

**UNIVERSIDADE FED AUTOMAÇÃO  
DAS5203 - INSTRUMENTAÇÃO PARA CONTROLE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CTC - CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E**

**Andrei Donati  
Fernando Battisti**

**RELATÓRIO FINAL -  
APARELHO TÉRMICO PARA TRATAMENTO DE LESÕES**

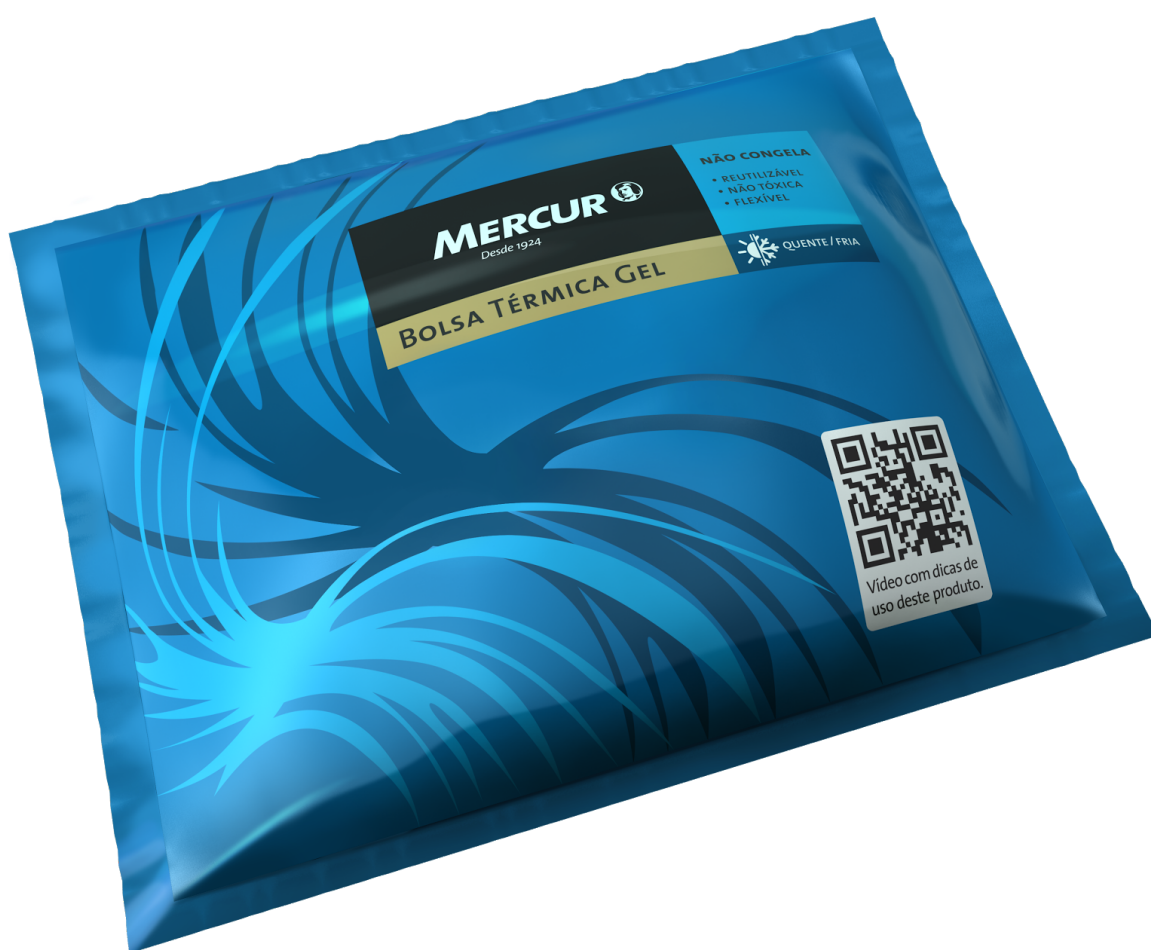
Florianópolis, SC  
2017

# Sumário

<b>Introdução</b>	<b>4</b>
Figura 1 - bolsa térmica comum utilizada para tratamento de lesões	4
<b>Desenvolvimento</b>	<b>6</b>
Construção Física	7
Elétrica	13
Modelagem	17
Controle	20
Software	23
<b>Resultados Obtidos</b>	<b>26</b>
<b>Trabalhos futuros</b>	<b>27</b>
<b>Conclusão</b>	<b>28</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>29</b>
<b>Direito de uso e tira-dúvidas</b>	<b>30</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>31</b>

# Introdução

O seguinte documento visa apresentar os métodos de desenvolvimento de um protótipo de produto que visa substituir bolsas térmicas utilizadas para tratamento de pessoas lesionadas através de crioterapia. O produto consiste em sistemas que utilizam pastilhas de estado sólido aliado a métodos de controle para gelar uma superfície metálica que, em contato com a pele, faz o mesmo papel, de maneira mais eficiente, das bolsas térmicas para o tratamento de contusões.



*Figura 1 - bolsa térmica comum utilizada para tratamento de lesões*

A motivação deste trabalho veio de uma lesão de uma pessoa próxima aos autores do projeto, que sempre sentia dificuldades na utilização das bolsas térmicas comuns pois estas não ficavam na temperatura adequada: ou congelada ou levemente fria.

O produto foi carinhosamente apelidado pelos atores do projeto como Gela Pele 3000.

# Desenvolvimento

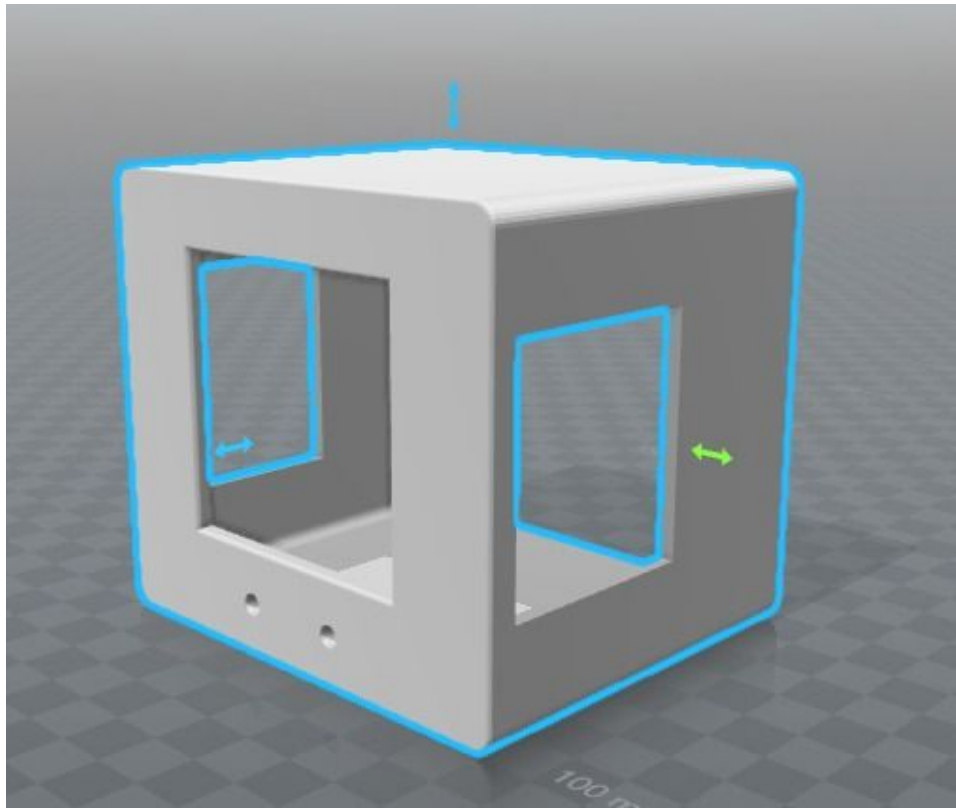
A seguinte seção irá apresentar as etapas de desenvolvimento do projeto. Ela foi dividida entre partes mecânicas, elétricas/eletrônica, modelagem do protótipo e finalizando com o controle do modelo. Estas etapas já estão organizadas em ordem cronológica.

## Construção Física

A parte mecânica do projeto é uma das mais cruciais pois como a função mais importante do produto é retirar energia de um local e transferi-lo para outro é necessário planejar detalhadamente o fluxo de calor bem como a estratégia de sensoriamento, a fim de obter os dados corretos de temperatura.

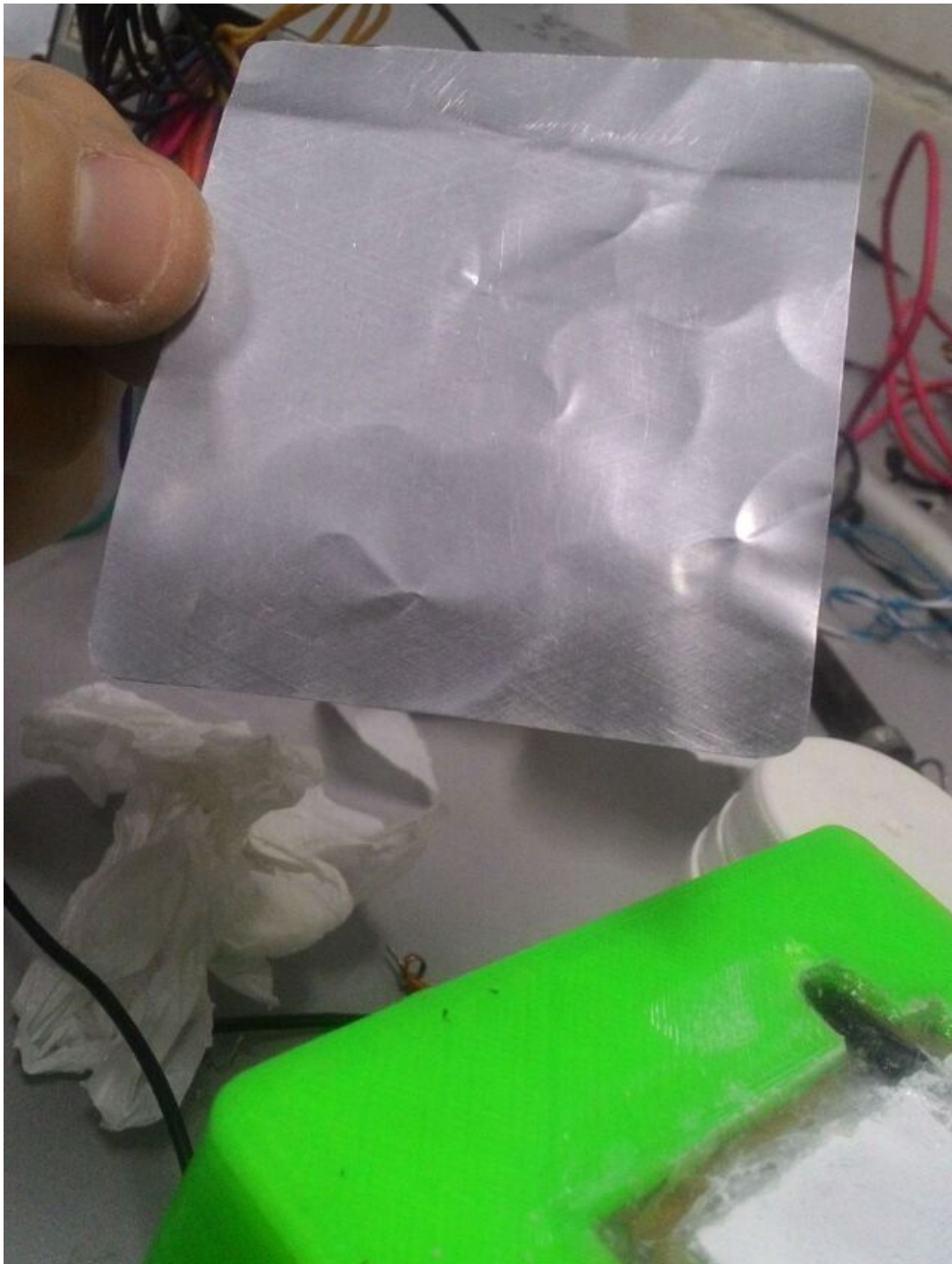
A construção do projeto foi dado em duas partes separadas, conectadas por cabos de sinal e potência (maiores detalhes na seção dedicada a parte elétrica). A parte principal é composta por:

- uma pastilha de peltier TEC1-12706 (72W de potência, 12V x 6A). Esta é a peça que efetivamente forçará o fluxo de calor;
- dissipador térmico de processador. Usado para dissipar o calor gerado pela pastilha de Peltier;
- cooler 70x70mm e 40x40mm de 12V. Usados para ajudar na dissipação térmica. São colocados de forma estratégica para otimizar a retirada de calor;
- Caixa impressa em 3D para acomodar os outros componentes (algumas modificações manuais foram feitas para melhor ajustar os componentes). Abaixo está a modelagem da caixa feita em software apropriado;
- conectores ethernet e de potência;
- dois leds indicadores. Foi usado leds 3mm já com acabamento, mas leds comuns podem ser usados;
- sensores de temperatura NTC. Estes sensores obtém os dados necessários para fazer a malha de controle (explicada em detalhes na seção Controle);
- Chapa metálica usada para transferir o frio gerado pelo Peltier para o músculo do paciente. Para este protótipo, esta peça foi feito com uma latinha de alumínio (este material é um bom condutor térmico e é fina o suficiente para gerar mínima resistência térmica). Um metal sem pintura e que seja plano pode se sair melhor nesta função.



*Figura 2 - sketch da caixa usada como base. Deve ser impressa em 3D*

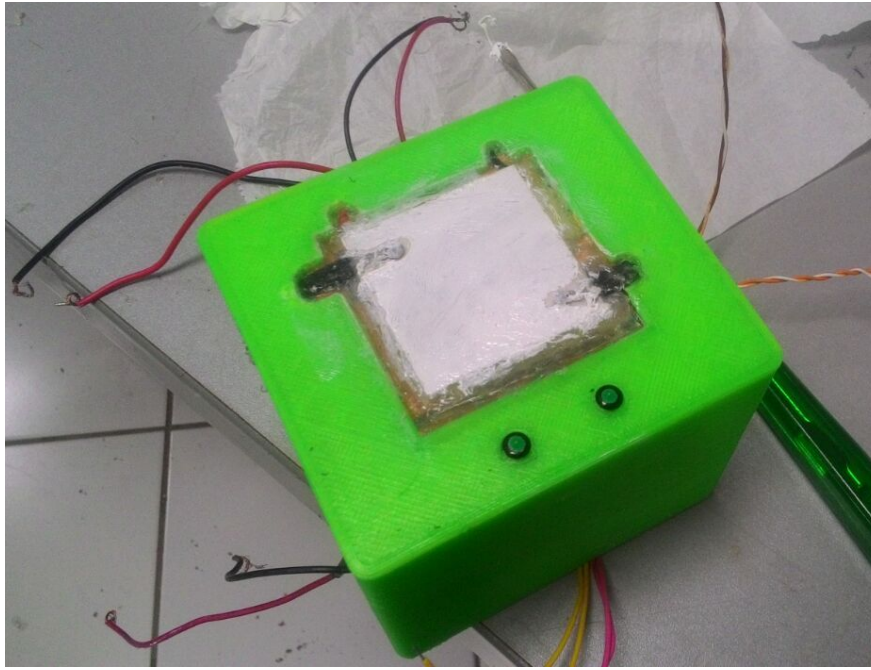
A montagem é bastante dificultosa, visto que ela deve ser feito em um espaço mínimo e que há grande fluxo de calor. A chapa metálica utilizada não é a ideal, mas conseguir oferecer boa condução térmica:



*Figura 3 - detalhe da chapa metálica usada*

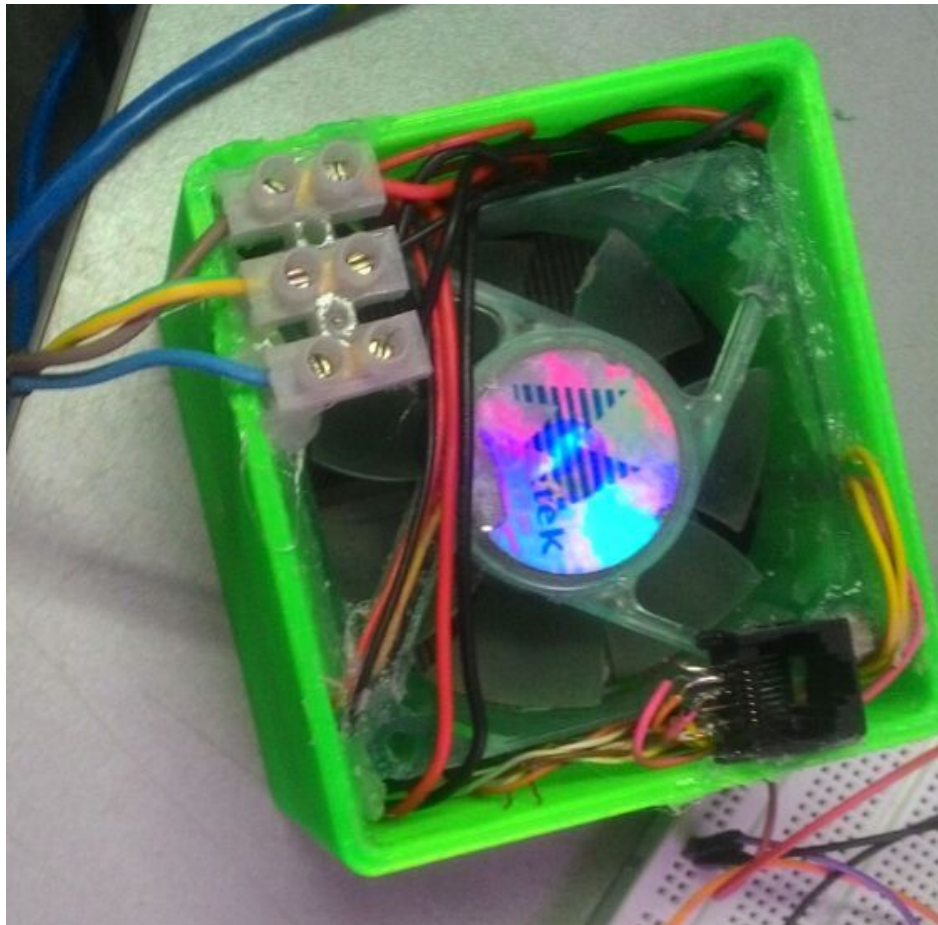
É necessário a colocação de pasta térmica entre o peltier e o os dissipadores, de forma a melhor transmitir o calor gerado.





*Figura 4 - detalhe da pastilha de peltier com pasta térmica*

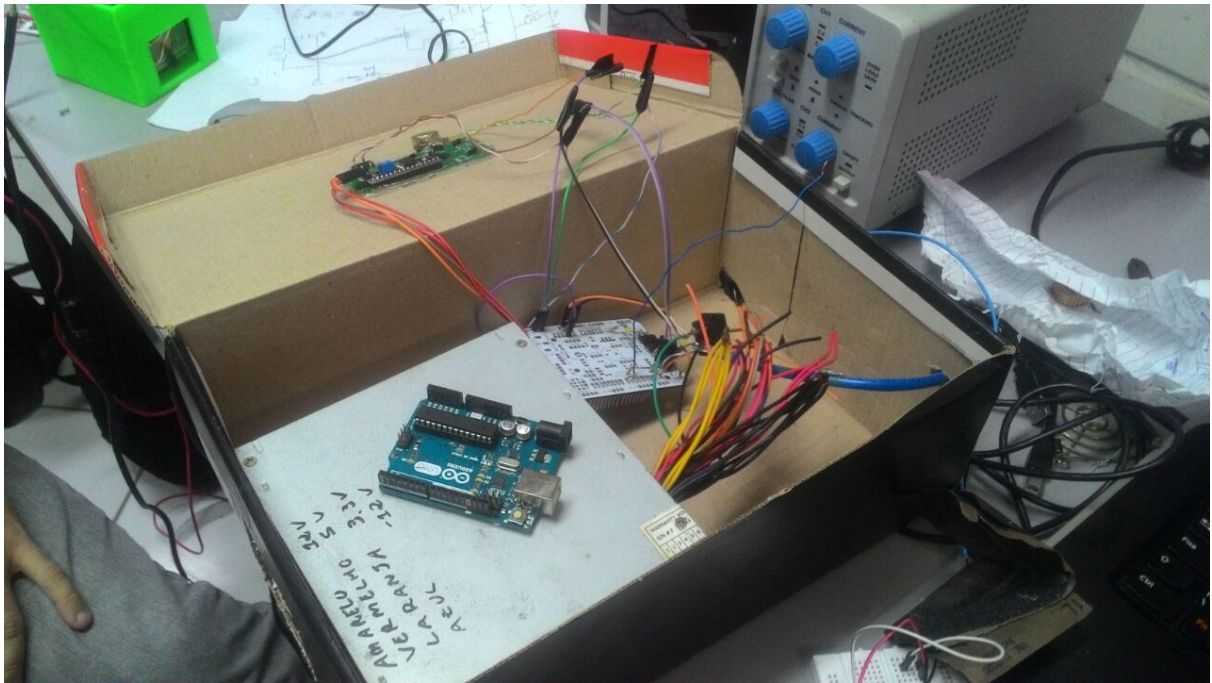
Um cooler foi colocado jogando ar frio sobre o dissipador (cooler 40mm) e o outro foi posicionado retirando o ar quente de cima do dissipador. Esta foi a configuração ideal encontrada pelos idealizadores do projeto:



*Figura 5 - detalhe do cooler que retira ar quente*

A posição dos sensores foi uma questão bastante difícil de acertar visto que eles precisam capturar a temperatura da placa que estará em contato com a pele sem afetar o fluxo de calor. Por estes e outros motivos, o NTC, sensor que é muito pequeno, foi escolhido. Ele foram posicionados entre a pastilha de Peltier e a chapa metálica, um em cada quadrante da pastilha. Para isto, dois pequenos furos foram feitos na chapa metálica.

A segunda parte da montagem mecânica é bastante simples. Ela consiste em um compartimento que consiga abrigar a interface, os botões, a fonte, o controlador e os transistores de potência. No casos deste protótipo, esta parte foi feita em uma caixa de sapato, que resolveu bem o problema. Para melhorar a dissipação de calor da fonte e dos transistores, foi adicionado um cooler na lateral da caixa.



*Figura 6 - construção da segunda parte do protótipo*

## Elétrica

A parte elétrica/eletrônica da montagem apresenta os seguintes componentes:

- circuito de potência (2 transistores MOSFETs IRF740) para acionamento do peltier e dos coolers;
- microcontrolador Arduino Uno (similares podem ser usados);
- circuito de chaveamento dos transistores MOSFETs utilizando um driver comercial TC4420;
- placa de prototipação Prototype Shield, usada para facilitar a conexão entre os componentes (sensores, atuadores, botões, LCD);
- circuito usado como interface, que consiste em um push-button, potenciômetro, 2 leds e um LCD 16x2.

Com certeza, o circuito mais crítico é o de potência, que apesar de ser bastante simples do ponto de vista de componentes, necessita alguns periféricos bem como uma análise mais detalhada tendo em vista a alta corrente que irá circular por ele ( $\sim 4A$ ). Os transistores escolhidos atendem com bastante folga as especificações de corrente, tensão e frequência de chaveamento do projeto.

Outro circuito um pouco mais complexo foi o de acionamento dos MOSFETs, pois teve que ser otimizado em um pequeno espaço (limitações da placa usada).



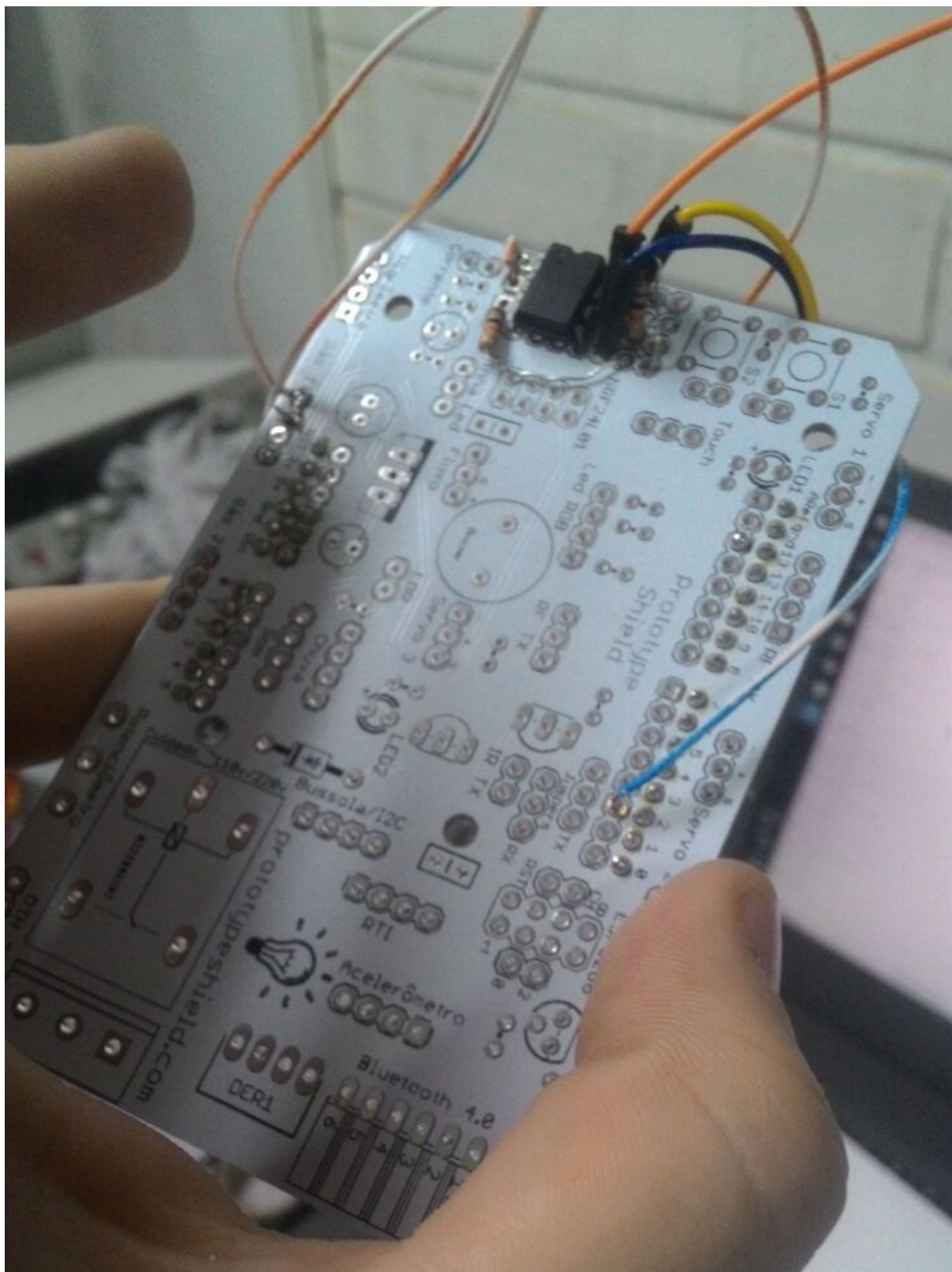
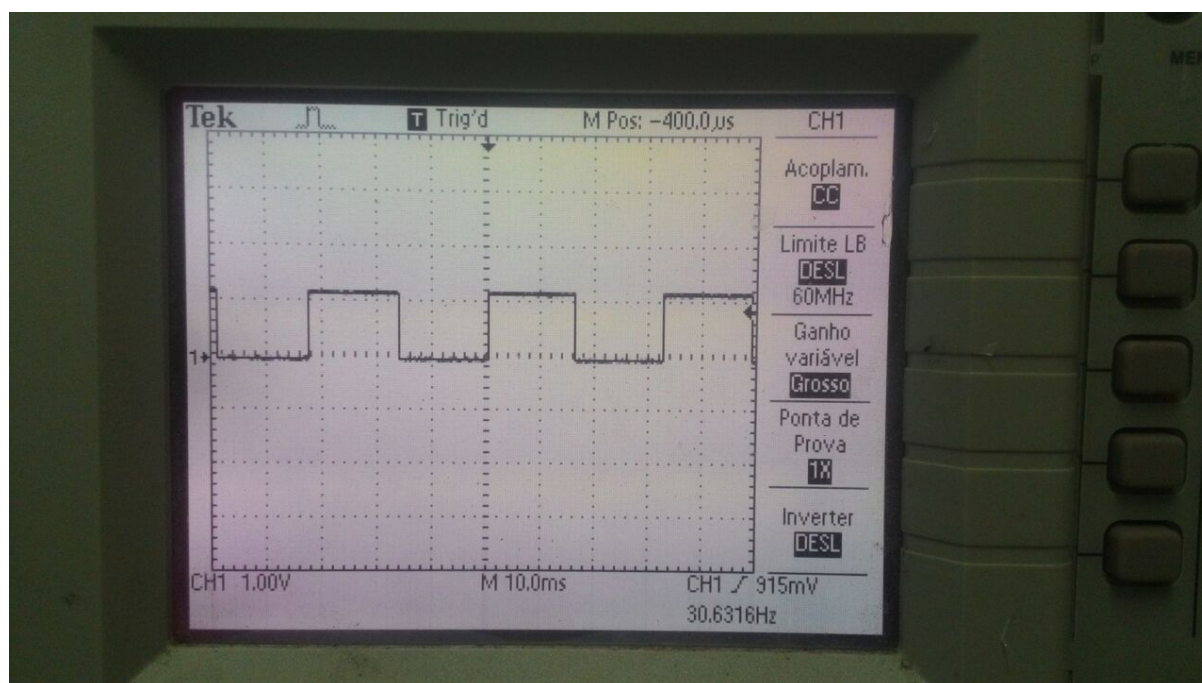


Figura 7 - detalhe da placa Protortype Shield com o circuito de chaveamento do MOSFET

É importante salientar que as escolhas feitas no projeto, em nenhum momento, foram feitas apenas para uma situação didática. Dessa forma, tínhamos o problema da perda de eficiência do Peltier quando submetido a altas frequências de chaveamento (caso do PWM do Arduino). Uma possível solução seria a construção de um conversor Buck de forma a suavizar a forma de tensão sobre o Peltier. Isto geraria encarecimento e uma complexidade extra que foi solucionada através de software, diminuindo a frequência do Arduino para apenas 30,5 Hz sem nenhuma perda para o projeto.



*Figura 8 - teste de frequência do PWM do Arduino*

Outro ponto interessante de destacar da parte eletrônica foi a calibração do NTC. Ela foi feita usando um sensor LM35, de forma que a temperatura do NTC devesse ficar igual a do sensor digital de referência. Os parâmetros ideais encontrados foram setados via software e servem para cálculo da equação de Steinhart–Hart (que descreve o funcionamento do NTC) encontrando a temperatura através da resistência atual do NTC. Maiores detalhes podem ser visto no código em anexo.

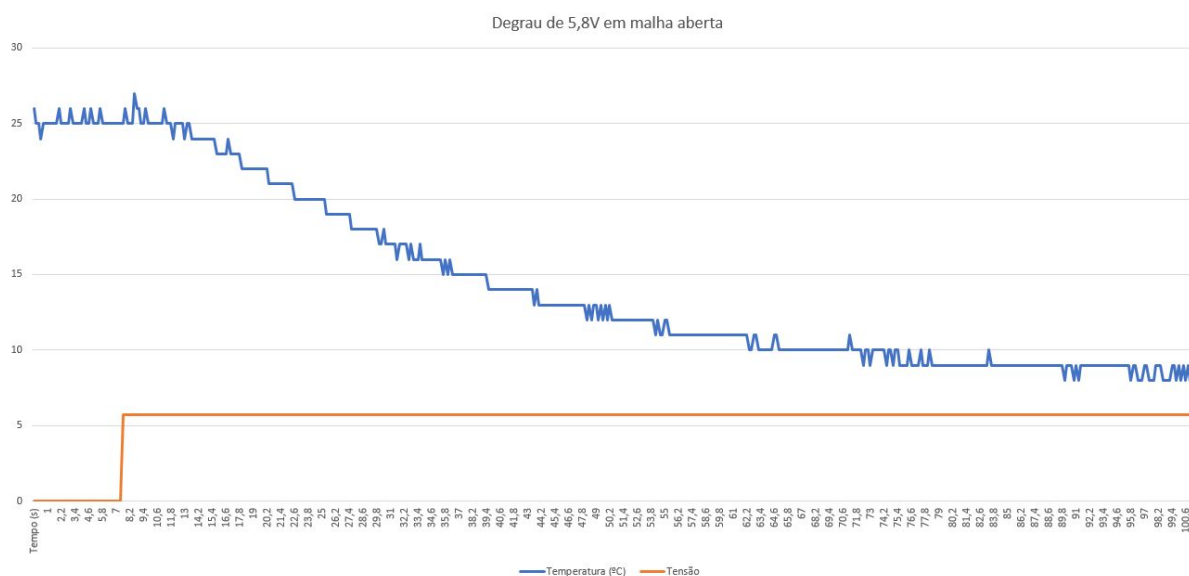


*Figura 9 - esquema completo de ligação do circuito*

## Modelagem

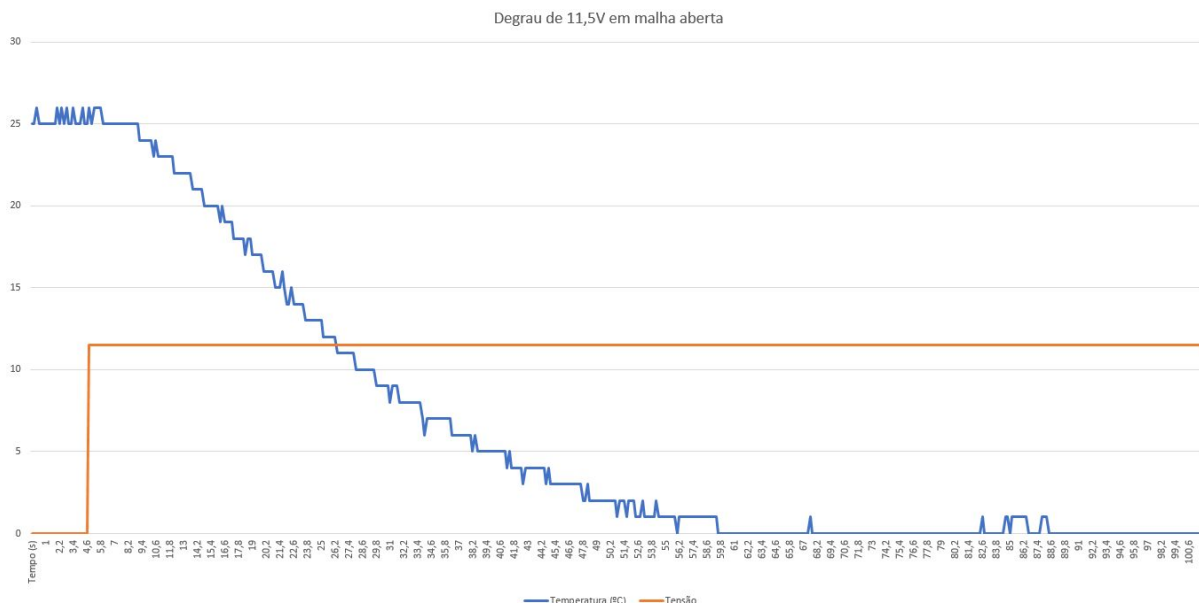
A modelagem do sistema poderia ser feita de duas formas: analiticamente, através de Equações Diferenciais que descrevessem a transferência de temperatura no metal (peça que será o objeto de controle) e usando parâmetros de geração e transferência de calor do Peltier. Como segunda opção, é possível obter o modelo de forma experimental, fazendo um processo de identificação do sistema.

Como a primeira opção é bastante complexa e necessita de parâmetros que nem sempre é possível ter acesso através do datasheet, a segunda opção foi escolhida. Dessa forma, foi feita um teste em malha aberta ao degrau de várias intensidades. Os resultados foram compilados e podem ser vistos no arquivo dados\_teste.xlsx (enviado em anexo). Como principais resultados, temos:

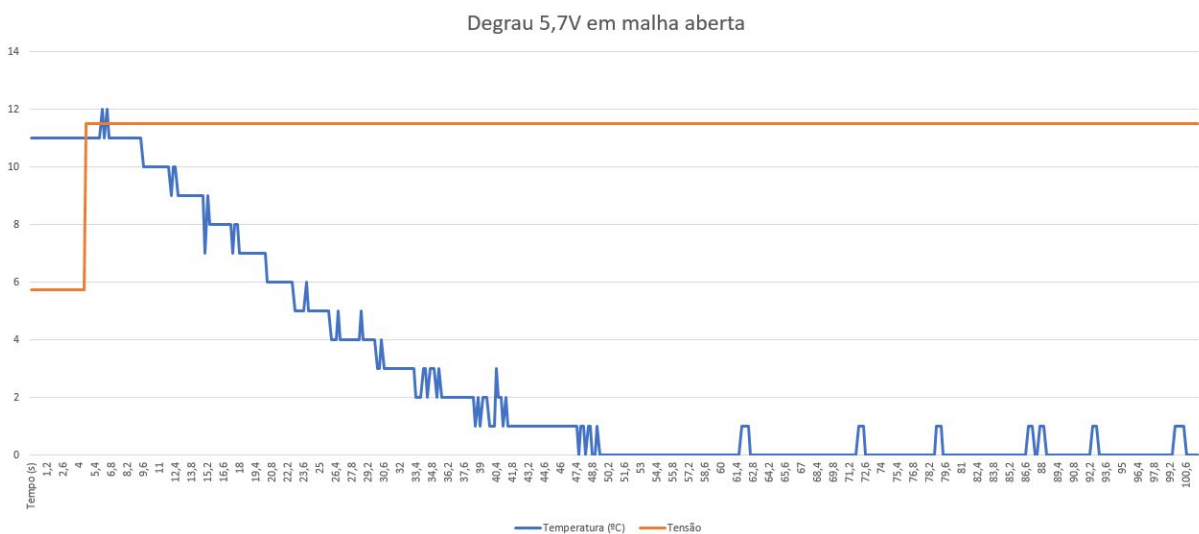


*Figura 10 - teste ao degrau de 5.8V*





*Figura 11 - teste ao degrau de 11.5V*



*Figura 12 - teste ao degrau de 5.7V, partindo da temperatura de 11°C*

Com estes gráficos em mãos, foi possível determinar uma função de transferência que descreve o sistema. Ao fazer isto, os autores encontraram três FTs de primeira ordem (como esperado) que, apesar de parecidas, diferem principalmente no tempo de acomodação do sistema.

Como é esperado pelos autores que o controle trabalhe sempre próximo da sua capacidade máxima, foi escolhido a função de transferência referente ao segundo gráfico. Desta forma, o sistema é representado por:

$$G(S) = \frac{-2,17e^{-4s}}{28,4s+1}$$

Como esperado, a função tem ganho negativo (quanto mais controle, mais diminui a variável do processo), é de primeira ordem (típica de sistemas térmicos), tem um atraso de transporte pequeno e apresenta um tempo de 5% alto (~1min).

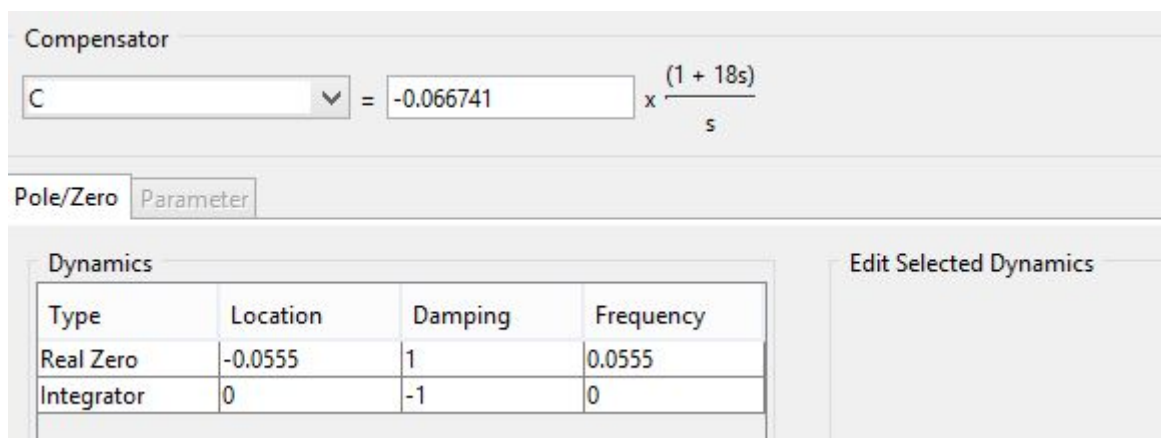
Com esta etapa pronta, é possível gerar um controlador para o sistema.

## Controle

Como citado em [4], “A intensidade de temperatura para tratamento crioterapia varia de 0°C a 17°C, atingindo resultado satisfatório do resfriamento em um tratamento de crioterapia.”. Dessa forma, é possível estabelecer um controle com algumas premissas:

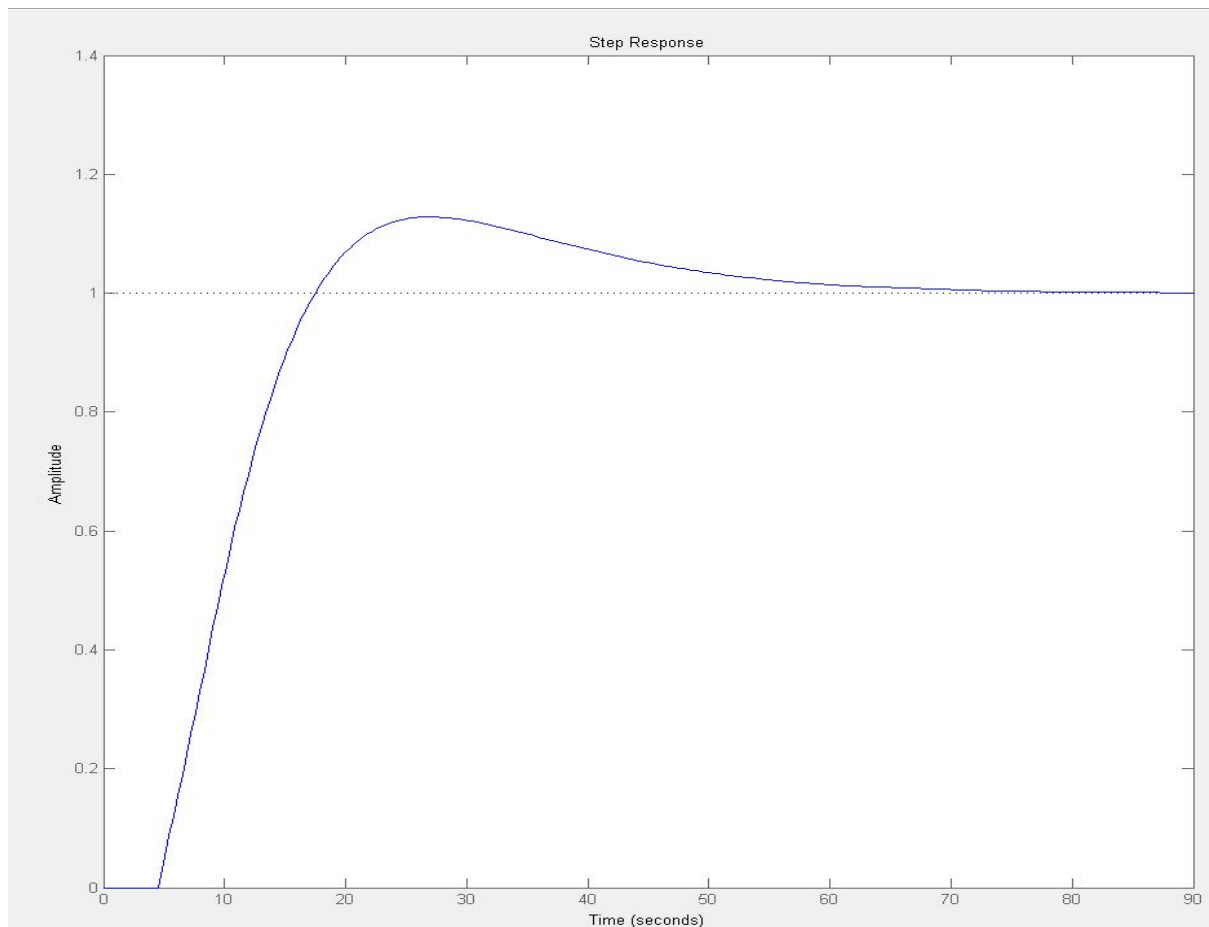
- deve seguir a referência setada pelo usuário variando de 0°C a 17°C (foi escolhido uma faixa menor de temperatura para maior facilidade);
- deve rejeitar perturbações, que em geral, serão a própria temperatura corporal do paciente;
- deve satisfazer os requisitos acima o mais rápido possível;
- como há saturação na malha, deve evitar o efeito do acúmulo de erro (problema tratado com um anti-windup).

Assim, foi projetado um controlador PI utilizando o lugar das raízes, com tempo de 5% de 50s, evitando grandes saturações no controle. O resultado obtido do controlador foi:



*Figura 13 - controlador obtido pela ferramenta SISOTOOL® usando o lugar das raízes*

Sua resposta a um degrau de temperatura de referência ficaria:



*Figura 14 - resposta ao degrau esperada para o sistema*

Como a implementação do controlador será feita em um microcontrolador, foi transformado a função de transferência em uma equação em termos de “z”, usando o tempo de amostragem de 100ms (amostragem mais que suficiente para os parâmetros desejados):

```
>> c2d(C,0.1)

ans =

    -0.06674 z - 0.05339
    -----
           z - 1

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.
```

*Figura 15 - controlador discreto obtido usando o Matlab®*

Este controle foi implementado e alguns problemas surgiram:

- sobressinal maior do que o esperado, bastante devido a saturação do controle;
- rejeição de perturbação lenta. Este problema é, com certeza, o mais grave, pois não é um ajuste do controle mas uma limitação do atuador (pastilha de peltier) que não consegue retirar mais calor a fim de rejeitar a perturbação mais rapidamente.

Em relação ao sobressinal foi tratado colocando um anti-windup. Ele foi implementado em código e está detalhado no arquivo em anexo.

Sobre a rejeição de perturbação os autores ainda não implementaram uma solução, mas sabe-se que a tensão máxima que fica sobre o peltier é de aproximadamente 11.5V. Como a fonte fornece apenas 12V, uma solução seria a construção de um conversor CC-CC buck-boost, de forma a variar a tensão de alimentação até 14.5V. Com essa tensão sobre os terminais do Peltier, o fluxo de calor na pastilha de peltier seria aumentado e, dessa forma, rejeitaria mais rapidamente as perturbações que o usuário provoca.

Apesar de não implementado, o projeto deste converso foi estudado e uma simulação dele, já com valores possíveis de capacitor e indutor, está em anexo. Algumas modificações seriam necessárias em código, como aumentar a frequência de comutação do PWM do Arduino, bem como saturá-la para evitar que a fonte tenha valores muito grandes na saída.

## Software

O software foi desenvolvido de forma a ser uma interface com o usuário simples e intuitiva e também realizar as tarefas de controle tanto da variável de processo como dos sistemas auxiliares (coolers, leds...).

Toda a programação foi feita em código de Arduino, placa usada como microcontrolador (mais detalhes está no próprio código em anexo).



*Figura 16 - interface do usuário inicializando*

Como resultado tivemos uma interface, com dois botões e uma tela LCD onde o usuário pode mudar o set-point de temperatura através do potenciômetro e começar ou parar o sistema pelo botão.



*Figura 17 - interface do usuário esperando o usuário iniciar o sistema*

A tela LCD, quando o sistema está em funcionamento, mostra as variáveis de processo, o set point e o valor do controle:



*Figura 18 - interface do usuário com o sistema funcionando*

Uma interface com mais funções poderia ser elaborada, porém a simplicidade do uso foi muito levado em conta.



# Resultados Obtidos

Todo o desenvolvimento do protótipo foi realizado a fim de obter um protótipo robusto e seguro, que cumprisse com excelência a tarefa de seguir a temperatura definida pelo usuário.

A robustez do protótipo foi alcançada pela construção deste sobre plataformas pouco frágeis (Arduino, fonte ATX, substituição da protoboard pela placa de desenvolvimento Prototype Shield..).

O tópico de segurança poderia ser melhorado: não há proteção de sobretemperatura no dissipador ou alguma função que projeta o usuário contra problemas no sensor. Além disso, algumas conexões estão expostas e precisam ser protegidas.

O seguimento de referência de temperatura, está funcionando, mas a rejeição de perturbação, como já exposto, está um pouco prejudicado por limitações do atuador (pastilha de peltier). A solução, também já discutida, seria fazer um conversor para elevar a tensão que fica sobre este componente.

Demais partes do projeto (eletrônica, mecânica...) poderiam sofrer algumas melhoras, entretanto todas conseguiram cumprir o proposto fazendo o protótipo funcionar.

# Trabalhos futuros

Como principal trabalho futuro está a implementação do conversor buck-boost estudado a fim de melhorar a rejeição de perturbação de temperatura. Outros pontos interessantes de melhora são:

- interface que possibilite o usuário estabelecer um tempo máximo que o produto deve ficar ligado;
- melhorar a ergonomia da caixa com o Peltier, pois hoje há a possibilidade do usuário bater com a mão nos coolers;
- adicionar um sensor de temperatura no dissipador de calor, evitando problema de sobretemperatura;
- melhorar o controle, de forma a evitar qualquer sobressinal;
- otimizar a transferência de calor entre o Peltier e a chapa metálica que fica em contato com o usuário. Atualmente alguns pontos ficam com ar entre as duas superfícies, criando uma indesejada resistência térmica;
- melhorar o posicionamento dos sensores, de forma que eles não atrapalhem a colocação da chapa metálica. Isto poderia ser executado fazendo pequenas ranhuras na pastilha de Peltier e embutindo os sensores ali.

Estas modificações garantiriam um produto mais robusto, seguro e com maior precisão na sua tarefa.

# Conclusão

O relatório contemplou todo o desenvolvimento do protótipo *Gela Pela 3000*. O desenvolvimento deste trabalho contribuiu bastante com o desenvolvimento técnico dos autores, muito devido às dificuldades encontradas no desenvolvimento, que necessitaram de soluções criativas e alternativas.

Apesar do resultado esperado não ter sido 100% obtido, nesta primeira versão do protótipo já foi possível observar quais pontos devem ser priorizados devido a dificuldade e importância no projeto, bem como quais problemas podem ser ignorados devido a pouca importância para o resultado.

# Agradecimentos

O trabalho não poderia ter sido realizado sem a ajuda de algumas pessoas. Elas, mesmo não sendo suas funções, auxiliaram os autores com dicas, soluções de problemas, esquemáticos de circuitos e componentes. Entre outras pessoas, os autores querem destacar o técnico do Laboratório de Montagem Mecatrônica do DAS, Gabriel Manoel, que forneceu algumas peças, esquemáticos e várias dicas.

Outra pessoa que deve receber os agradecimentos dos autores é Dimas Rafael Broering, que doou a placa Prototype Shield (criada por ele mesmo). Esta peça facilitou de forma brutal a conexão de botões, sensores, LCD.. com a placa Arduino e foi fundamental para a construção de um protótipo mais robusto. Mais detalhes da placa podem ser visto em [5].

## Direito de uso e tira-dúvidas

Os autores disponibilizam o projeto para uso da comunidade de forma não comercial.

Para entrar em contato com os idealizadores sobre dúvidas ou direito de uso, pode-se enviar e-mail para:

Andrei Donati - [andrei\\_donati@hotmail.com](mailto:andrei_donati@hotmail.com)

Fernando Battisti - [ferbattisti94@gmail.com](mailto:ferbattisti94@gmail.com)

## Referências Bibliográficas

- [1] <[electronics.stackexchange.com/questions/28634/how-to-drive-a-peltier-element](https://electronics.stackexchange.com/questions/28634/how-to-drive-a-peltier-element)> - Acessado em 16 de junho de 2017
- [2] <<http://www.mstarlabs.com/sensors/thermistor-calibration.html>> - Acessado em 16 de junho de 2017
- [3] PANG. Du-Yeol, et al. Temperature Control using Peltier Element by PWM Method - Gyeonggi-Do, Korea
- [4] CARNEIRO, Mário Brandão. Equipamento de hipotermia para ser utilizado em tratamento muscular com lesões na fase aguda - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/97037>>
- [5] <[www.prototypeshield.com](http://www.prototypeshield.com)> - Acessado em 25 de junho de 2017