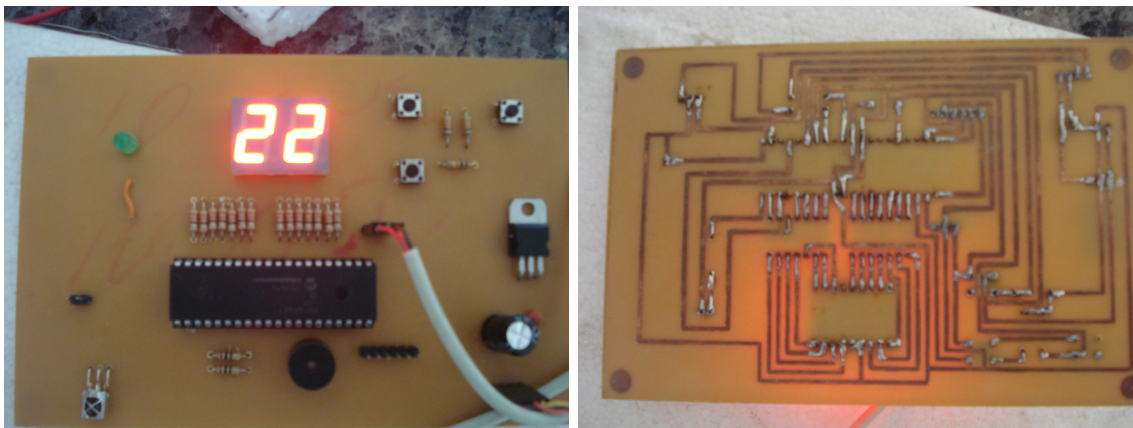


Figura 6.4: Detalhe da interface humano-máquina e do microcontrolador

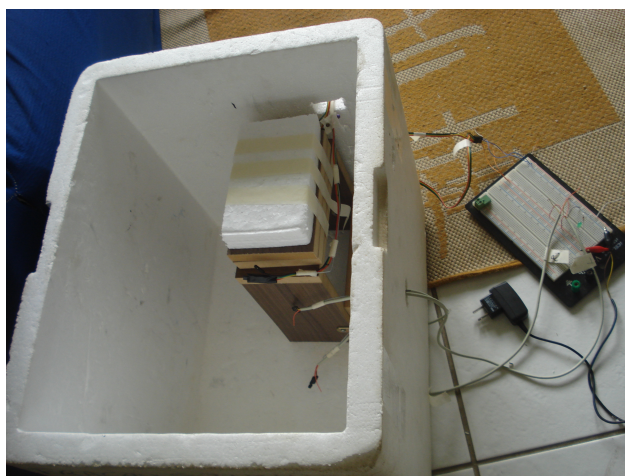


Figura 6.5: Volume fechado (caixa de isopor) a ser climatizado



Figura 6.6: Detalhe do sensoreamento distribuído na caixa

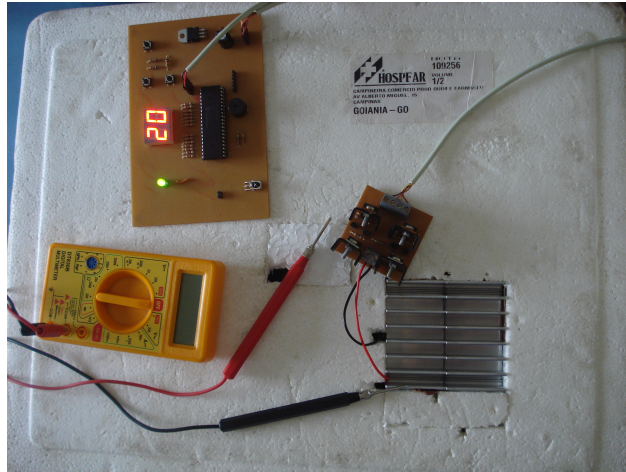


Figura 6.7: Circuitos de controle e de potência sobre a tampa da caixa fechada



Figura 6.8: Reservatório de água e tubos

7. Testes

7.1 Teste inicial

O primeiro teste realizado consistiu em submeter uma pastilha termoeletrica, fixada em uma estrutura isolada termicamente do exterior, a diferentes correntes elétricas, medindo a variação de temperatura em ambas as faces da pastilha e em alguns pontos estratégicos do interior dessa estrutura isolada. Fazendo a função desta, foi escolhida uma caixa de isopor nas dimensões de 400x300x350 mm. Para alimentação, foram utilizadas duas fontes pequenas com saída de 5V e máxima corrente de 800mA para os módulos de sensores, que são elementos de baixa potência, e uma fonte com saída de 12V e máxima corrente de 20A para alimentar a placa de Peltier. Para o sistema de dissipação de calor, foi inicialmente utilizado um *cooler* convencional para processador de computador sem a fixação da estrutura de aletas.

Logo no início do teste, o que se observou foi o superaquecimento da face quente e o aquecimento indevido da face que deveria ser resfriada, mostrando estar o sistema de dissipação de calor subdimensionado. Ao observar-se o aquecimento indevido da face fria durante os primeiros 5 segundos de funcionamento, houve a necessidade da interrupção do teste e não foram obtidos, portanto, resultados significativos do funcionamento da placa no primeiro teste.

Assim, uma nova solução para dissipação foi projetada: a fixação de uma estrutura de aletas juntamente ao *cooler*. Resultados dos testes do sistema com a nova configuração podem ser observados na próxima seção.

7.2 Testes para seleção do dissipador

Para a seleção da estrutura de aletas, foram realizados novos testes comparativos medindo a temperatura mínima alcançada na face fria com cada uma das quatro diferentes aletas que o grupo

dispunha. As duas melhores foram selecionadas para serem utilizadas na face quente e, eventualmente, na face fria. Ao utilizá-las, a face fria chegou à temperatura de 10°C em menos de 1 minuto de operação, resultado muito promissor. As tabelas dos valores obtidos com as quatro aletas são apresentadas e discutidas ainda nessa seção.

Deve-se, inicialmente, salientar que este teste foi realizado sem nenhum tipo específico de transferência de calor com a face fria, o que diminui o rendimento da placa de Peltier, já que seu rendimento máximo ocorre quando a diferença de temperatura entre as faces é infinitesimal. Porém, desse modo, fica mais intuitivo observar a capacidade de resfriamento da pastilha. As medições foram realizadas a cada 5 segundos e as estruturas aletadas foram numeradas de 1 a 4.

7.2.1 Primeiro teste dos dissipadores

O primeiro teste foi feito com corrente entre 1 e 2 Ampères. O gráfico a seguir apresenta o resultado para as 4 aletas diferentes.

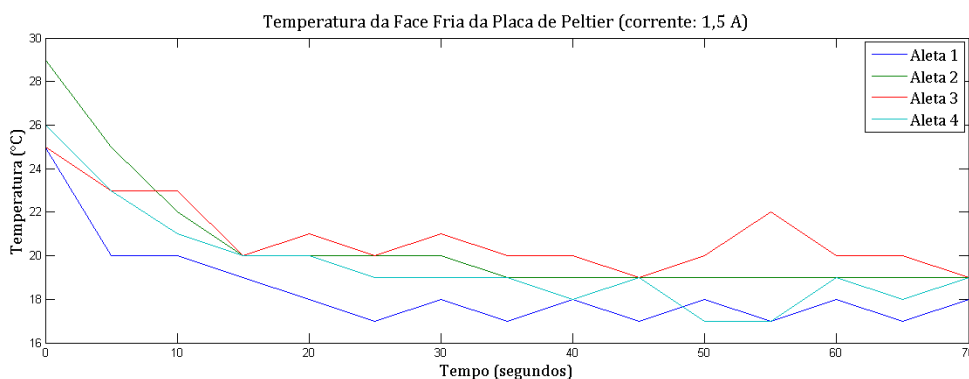


Figura 7.1: Teste aletas - 1,5 A

Através desses resultados, as aletas 1 e 4 foram pré-selecionadas.

7.2.2 Segundo teste dos dissipadores

A seguir novos testes foram feitos com essas duas, porém dessa vez com correntes entre 4 e 5 Ampères. Os resultados obtidos estão representados no gráfico a seguir.

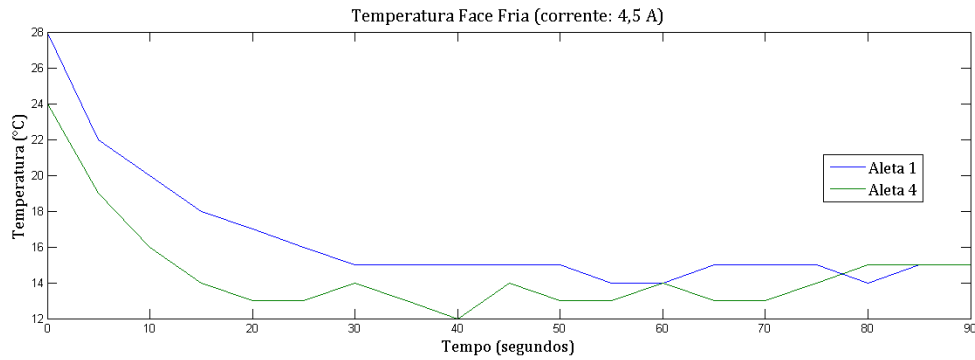


Figura 7.2: Teste aletas - 4,5 A

Já nesses testes, um aumento significativo na temperatura do dissipador foi observada, mostrando que para altas correntes o sistema de dissipação de fato é um fator limitante. Como pode ser observado, a Aleta 1 alcançou uma diferença de $14^{\circ}C$ em apenas 1 minuto, enquanto a Aleta 2 alcançou uma diferença de $12^{\circ}C$ em menos de 1 minuto.

7.2.3 Terceiro teste dos dissipadores

Para finalizar, o mesmo teste foi realizado, porém utilizando uma corrente entre 6 e 7 Ampères. Os resultados obtidos estão representados no gráfico a seguir.

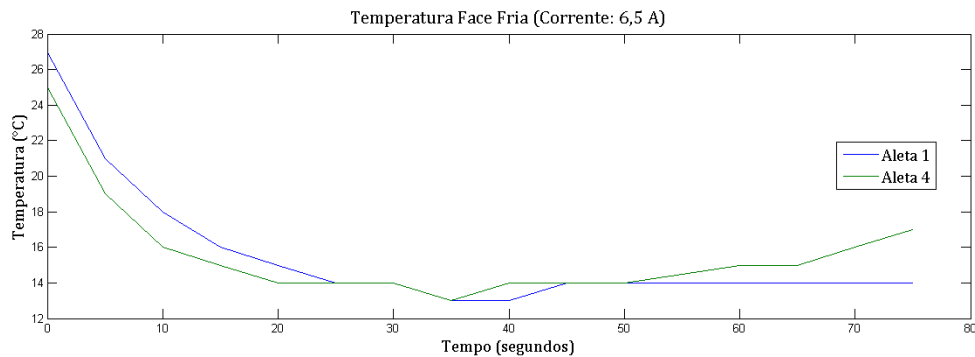


Figura 7.3: Teste aletas - 6,5 A

Como pode ser observado, a Aleta 1 alcançou uma diferença de $13^{\circ}C$ em menos de 1 minuto, enquanto a Aleta 2 alcançou uma diferença de $11^{\circ}C$ também em menos de 1 minuto. A descrição do protótipo mostrou que foram utilizadas duas aletas, uma para cada região monitorada, tais foram as aletas e estes são os testes realizado para comprovar suas eficiências, bem como a do sistema de dissipação.

Quanto ao protótipo, deve-se salientar a dificuldade em fazer a correta fixação de ambas as faces placa de Peltier nas superfícies aletadas. Problemas nesse aspecto prejudicaram a aquisição de uma série de dados , que foram descartados por erro de construção, nos quais a temperatura da água permaneceu inalterada.

7.3 Teste final: controle em malha fechada

Após a seleção adequada dos dissipadores de calor a serem utilizados, pode-se então voltar ao teste com o controle em malha fechada. Como já descrito, um módulo de sensoriamento foi responsável por medir a temperatura em diversas partes do protótipo. Abaixo pode-se observar os resultados do teste.

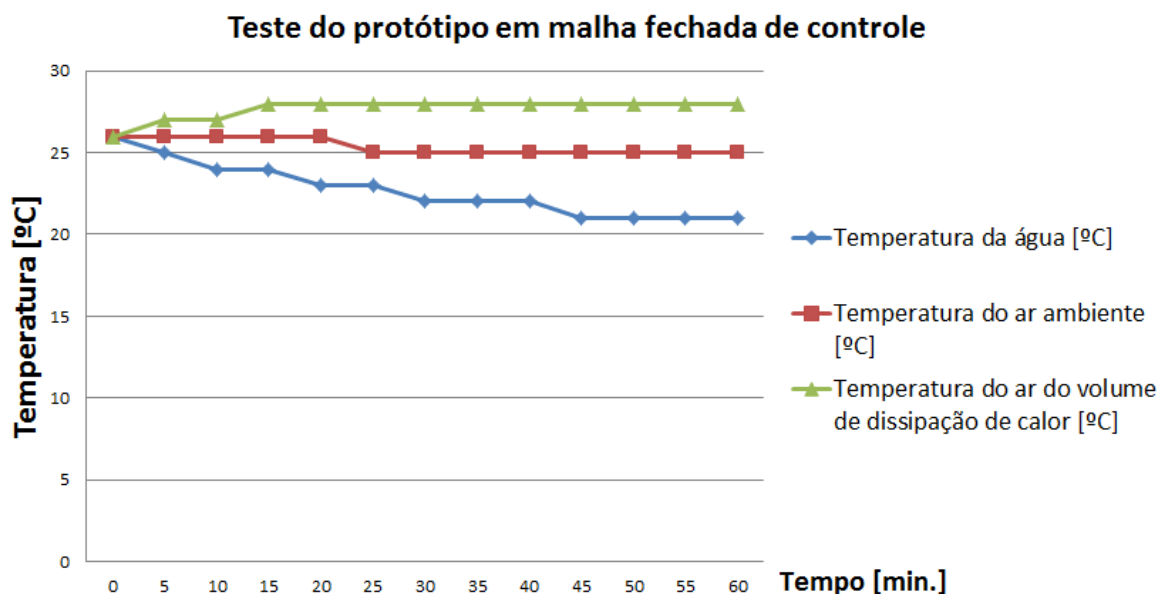


Figura 7.4: Teste final

A duração do teste foi de 1 hora e os resultados obtidos para as temperaturas da água e do ar não representaram o esperado. Após o período de teste, verificou-se uma alteração de apenas 1 grau Celsius no ar, apesar da variação da temperatura da água ter sido de 5 graus Celsius. Além disso, notou-se que a dissipação de calor durante o teste não representou um problema para o funcionamento do sistema, já que houve uma variação na temperatura do compartimento de dissipação de apenas 2 graus Celsius.

Idealmente, a diferença de temperatura entre temperatura real do ar e temperatura desejada do

ar deveria ser nula - o que consiste o objetivo do sistema de controle. Além disso, as diferenças entre temperatura do ar, da água e da superfície da pastilha de Peltier deveriam ser infinitesimais, pois a transferência de calor entre os subsistemas seria responsável por equilibrar as temperaturas até que a temperatura desejada fosse atingida e essa diferença fosse, então, nula. Por último, a temperatura do compartimento de dissipação não poderia se elevar ao ponto de interferir na troca de calor dos outros subsistemas. Isso ocorreria caso ambas as faces da pastilha passassem a aquecer, sinalizando que o efeito Joule corresponderia à uma geração de energia térmica maior do que a retirada pela pastilha do ambiente através do efeito termoelétrico - único dos fatos descritos que não aconteceu durante o teste.

Utilizando os resultados da seção 7.2 (em malha aberta de controle) como base comparativa para o comportamento do sistema e a situação ideal de funcionamento do protótipo descrita acima, pode-se então chegar às seguintes conclusões:

- **Materiais utilizados no reservatório de água e nos tubos são inadequados e impediram uma boa transferência de calor:** como observado, houve uma diferença significativa de até 4 graus Celsius entre temperatura do ar e da água, que se manteve inalterada durante o período final do teste, sinalizando uma transferência de calor deficitária na sua interface;
- **Baixa precisão na montagem causou invólucros de ar e acúmulo de partículas entre componentes, dificultando a transferência de calor ideal:** como o material do reservatório impedia a transferência de calor ideal entre água e ar - caso em que ambos compartimentos deveriam possuir uma diferença de temperatura menor do que 1 grau Celsius -, a temperatura da água diminuiu em relação à do ar, que é a referência para o sistema de controle. Assim, dada a diferença remanescente entre temperatura real do ar e temperatura desejada, ou seja, diferença entre temperatura realimentada no controle e temperatura referência do controle, o sistema de controle saturou e forneceu cerca de 10,5 Amperes à pastilha de Peltier - limite máximo de corrente definido no *software* do microcontrolador para que não hajam danos à pastilha. Isso deveria causar, idealmente, uma mudança de temperatura ainda mais acentuada na água - resultado esperado devido à comparação com os resultados obtidos nos testes anteriores em malha aberta, onde a alteração da temperatura do ar quando não havia nenhum outro material de interface com pastilha se mostrou maior, equivalente a 14°C. Portanto, pode-se atribuir tal diferença na variação de temperatura não só à troca de calor entre reservatório e

ambiente, mas também à perdas geradas na interface entre pastilha e água, por uma precisão de montagem do sistema insuficiente.

8. Conclusão

Apesar de pouco explorado no Brasil, o uso de teto ou piso radiante no controle de temperatura em ambientes internos configura-se como uma alternativa ao uso de aparelhos condicionadores de ar ou aquecedores elétricos convencionais. Visando explorar tal alternativa, foi proposto um sistema que utiliza essa configuração aliada a um módulo de controle. O projeto inclui também a construção de um protótipo, que, em conjunto com as simulações, permitem uma análise mais completa do comportamento do sistema.

Tal solução foi apresentada incluindo a escolha dos principais componentes de atuação e sensoriamento, simulações referentes ao controle projetado, desenvolvimento e considerações a respeito da planta térmica e, por fim, a arquitetura e alguns detalhes construtivos do protótipo. Alguns dos componentes, como o sensor de temperatura LM35 e o módulo de efeito Peltier (pastilha termoeletrica), foram abordados com maior detalhamento, incluindo especificações técnicas quando pertinentes.

Quanto ao sistema de controle, um modelo foi desenvolvido a partir da técnica de Capacitância Global e simulações foram geradas através do *software* Matlab. Tais simulações indicaram que o sistema alcançou a resposta desejada em um tempo consideravelmente curto.

Como resultado da construção do protótipo, salienta-se a importância do correto isolamento das partes em contato com água, a dificuldade (e fundamental relevância) da fixação da placa Peltier em contato com ambas as superfícies aletadas e, por fim, o devido dimensionamento do subsistema de dissipação do calor gerado, ressaltando que descuidos com esses aspectos causaram a queima de duas placas por superaquecimento.

Além dos testes realizados, uma série de outros testes podem ser feitos no protótipo visando definir detalhes da construção de um sistema similar ao proposto como produto, bastando alterações simples, principalmente as previstas e descritas na seção Protótipo.

Como sugestão de trabalhos futuros, um segundo protótipo na configuração do sistema proposto

pode ser construído e testado, obtendo dados mais específicos do funcionamento do sistema e definindo alguns parâmetros restantes importantes para a definição de algo semelhante a um produto. Os testes com este poderiam ser realizados em campo, com materiais mais adequados - com uma resistência à condução térmica menor -, e com uma precisão de montagem maior, podendo-se obter dados mais precisos da eficiência do dispositivo.

Além disso, pode-se estudar o fenômeno da transferência de calor em um ambiente interno de forma mais profunda e realizar uma sofisticação na modelagem térmica do sistema, utilizando métodos numéricos, por exemplo. Pode-se também sofisticar o método de controle utilizado, como realizando um controle distribuído que considere a desuniformidade das perdas do sistema e os compense.

Referências bibliográficas

- [1] X. Jin, X. Zhang, Y. Luo. *A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system*. School of Energy and Environment Southeast University, No. 2 Sipailou, Nanjing 210096, PR China.
- [2] S. Ho, R. Hayes , R. Wood. *Simulation of the dynamic behaviour of a hydronic floor heating system*. Heat Recovery Systems and CHP 1995;15(6):505e19.
- [3] Sattari, B. Farhanieh,. *A parametric study on radiant floor heating system performance*. Renewable Energy 31 (2006) 1617–1626.
- [4] R. Gao, A. Li, O. Zhang , H. Zhang . *Comparison of indoor air temperatures of different under-floor heating pipe layouts*. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China.
- [5] X. Jin, X. Zhang, Y. Luo, R. Cao . *Numerical simulation of radiant floor cooling system: The effects of thermal resistance of pipe and water velocity on the performance*. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, PR China
- [6] J. Miriel, L. Serres, A. Trombe . *Radiant ceiling panel heating-cooling systems: Experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions*.
- [7] U. Konigorski. *Modellbildung und Simulation*.
- [8] National Semiconductors. Datasheet *LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D Precision Centigrade Temperature Sensors*.
- [9] Hebei IT. Datasheet *TEC - 12175*
- [10] Website. <http://www.peltier.com.br/intro.htm>
- [11] J. Dieckmann, K. Roth, J. Brodrick . *Radiant Ceiling Cooling*. American Society of Heating,

Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

[12] International Bureau of Weights and Measures (2006), The International System of Units (SI) (8th ed.), ISBN 92-822-2213-6

A.2 Circuito de potência

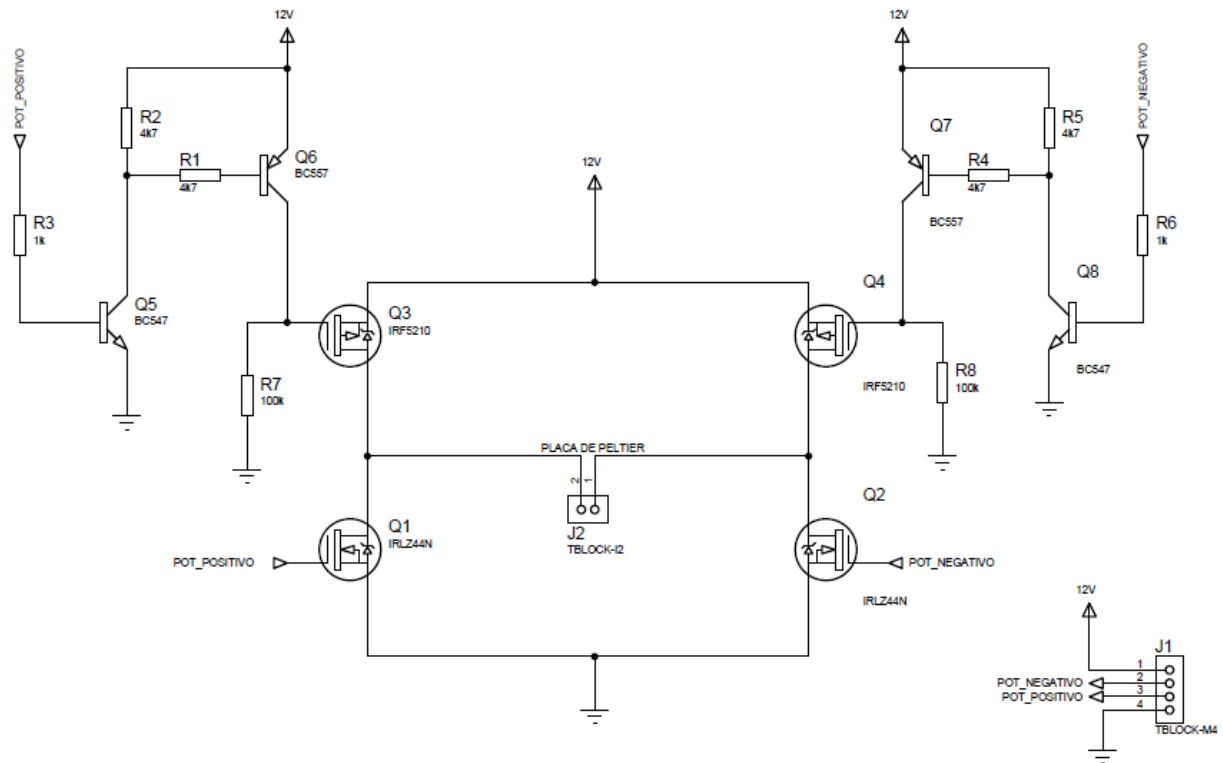


Figura A.2: Projeto do circuito de potência

A.3 Código da comunicação por infra-vermelho

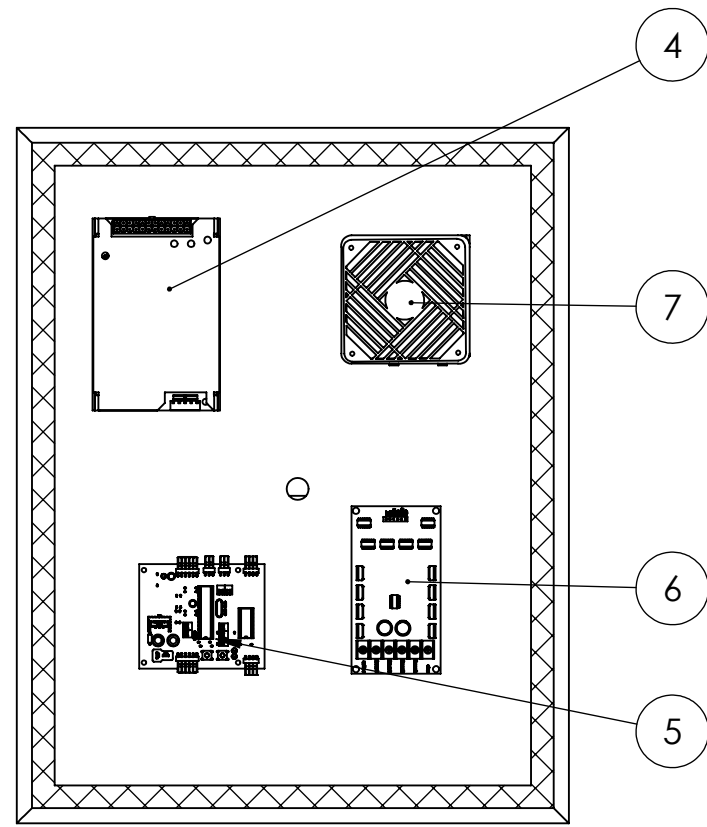
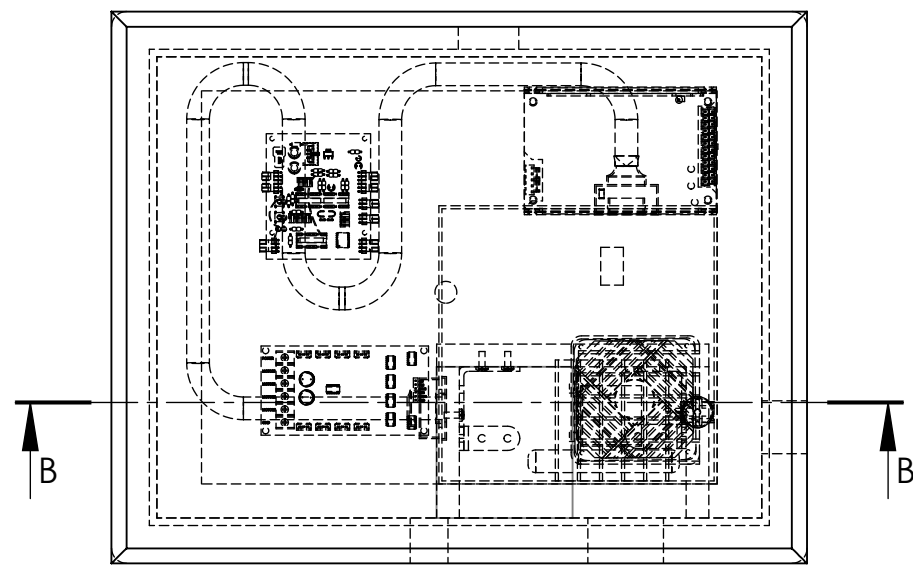
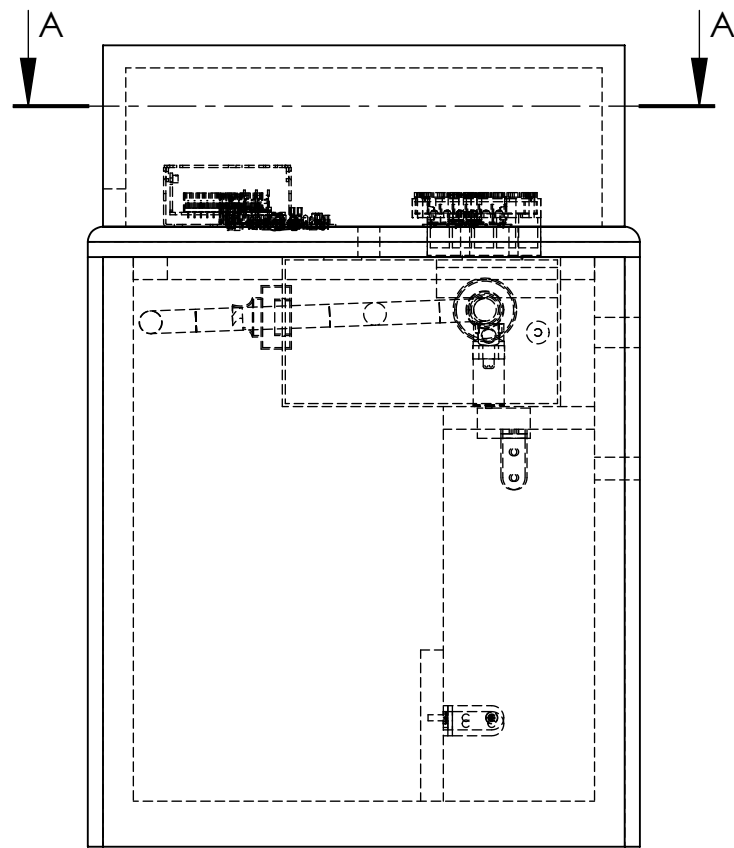
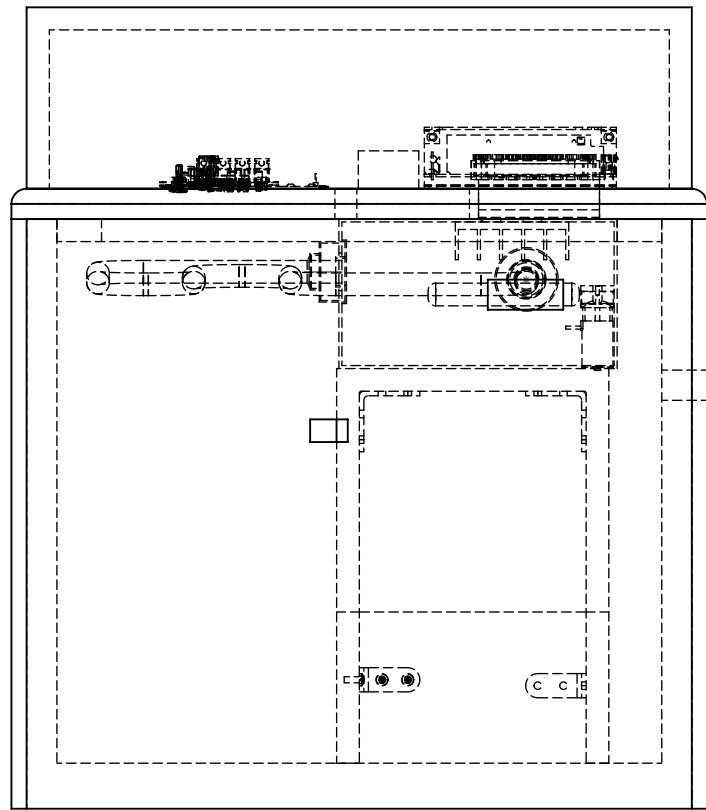
```
#include <IRremote.h>

int RECV_PIN = 22;
IRrecv irrecv(RECV_PIN);
decode_results results;

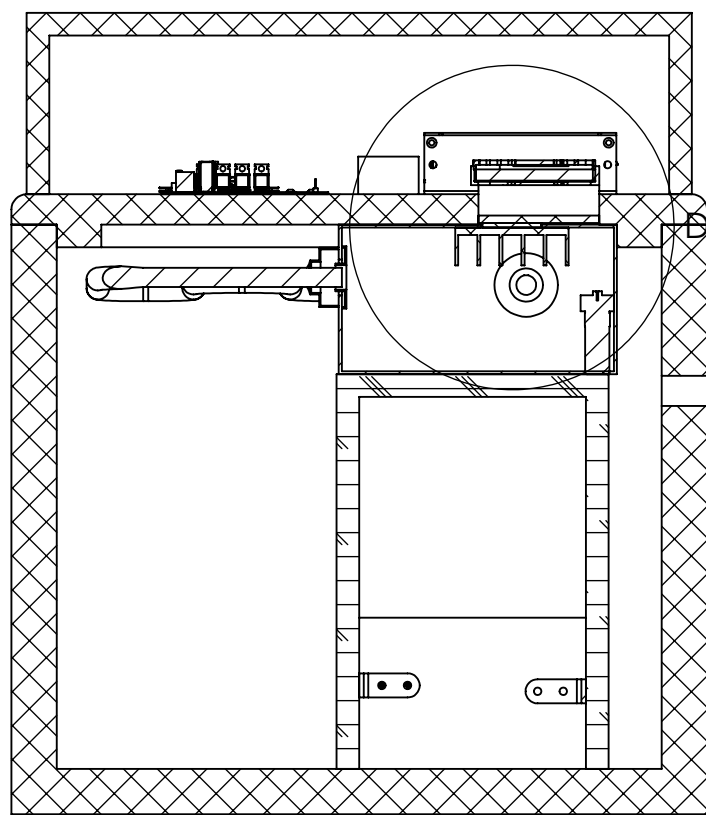
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  irrecv.enableIRIn(); // Inicia o receptor
}
```

```
void loop() {  
  if (irrecv.decode(&results)) {  
    Serial.println(results.value, HEX);  
    irrecv.resume(); // Recebe o próximo valor  
  }  
}
```

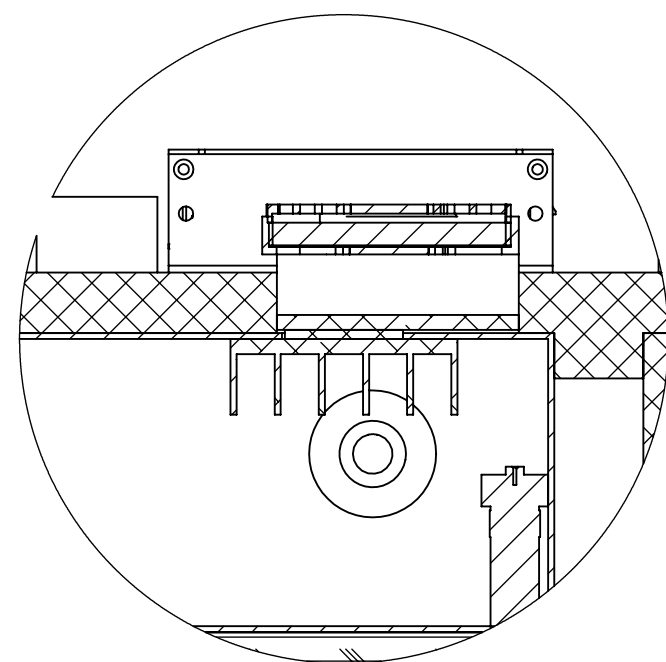
B. Desenho de Conjunto



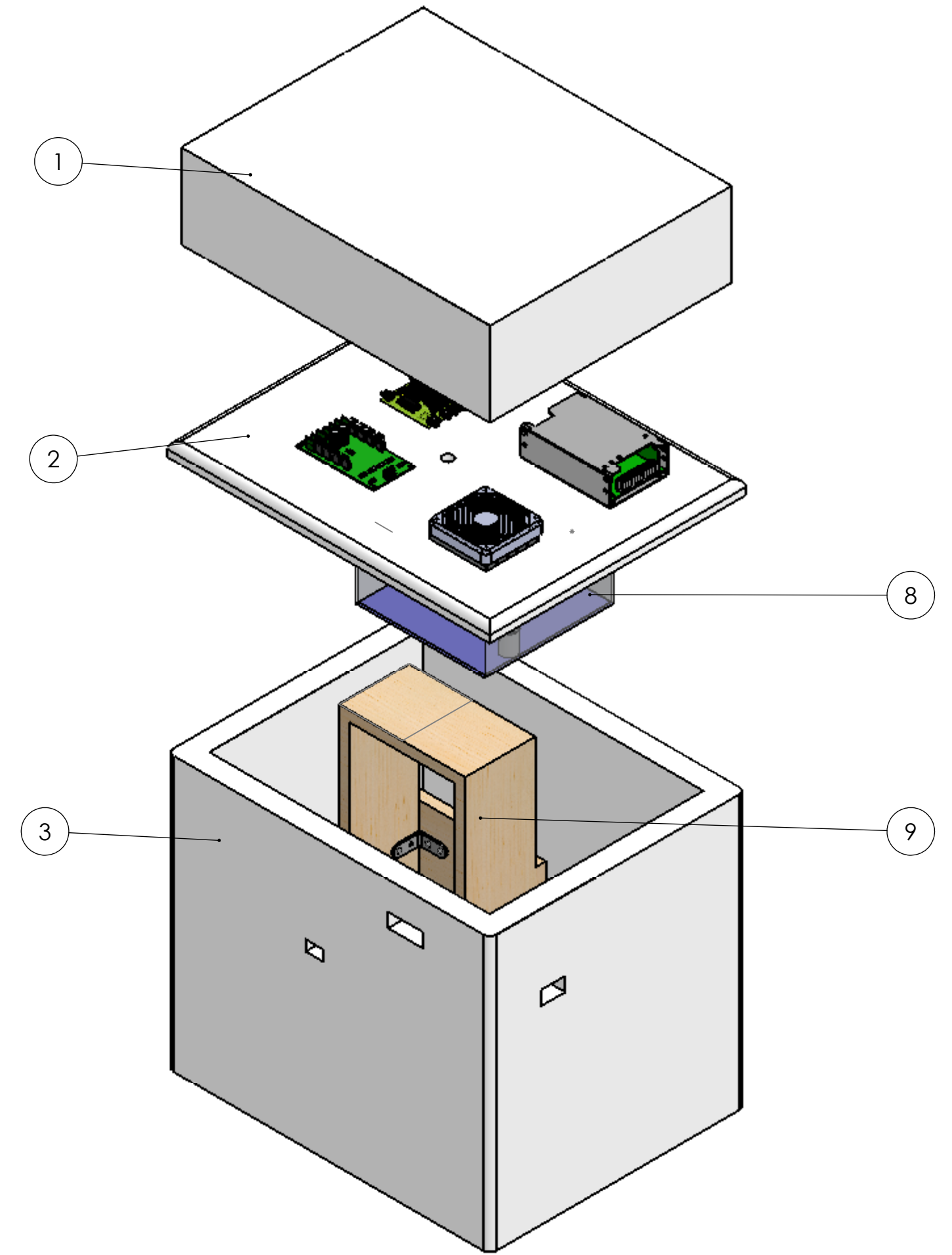
SEÇÃO A-A



SEÇÃO B-B

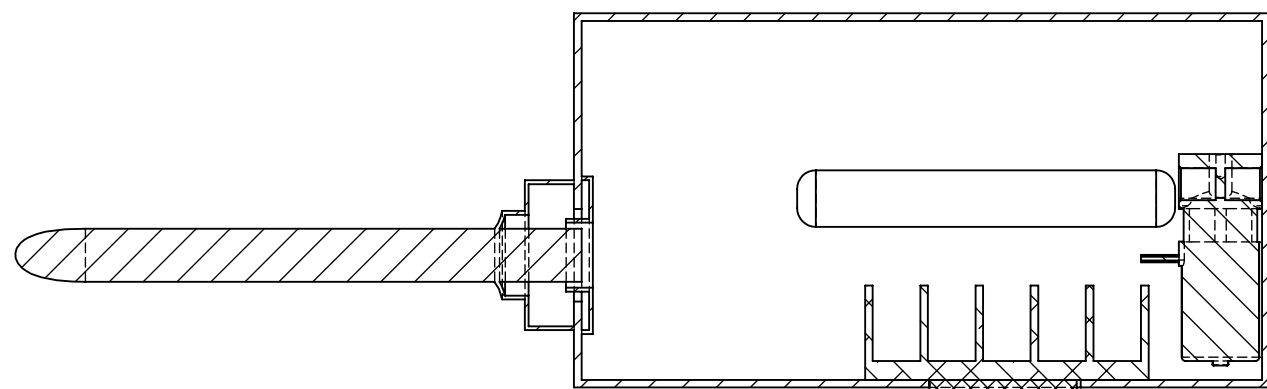
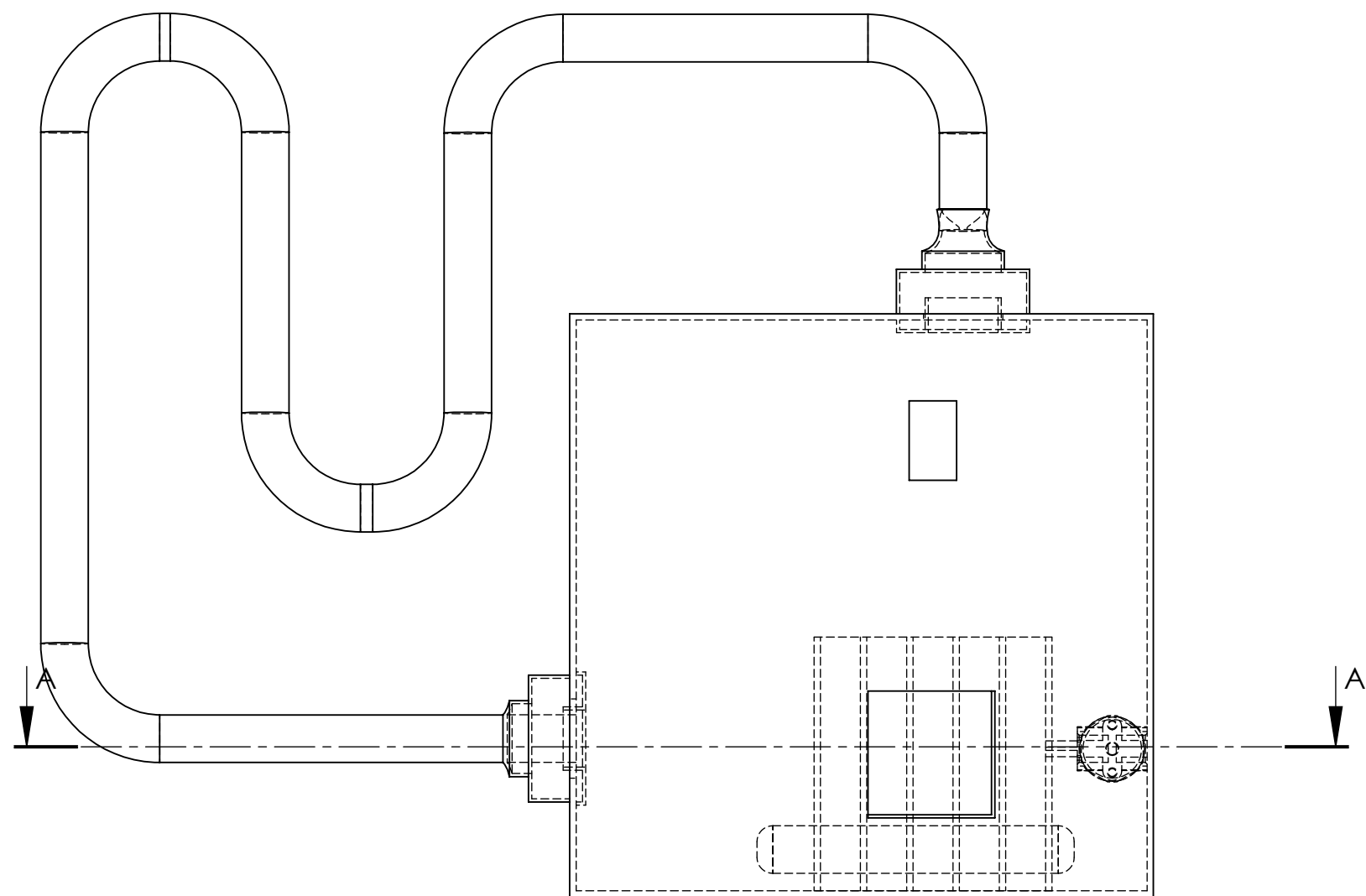
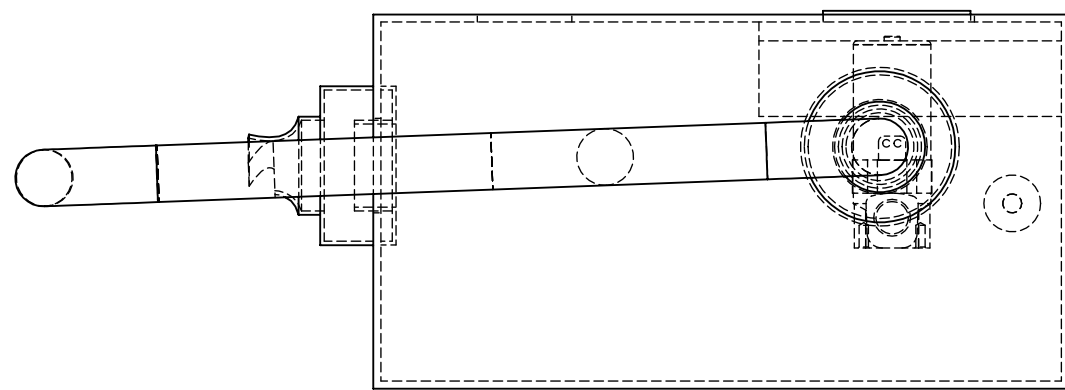
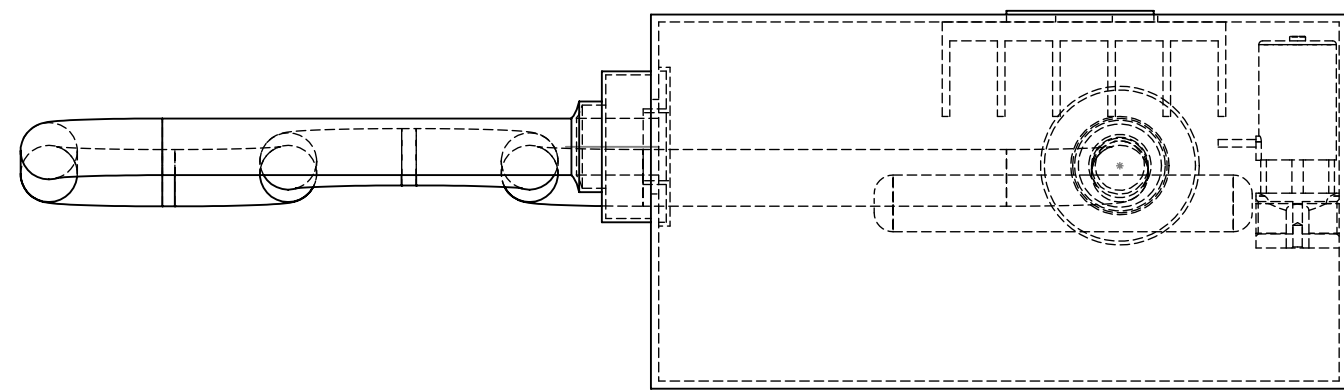


DETALHE D
ESCALA 2 : 5

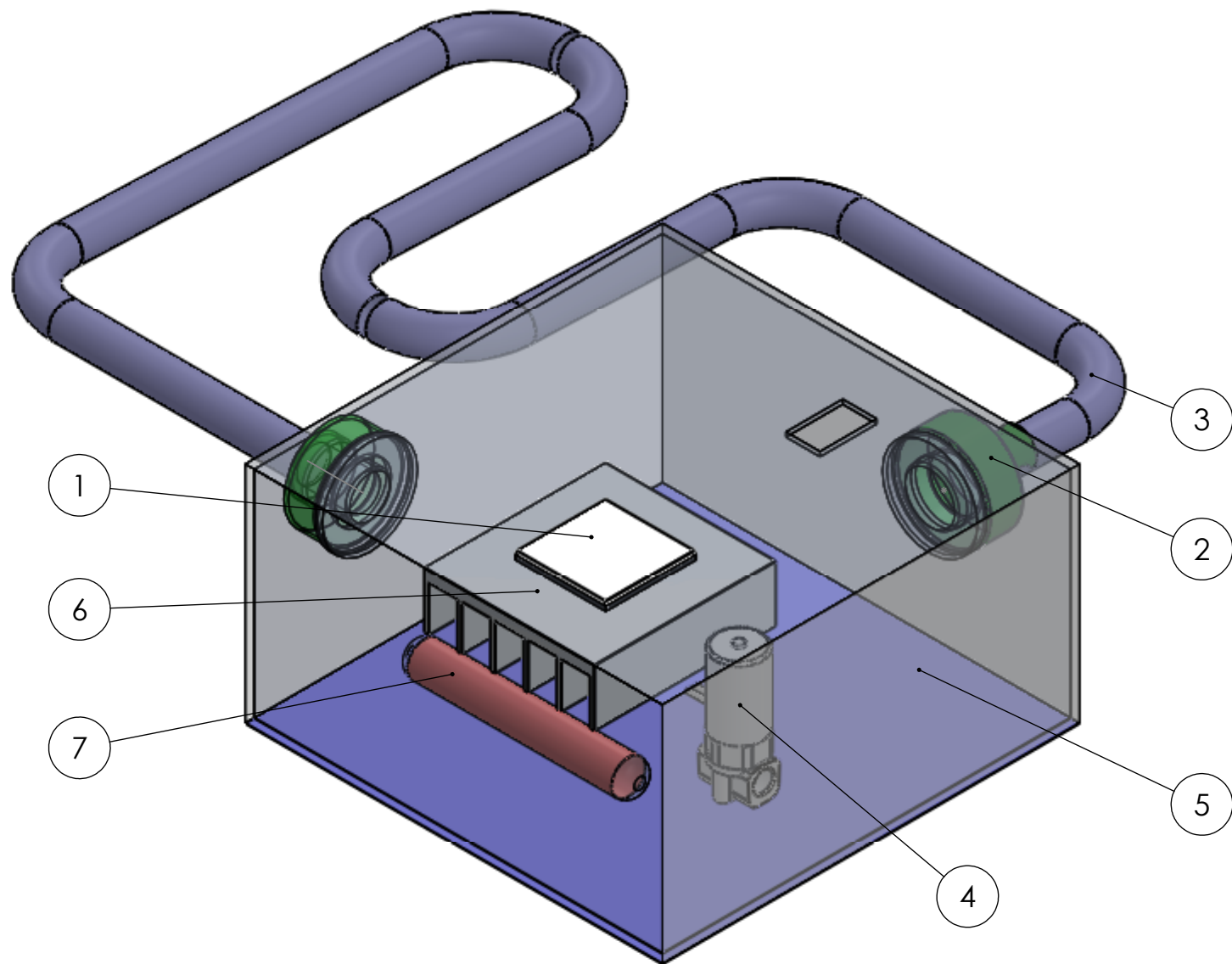


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Isopor 1	Isola a região de dissipação	1
2	Isopor 2	Interstício regiões monitoradas	1
3	Isopor 3	Isolamento região controlada	1
4	Fonte Alimentação	Fonte CC 12V	1
5	Placa de Controle		1
6	Ponte H		1
7	Sist. Dissipação	Fan combinado com Aletas	1
8	Sist. Refrigeração	Mais detalhes em 1.2	1
9	Suporte	Suporte de Madeira	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	



SECTION A-A



ITEM NO.	PARTE	DESCRIÇÃO	QTDE
1	Pastilha Térmica	Placa de Efeito Peltier 15A	1
2	Adaptadores	Adapt. padrão para 1/2"	2
3	Tubulação		1
4	Bomba	Circulação de Água 1.5W	1
5	Reservatório	Placa de Efeito Peltier 15A	1
6	Dissipador	Estrutura de Aletas	1
7	Termômetro	Term. de Álcool p/ Aquários	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN:		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
Jonas Lucchesi						9/11/2012		Sistema de Refrigeração			
CHK'D		Guilherme Castro				9/11/2012					
APPR'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		A2	
								Reservatório e Anexos			
								SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	
						WEIGHT:					