UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Paula Christiny Batista e Silva

Proposta de módulo de aquisição de temperatura da pastilha de freio aplicado ao carro BAJA 2019

São Carlos

2018

Paula Christiny Batista e Silva

Proposta de módulo de aquisição de temperatura da pastilha de freio aplicado ao carro BAJA 2019

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Edson Gesualdo

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Batista e Silva, Paula Christiny
B324p Proposta de módulo de aquisição de temperatura dapastilha de freio aplicado ao carro BAJA 2019 / Paula Christiny Batista e Silva; orientador Edson Gesualdo. São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. termopar. 2. mensuração de temperatura. 3. BAJA SAE . I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Paula Christiny Batista e Silva

Título: "Proposta de módulo de aquisição de temperatura da pastilha de freio aplicado ao carro BAJA 2019"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 27 / 11 / 2018,

com NOTA 7,8 (sete, oito), **pela Comissão Julgadora:**

Prof. Assistente Edson Gesualdo - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Elian João Agnoletto - Doutorando - SEL/EESC/USP

Dr. Heitor Vinicius Mercaldi - Doutorado - EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador o Prof. Edson Gesualdo pela proposta do projeto e incentivo durante a sua execução. À Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira e aos meus amigos Bruno (Putin) e Pedro Rogério pela ajuda na formatação e escrita do TCC e pelas ideias propostas. Agradeço também ao BAJA EESC, principalmente aos alunos André e Bruno, por me acompanharem e me ajudarem durante os experimentos e validação do protótipo. Agradeço também à Jussara por toda a orientação e ajuda, não só em relação às entregas do Trabalho de Conclusão de Curso, mas também durante toda a graduação, sempre disposta a ajudar e sanar nossas dúvidas.

Sou muito grata à minha família pelo apoio recebido, principalmente a meus pais e meus irmãos. Agradeço também aos meus queridos amigos da faculdade, pois sem eles não seria possível aguentar as noites estudando e toda a pressão sofrida durante o curso. Gostaria também de agradecer às extracurriculares na qual eu participei, que foram de extrema importância na moldagem do meu caráter profissional.

RESUMO

SILVA, P. C. B. **Proposta de módulo de aquisição de temperatura da pastilha de freio aplicado ao carro BAJA 2019**. 2018. 67p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A equipe BAJA-EESC desenvolve um veículo *off road* e seus sistemas para competições em pistas íngremes com obstáculos inspirados na natureza. O carro passa por vários testes de segurança, inclusive o do funcionamento do sistema de freio. Era necessário, então realizar as mensurações das temperaturas atingidas para a pastilha de freio para verificar se o material escolhido estava apropriado. A mensuração da temperatura da pastilha do freio era feita por meio de uma câmera térmica, sendo tirada uma foto do disco do carro após a frenagem, quando este se encontrava parado. Também era feita uma simulação da temperatura da pastilha de freio para comparação com a captada pela câmera. O *software Ansys* replicava as mesmas condições de frenagem para simular a temperatura da pastilha. As medidas eram feitas de forma indireta e por isso eram suscetíveis a erros. Além disso, os testes realizados mostraram uma diferença entre as temperaturas medidas e a simulação feita, com uma variação em torno de 30°C. Foi necessário, portanto, desenvolver o projeto de mensurar a temperatura da pastilha de freio do carro EESC USP Baja SAE usando um sistema microprocessado embarcado. Para isso, foram utilizados um termopar do tipo K, um microcontrolador e o amplificador de precisão AD8497. Foram realizados testes de validação do protótipo criado para analisar seu erro instrumental médio. Para isso, utilizou-se de um termômetro *Minipa* para comparação dos resultados. Além disso, foi testado o tempo de resposta do sistema considerando um possível aquecimento abrupto do freio. O módulo projetado teve um erro médio de $1,7$°C comparado ao termômetro *Minipa*, usado como padrão. Pressupõem-se um avanço em relação às metodologias anteriores. Foi verificado que o tempo de resposta não tem relação linear com a temperatura. Por fim, foram propostas continuações do trabalho para projetos futuros.

Palavras-chave:termopar, mensuração de temperatura, BAJA SAE

ABSTRACT

SILVA, P. C. B. . 2018. 67p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The BAJA-EESC team develops a baja car to compete in a nature-inspired circuit. They need to make sure the brake-pad developed suits the needs for the competition. There is a need for the measurement of the brake pad's temperature. The current method is taking a picture of the disk brake using a thermal camera. The software Ansys is also used for validation purposes. The difference between those measurements is around 30°C. This project develops a method that measures the temperature of the brake pad of the EESC USP Baja SAE car using an embedded microprocessor system. A type K thermocouple, a microcontroller and a precision amplifier AD8497 were used. Validation tests were made to analyze the printed circuit's measurement error. The results were then compared with the measurements performed with a Minipa thermometer. Moreover, the system time average response was also calculated. There was a difference of around $1,7$°C between the temperature measured by the method developed and the thermometer. A breakthrough is assumed in relation to the previous methodologies. It was verified that the response time has no linear relationship with the temperature. There are propositions for future projects.

Keywords: thermocouples, temperature measurement, BAJA SAE

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Foto tirada do disco de freio, de autoria da extracurricular BAJA-EESC 24
Figura 1.2 – Disco de freio simulado pelo *Ansys*, de autoria da extracurricular BAJA-EESC 24
Figura 1.3 – Resultados obtidos a partir da simulação *Ansys*, de autoria da extracurricular BAJA-EESC 24
Figura 2.1 – Vista em corte de um freio a disco, retirado de infantini2008variaveis . 27
Figura 2.2 – Esquemático de um termopar, retirado de embarcados 29
Figura 2.3 – Exemplo de compensação usado em indústrias, retirado de camb-termopar 30
Figura 3.1 – Diagrama em blocos do sistema de mensuração de temperatura proposto, de autoria própria 36
Figura 3.2 – Topologia do filtro passa-baixa, retirado de Analog Devices (2010) . . . 37
Figura 3.3 – Experimento realizado para a validação do protótipo 40
Figura 4.1 – Diferença entre as temperaturas medidas pelo *Minipa* e pelo protótipo, de autoria própria 43
Figura 5.1 – Sistema elétrico utilizado para a mensuração da pastilha de freio, de autoria própria 48
Figura A.1 – Esquemático do módulo de aquisição de temperatura 57
Figura B.1 – Esquemático do microcontrolador 59
Figura A.1 – Esquemático da placa de testes usada no carro BAJA EESC 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação de características de diferentes sensores de temperatura . 31
Tabela 2.2 – Faixas de operação de temperatura para cada tipo de termopar 31
Tabela 3.1 – Materiais utilizados no circuito de sensor de temperatura 38
Tabela 3.2 – Materiais utilizados no circuito de comunicação 38
Tabela 3.3 – Instrumentos usados para a validação do protótipo 39
Tabela 4.1 – Comparação entre as temperaturas obtidas pelo termopar e pelo circuito 44
Tabela 4.2 – Tempo de resposta do protótipo para diferentes variações de temperatura 45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	- Society of Automotive Engineers
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
PIC	- *Programmable Intelligent Computer*
CI	- Circuito Integrado
TR	- Temperatura de Referência
RTD	- Detetores de Temperatura Resistivos (*Resistance-Temperature Detector*)
I/O	- Entrada/Saída(*In/Out*)
I2C	- *Inter-Integrated Circuit*
SPI	- *Serial Peripheral Interface*
USB	- *Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔW_g	- energia necessária para que o elétron efetue a transição da banda de valência para a banda de condução
Q_A	- Constante Seeback do metal A
Q_B	- Constante Seeback do metal B
e	- diferença de potencial (fem)
f_{NIST}	- relação tensão *versus* temperatura de um termopar
V_{OUT}	- Tensão de saída do amplificador
TMJ	- Temperatura da junção de medida do termopar
V_{REF}	- Tensão de entrada do amplificador.
V_{TC}	- Tensão corrigida do termopar
TRJ	- Temperatura da junção de referência do termopar
ΔT	- Diferença entre a temperatura mensurada pelo *Minipa* e a mensurada pelo circuito projetado
τ	- Variação de temperatura inicial e final da junção de medição do termopar
T_i	- Temperatura inicial da junta de medição do termopar
T_f	- Temperatura final da junta de medição do termopar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 23

2 REVISÃO DE LITERATURA 27
2.1 Freio a Disco 27
2.2 Sensores de Temperatura 28
2.2.1 Detectores de Temperatura Resistivos (RTD) 28
2.2.2 Termistores 28
2.2.3 Termopares 29
2.2.4 Escolha do sensor de temperatura utilizado 31
2.3 Estudo de experimentos realizados para mensuração da pastilha . . 32

3 MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1 Escolha dos componentes 35
3.1.1 Amplificador de precisão 35
3.1.2 Microcontrolador 35
3.2 Montagem do protótipo 36
3.2.1 Amplificador de precisão 36
3.2.2 Microcontrolador 38
3.2.3 Comunicação e *Display* 38
3.3 Validação do protótipo 39
3.3.1 Métodos de ajuste 40
3.3.2 Tempo de resposta do protótipo 41

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS 43
4.1 Mensuração da temperatura da água 43
4.2 Tempo de resposta do protótipo 44

5 PROPOSTA PARA A MENSURAÇÃO DA TEMPERATURA DA PASTILHA DE FREIO 47
5.1 Fixação do termopar no freio 47
5.2 Placa de testes 47
5.3 Protocolos de ensaio 47

6 CONCLUSÃO 51

REFERÊNCIAS 53

APÊNDICES 55

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO SENSOR DE TEMPERATURA . 57

APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO MICROCONTROLADOR 59

APÊNDICE C – CÓDIGO 61

ANEXO A – PLACA DE TESTES DO BAJA EESC 67

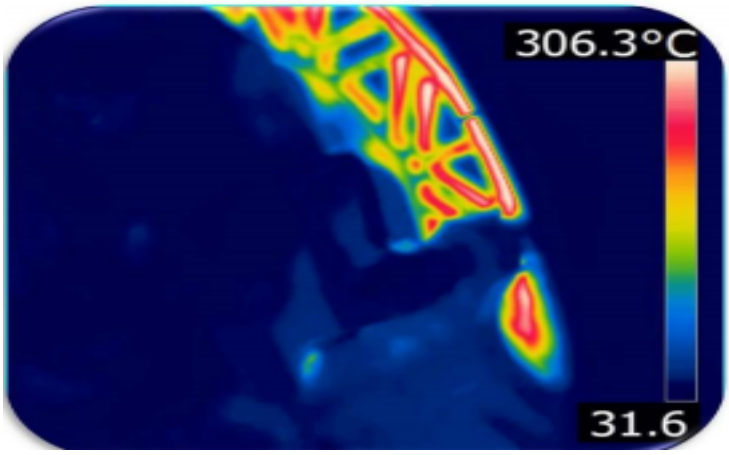
1 INTRODUÇÃO

O projeto Baja SAE (*Society of Automotive Engineers* - Sociedade de Engenheiros da Mobilidade) foi criado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, e teve sua primeira competição em 1976. Foi somente em 1991 que se iniciavam as atividades SAE BRASIL, sendo que em 1994, foi lançado o Projeto Baja SAE BRASIL WebSAE. O projeto tem o objetivo de envolver o aluno na concepção, desenvolvimento e testes de um veículo *off road*, ou seja, próprio para enfrentar um circuito não pavimentado com obstáculos feitos ou inspirados pela natureza, como locais íngremes, lamas e pedras. O veículo deve estar apto a correr pelo circuito de competição no menor tempo possível e estar em conformidade com as normas técnicas de segurança do programa.

Dentre os sistemas que compõem um carro, o sistema de freio é bastante importante para a segurança tanto do motorista quanto dos outros competidores. Esse sistema converte energia cinética rotacional ou translacional de uma massa em energia térmica infantini2008variaveis. No caso do Baja EESC (Escola de Engenharia de São Carlos), esse sistema é de freio a disco, e tem a maioria dos seus componentes projetada pelos membros do grupo BajaEESC (2008). O freio a disco realiza a conversão de energia por meio do contato entre as superfícies da pastilha e o disco de freio, fazendo com que a temperatura aumente. Isso produz o efeito da diminuição do coeficiente de atrito, e consequente perda da capacidade de frenagem do veículo, fenômeno chamado de *fading*Alves (2015). Este fenômeno está intrinsecamente ligado ao comportamento do coeficiente de atrito, que está relacionado ao material que compõe a pastilha. Portanto, faz-se necessário monitorar a temperatura da pastilha durante as frenagens, de forma a averiguar se o material escolhido para a pastilha é adequado e se a capacidade de frenagem do veículo está de acordo com as especificações e necessidades da competição.

Atualmente, a mensuração da temperatura da pastilha do freio é feita por meio de uma câmera térmica. É tirada uma foto do disco do carro após a frenagem, quando este se encontra parado. É possível perceber que usando o método da câmera térmica, a temperatura é medida no disco e não na pastilha. Assim, a medida é feita de forma indireta e é suscetível a erros. A Figura 1.1 mostra os resultados deste método.

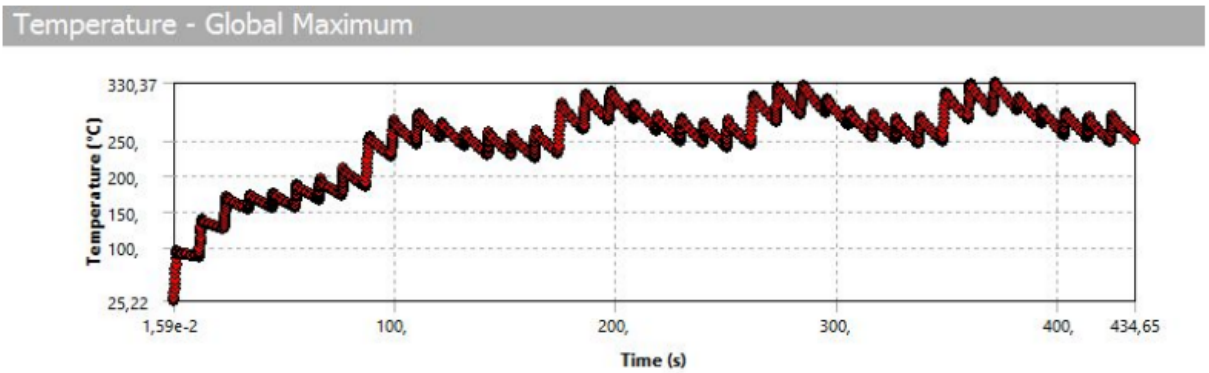
Figura 1.1: Foto tirada do disco de freio, de autoria da extracurricular BAJA-EESC



Também é feita uma simulação da temperatura do freio por meio do *software Ansys*, em que se replica as mesmas condições de frenagem para simular a temperatura da pastilha. As Figuras 1.2, 1.3 mostram as temperaturas teóricas em cada parte do disco de freio e a temperatura do disco ao longo do tempo, respectivamente.

Figura 1.2: Disco de freio simulado pelo *Ansys*, de autoria da extracurricular BAJA-EESC

Figura 1.3: Resultados obtidos a partir da simulação *Ansys*, de autoria da extracurricular BAJA-EESC



Além disso, os testes realizados mostraram uma diferença entre a temperatura medida e a simulação feita, com uma variação em torno de 30 °C. Esta variação entre as formas de mensuração é significativa, por a pastilha de freio, quando esta é acionado, atinge temperaturas de 300°C a 500°C. Devido a essa diferença também não é possível aferir qual método mostra a temperatura correta da pastilha. isso porque não há um padrão a ser comparado para verificar o método computacional utilizado, enquanto a medida realizada pela câmera térmica é feita bem depois das frenagens, já que é necessário retirar o pneu do carro para utilizar o método.

Surgiu assim a necessidade de se criar um novo método de mensurar a temperatura da pastilha de freio do carro. É necessário que a temperatura seja medida diretamente na pastilha, e que ela seja feita de forma contínua para verificar o fenômeno de *fading* nas piores condições de frenagem existentes.

Desta forma, a proposta deste trabalho é desenvolver um método de aquisição de temperatura da pastilha do freio com a utilização de um termopar do tipo K, um microcontrolador do tipo PIC (*Programmable Intelligent Computer*) e um amplificador de precisão próprio para termopares. A maior dificuldade encontrada no projeto é verificar se a temperatura medida equivale à temperatura real. Para isso faz-se uso do termômetro digital da marca *Minipa*. Este termômetro, apesar de ter uma margem de erro embutida em seu método de mensuração, é utilizado para definir a temperatura padrão a ser seguida.

Os demais capítulos deste trabalho são organizados em revisão literária, metodologia, resultados, projetos futuros e conclusões. Na revisão de literatura são ilustrados todos os temas abordados, como o funcionamento de um freio a disco, a explicação teórica do termopar e uma revisão de como outros pesquisadores trataram deste problema. Na metodologia serão dispostos os materiais e métodos utilizados para a construção e teste do protótipo. Os resultados mostram a resposta do protótipo aos experimentos realizados. O capítulo de projetos futuros mostra possíveis continuidades ao trabalho. Por fim, as conclusões contêm as análises dos resultados obtidos.

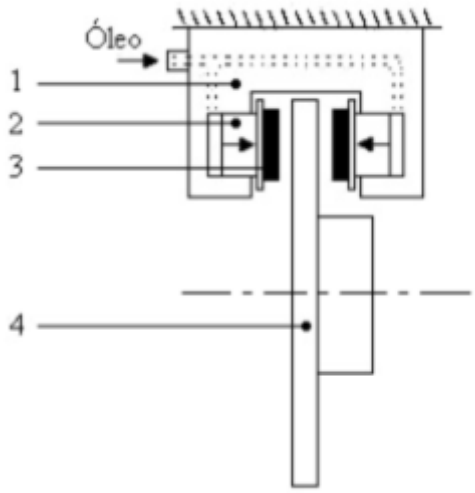
2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo mostra as teorias estudadas para o desenvolvimento do projeto. A primeira seção faz uma breve explicação do freio a disco. Já a segunda seção mostra os sensores de temperatura estudados e as suas características a fim de se escolher o mais adequado para a aplicação. Por fim, a última seção aborda como outros estuduiosos resolveram os problemas e o que pode ser tirado como ensinamento em cada um dos projetos.

2.1 Freio a Disco

De acordo com eriksson2000tribological, um sistema de freio tem como seus principais componentes o rotor, o material de fricção e o sistema hidráulico ou pneumático. Um sistema de freio a disco é aquele em que as forças de atuação são axiais ao rotor infantini2008variaveis. A estrutura de um freio a disco e seus principais componentes são representados na Figura 2.1. O cáliper (conjunto pistão-pastilha) está representado pelo número (1), o pistão por (2), a pastilha por (3) e o disco por (4).

Figura 2.1: Vista em corte de um freio a disco, retirado de infantini2008variaveis



No sistema de freio a disco, o material de fricção é composto pela pastilha e pelo disco de freio. A pastilha tem a função de transmitir de maneira uniforme as forças de atuação do pistão. O disco, por fim, é definido como o "componente girante do par de fricção".

2.2 Sensores de Temperatura

Esta seção apresenta uma breve revisão de literatura sobre os sensores de temperatura existentes e foi baseada nos trabalhos de notasaulagesualdo e de camb-termopar. Estes sensores funcionam de forma a estabelecer uma relação entre o material utilizado e a temperatura que se deseja medir. Exemplos de sensores de temperatura são: o RTD (Detectores de de Temperatura Resistivos - *Resistance-Temperature Detector*), termistores e termopares.

2.2.1 Detectores de Temperatura Resistivos (RTD)

O RTD funciona por meio da relação entre a resistência elétrica de um condutor com a temperatura. Os átomos individuais na estrutura cristalina de um metal vibram em torno de uma posição de equilíbrio, por ação da energia térmica. Essa vibração dos átomos faz com que os elétrons de condução tendam a colidir entre si. Isso impede o livre movimento de elétrons de forma que o metal passa a exibir uma resistência ao fluxo de corrente elétrica. O aumento da temperatura desse material causa uma vibração dos átomos de maior amplitude e frequência, o que faz com que o material absorva mais energia e aumente sua resistência elétrica. Há, portanto, uma dependência positiva entre a resistência e a temperatura do material. Essa dependência pode ser simplificada por meio de:

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 (\Delta T)^2]. \tag{2.1}$$

sendo $R(T)$ a resistência do material a uma dada temperatura T e α_1 e α_2 coeficientes dependentes do material. Se a diferença de temperatura for pequena, a equação (2.1) pode ser simplificada novamente para:

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha_0 \Delta T]. \tag{2.2}$$

2.2.2 Termistores

Termistores são sensores de temperatura semicondutores, construídos principalmente de óxidos metálicos. Os termistores, assim como os RTDs, relacionam sua resistência elétrica com a temperatura. Porém, por se tratar de semicondutores, a baixas temperaturas, estes materiais se comportam como isolantes devido à falta de elétrons livres.

Com o aumento de temperatura, a vibração das moléculas fornece energia aos elétrons na camada de valência. Quando esta energia excede o *gap* de energia (ΔW_g), os elétrons efetuam a transição para a banda de condução e a resistência do material diminui. Dessa forma, a dependência entre a temperatura e a resistência passa a ser negativa e altamente não linear, de acordo com:

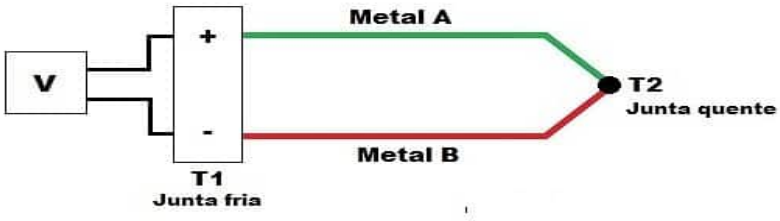
$$R = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}. \tag{2.3}$$

sendo R a resistência em ohms (Ω) à temperatura T dada em Kelvin (K) e β a constante característica do material (dada em K).

2.2.3 Termopares

Um termopar é um sensor de temperatura que consiste de um circuito formado por dois condutores diferentes unidos em uma de suas extremidades. Se estes termoelementos estão a temperaturas distintas, o circuito fechado é capaz de produzir tensão proporcional à diferença de temperatura entre eles Scervini (2009). O esquemático de um termopar pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2: Esquemático de um termopar, retirado de embarcados



A vibração dos átomos e os movimentos dos elétrons são afetados quando se há uma diferença de temperatura mantida entre os metais. Isso é devido à maior energia térmica existente na junção mais quente do termopar, o que faz com que os elétrons se desloquem para a junção mais fria.

Se o circuito entre estas juntas é fechado, uma força eletromotriz é produzida de forma a causar um fluxo de corrente que flui por meio deste circuito. Essa propriedade é chamada de Efeito Seeback, descoberto em 1821. O Efeito Seeback é traduzido por:

$$e = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT. \tag{2.4}$$

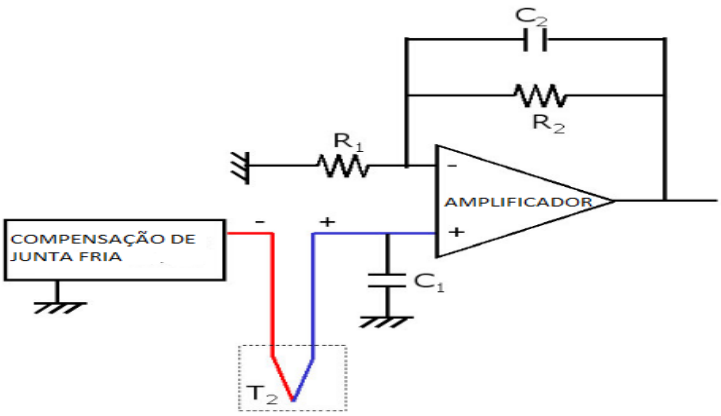
em que e é a diferença de potencial produzida, T_1 e T_2 são as temperaturas das junções dadas em graus K, e Q_A e Q_B as constantes de transporte térmico dos dois metais. Também chamadas de constantes Seeback, Q_A e Q_B dependem do material que o termoelemento é feito Scervini (2009). A relação $Q_A - Q_B$ pode ser traduzida para equações polinomiais de 5° a 9°, dependendo dos materiais constituídos pelo termopar utilizado.

Assim, como a tensão de Seeback é proporcional ao gradiente de temperatura entre as junções do termopar, é necessário conhecer a temperatura de uma delas. Essa junção é chamada junção de referência, e a junção que se deseja conhecer a temperatura é chamada de junção de medição. camb-termopar completa que a relação entre a temperatura da junção de medição e a diferença de potencial gerada pelo termopar (f_{NIST}) só pode ocorrer se a temperatura da junção de referência for constante.

Devido a isso, a junção de referência é mantida em um banho de água e gelo para garantir uma temperatura de referência (TR) constante de 0 °C. Toda f_{NIST} existente para termopares é referenciada a 0 °C Scervini (2009).

No entanto, o banho de água e gelo é um método difícil de ser utilizado em aplicações industriais. Por isso, este é substituído por um circuito integrado (CI) chamado compensação de junta fria Scervini (2009). Neste caso, a junção de referência fica à temperatura ambiente e o CI produz uma diferença de tensão proporcional à diferença entre 0 °C e a temperatura ambiente. Essa compensação é possível devido ao Efeito Peltier, como dito em camb-termopar Um exemplo de compensação de junta fria pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3: Exemplo de compensação usado em indústrias, retirado de camb-termopar



A introdução deste CI ao circuito de mensuração de temperatura pode introduzir um erro à medida, já que este nem sempre será capaz de reproduzir exatamente a relação temperatura *versus* tensão do termopar Scervini (2009). Dessa forma, é possível calibrar o compensador de junção por meio de uma tabela de calibração. Esta tabela relaciona a diferença de potencial obtida com a temperatura que se deseja descobrir usando a junta de referência a uma temperatura de 0 °C Scervini (2009). Cada tabela é específica para cada tipo de termopar, já que a f_{NIST} muda de acordo com o material utilizado.

Apesar de ser possível criar um termopar com qualquer tipo de condutor, somente uma pequena quantidade de ligas metálicas são utilizadas. Dessa forma, surgiu a classificação dos termopares por letras (J, T, K, E, S, R) de acordo com suas ligas metálicas. Estas ligas são: Cobre e Constantan[1], Ferro e Constantan, Cromel[2] e Alumel[3] e Platina-Ródio com Platina.

[1] $Cu_{57}Ni_{43}$
[2] $Ni_{90}Cr_{10}$
[3] $Ni_{94}Mn_3Al_2Si_1$

2.2.4 Escolha do sensor de temperatura utilizado

A partir desta breve revisão sobre os sensores de temperatura estudados, foi possível compará-los para posteriormente realizar a escolha do sensor mais adequado para a aplicação. A Tabela 2.1 mostra essa comparação.

Tabela 2.1: Comparação de características de diferentes sensores de temperatura

Sensor	**Linearidade**	**Tempo de resposta (s)**	**Exatidão**	**Faixa típica de operação**
RTD	linear para pequenas variações de temperatura (eq. (2.2))	0,5 a 5	$\pm 0,10$ °C	-100°C a 650°C
Termistor	altamente não linear (eq. (2.3))	0,5 a 10	de $0,10\%$ até $1,00\%$	-50°C a 150°C
Termopar	razoavelmente linear (eq. (2.4))	2 a 11	de $\pm 0,25\%$ a $\pm 1,00\%$	-200°C a 1800°C

Dentre as opções existentes, escolheu-se o termopar por se ter uma faixa típica de operação extensa, linearidade razoável e baixo custo. Além disso, ele apresenta maior robustez mecânica e ocupa menor espaço do que os outros sensores.

Os termopares se diferem pelos metais que o constituem, sendo as configurações padrões classificadas por meio de letras (J,T,K, E, S, R). Cada uma delas possui linearidade, exatidão e faixa de medida típicas, como mostra a Tabela 2.2. Por fim, foi escolhido o termopar tipo K para se medir temperatura da pastilha de freio.

Tabela 2.2: Faixas de operação de temperatura para cada tipo de termopar

Tipo de Termopar	**Liga metálica**	**Faixa típica de operação(°C)**	**Exatidão**	**Ordem da equação polinomial**
E	Cobre e Constantan	0°C a 870°C	de $\pm 0,50\%$ a $\pm 0,75\%$	9°
J	Ferro e Constantan	0°C a 760°C	$\pm 1,00\%$	5°
K	Cromel e Alumel	0°C a 1260°C	de $\pm 0,50\%$ a $\pm 0,75\%$	8°
R	Platina-Ródio e Platina	0°C a 1480°C	$\pm 0,25\%$	8°
S	Platina-Ródio e Platina	0°C a 1480°C	$\pm 0,25\%$	9°
T	Cobre e Constantan	-180°C a 370°C	de $\pm 0,50\%$ a $\pm 0,75\%$	7°

2.3 Estudo de experimentos realizados para mensuração da pastilha

A necessidade de medir a temperatura de um freio a disco e o efeito desta sobre o atrito medido em materiais de fricção do sistema de frenagem já foram reconhecidas por outros autores, como iombriller2002analise, neis2008projeto e pereira2010analise. Este capítulo tem como objetivo demonstrar as formas de mensuração realizadas por cada um destes autores para melhor entendimento dos resultados deste projeto e aprendizagem das melhores práticas adotas por cada um deles.

Em iombriller2002analise termopares foram utilizados para analisar os sistemas de freio a disco de veículos comerciais pesados. Para se avaliar as características térmicas desse tipo de veículos, foram utilizados termopares tipo K. Recomenda-se que o termopar utilizado seja de ponta seca[4], por facilitar a montagem no veículo. Além disso o isolamento térmico feito por meio de fibra de vidro garante maleabilidade durante a montagem.

Além de descrever a importância de um bom isolamento térmico, iombriller2002analise também ressaltou a necessidade de se calibrar o termopar antes de cada teste realizado. Estes procedimentos evitavam erros de leitura no sistema de aquisição de dados.

neis2008projeto, por outro lado, parte de um sistema mais robusto para verificar a relação da temperatura do freio com seu coeficiente de atrito. Seu projeto consistia em medir a temperatura do disco por meio de um tribômetro[5] que tem em sua constituição termopares do tipo K. A partir das incertezas associadas ao termopar, ao método de compensação de junta fria utilizado e à capacidade do sistema de aquisição de dados, neis2008projeto estimou uma incerteza instrumental associada ao termopar no tribômetro projetado.

Esta incerteza era de $\pm 2,38$°C para temperaturas de 0°C a 200°C. Esse erro sofria um aumento considerável à medida que se aumentava a temperatura, tendo um erro médio de $\pm 2,42$°C para uma temperatura de 300°C, podendo chegar a um erro de $\pm 6,81$°C quando atingidos 900°C.

Outra abordagem realizada foi apresentada em pereira2010analise, que tinha por objetivo substituir um termopar por um pirômetro como método de mensuração de temperatura. As desvantagens que levariam ao desuso do termopar seriam o tempo de preparação para a montagem do experimento e o conhecimento técnico necessário para o manuseio deste sensor. Contudo, percebe-se que, apesar dos dois métodos gerarem resultados similares, o termopar era mais adequado durante a aquisição de temperaturas onde ocorre o fenômeno *fading*.

A partir da análise destes trabalhos, foi feita a proposta de se desenvolver um

[4]junção exposta ao ambiente externo

[5]instrumento que visa medir coeficiente de atrito, força de atrito, etc. entre duas superfícies de contato

sistema embarcado para a mensuração a temperatura da pastilha do freio do carro da extracurricular BAJA-EESC. Assim como feito por iombriller2002analise, neis2008projeto e pereira2010analise, foi escolhido como sensor de temperatura o termopar do tipo K. Além disso, utilizou-se o trabalho de neis2008projeto para analisar o erro esperado para o projeto e seguiu-se as recomendações de iombriller2002analise para a calibração do termopar antes de cada experimento realizado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são mostrados os processos de escolha dos componentes e passos para a construção do protótipo de mensuração da temperatura de freio. Em seguida, são expostos os experimentos realizados para a validação do protótipo. Por fim, são descritos os procedimentos para a mensuração da temperatura da pastilha de freio.

3.1 Escolha dos componentes

Esta seção tem o objetivo de explicar a escolha dos componentes utilizados para este projeto. Assim, serão demonstradas as vantagens das escolhas do amplificador AD8497 e do microcontrolador PIC18F4550.

3.1.1 Amplificador de precisão

Como dito no tópico anterior, foi utilizado um termopar do tipo K para obter a temperatura do freio. No entanto, sabe-se que a tensão proveniente do termopar é da ordem de mV, sendo necessária a utilização de um amplificador. Além disso, para conseguir relacionar a diferença de tensão do termopar com a temperatura medida, é necessário ter uma temperatura de referência. Normalmente é usada uma solução de gelo e água para se garantir uma temperatura de 0 °C. Porém isso seria inviável para a aplicação desejada, já que o sistema de freio do carro sofre bastante aquecimento.

Assim, foi empregado um circuito integrado que contivesse essa temperatura de referência embutida e que fosse compatível com as características de um termopar tipo K. Foi escolhido o amplificador AD8497, que condiz com as necessidades do projeto. De acordo com as especificações de Analog Devices (2010), o AD8497 transforma a saída do termopar em linear com sensibilidade de $5mV/°C$. Também suporta uma variação de temperatura ambiente de 25 °C a 100 °C como temperatura de referência. Este amplificador também garante um erro máximo de ±2 °C para a mensuração de temperaturas na faixa de −25 °C a +295°C.

3.1.2 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado foi o PIC18F4550. Este tem as seguintes características, de acordo com o *datasheet* Microchip Technology Inc. (2009):

1. 35 portas de entrada e saída (I/O);
2. Comunicações I2C (*Inter-Integrated Circuit*), SPI (*Serial Peripheral Interface*) e serial;

3. Interrupção;
4. Arquitetura otimizada para facilitar compilação de linguagem C;
5. Portas paralelas próprias para transmissão de dados via USB (*Universal Serial Bus*);
6. Conversor Analógico/ Digital(A/D) com 10 *bits* de resolução, podendo ler até 5V de tensão.

Isso faz com que o PIC18F4550 seja adequado para a aplicação desejada. Por exemplo, uma resolução de 10 bits faz com que haja uma melhor exatidão na leitura do amplificador, pois existem mais "casas decimais"disponíveis para a conversão dos dados. Além disso, ele foi escolhido por causa da familiaridade dos estudantes do grupo do BAJA-EESC com este microcontrolador. Dessa forma é possível fazer o aproveitamento deste trabalho nos demais projetos da equipe.

3.2 Montagem do protótipo

Para a construção do protótipo, definiu-se um diagrama de blocos descrito na Figura 3.1.

Figura 3.1: Diagrama em blocos do sistema de mensuração de temperatura proposto, de autoria própria

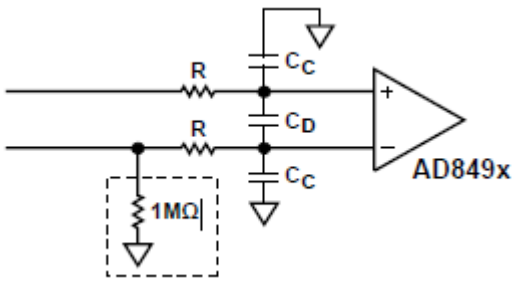
Dessa forma, o bloco de sensor de temperatura é referente ao sensor escolhido. Este é conectado ao circuito projetado para aquisição dos dados. Este circuito conta com um filtro passa-baixa e um amplificador de tensão, para que os resultados possam ser lidos e processados pelo microcontrolador. Este processa os dados e, por meio da comunicação USB e do *software serialportmonitor*, os dados da porta COM do PIC18F4550 são lidos pelo *display* de um computador. Os dados recolhidos pelo *software serialportmonitor* poderiam ser captados e convertidos em um arquivo do tipo *.txt* para posterior análise das temperaturas lidas em um arquivo *Excel*. Os tópicos a seguir explicam como foi projetado cada um dos blocos da Figura 3.1.

3.2.1 Amplificador de precisão

Para a montagem do circuito do amplificador de precisão AD8497, foram seguidas as recomendações do *datasheet* Analog Devices (2010). Primeiramente era necessário utilizar de um filtro passa-baixa antes da entrada do CI, já que, de acordo com Analog

Devices (2010), os termopares podem funcionar como uma ótima antena, e por isso podem pegar sinais indesejados. É também recomendado que o termopar seja conectado ao terra por meio de um resistor de $1M\Omega$ ligado à entrada negativa do amplificador. O filtro recomendado tem a topologia descrita na Figura 3.2.

Figura 3.2: Topologia do filtro passa-baixa, retirado de Analog Devices (2010)



.

O filtro da Figura 3.2 deveria ter uma baixa frequência de corte que ainda permitisse que não houvessem alterações no sinal de entrada. Isso porque os sinais emitidos pelo termopar têm frequências muito baixas. Portanto, era necessário um filtro passa-baixa para que o amplificador não pudesse captar sinais indesejados. De acordo com o *datasheet* Analog Devices (2010), a frequência do filtro pode ser calculada por

$$F_{FILTRO} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)} \tag{3.1}$$

em que C_D e C_c e R são os capacitores e resistor do filtro, respectivamente, dispostos como na Figura 3.2. É recomendado que o resistor do filtro tenha resistência menor do que $50k\Omega$ para que correntes de *offset* não interfiram na exatidão.

As resistências escolhidas para o filtro tinham valor de $22k\Omega$, sendo os capacitores C_D e C_C com capacitâncias equivalentes a $1\mu F$ e $100nF$, respectivamente. As escolhas dos valores dos capacitores C_D e C_C foi baseada nas condições impostas pelas simplificações dos cálculos da equação do F_{FILTRO} para se chegar à equação (3.1). De acordo com o *datasheet* Analog Devices (2010), para que a equação (3.1) seja válida, é necessário que $C_D \geq 10C_C$. Dessa forma, por meio de (3.1), é possível calcular a frequência de filtro equivalente a $6Hz$.

De acordo com Analog Devices (2010), é necessário colocar capacitores de desacoplamento no pino de alimentação utilizado. Se o capacitor for colocado o mais próximo possível do pino de alimentação, ele deve ter capacitância de $100nF$. Recomenda-se também que o pino do sensor seja ligado ao V_{OUT}.

A partir dessas instruções foi possível montar a placa de amplificação do sinal do termopar. Os materiais utilizados para a fabricação da placa podem ser vistos na Tabela 3.1. O esquemático do amplificador do sensor de temperatura pode ser visto no Apêndice

A. Era esperado que o amplificador tivesse uma saída que representasse uma relação direta entre a tensão lida e a temperatura referente à esta tensão. Ou seja, se a saída do AD8497 fosse 5V, a temperatura medida pelo sensor deveria ser 5V.

Tabela 3.1: Materiais utilizados no circuito de sensor de temperatura

Componente	**Especificação**	**Quantidade**	**Nome**
Amplificador de Precisão	AD8497	1	U_1
Conector	Termopar	1	C
Capacitor eletrolítico	$1\mu F - 63V - 20\%$	1	C_2
Capacitor cerâmico	$100nF - 10\%$	3	C_1, C_3, C_4
Resistor	$22k\Omega - 5\%$	2	R_1, R_2
Resistor	$1M\Omega - 5\%$	1	R_3

3.2.2 Microcontrolador

Além da montagem do protótipo, era necessário também fazer a montagem do circuito de comunicação para se processar os dados obtidos pelo sensor. Foi montado um circuito na *protoboard* que continha um microprocessador configurado para receber os dados do amplificador e transmiti-los por meio da comunicação USB. Os materiais utilizados para a montagem do circuito podem ser vistos na Tabela 3.2 e o seu esquemático pode ser visto no Apêndice B.

Tabela 3.2: Materiais utilizados no circuito de comunicação

Componente	**Especificação**	**Quantidade**	**Nome**
Capacitor cerâmico	$10nF - 10\%$	1	C_1
Capacitor cerâmico	$100nF - 10\%$	3	C_{19}, C_{22}, C_{23}
Capacitor cerâmico	$330nF - 10\%$	1	C_{20}
Diodo	1N4001	1	D_1
Diodo	1N4148	2	D_7, D_9
LED Difuso 5 mm Amarelo	E15E0 $1,8 - 2,2V$	1	D_3
LED Difuso 5 mm Azul	20D624 $3,0 - 3,2V$	1	D_2
Microcontrolador	PIC18F4550	1	U_1
Oscilador de cristal de quartzo	$32kHz$	1	X_2
Resistor	$10k\Omega - 5\%$	1	R_1
Resistor	$330\Omega - 5\%$	2	R_3, R_5

3.2.3 Comunicação e *Display*

Para a validação do protótipo, foi utilizada a comunicação via USB entre o microcontrolador e o computador, posteriormente utilizado como *display*. O *software serialport-monitor* foi utilizado para fazer o monitoramento de porta COM utilizada para receber os dados da temperatura em tempo real. Isto é, os dados são mostrados à medida que são adquiridos pelo sensor, respeitando o tempo de *delay* entre cada uma das etapas mostradas na Figura 3.1.

Contabilizou-se que o microprocessador era capaz de realizar 30 medições por segundo. Assim, para melhor processamento de dados, foi feita uma média aritmética dos 30 primeiros dados amostrados de forma a se obter uma medição por segundo. Foi utilizada a linguagem C para a comunicação entre o microprocessador e o *display*. O código criado para isso pode ser encontrado no apêndice C.

3.3 Validação do protótipo

A validação do protótipo foi feita por meio de testes de mensuração da temperatura da água, de forma a comparar os resultados obtidos com um termômetro da marca *Minipa* e a saída do amplificador projetado. Os instrumentos utilizados para os testes são citados na Tabela 3.3.

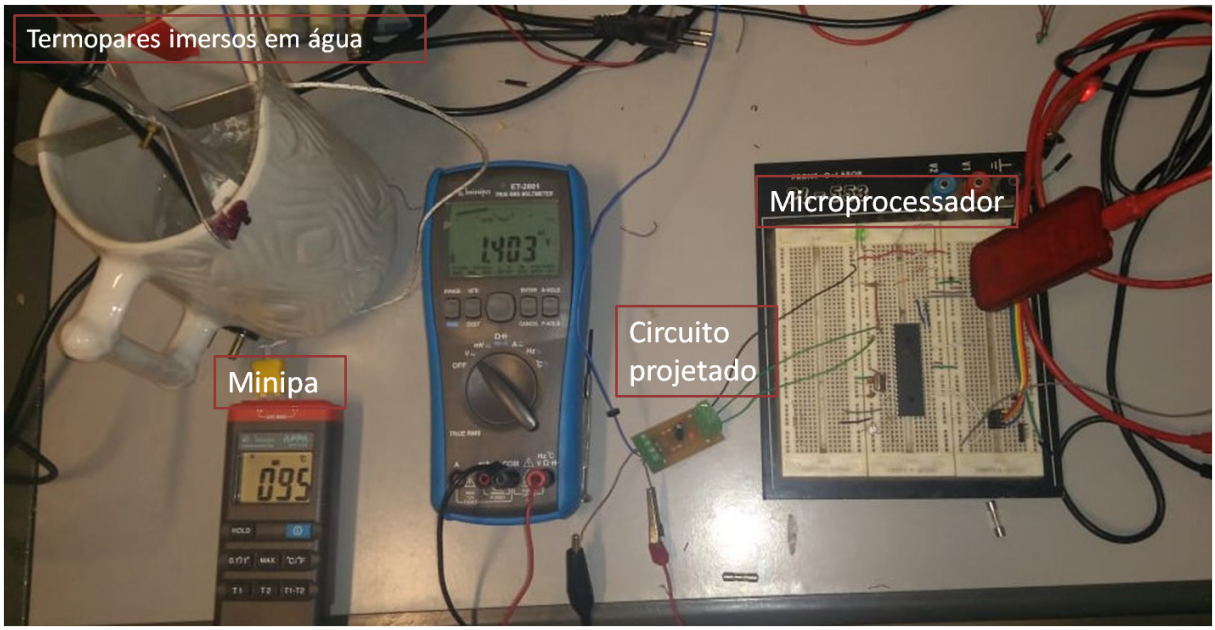
Tabela 3.3: Instrumentos usados para a validação do protótipo

Instrumento	**Quantidade**
Variac	1
Termômetro Minipa	2
Vasilha de cerâmica com água	1
Circuito de sensor de temperatura	1
Circuito com o microprocessador	1
display do computador (*software serialportmonitor*)	1

Uma ilustração da experiência realizada pode ser visto na Figura 3.3. O experimento funcionava da seguinte forma: A tensão do variac era regulada de forma a aquecer gradualmente a água do recipiente. Dois termopares tinham suas junções de medição em contato com a água. Um dos termopares tinha sua junção de referência conectada ao termômetro *Minipa*, enquanto o outro era conectado ao circuito amplificador projetado.

A saída do amplificador estava conectada ao microprocessador. O microprocessador transferia os dados obtidos para o *display* do computador. Os dados coletados foram então transferidos para uma planilha do *Excel* e comparados entre si para fazer a validação do protótipo criado.

Figura 3.3: Experimento realizado para a validação do protótipo



3.3.1 Métodos de ajuste

De acordo com o *datasheet* Analog Devices (2010), a saída esperada do amplificador (V_{OUT}) é a definida pela equação:

$$V_{OUT} = (TMJ \times 5mV/°\text{C}) + V_{REF} \tag{3.2}$$

em que TMJ é a temperatura da junção de medição do termopar e V_{REF} a tensão de entrada do amplificador. Dessa forma, conhecendo-se TMJ e V_{REF}, é possível fazer uma relação entre a saída esperada e a saída real do amplificador. Malk (2010) informa que o amplificador é otimizado para que seu alcance de performance linear seja o melhor possível, levando em consideração o tipo de termopar utilizado e a variação da temperatura que se deseja medir. A linearidade de $5mV/°\text{C}$ na saída do amplificador é garantida por meio dos seguintes parâmetros:

- Ganho do amplificador $(122,4V/V)$
- Tensão de *offset* (erro de tensão a 0°C para garantir 125mV a 25°C$(-0,98mV)$)
- Fator de escala do sensor de temperatura pela junção de compensação $5,0392mV/°\text{C})$

Caso ocorram divergências entre as medidas realizadas e os resultados teóricos esperados, é possível utilizar um algoritmo de correção para descobrir o valor da tensão do

termopar linearizada (V_{TC}) por meio da equação a seguir:

$$\begin{aligned} V_{TC} &= f_{NIST}(TMJ - 0) - f_{NIST}(TRJ - 0) \\ &= f_{NIST}(\frac{V_{OUT} - V_{REF} + 0,98mV)}{122,4}) \end{aligned} \tag{3.3}$$

em que TRJ é a temperatura da junção de referência do termopar e f_{NIST} é uma função que relaciona os milivolts de saída do termopar com a temperatura, baseada na função base[1] publicada pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology*). Assim, é possível criar um código em C que encontre o valor da extrapolação linear entre as duas medidas e faça as correções necessárias para melhorar a precisão das medidas.

3.3.2 Tempo de resposta do protótipo

Outro parâmetro necessário para a validação do protótipo é o tempo de resposta do sensor após uma mudança repentina de temperatura. Ou seja, o tempo que o sistema leva para que este se estabilize e marque a temperatura correta. Isso é especialmente importante no sistema de freio pois pode sofrer uma rápida variação de temperatura.

Os materiais necessários para esse experimento foram:

1. Recipiente com solução de água e gelo;
2. Ferro de solda;
3. Recipiente com água fria;
4. Partes do corpo humano (dedos);
5. Cronômetro do celular.

Foram escolhidos os materiais: solução de água e gelo, recipiente com água fria, ferro de solda e os dedos como temperaturas a serem medidas durante o experimento. Sabe-se que a solução de água e gelo tem temperatura de 0°C quando esta se encontra estabilizada. Também é conhecida a temperatura média do corpo humano (36°C). A temperatura de liquefação de estanho é de aproximadamente 231°C, sendo possível averiguar quando o ferro de solda atinge essa temperatura. Foi utilizada também água fria da mesma fonte que o experimento anterior. Dessa forma, todos os materiais teriam suas temperaturas previamente conhecidas. No entanto, as temperaturas dos objetos foram mensuradas também com o termômetro *Minipa* para fins de validação.

Para o teste do tempo de resposta, utilizando o circuito projetado, foram seguidos os seguintes procedimentos:

[1] pode ser encontrada em *http://srdata.nist.gov/its90/main*

1. Mensuração da temperatura ambiente, temperatura em que se encontrava a junção de medição do termopar;
2. Imersão da junção de medição do termopar na solução de água e gelo;
3. Cronometragem do tempo necessário para que a temperatura atingisse (0°C);
4. Mensuração da temperatura do ferro de solda, que foi previamente aquecido até atingir a temperatura de 231°C e cronometragem do tempo necessário para que o sistema atingisse essa temperatura;
5. Imersão da junção de medição do termopar na bacia de água fria (18°C) e cronometragem do tempo necessário até que o sensor indicasse a temperatura correta;
6. Medição da temperatura do corpo humano e cronometragem do tempo necessário para que a temperatura atingisse 36°C;

A cronometragem foi feita a partir do momento em que se retirava a junção de medição do termopar de um sistema e se terminava quando este atingia a temperatura do outro sistema em questão. Todos os sistemas já estavam na temperatura desejada para o experimento para que não ocorresse medições do tempo do aquecimento das amostras mas sim do tempo de resposta do protótipo. Após a cronometragem do tempo foi calculada a relação do aumento de temperatura em relação ao tempo. Assim, seria possível verificar se essa relação é ou não constante e as consequências disso para a aplicação estipulada neste trabalho.

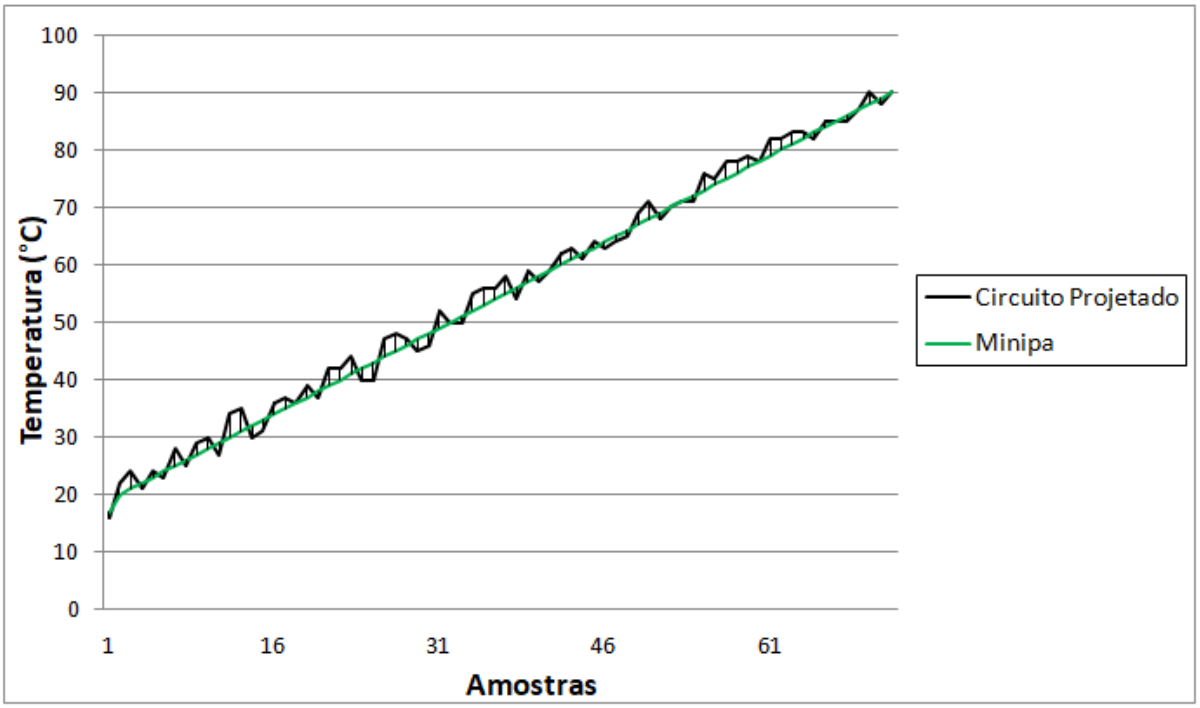
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo documentar os resultados obtidos no projeto, bem como a interpretação destes para que seja possível verificar as falhas e acertos do trabalho. Os resultados demonstram a validação do protótipo, que consiste na comparação das temperaturas medidas em relação ao termômetro *Minipa* e o tempo de resposta característico do circuito projetado.

4.1 Mensuração da temperatura da água

Como mostrado no capítulo de materiais e métodos, a validação do protótipo consistia na comparação entre as mensurações das temperaturas da água obtidas pelo termômetro *Minipa* e pelo circuito projetado. A Figura 4.1 mostra o gráfico gerado pelo *Excel* a partir dos resultados obtidos. As temperaturas medidas variaram de 16°C à 90°C.

Figura 4.1: Diferença entre as temperaturas medidas pelo *Minipa* e pelo protótipo, de autoria própria



Foi utilizado o termômetro *Minipa* para se estimar os erros contidos no módulo de aquisição de temperatura projetado. A partir dos resultados visíveis na Figura 4.1, foi calculada a diferença de temperatura mensurada entre o *Minipa* e o circuito projetado. Essa diferença foi representada pela nomenclatura ΔT.

A partir disso ΔT foi considerado o erro de medida do módulo projetado. Para se fazer o gráfico da Figura 4.1, foram coletadas 72 amostras de temperatura para cada um dos métodos de mensuração. A diferença dada entre eles foi calculada e a partir destas obteve-se os erros máximo, mínimo e médio da temperatura obtida pelo circuito projetado em relação à obtida pelo termômetro. Também foi realizado o cálculo de desvio padrão dos resultados encontrados. Estes valores estão presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Comparação entre as temperaturas obtidas pelo termopar e pelo circuito

	ΔT (°C)	Desvio Padrão
Valor Máximo	4	2,828427
Valor Médio	1,70833	1,207974
Valor Mínimo	0	0

Pode-se perceber que os resultados obtidos foram bastantes satisfatórios. Há um desvio padrão baixo, o que mostra uma convergência entre os dados obtidos pelos dois métodos de mensuração de temperatura. O erro médio do circuito projetado em relação ao termômetro *Minipa* é de $1,7$°C.

O método anterior que usava o software *Ansys* tinha o problema de não existir um padrão, o que se difere deste método por se utilizar o *Minipa* como referência. O método da câmera térmica era utilizado bem depois da frenagem, já que era necessário retirar os pneus para tirar a fotografia. Portanto, especula-se que o método desenvolvido por este trabalho seja mais preciso e exato do que os utilizados anteriormente.

Além disso, é necessário levar em conta o erro de medida do termômetro comercial *Minipa*. Minipa () mostra que o erro de medida para a faixa de tmperatura medida é de $\pm(0,1\% + 1°\text{C})$. Portanto, as oscilações das medidas entre o circuito e o Minipa vistos na Figura 4.1 podem ser tanto relacionados ao erro do circuito quanto ao erro do termômetro utilizado.

4.2 Tempo de resposta do protótipo

Além de analisar os resultados das mensurações da temperatura, outro método de validação do protótipo é a análise do tempo de resposta do módulo projetado. Este resultado é referente à rápida variação de temperatura entre a temperatura inicial da junção de medição e a temperatura que o termopar deve medir.

Foram consideradas diferentes variações de temperatura. Esta variação é representada pelo símbolo τ. Foram mensuradas as temperaturas da solução de água e gelo, do ferro de solda, do balde de água fria e do corpo humano. As temperaturas inicias e finais da junção de medição do termopar são representadas por T_i e T_f, respectivamente. Os resultados deste experimento podem ser vistos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tempo de resposta do protótipo para diferentes variações de temperatura

Materiais medidos	T_i (°C)	T_f (°C)	**Variação de Temperatura** (τ)(°C)	**Tempo de resposta (s)**	$\lvert\tau\rvert/t$ (°C/s)
Solução de água e gelo	28	0	-28	8,22	3,41
Ferro de solda	0	231	$+231$	11,08	20,85
Balde de água fria	231	18	-213	10,92	19,50
Corpo humano	18	36	$+18$	8,69	2,07

A partir destes resultados consta-se que o tempo de resposta não apresenta dependência linear em relação à variação de temperatura que o termopar precisa atingir. Percebe-se que a relação variação de temperatura por tempo(τ/t) é menor para menores temperaturas. Ou seja, o termopar responde mais rapidamente quando há maior variação entre T_i e T_f do que para pequenas variações.

Isso é bem visível na última coluna da Tabela 4.2, já que o termopar captou $3,41$°C/s quando havia uma variação $\tau = -28$°C, enquanto para $\tau = 231$°C. Este resultado é importante pois as frenagens normalmente causam uma rápida variação de temperatura na pastilha. Além disso, não é perceptível nenhuma ligação entre o tempo de resposta e variações negativas ou positivas de temperatura.

Portanto, pode-se presumir que o tempo de resposta do protótipo é independente da variação de temperatura que este deve medir. É possível fazer a média aritmética entre os quatro valores encontrados para se obter a média do tempo de resposta do circuito projetado. Após os cálculos realizados, conclui-se que o tempo médio de resposta do termopar é de $9,73s$.

5 PROPOSTA PARA A MENSURAÇÃO DA TEMPERATURA DA PASTILHA DE FREIO

Um dos objetivos deste trabalho era a aplicação do módulo de aquisição de temperatura na pastilha de freio do carro BAJA. No entanto, isso não foi possível devido à diferença de agenda entre os alunos e às competições do BAJA SAE Brasil. Este capítulo, portanto, é uma proposta para prosseguimento do trabalho. São descritos os materiais e métodos recomendados para a validação da escolha do material da pastilha de freio.

5.1 Fixação do termopar no freio

O termopar deveria ser fixado na pastilha de freio por meio de fibras de vidro, que, de acordo com Iombriller (2002), garantem o isolamento e estabilidade térmica do sistema.

5.2 Placa de testes

O teste do termopar na pastilha de freio do carro ainda segue o modelo da Figura 3.1. No entanto, o bloco referente ao microprocessador seria substituído pela placa de testes projetada pelo BAJA EESC e a comunicação passa a ser por meio do transmissor SV611 e não mais por USB. Esta placa de teste é uma placa de circuito impresso e funciona de forma similar à placa de comunicação utilizada na validação do protótipo. Esta placa utiliza o microprocessador PIC18F4550 visto anteriormente. O esquemático da placa pode ser visto no Anexo A.

Além disso, como o teste seria feito em um ambiente aberto, o protocolo de comunicação USB já não era mais viável. A comunicação seria feita pelo transmissor SV611. Este é o transmissor utilizado pelo BAJA-EESC para transmitir os dados recolhidos da placa de testes mostrada no Anexo A para o computador de um dos integrantes do grupo.

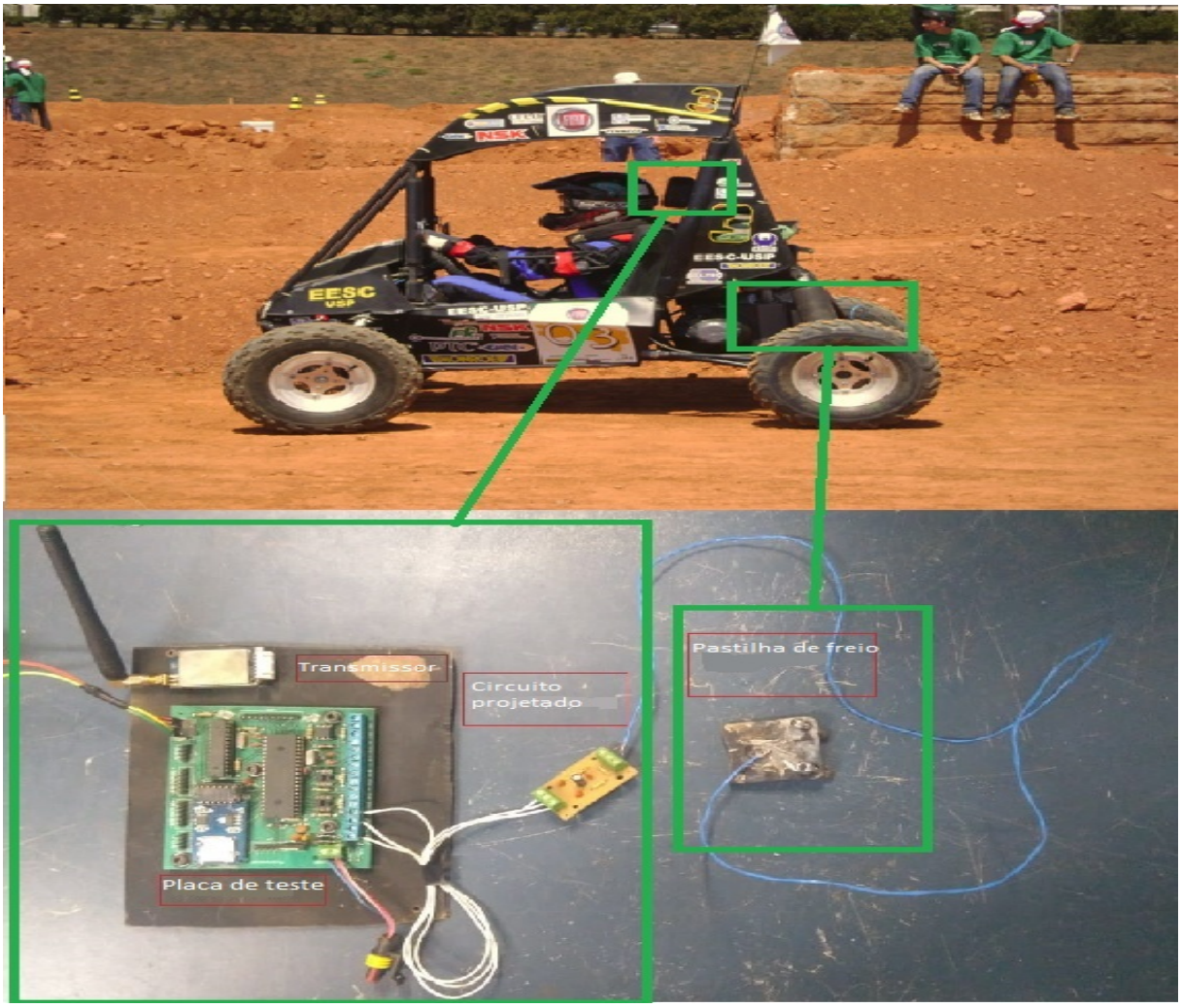
5.3 Protocolos de ensaio

Os primeiros ensaios seriam realizados com o carro suspenso. É aconselhável medir a temperatura ambiente antes e depois do experimento. É indicado que o termopar seja colocado no freio esquerdo traseiro, por causa da proximidade deste com o local da fixação da placa de testes. A placa de testes seria conectada ao transmissor e também ao circuito de mensuração de temperatura projetado. Este estaria conectado à junção de referência do termopar, enquanto a junção de medição estaria conectada à pastilha de freio.

A Figura 5.1 mostra o carro do BAJA-EESC juntamente com o sistema que deveria ser utilizado para mensurar a temperatura da pastilha de freio. Esta Figura é dividida em duas partes. Em cima, mostra-se o veículo baja. Os retângulos na Figura mostram onde

seriam localizados os circuitos do sistema embarcado e a junção de medição do termopar juntamente com a pastilha de freio. Embaixo estão localizados, da esquerda para a direita, a placa de testes junto com o transmissor, o circuito projetado para a mensuração de temperatura, o termopar e a pastilha de freio.

Figura 5.1: Sistema elétrico utilizado para a mensuração da pastilha de freio, de autoria própria



Os ensaios seriam realizados com o carro "frio", ou seja, com um espaçamento de tempo entre eles para que a temperatura atingida em um ensaio não pudesse interferir no próximo. Seriam realizados quatro ensaios com o carro suspenso. O primeiro iria medir a temperatura da pastilha durante uma frenagem de três segundos. O segundo ensaio consistia de três frenagens consecutivas de três segundos cada. Seria realizado também um ensaio com três frenagens consecutivas de duração de dois segundos cada. Por fim, o último ensaio consistia de frenagens de dois e três segundos consecutivas. O iontervalo entre cada uma destas frenagens deveria ser de um segundo.

Estes ensaios seriam realizados com o objetivo de simular a temperatura máxima

que a pastilha seria capaz chegar se o carro fosse submetido a condições extremas de frenagem. Assim, seria possível também verificar o comportamento do coeficiente de atrito do material da pastilha e o efeito de *fading* no carro.

O último ensaio seria realizado em um circuito de corrida similar ao utilizado para competição BAJA SAE. A temperatura ambiente seria medida antes e depois do ensaio. Com essa simulação, seria possível ver a temperatura máxima da pastilha esperada durante a competição.

6 CONCLUSÃO

Considerando os capítulos revisão de literatura e os resultados deste trabalho, pode-se concluir que este trabalho atende à sua proposta. A dificuldade de validação da temperatura obtida por meio do termopar foi superada por meio do termômetro *Minipa*. Além disso, a compensação de junta fria necessária para o funcionamento do termopar foi realizada pelo amplificador de precisão AD8497. Este é capaz de resistir ao aumento da temperatura do ambiente do carro devido à energia térmica liberada pelo freio.

O protótipo criado apresentou resultados satisfatórios, tanto em relação ao erro em relação ao termômetro quanto ao tempo de resposta do sistema. Sua validação demonstrou que o erro médio do sistema é de $\pm 1,7°C$. É importante ressaltar que este erro foi calculado usando uma faixa de temperatura de 0°C a 100°C. Sabe-se que, apesar do amplificador ser linear, há um aumento do erro médio com o aumento da temperatura. No entanto, este erro é bastante seguro, já que a faixa de temperatura atingida pela pastilha de freio é alta, chegando a 500°C.

Apesar de o termopar ser linearizado, ele se mostra irregular na Figura 4.1, em contraste com o termômetro digital usado para comparação. Isso é devido a dois fatores principais. O primeiro é devido ao ruído, especialmente o causado pela *protoboard* no circuito de comunicação com a placa. Outro fator é a filtragem dos dados durante a conversão digital.

O termômetro usava uma média de pontos na casa de milhares para conseguir o resultado final. O microprocessador, no entanto, foi programado para fazer a média de 30 valores. No entanto, é preciso considerar também que há um erro de medida embutido no Minipa de $\pm(0,1\% + 1°C)$. Isso pode também influenciar na irregularidade vista na Figura 4.1.

Além disso, a análise do tempo médio de resposta do termopar mostrou que este é de $9,73s$. A partir da Tabela 4.2, foi possível inferir que este tempo de resposta não depende linearmente da diferença da temperatura inicial e final da junção de medição do termopar. Isso é uma vantagem para a aplicação na pastilha de freio, já que ocorrem mudanças abruptas de temperatura durante a frenagem.

Não foi possível realizar a mensuração da pastilha do freio do carro do BAJA-EESC por diferença de agenda devido às competições SAE. No entanto, os procedimentos para tais experiências estão descritos no capítulo de projetos futuros.

Por fim, este projeto ainda pode ser replicado pelos alunos do BAJA-EESC para a mensuração de temperatura de outros materiais, como a temperatura do motor, por exemplo. Isso é devido à simplicidade do projeto e à utilização de componentes familiares

à equipe na construção do protótipo.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. H. Analise de desgaste em materiais aplicados em discos de freio. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

ANALOG DEVICES. **Precision Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation**. [S.l.], 2010. Rev. D.

BAJAEESC. 2008. Http://www.bajaeescusp.com/subsistemas. Accessed: fev,2018.

IOMBRILLER, S. F. **Análise térmica e dinâmica do sistema de freio a disco de veículos comerciais pesados**. 2002. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2002.

MALK, R. **Thermocouple Linearization When Using the UAD8495/AD8496/AD8497**. [S.l.], 2010. Rev. 0.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC 18F2455/2550/4555/4550 DATA SHEET**. [S.l.], 2009. DS39632E.

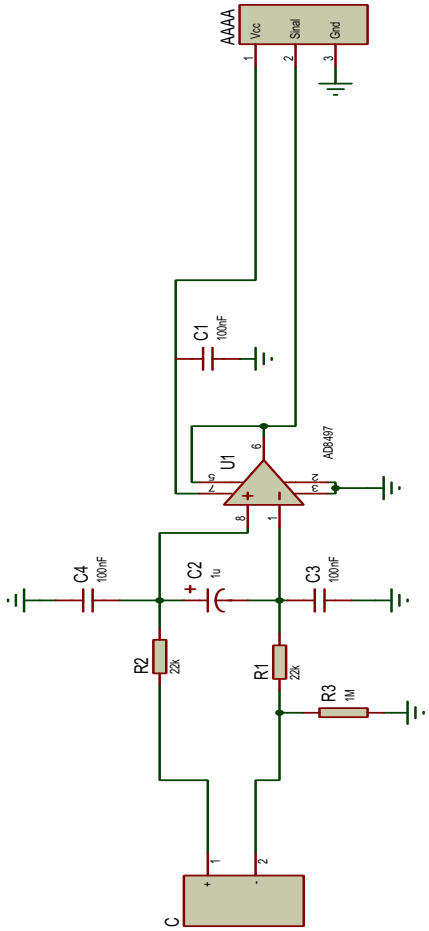
MINIPA. **Proposta Técnica - Termômetro Digital 2 Canais**. [S.l.].

SCERVINI, M. **Thermocouples Operating Principles**. Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge, 2009. Accessed: oct,2018.

Apêndices

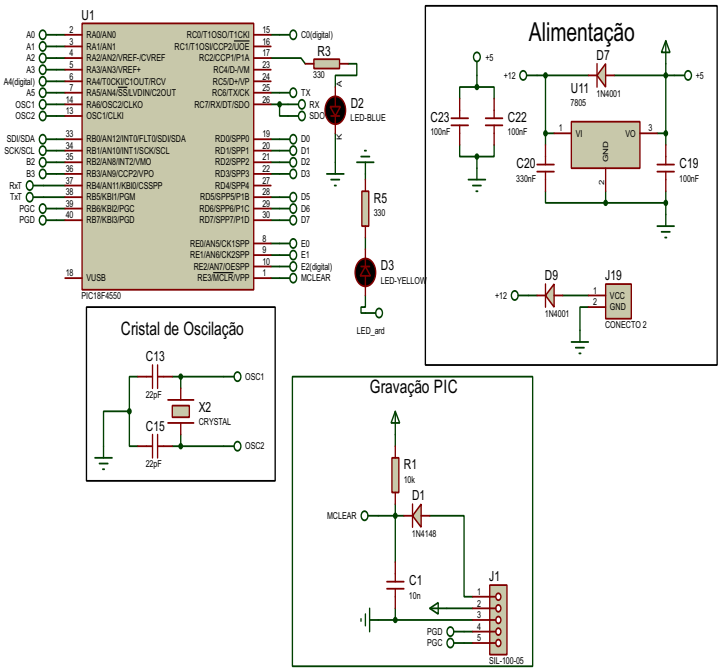
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO SENSOR DE TEMPERATURA

Figura A.1: Esquemático do módulo de aquisição de temperatura



APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO MICROCONTROLADOR

Figura B.1: Esquemático do microcontrolador



APÊNDICE C – CÓDIGO

```
//Bibliotecas utilizadas no projeto

#include <p18f4550.h>

#include <delays.h> // Adiciona a biblioteca do delay
#include <timers.h> // Adiciona a biblioteca dos timers
#include <stdio.h> // Adiciona a biblioteca padro de
    entradas e sa das
#include <adc.h>   //Adiciona a biblioteca de converso
    analogico-digital
#include <usart.h> //Adiciona a biblioteca de comunicao
    serial
#include <capture.h> //Adiciona a biblioteca de capture
#include <spi.h>
#include <stdlib.h>
#define Fosc 20 // Define a frequncia do oscilador :20Mhz

//*********
// Configuration Bits
// CONFIG1L
#pragma config PLLDIV = 1        // PLL Prescaler Selection bits
     (No prescale (4 MHz oscillator input drives PLL directly))
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2// System Clock Postscaler
    Selection bits ([Primary Oscillator Src: /1][96 MHz PLL Src:
     /2])
#pragma config USBDIV = 1        // USB Clock Selection bit (
    used in Full-Speed USB mode only; UCFG:FSEN = 1) (USB clock
    source comes directly from the primary oscillator block with
     no postscale)

// CONFIG1H
#pragma config FOSC = HS         // Oscillator Selection bits (
    HS oscillator (HS))
#pragma config FCMEN = OFF       // Fail-Safe Clock Monitor
    Enable bit (Fail-Safe Clock Monitor disabled)
#pragma config IESO = OFF        // Internal/External Oscillator
     Switchover bit (Oscillator Switchover mode disabled)
```

```
// CONFIG2L
#pragma config PWRT = OFF          // Power-up Timer Enable bit (
    PWRT disabled)
#pragma config BOR = ON            // Brown-out Reset Enable bits
    (Brown-out Reset enabled in hardware only (SBOREN is
    disabled))
#pragma config BORV = 3            // Brown-out Reset Voltage bits
     (Minimum setting 2.05V)
#pragma config VREGEN = OFF        // USB Voltage Regulator Enable
     bit (USB voltage regulator disabled)

// CONFIG2H
#pragma config WDT = OFF           // Watchdog Timer Enable bit (
    WDT disabled (control is placed on the SWDTEN bit))
#pragma config WDTPS = 512         // Watchdog Timer Postscale
    Select bits (1:512)

// CONFIG3H
#pragma config CCP2MX = ON         // CCP2 MUX bit (CCP2 input/
    output is multiplexed with RC1)
#pragma config PBADEN = ON         // PORTB A/D Enable bit (PORTB
    <4:0> pins are configured as analog input channels on Reset)
#pragma config LPT1OSC = OFF       // Low-Power Timer 1 Oscillator
     Enable bit (Timer1 configured for higher power operation)
#pragma config MCLRE = ON          // MCLR Pin Enable bit (MCLR
    pin enabled; RE3 input pin disabled)

// CONFIG4L
#pragma config STVREN = ON         // Stack Full/Underflow Reset
    Enable bit (Stack full/underflow will cause Reset)
#pragma config LVP = ON            // Single-Supply ICSP Enable
    bit (Single-Supply ICSP enabled)
#pragma config ICPRT = OFF         // Dedicated In-Circuit Debug/
    Programming Port (ICPORT) Enable bit (ICPORT disabled)
#pragma config XINST = OFF         // Extended Instruction Set
    Enable bit (Instruction set extension and Indexed Addressing
     mode disabled (Legacy mode))

// CONFIG5L
#pragma config CP0 = OFF           // Code Protection bit (Block 0
     (000800-001FFFh) is not code-protected)
#pragma config CP1 = OFF           // Code Protection bit (Block 1
```

```
    (002000-003FFFh) is not code-protected)
#pragma config CP2 = OFF        // Code Protection bit (Block 2
    (004000-005FFFh) is not code-protected)
#pragma config CP3 = OFF        // Code Protection bit (Block 3
    (006000-007FFFh) is not code-protected)

// CONFIG5H
#pragma config CPB = OFF        // Boot Block Code Protection
   bit (Boot block (000000-0007FFh) is not code-protected)
#pragma config CPD = OFF        // Data EEPROM Code Protection
   bit (Data EEPROM is not code-protected)

// CONFIG6L
#pragma config WRT0 = OFF       // Write Protection bit (Block
   0 (000800-001FFFh) is not write-protected)
#pragma config WRT1 = OFF       // Write Protection bit (Block
   1 (002000-003FFFh) is not write-protected)
#pragma config WRT2 = OFF       // Write Protection bit (Block
   2 (004000-005FFFh) is not write-protected)
#pragma config WRT3 = OFF       // Write Protection bit (Block
   3 (006000-007FFFh) is not write-protected)

// CONFIG6H
#pragma config WRTC = OFF       // Configuration Register Write
    Protection bit (Configuration registers (300000-3000FFh)
   are not write-protected)
#pragma config WRTB = OFF       // Boot Block Write Protection
   bit (Boot block (000000-0007FFh) is not write-protected)
#pragma config WRTD = OFF       // Data EEPROM Write Protection
    bit (Data EEPROM is not write-protected)

// CONFIG7L
#pragma config EBTR0 = OFF      // Table Read Protection bit (
   Block 0 (000800-001FFFh) is not protected from table reads
   executed in other blocks)
#pragma config EBTR1 = OFF      // Table Read Protection bit (
   Block 1 (002000-003FFFh) is not protected from table reads
   executed in other blocks)
#pragma config EBTR2 = OFF      // Table Read Protection bit (
   Block 2 (004000-005FFFh) is not protected from table reads
   executed in other blocks)
#pragma config EBTR3 = OFF      // Table Read Protection bit (
```

```
    Block 3 (006000-007FFFh) is not protected from table reads
    executed in other blocks)

// CONFIG7H
#pragma config EBTRB = OFF        // Boot Block Table Read
    Protection bit (Boot block (000000-0007FFh) is not protected
     from table reads executed in other blocks)

#define Slave_Select      PORTAbits.RA5
#define LED               PORTCbits.RC2

void MandaVetorTelemetria(char* Vetor, int Tamanho);
void MandaInformacaoTelemetria(int* VetorValores, int Tamanho);
void delay(unsigned int ms);
int atoi(const char * s );

void main(){

    unsigned char palavra[12];
    int temperatura;

   // C o n f i g u r a es  Master

    TRISBbits.TRISB1=0; //define como saida(SCK )
    TRISBbits.TRISB0=1; // define como entrada(SDI)
    TRISCbits.TRISC7=0; // define como saida(SDO)


   // configuraao led

    TRISCbits.TRISC2=0;
    TRISAbits.TRISA5=0;


    OpenUSART( USART_TX_INT_OFF
             &USART_RX_INT_OFF
             &USART_ASYNCH_MODE
             &USART_EIGHT_BIT
             &USART_BRGH_HIGH
             ,129);
```

```
    OpenSPI(SPI_FOSC_16, MODE_00, SMPEND);

    Slave_Select = 0;

    while(1)
    {

        getsSPI(palavra,12);

        MandaInformacaoTelemetria(palavra,12);
        delay(1000);

       if(LED==1)
       {
            LED=0;
       }
       else
           LED=1;

    }
}

void MandaInformacaoTelemetria(int* VetorValores, int Tamanho)
{
        int i;
        char ValorString[6] = {0,0,0,0,0,0};
        char Terminador;

        for(i=0;i<Tamanho;i++)
        {
                sprintf(ValorString, "%i", VetorValores[i]);
                MandaVetorTelemetria(ValorString,strlen(
                    ValorString));
                Terminador = ';';
                MandaVetorTelemetria(&Terminador,1);
        }
        Terminador = '\n';
        MandaVetorTelemetria(&Terminador,1);
}

void MandaVetorTelemetria(char* Vetor, int Tamanho)
```

```
{
        int i;
        for(i=0;i<Tamanho;i++)
        {
                putcUSART(Vetor[i]);
                delay(4);
        }
}



void delay(unsigned int ms)
{
    int i,j;
    for(i=0;i<=ms;i++)
        for(j=0;j<=120;j++);
}
```

ANEXO A – PLACA DE TESTES DO BAJA EESC

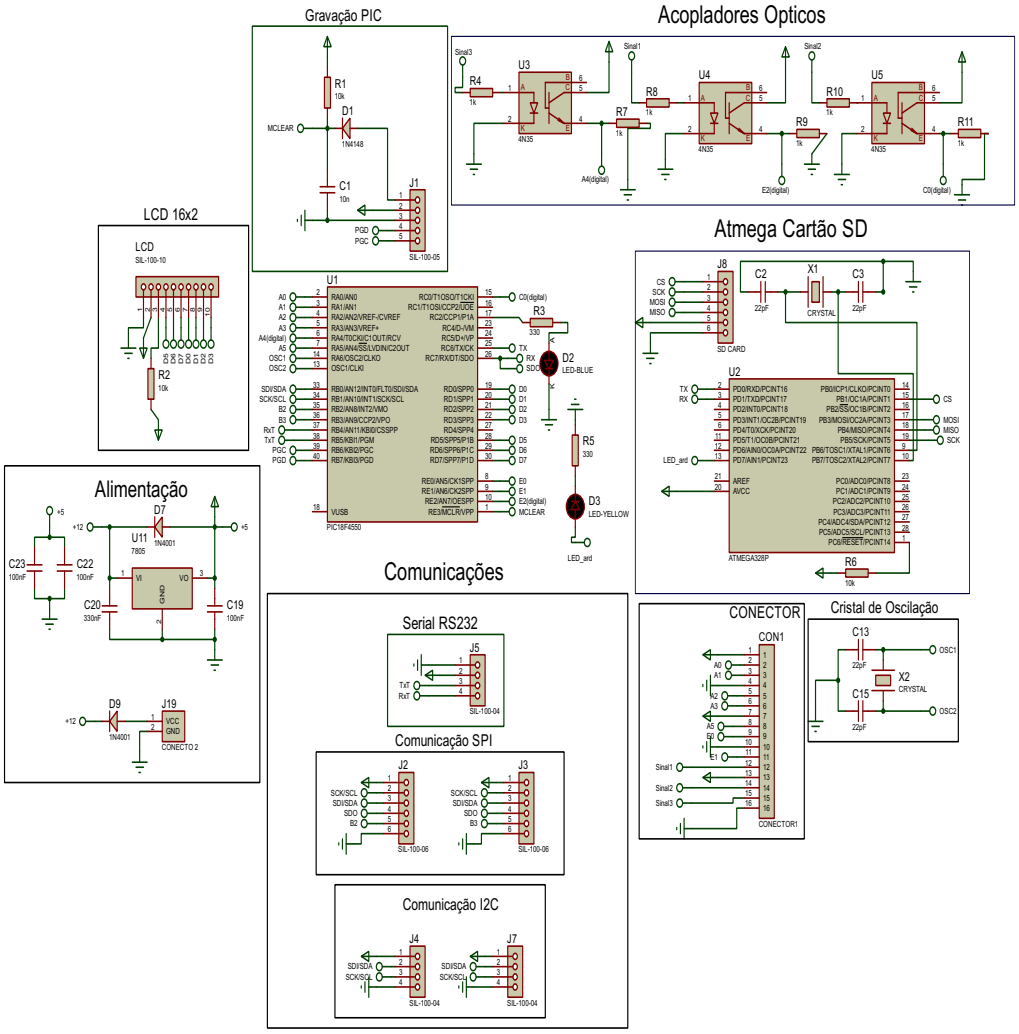



Figura A.1: Esquemático da placa de testes usada no carro BAJA EESC