

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS DIVINÓPOLIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

André Lucas Costa da Silva

**REAPROVEITAMENTO DA ENERGIA TÉRMICA DE UM MOTOR A COMBUSTÃO
PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO EFEITO PELTIER-SEEBECK**

Divinópolis.

2015.

André Lucas Costa da Silva

**REAPROVEITAMENTO DA ENERGIA TÉRMICA DE UM MOTOR A COMBUSTÃO
PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO EFEITO PELTIER-SEEBECK**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica, Eletrônica,

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício

Co-orientador: Prof. Me. Cláudio H. G. dos Santos

Divinópolis.

2015.

André Lucas Costa da Silva

**REAPROVEITAMENTO DA ENERGIA TÉRMICA DE UM MOTOR A COMBUSTÃO
PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO EFEITO PELTIER-SEEBECK**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica (Termodinâmica e Transferência de Calor) e Eletrônica (Circuitos Elétricos e Eletrônica de Potência).

Comissão Avaliadora

Professor Doutor Lúcio Flávio Santos Patrício (Orientador) – CEFET-MG

Professor Doutor João Carlos de Oliveira – CEFET-MG

Professor Doutor Evandro Fockink da Silva – CEFET-MG

Divinópolis.

2015.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, fica expressa aqui a minha gratidão.

Aos meus pais, Paulo Roberto da Silva e Maria Policena Costa da Silva, pelo apoio, pelo incentivo, pela colaboração e por toda a estrutura que me é fornecida durante toda a minha vida.

Ao professor Lúcio Flávio Santos Patrício, pela orientação, pela paciência, pela vontade de realizar o projeto e pelos ensinamentos durante todo esse tempo.

Ao professor Cláudio Henrique Gomes dos Santos, pela orientação, pelo interesse pelo projeto e pelo aprendizado nestes meses da realização do trabalho.

*Não há nada que você possa fazer que não possa ser feito.
Não há nada que você possa conhecer que não seja
conhecido. (John Lennon e Paul McCartney, 1967)*

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso abordou a temática do reaproveitamento de energia. Foi estudado e desenvolvido todo um sistema para captação de energia térmica e conversão desta em energia elétrica. A potência produzida foi utilizada no sistema elétrico do carro, na saída auxiliar de 12 V. O primeiro passo foi a montagem experimental do sistema de captação de energia térmica, que permitiu a avaliação do conjunto em funcionamento. Depois foram realizados os testes com os módulos termoelétricos para a obtenção de uma tensão de saída para diferentes valores de temperaturas de entrada. O passo seguinte foi projetar o conversor *boost*, em que uma tensão de 5 volts proveniente dos transdutores foi elevada para 12 volts na saída do circuito. Depois instalou-se o sistema de captação, composto pelos módulos termoelétricos na parte de baixo do veículo, junto ao escapamento. O carro era equipado com motor 1.0. O último passo do trabalho foi a aplicação da tensão de 12 volts no sistema elétrico do carro. Na saída do conversor *boost* foi ligado um acendedor de cigarro que permitiu o carregamento de um celular. Os resultados mostraram que em dias com temperaturas frias a eficiência da conversão da energia térmica em energia elétrica foi melhor do que em dias com temperaturas quentes. Essa eficiência diz respeito ao tempo em que os 12 V foram mantidos na saída. Isso aconteceu porque levando em conta que a temperatura do escapamento esteve sempre por volta de 90 °C, a maior diferença de temperatura ocorreu em dias frios onde a temperatura ambiente foi por volta dos 25 °C, contra 31 °C em dias quentes.

Palavras-chave: Reaproveitamento de energia térmica. Efeito Peltier-Seebeck. Placa de Peltier. Conversor *boost*.

ABSTRACT

This project focussed at reuse of energy. It studied and developed a whole system for the catchment of thermal energy and conversion into electrical energy. The generated power was used at car's auxiliary output of 12 V. The first step was the experimental mounting of system for the catchment of thermal energy, which enabled to evaluate the system operation. After there were the tests with the thermoelectric modules, which achieved an output voltage for different input values of temperature. The next step was to project the boost converter, where the voltage of 5 volts from the thermocouples was increased to 12 volts on output of the circuit. After that, it was necessary to install the collection system, formed by the thermoelectric modules at the bottom of the vehicle, close to the exhaust. The car was equipped with 1.0 engine. The last step of the work was the application of 12 volts at car's electrical system. At the exit of the boost converter was connected a cigarette lighter that allowed the loading of a cell phone. The results showed that in days with cold temperatures, the efficiency of conversion from thermal energy to electrical energy was better than in days with hot temperatures. This efficiency is about the time which 12 V is maintained at the output. It occurred because considering that the exhaust temperature was kept about 90°C, the highest temperature difference occurred in cold weather where the ambient temperature was about 25°C against 31°C on hot days.

Keywords: Reuse of Thermal Energy. Peltier-Seebeck Effect. Peltier Cell. Boost converter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 - Seção de um motor de quatro tempos.
- Figura 2.2 - Ciclo de trabalho de um motor de quatro tempos.
- Figura 2.3 - Diagrama do Ciclo de Carnot.
- Figura 2.4 - Ciclo-padrão a ar Otto.
- Figura 2.5 - Ciclo-padrão a ar Diesel.
- Figura 2.6 - Esquema de uma Placa de Peltier.
- Figura 2.7 - Circuito do conversor *boost*.
- Figura 2.8 - Circuito equivalente para a chave fechada.
- Figura 2.9 - Circuito equivalente para a chave aberta.
- Figura 2.10 - Corrente no capacitor.
- Figura 2.11 - Tensão na saída.
- Figura 2.12 - Eficiência do conversor *boost*.
- Figura 3.1 - Sequência das Atividades.
- Figura 3.2 - Montagem do sistema com uma Placa de Peltier.
- Figura 3.3 - Curva de Potência do módulo termoelétrico.

Figura 3.4 - Gráfico de Tensão x Potência.

Figura 3.5 - Curva de Potência do módulo termoeétrico, feita utilizando um transistor.

Figura 3.6 - Conversor *boost*, componentes eletrônicos.

Figura 3.7 - Conversor *boost*, trilhas de condução.

Figura 3.8 - Escapamento do veículo.

Figura 3.9 - Sistema de captação de energia térmica.

Figura 3.10 - Sistema de captação instalado no veículo.

Figura 3.11 - Sistema de captação instalado na parte final do escapamento.

Figura 3.12 - Ligação entre o sistema de captação e o conversor *boost*.

Figura 3.13 - Celular ligado à saída do conversor *boost*.

Figura 4.1 - Gráfico com os dados da Medição 1.

Figura 4.2 - Gráfico com os dados da Medição 2.

Figura 4.3 - Gráfico comparando as duas medições feitas.

Figura 4.4 - Módulos Termoeétricos instalados junto ao tubo do escapamento.

Figura 4.5 - Vista lateral dos módulos termoeétricos instalados junto ao escapamento.

Figura A - Condução em uma parede plana com geração uniforme de calor.

Figura B: Escoamento de ar no módulo termoelétrico.

Figura C - Onda quadrada para a ativação do mosfet.

Figura D - Conversor *Boost*.

Figura E - Tensões de saída e entrada do conversor *boost*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes de desempenho em função da temperatura.

Tabela 3.1 - Materiais utilizados durante o projeto.

Tabela 3.2 - Dados Técnicos do Produto. (Black & Decker)

Tabela 3.3 - Dados Técnicos do Produto. (Tany Produtos)

Tabela 3.4 - Dados técnicos do produto. (Digital Thermometer)

Tabela 3.5 - Especificações Multímetro Hikari. (Hikari Ferramentas)

Tabela 3.6 - Dados Técnicos do Produto. (Politerm Produtos)

Tabela 3.7 - Dados Técnicos da Fonte DC. (Politerm Produtos)

Tabela 3.8 - Dados Técnicos do Produto. (Agilent Produtos)

Tabela 3.9 - Dados Técnicos do Produto. (Mospec)

Tabela 3.10 - Dados Técnicos do Produto. (Minipa)

Tabela 3.11 - Teste para diferença de 59°C.

Tabela 3.12 - Associação dos módulos em série.

Tabela 3.13 - Associação dos módulos em paralelo.

Tabela 3.14 - Temperaturas ao longo do escapamento do veículo.

Tabela 3.15 - Variáveis analisadas.

Tabela 4.1 - Gastos do projeto.

LISTA DE NOTAÇÕES E ACRÔNIMOS

Letras Latinas

Q_H - Fluxo de calor absorvido (W)

Q_C - Fluxo de calor liberado (W)

T_H - Temperatura quente (K)

T_C - Temperatura fria (K)

q_s'' - Fluxo térmico (W/m²)

k - condutividade térmica (W/m.K)

$\frac{dT}{dx}$ - gradiente de temperatura

ρc - Capacidade calorífica volumétrica (J/m³.K)

\dot{q} - Taxa volumétrica de geração de energia (W/m³)

\dot{E}_g - Fluxo de energia interna (W)

V - Volume (m³)

I - Corrente Elétrica (A)

R - Resistência Elétrica (Ω)

$T_{s,1}$ - Temperatura da Superfície 1(K)

$T_{s,2}$ - Temperatura da Superfície 2(K)

C_1 e C_2 - Constantes de integração

h_x - coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K)

T_s - temperatura da superfície (K)

T_∞ - temperatura do ambiente (K)

V - velocidade de referência do fluido (m/s)

L = Comprimento da superfície (m)

\bar{h}_x = coeficiente médio de transferência de calor por convecção (W/m².K)

Pr - Número de Prandtl (adimensional)

Re - Número de Reynolds (adimensional)

Nu - Número de Nussel (adimensional)

Z - Figura de Mérito (1/K)

Bi_2Te_3 - Telureto de Bismuto

PbTe - Telureto de Chumbo

V_L - tensão no indutor (V)
 V_s - tensão de entrada (V)
 V_o - tensão de saída (V)
 T - período de chaveamento (s)
 D - razão cíclica (adimensional)
 f_s - frequência de chaveamento (Hz)
 I_o - corrente de saída (A)
 I_L - corrente no indutor (A)
 ΔI_L - variação da corrente no indutor (A)
 ΔV_o - variação da tensão de saída (V)

Letras Gregas

η - Rendimento térmico (adimensional)
 ν - viscosidade cinemática do fluido (m²/s)
 δ - Camada limite
 σ - constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$
 ε - emissividade, $0 \leq \varepsilon \leq 1$
 α - coeficiente de Seebeck, (V/K)

Acrônimos

MCI - Motor a Combustão Interna
PMS - Ponto Morto Superior
PMI - Ponto Morto Inferior
ORC - Organic Rankine Cycle – Ciclo Orgânico de Rankine
TEG - Thermoelectric Generator – Gerador Termoelétrico
TEC - Thermoelectric Cooler – Refrigerador Termoelétrico
PIC - *Programmable Interface Controller* - (Controlador de Interface Programável)
PWM - *Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso
CCS - Climate Control Seat – Assento Climatizado Controlado
DC - Direct Current – Corrente Contínua

SUMÁRIO

1- Introdução.....	1
1.1- Definição do problema.....	1
1.2- Motivação.....	1
1.3- Objetivos do Trabalho.....	2
1.4- Síntese dos Capítulos Posteriores.....	3
2- Revisão Bibliográfica.....	4
2.1- Motores a Combustão Interna (MCI).....	4
2.2- Termoelétricos.....	18
2.3- Circuitos Elevadores de Tensão.....	22
2.4- Estado da Arte.....	29
3- Metodologia.....	31
3.1- Aparato Experimental.....	32
3.2- Materiais Utilizados.....	33
3.2- Sequência de Atividades.....	40
4- Resultados e Discussões.....	50
5.1- Conclusões.....	57
5.2- Propostas para Trabalhos Futuros.....	58
6- Referências Bibliográficas.....	59
7- Apêndices.....	61
8- Anexos.....	74

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Este capítulo contém a definição do problema, a motivação, os objetivos e a síntese dos capítulos posteriores do trabalho.

1.1 Definição do problema

Neste trabalho de conclusão de curso, abordou-se a temática do reaproveitamento de energia térmica proveniente dos gases de escape de um motor a combustão interna. Foram acopladas ao escapamento de um veículo termopares que forneceram a energia elétrica que, por sua vez, passou por um circuito elevador de tensão. Posteriormente a energia foi utilizada no sistema elétrico de um automóvel, na saída auxiliar de 12 V. Trata-se de um trabalho que contemplou como eixos do curso de Engenharia Mecatrônica as áreas de Mecânica (Termodinâmica e Transferência de Calor) e Eletrônica (Circuitos Elétricos e Eletrônica de Potência).

1.2 Motivação

A motivação para desenvolver uma proposta de reaproveitamento de energia térmica está relacionada ao fato de ser um demanda existente nas pesquisas sobre o automobilismo de Fórmula 1, uma das principais categorias de inovação tecnológica do ramo, ou seja, a motivação é pessoal.

Ainda a respeito do mundo do automobilismo, uma nova categoria foi criada no ano de 2014, a Fórmula E. Os carros são movidos exclusivamente por um motor elétrico, cada carro utiliza duas baterias de 200 Kg por corrida, enquanto uma está na pista alimentando o motor, a outra está sendo carregada. Essa categoria foi criada para permitir o desenvolvimento de pesquisas na área de novos propulsores para automóveis.

Nesta questão da geração de energia renovável, uma das áreas que ainda não estão muito divulgadas é a de recuperação de energia e aumento do rendimento dos processos produtivos. Os desperdícios acumulados em qualquer processo produtivo, se contabilizados, podem representar até 20% dos custos energéticos de

uma empresa , segundo dados de 2005 do Eurostat (SIMÕES, 2012, p.3)

No projeto, o termoelétrico que foi utilizado é chamado de Placa de Peltier e é importante ressaltar que as vantagens dele são as ausências de peças móveis, de gás freon (gás a base clorofluorcarbonos), de ruído e de vibração; além do tamanho reduzido, alta durabilidade e precisão. Este transdutor é utilizado em inúmeros setores, principalmente os de bens de consumo, automotivo, industrial e militar.

No CEFET-MG *Campus V*, não foram encontrados sistemas em trabalhos anteriores que estudaram o efeito Peltier-Seebeck, assim sendo, a realização deste trabalho além de iniciar as pesquisas nesta área, também permitiu o reaproveitamento de uma energia dissipada para a geração de eletricidade, interesse central da atualidade.

1.3 Objetivos do trabalho

O projeto teve como objetivo geral estudar e desenvolver todo um sistema para captação de energia térmica e conversão desta em energia elétrica para utilização no sistema elétrico do carro, na saída auxiliar de 12 V.

Os objetivos específicos foram:

- construir um sistema para captar a energia térmica proveniente dos gases de escape de um motor a combustão interna;
- converter a energia térmica captada em energia elétrica, utilizando Placas de Peltier;
- montar um circuito eletrônico capaz de elevar a tensão gerada pelas placas de Peltier;
- aplicar, de acordo com a potência gerada, a tensão no sistema elétrico do carro, na saída auxiliar de 12 V;
- comparar resultados em diferentes temperaturas e vazões de gases.

1.4 Síntese dos capítulos posteriores

O presente Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se dividido em cinco capítulos.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica onde são tratados os assuntos de motor a combustão interna, termoelétricos e circuitos elevadores de tensão, além de falar sobre o que há de atual em pesquisas sobre o tema do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada na realização do trabalho. São mostrados: o aparato experimental, os materiais utilizados e a sequência de atividades realizadas até o final do trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados encontrados, as discussões e as comparações com outros projetos.

O capítulo cinco mostra as conclusões do projeto e o que pode ser feito como estudos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo estão apresentados os conceitos sobre o que é importante para a realização deste trabalho: motor a combustão interna, termoeletrônicos e circuitos elevadores de tensão.

2.1 Motores a Combustão Interna (MCI)

Como observado por Heywood (1988), motores de combustão interna são máquinas térmicas em que a energia química dos combustíveis é convertida em trabalho mecânico, ou seja, o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão.

Os primeiros motores a combustão externa apareceram no século XVIII e o combustível utilizado era a lenha, naquela época abundante e de baixo custo.

No século XIX apareceram os primeiros motores a combustão interna. Nestes, o combustível era queimado dentro do próprio motor e seu aparecimento resultou em um rápido desenvolvimento mecânico. Estes motores levaram vantagem sobre as máquinas a vapor pela sua versatilidade, eficiência, funcionamento inicial rápido e possibilidade de adaptação a diversos tipos de máquinas.

O primeiro motor a combustão interna foi construído pelo mecânico alemão J.J.E. Lenoir, em 1860, e tinha a potência de 735 W, trabalhando com gás de iluminação.

Em 1867, Nicolaus A. Otto e Eugen Langen, baseando-se na máquina de Lenoir, construíram um motor que comprimia a mistura de ar e gás de iluminação, com ignição feita por uma centelha elétrica.

Em 1862, o engenheiro francês Alphonse Beau de Rochas publicou estudos teóricos e descreveu os princípios do ciclo de quatro tempos baseado no motor de Otto. Este, por sua vez, baseado no estudo de Rochas, desenvolveu um motor: o motor de ciclo Otto apresentado em 1872. Estes motores usavam como combustível o gás de carvão ou o gasogênio, com ignição feita por centelha elétrica.

Em 1889, fez-se a primeira aplicação do motor de ciclo Otto em veículos, utilizando-se como combustível a gasolina.

Em 1893, o engenheiro alemão Rudolf Diesel descreveu um novo motor, no

qual a ignição da mistura ar mais combustível era feita por compressão. Este motor, que Diesel denominou “motor térmico racional”, acabou ficando conhecido como motor Diesel.

De acordo com Taylor (1971), dentre as máquinas térmicas usuais, o motor de combustão interna e a turbina a vapor são os mais usados. A turbina a gás tem uso na propulsão de aviões, em ciclos combinados e lugares com restrição de espaço.

Os motores modernos (célula de hidrogênio, híbridos, ar-comprimido e elétrico) são derivados dos construídos por Otto e Diesel e as características básicas dos mesmos são as seguintes:

- a) Motores de ciclo Otto: utilizam combustível de baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Para ignição necessitam de centelha produzida pelo sistema elétrico.
- b) Motores de ciclo Diesel: utilizam como combustível o óleo diesel. A inflamação do combustível injetado sob pressão no cilindro ocorre pela compressão de ar e consequente elevação da temperatura, espontaneamente.

2.1.1 Princípio de Funcionamento de um Motor a Combustão Interna

Conforme Stone (1997), os dois principais tipos de motores à combustão interna são: motores de ignição por centelha (Ciclo Otto), como mostrado na Figura 2.1, onde ocorre a ignição do combustível através da centelha das velas e motores de ignição por compressão (Ciclo Diesel) onde temperatura e pressão durante a compressão é suficiente para provocar a ignição espontânea do combustível. Devido ao ciclo térmico, em que o conjunto trabalha sobre quatro movimentos (admissão, compressão, combustão e escape), faz com que o movimento rotativo do virabrequim seja transferido para movimento alternativo nas bielas e pistões, gerando a potência necessária para a execução de qualquer trabalho mecânico. O ciclo se completa a cada quatro cursos do êmbolo, de onde vem a sua denominação.

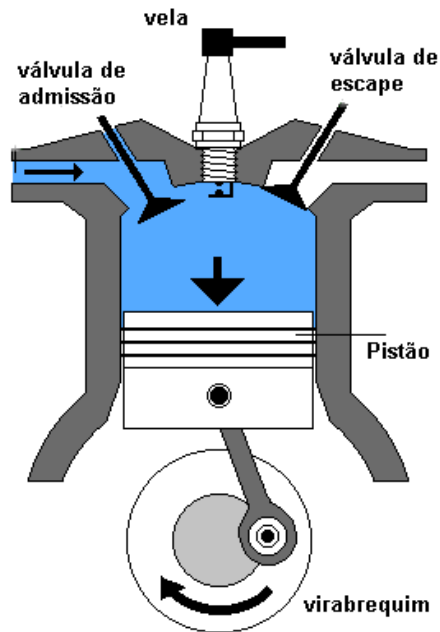


Figura 2.1 - Seção de um motor de quatro tempos. (Geocities, 2009).

O motor a combustão interna de pistão que funciona segundo o ciclo Otto, onde há centelha, e Diesel, não existe centelha, apresentam, durante o funcionamento, quatro fases. A série dessas quatro fases consecutivas é chamada de ciclo do motor, como ilustrado na Figura 2.2.

O detalhamento das fases, para um motor de 4 tempos com centelha de, é o seguinte:

1ª – Admissão:

O pistão, partindo do Ponto Morto Superior (PMS) para o Ponto Morto Inferior (PMI), o movimento descendente tende a provocar uma queda de pressão no cilindro, o que gera a aspiração dos gases através da válvula de admissão. Para que a admissão possa ser realizada, a válvula de admissão deve estar aberta e a de escape fechada. A válvula de admissão permanece aberta durante todo o curso de descida do pistão. Quando o pistão atingir o PMI, foi realizado um curso e meia volta da árvore de manivelas, ou seja, um tempo.

2ª – Compressão:

No segundo tempo, o pistão partirá do PMI para o PMS (movimento ascendente). A válvula de admissão e de escape ficarão fechadas. Com isso a mistura ar e combustível não tem como escapar do cilindro, sendo comprimidos pelo pistão. Para um motor a gasolina, essa compressão poderá ser de 8 a 10 vezes maior que o seu volume na admissão, ou seja, será fortemente comprimido na câmara de explosão.

3ª – Combustão:

No final do segundo tempo, através do sistema de ignição, é produzido uma centelha elétrica nos eletrodos da vela. Com isso, iniciará o processo de combustão da mistura ar-combustível. Com a inflamação ocorrerá o aumento de temperatura e a dilatação dos gases. A pressão subirá rapidamente o que provocará a impulsão do pistão novamente para o PMI. Durante todo o tempo de combustão, as duas válvulas se manterão fechadas. O terceiro tempo também pode ser chamado de tempo motor, pois, é o único que realiza trabalho.

4ª – Escape:

Ao atingir o PMI, a válvula de escape começará a abrir-se e o pistão voltará para o PMS. Com isso, os gases queimados poderão sair do cilindro pelo coletor de escape. No quarto tempo, somente a válvula de escape ficará aberta. Quando o pistão atingir o PMS, a válvula de escape estará fechada e a de admissão iniciará sua abertura. A partir desse momento, começa tudo de novo.

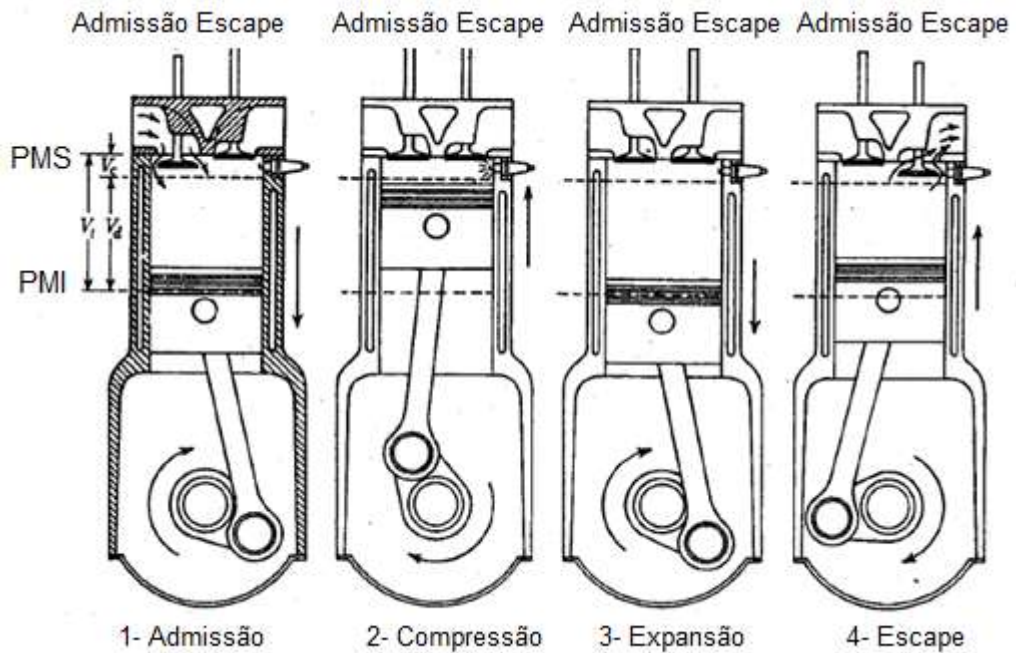


Figura 2.2 - Ciclo de trabalho de um motor de quatro tempos. (Adaptado de Heywood, 1988).

2.1.2 O MCI como Fonte de Energia Térmica

Para apresentar um motor a combustão interna como fonte de energia térmica é necessário definir o que é Ciclo de Carnot, Ciclo Otto e Ciclo Diesel.

1 – Ciclo de Carnot

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) publicou em 1823 um artigo com nome de “Reflexões sobre a potência motriz do fogo”. Conhecido com o nome de “Ciclo de Carnot”, este ciclo teórico se compõe das seguintes fases, como mostrada na Figura 2.3: **AB** = expansão isotérmica; **BC** = expansão adiabática; **CD** = compressão isotérmica; **DA** = compressão adiabática.

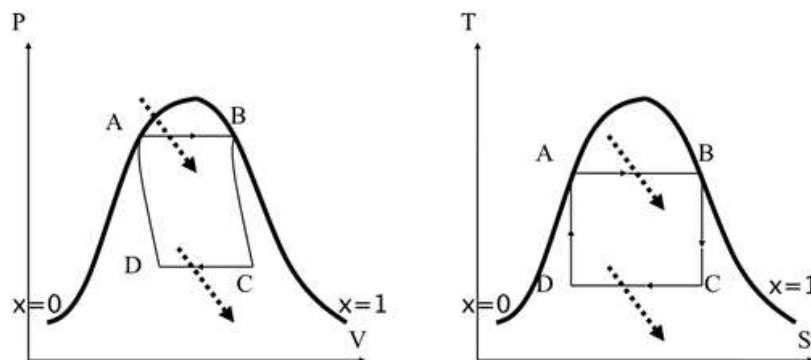


Figura 2.3 - Diagrama do Ciclo de Carnot. (Máquinas Térmicas, 2009)

O ciclo de Carnot pode ser descrito da seguinte maneira:

Na primeira fase, chamada de expansão isotérmica (**AB**), o gás sofre uma expansão de A para B onde não há mudança de temperatura, recebendo uma quantidade de calor Q_H da fonte quente que está a uma temperatura T_H .

A segunda fase chamada de expansão adiabática (**BC**), partindo do estado B, o gás continua se expandido, mas agora adiabaticamente (isto significa que não há troca de calor) até atingir o estado C. Apesar de não haver troca de calor, o gás se resfria da temperatura mais alta T_H até atingir uma temperatura mais baixa T_C . Essa diminuição de temperatura ocorre pelo fato de que o gás precisa utilizar parte de sua energia interna para realizar trabalho.

Na terceira fase conhecida como compressão isotérmica (**CD**), agora partindo do estado C, o gás é comprimido isotermicamente à temperatura T_C até o estado D, enquanto libera uma parcela de calor Q_C para a fonte térmica de temperatura mais baixa, também chamada de fonte fria.

A quarta fase, conhecida como compressão adiabática (**DA**), a partir do estado D, o gás, através de uma compressão adiabática retorna ao estado inicial A, durante a qual o gás se aquece até a temperatura inicial T_H sem troca de calor com o meio.

2 – Ciclo Otto

O ciclo padrão a ar Otto é um ciclo ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha. Os diagramas P - V e T - S desse ciclo estão mostrados na Figura 2.4. O processo **1-2** é uma compressão isentrópica do ar quando o pistão se move, do PMI para o PMS. O calor é então transferido para o ar, a volume constante, enquanto o pistão está momentaneamente em repouso no PMS (em um motor real, este processo corresponde à ignição da mistura combustível-ar pela centelha, e à queima subsequente). O processo **3-4** é uma expansão isentrópica e o processo **4-1** é o de rejeição de calor do ar, enquanto o pistão está no PMI.

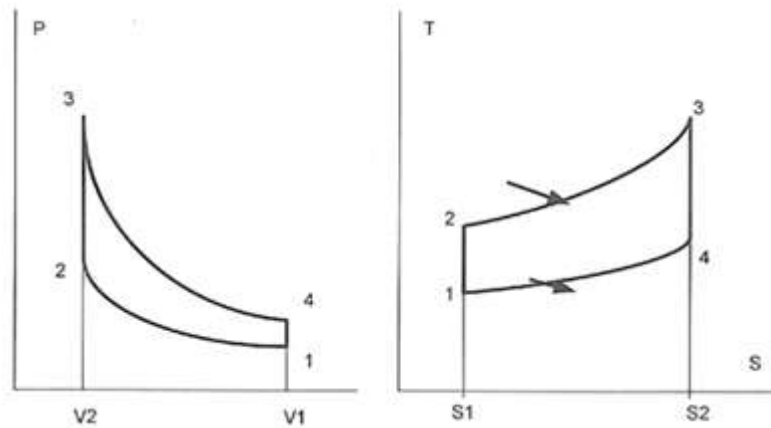


Figura 2.4 - Ciclo-padrão a ar Otto. (Máquinas Térmicas, 2009)

3 – Ciclo Diesel

A Figura 2.5 mostra o ciclo-padrão de ar Diesel. Este é o ciclo ideal para o motor Diesel que também é conhecido por motor de ignição por compressão.

Neste ciclo, o calor é transferido ao fluido de trabalho a pressão constante. Este processo corresponde à injeção e queima do combustível no motor Diesel real. Como o gás expande durante a transferência de calor no ciclo-padrão a ar, a transferência de calor deve ser apenas o suficiente para manter a pressão constante. Quando se atinge o estado 3, a transferência de calor cessa e gás sofre uma expansão isoentrópica (processo 3-4) até que o pistão atinja o PMI. A rejeição de calor, como no ciclo-padrão Otto, ocorre a volume constante e com o pistão no PMI. Esta rejeição simula os processos de descarga e de admissão do motor real.

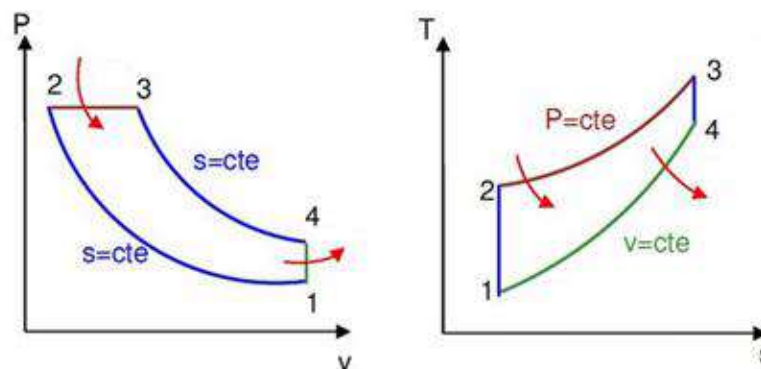


Figura 2.5 - Ciclo-padrão a ar Diesel. (Máquinas Térmicas, 2009)

2.1.3 Eficiência Térmica de um MCI

De acordo com Heywood (1988), a razão entre o trabalho produzido com a quantidade de energia fornecida por ciclo que pode ser liberada no processo de combustão é habitualmente utilizada como uma medida da eficiência do motor. A energia do combustível fornecida que pode ser liberada pela combustão é dada pela massa do combustível fornecido ao motor multiplicado pelo valor do calor de combustão. O valor do calor de combustão define o conteúdo energético do combustível, ele é determinado em um procedimento de teste normalizado no qual uma massa conhecida de combustível está totalmente em combustão, e a energia térmica liberada pelo processo é absorvida por um calorímetro.

Esta medida de eficiência do motor pode ser dada por:

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_f Q_{HV}} \quad (2.1)$$

Onde: m_f é a massa de combustível por ciclo (Kg);

Q_{HV} é o calor de combustão(J/Kg);

W_c é o trabalho realizado (J).

A eficiência da conversão de combustível é a definição mais utilizada para a eficiência do motor, pois ela usa uma fácil medição do calor de combustão para definir a energia utilizável de combustível fornecida para o motor.

2.1.4 Transferência de Calor

A transferência de calor é o transporte de energia que ocorre quando quantidades de matéria que apresentam temperaturas diferentes são colocadas em contato térmico. De acordo com Moran *et al* (2005), a partir do estudo da termodinâmica, aprende-se que a energia pode ser transferida através de interações que incluem a transferência de energia por calor e trabalho, assim como a transferência de energia associada com escoamento de massa.

2.1.4.1 Modos de Transferência de Calor

A transferência de calor pode ocorrer de 3 diferentes modos: condução, convecção e radiação.

1- Condução

Segundo Moran *et al* (2005), a análise da condução diz respeito à determinação da distribuição de temperatura em um meio resultante das condições em suas fronteiras. Com o conhecimento da distribuição de temperatura, a distribuição do fluxo térmico pode ser determinada utilizando-se a lei de Fourier.

A lei de Fourier unidimensional relaciona o fluxo térmico (W) na direção x , a área (m^2), ao produto da condutividade térmica ($W/m.K$) pelo gradiente de temperatura (dT/dx), na direção x .

$$q'_s = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Considerando a maneira pela qual a distribuição de temperatura em um meio resultante das condições impostas nas fronteiras pode ser determinada, para o caso de condição transiente unidimensional com geração volumétrica de energia, a equação do calor é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

Onde a temperatura é uma função da coordenada x e do tempo, $T(x,t)$.

Condições de regime permanente, com geração volumétrica de energia:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \dot{q} = 0 \quad (2.4)$$

Condições de regime permanente, sem geração volumétrica de energia:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Onde a temperatura, $T(x)$, depende apenas da coordenada x .

Existe o aparecimento das propriedades ρ , c e k na equação de calor (2.3). O produto ρc (J/m³.K) é denominado capacidade calorífica volumétrica e mede a capacidade de um material armazenar energia sob forma de calor. A condutividade térmica (k) é uma propriedade de transporte que depende principalmente do material, uma vez que é o coeficiente de taxa associado à Lei de Fourier.

Os problemas de condução para os quais a distribuição de temperatura em um meio era determinada unicamente pelas condições nas fronteiras podiam ser representados por resistências de circuitos térmicos. Existe um efeito adicional na distribuição de temperatura de processos que podem estar ocorrendo no interior do meio. Em particular, trata-se das geometrias comuns com uma taxa volumétrica uniforme de geração de energia \dot{q} (W/m³), que surge dos processos de conversão de energia. Para essa situação o meio não pode ser representado por um circuito térmico, mas é necessário resolver a equação de calor para obter a distribuição de temperatura e, assim sendo, o fluxo térmico.

Todos os fenômenos que levam à geração de energia interna podem ser modelados como ocorrendo de forma distribuída e a taxa total de geração interna é proporcional ao volume. Assim, eles são denominados fenômenos volumétricos. Se a geração de energia interna $\dot{E}g$ (W) ocorre uniformemente através de um meio de volume V (m³), pode-se definir a taxa de geração volumétrica \dot{q} (W/m³).

$$\dot{q} = \frac{\dot{E}g}{V} \quad (2.6)$$

No caso do fluxo de corrente elétrica através de um resistor, a taxa de geração de energia interna, também conhecida como dissipação de potência elétrica, pode ser representada como:

$$\dot{E}g = I^2 \cdot R \quad (2.7)$$

Onde: I = corrente elétrica (A);

R = resistência elétrica (Ω);

$\dot{E}g$ = taxa de geração de energia interna (W).

Considere um parede plana na qual há geração uniforme de energia por unidade de volume (\dot{q} constante) e as superfícies são mantidas em $T_{s,1}$ e $T_{s,2}$. Para uma condutividade térmica k constante, a forma apropriada da equação de calor é:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.8)$$

A solução geral para a distribuição de temperatura é:

$$T = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + C_1x + C_2 \quad (2.9)$$

Onde: C_1 e C_2 são as constantes de integração. Por substituição, pode ser verificado que a Equação (2.9) é uma solução para a equação de calor. Para as condições de contorno temos:

$$T(0) = T_{s,1} \quad \text{e} \quad T(L) = T_{s,2}$$

As constantes de integração podem ser calculadas e são da forma:

$$C_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2L} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{\dot{q}}{2k}L^2 + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

Então a distribuição de temperatura para o caso de as condições de contorno assimétricas é:

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2} \frac{x}{L} + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad (2.10)$$

2- Convecção

De acordo com Moran *et al* (2005), o problema da convecção é determinar os efeitos da geometria da superfície e das condições de escoamento no coeficiente de convecção resultante (h) das camadas limites que se desenvolvem sobre a superfície.

O calor transferido por convecção é dado por:

$$q_{conv} = h_x A (T_s - T_\infty) \quad (2.11)$$

Onde: h_x = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K);

T_s = temperatura da superfície (K);

T_∞ = temperatura do ambiente (K).

De acordo com a equação 2.12, é possível encontrar o calor total transferido por convecção.

$$q = \bar{h}_x \cdot A (T_s - T_\infty) \quad (2.12)$$

Onde: \bar{h}_x = coeficiente médio de transferência de calor por convecção (W/m².K). Esse coeficiente geralmente é obtido através de correlações que incorporam Reynolds, Nusselt e Prandtl.

O escoamento paralelo sobre uma placa plana ocorre em várias aplicações de engenharia. As condições de escoamento da camada limite são caracterizadas pelo número de Reynolds.

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2.13)$$

Onde: V = velocidade de referência do fluido (m/s);

L = comprimento da superfície (m);

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

O número de Prandtl é definido pela equação 2.14:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.14)$$

Onde: ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s);

α = difusividade térmica (m²/s).

Para escoamento laminar, as espessuras das camadas limites hidrodinâmica e térmica dependem do número de Prandtl, número adimensional representando a razão da quantidade de movimento e as difusividades térmicas.

$$\delta = 5x Re_x^{-1/2} \quad (2.15)$$

$$Re_L = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu} \quad (2.16)$$

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{k} = 0,332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.17)$$

A expressão para o coeficiente médio de transferência de calor por convecção para uma superfície plana é dada por:

$$\overline{Nu}_x = \frac{\overline{h}_x \cdot x}{k} = 0,664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.18)$$

Onde: h_x = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K);

\overline{h}_x = coeficiente médio de transferência de calor por convecção (W/m².K);

k = condutividade térmica (W/m);

Pr = número de Prandtl.

Para escoamento turbulento, o desenvolvimento da camada limite é fortemente influenciado pela velocidade aleatória e menos pelo movimento molecular. Portanto, o crescimento relativo de camada limite não depende do número de Prandtl. Isto é, as espessuras das camadas limites hidrodinâmica e térmica são aproximadamente iguais.

$$\delta = 0,37x Re_x^{-1/5} \quad (2.19)$$

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{k} = 0,0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2.20)$$

3- Radiação

Como Moran *et al* (2005), todas as superfícies a uma temperatura não-nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Portanto, na ausência de um meio interveniente, há transferência de calor por radiação entre duas superfícies que estejam com temperaturas diferentes.

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.21)$$

Onde: σ = constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$

ε = emissividade, $0 \leq \varepsilon \leq 1$;

T_s = temperatura na superfícies (K);

T_{viz} = temperatura na vizinhança (K).

2.1.5 Transferência de Calor nos MCI's

No motor encontra-se o modo de transferência de calor por condução no cabeçote, paredes do cilindro, pistão, bloco e coletores. Já o modo de transferência de calor por convecção é forçado em regime turbulento, pois existe bombeamento dos fluidos, ocorre entre os gases e líquidos e as paredes dos componentes do motor. A Radiação é um modo secundário de transferência de calor entre os gases quentes durante a queima e as paredes do cilindro, é mais significativo em motores de ignição por compressão (ciclo Diesel) devido a presença de fuligem durante uma fase da queima do combustível no cilindro. Em um motor a combustão existe radiação térmica proveniente do coletor de escape.

2.2 Termoelétricos

De acordo com Hargreaves, Vasconcellos e Barros (2013), termoelétricos são associados com fenômenos térmicos e elétricos, pois podem converter energia térmica em energia elétrica e vice-versa. Em geral, os módulos termoelétricos possuem dois modos de funcionamento: geração de energia elétrica e refrigeração. Os geradores aproveitam o calor rejeitado de certas fontes para criar um gradiente de temperatura necessário para a geração de uma tensão contínua. Os refrigeradores, utilizam uma diferença de potencial elétrico aplicada nas junções para criar o gradiente de temperatura entre as placas. Basicamente, desde a descoberta dos efeitos termoelétricos no início do século XIX, houve pouco desenvolvimento no que diz respeito a melhora de sua eficiência.

2.2.1 Efeito Seebeck

Conforme Hargreaves, Vasconcellos e Barros (2013), o efeito Seebeck consiste na conversão de um gradiente de temperatura em energia elétrica. A diferença de temperatura imposta sobre duas junções A e B é capaz de gerar uma diferença de potencial entre elas

Assim, a tensão é proporcional à variação de temperatura. O coeficiente de proporcionalidade é denominado coeficiente de Seebeck e é expresso em V/K.

A equação 2.22 descreve o efeito Seebeck.

$$V_{AB} = \alpha \Delta T \quad (2.22)$$

Onde: V_{AB} = tensão em circuito aberto (V);

α = coeficiente de Seebeck, (V/K);

ΔT = diferença de temperatura entre a parte quente e a fria (K).

2.2.2 Efeito Peltier

Segundo Hargreaves, Vasconcellos e Barros (2013), o efeito Peltier pode ser interpretado como o inverso do efeito Seebeck. Nesse caso, o gradiente de

temperatura entre as placas é obtido através da aplicação de uma corrente elétrica nos semicondutores, sendo que o calor gerado é proporcional à essa corrente de entrada e o seu sinal muda se essa corrente é invertida.

2.2.3 Placas de Peltier

As Placas de Peltier, também conhecidas como pastilhas termoelétricas, são pequenas unidades que utilizam tecnologia de matéria condensada para operarem com a finalidade de transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente. Uma unidade típica tem espessura de alguns milímetros e forma quadrada (4x40x40 mm). Esses módulos são a união de placas cerâmicas com pequenos cubos de Bi_2Te_3 (telureto de bismuto) entre as placas de cerâmica. Essa série de elementos é soldada entre as duas placas cerâmicas, eletricamente em série e termicamente em paralelo. Quando uma corrente DC passa por um ou mais pares de elementos de tipo-n e tipo-p, há uma redução na temperatura da junta (lado frio) resultando em uma absorção do calor do ambiente. Este calor é transferido pela pastilha por transporte de elétrons e emitido no outro lado (lado quente) via elétrons que movem de um estado alto para um estado baixo, como é mostrado na Figura 2.6. Uma típica pastilha de Peltier, funciona de acordo com o efeito Peltier-Seebeck. Os efeitos estão descritos abaixo.

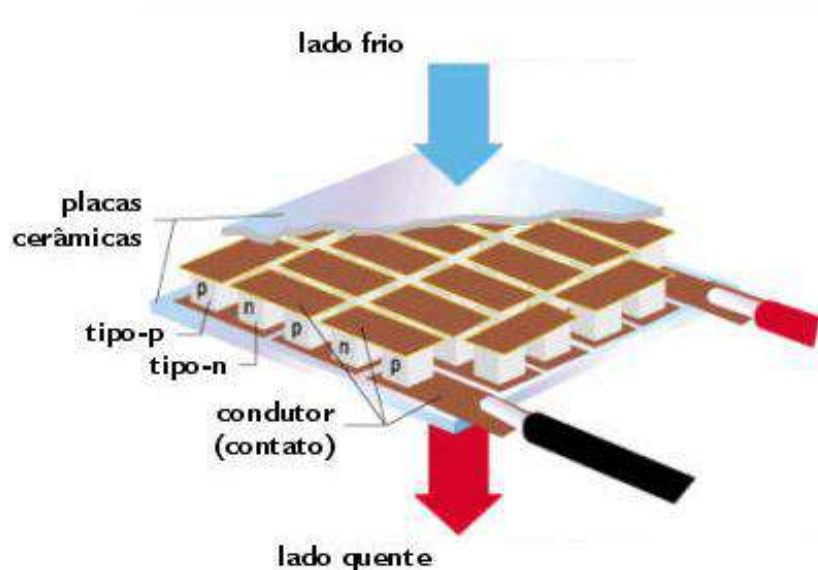


Figura 2.6 - Esquema de uma Placa de Peltier. (Termopares, 2010)

A condutividade térmica de um módulo termoelétrico pode ser calculada utilizando a equação 2.23:

$$k = \frac{KA}{L} \quad (2.23)$$

Onde: K = condutância térmica (W/m².K);

A = área do elemento termoelétrico (m²);

L = comprimento do elemento termoelétrico (m).

2.2.4 Figura de mérito

A figura de mérito é uma função matemática que representa o desempenho do equipamento. No caso dos termoelétricos, é dada para cada material e expressa por 1/K, podendo ser expressa pela equação 2.24:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (2.24)$$

Onde α = coeficiente de Seebeck, (V/K);

ρ = resistividade elétrica (Ohm·m);

k = condutividade térmica (W/m-K).

Geralmente, um alto coeficiente de Seebeck e uma baixa resistividade elétrica e condutividade térmica garantem um bom valor de Z. Para evitar a redução da condutividade térmica do módulo, usa-se aumentar o coeficiente de Seebeck ou então diminuir a resistividade elétrica do componente. A Tabela 2.1 mostra os valores de figura de mérito para alguns semicondutores.

Tabela 2.1 - Coeficientes de desempenho em função da temperatura. (Lee, 2010.)

Material	Tipo	Temperatura (°C)	Figura de Mérito Z (1/K)
Bi_2Te_3	p	25	$2,5 \times 10^{-3}$
Bi_2Te_3	n	25	$2,5 \times 10^{-3}$
$SbBiTeSe$	p	70	3×10^{-3}
$BiSbTe$	p	150	$2,5 \times 10^{-3}$
$Bi_2Te_3 - 74Sb_2Te_3$	n	150	3×10^{-3}
$Bi_2Te_3 - 25Bi_2Se_3$	p	150	$2,7 \times 10^{-3}$
$PbTe$	n,p	450 (325 – 625)	$1,3 \times 10^{-3}$
$ZnSb$	p	175	$1,4 \times 10^{-3}$
$SiGe$	p	1000	$0,4 \times 10^{-3}$
$SiGe$	n	1000	$0,8 \times 10^{-3}$
$GeTe$	p	450	$1,7 \times 10^{-3}$
$MnTe$	p	90	$0,4 \times 10^{-3}$
$AgSbTe_2$	p	400	$1,3 \times 10^{-3}$
$InAs$	n	700	$0,7 \times 10^{-3}$

Segundo Pereira (2010), para refrigeração, o par de Bi_2Te_3 é o mais utilizado. Já para geração de energia, opta-se por o usar o par de $PbTe$. A maioria das propriedades das junções é mascarada pelo efeito de dopagem dos semicondutores, que consiste na adição de impurezas a um elemento semiconductor para transformá-lo mais condutor, porém com propriedades mais controladas.

2.2.5 Eficiência de conversão das Placas de Peltier

Segundo *Thermoelectrics* (2008), pode ser demonstrado que a eficiência máxima de um material termoelétrico depende de dois termos. A primeira é a eficiência de Carnot, em que todas as máquinas térmicas não podem exceder essa eficiência. O segundo é um termo que depende das propriedades termoelétricas, coeficiente Seebeck, resistividade elétrica e condutividade térmica, que juntas formam a propriedade do material que nós chamamos Z, a figura de Mérito, descrita na seção 2.2.4.

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1+Z} - 1}{\sqrt{1+Z} + 1} \quad (2.25)$$

2.3 Circuitos Elevadores de Tensão

Segundo Skvarenina (2002), a finalidade de um conversor DC-DC é fornecer tensão de saída regulada para uma resistência de carga variável a partir de uma tensão DC na entrada. Conversores DC-DC são muito usados em equipamentos que requerem um valor de tensão contínua regulada, tais como computadores, instrumentos médicos, dispositivos de comunicação, aparelhos televisores e carregadores de bateria.

2.3.1 Conversor Boost

De acordo com Hart (2012), o conversor *boost*, mostrado na Figura 2.7, é um conversor chaveado que funciona pelo fechamento e abertura ou comutação periódica de uma chave eletrônica. Ele é chamado conversor *boost* ou elevador, porque a tensão na saída é maior que a da entrada.

A análise deste circuito é feita pelo exame da corrente e tensão no indutor para a chave fechada e depois para a chave aberta.

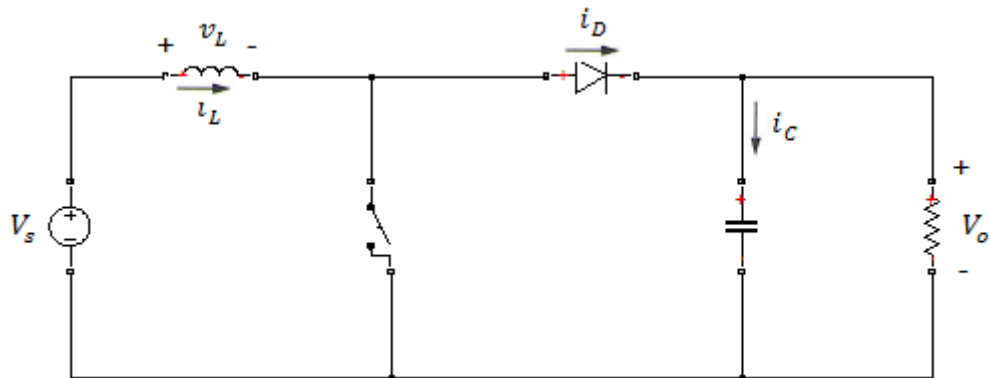


Figura 2.7 - Circuito do conversor *boost*. (Hart, 2012)

Análise para a chave fechada: quando a chave é fechada, o diodo fica polarizado reversamente. A lei de Kirchhoff em torno da malha contendo fonte, indutor e a chave fechada é:

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \qquad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \qquad (2.26)$$

A taxa de variação da corrente é uma constante, logo a corrente aumenta linearmente enquanto a chave ficar fechada, como mostrado na Figura 2.8. A variação na corrente é calculado por:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L}$$

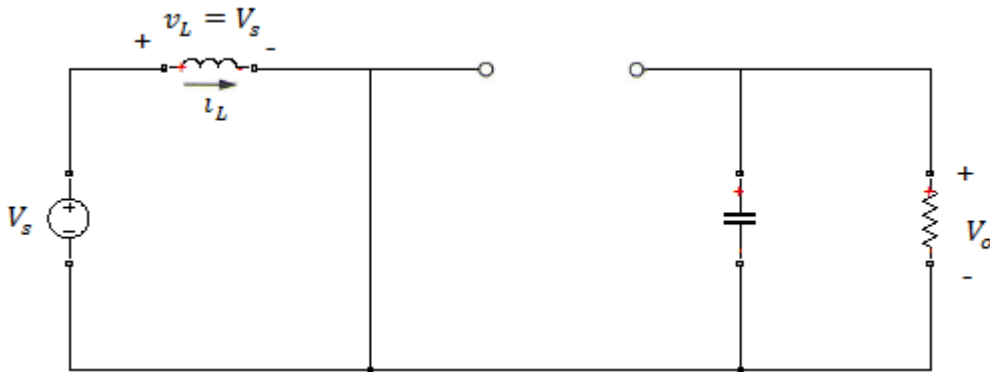


Figura 2.8 - Circuito equivalente para a chave fechada. (Hart, 2012)

Resolvendo para Δi_L com a chave fechada,

$$(\Delta i_L)_{fechada} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.27)$$

Análise para a chave aberta: quando a chave está aberta, Figura 2.9, a corrente no indutor não pode mudar instantaneamente, então o diodo fica polarizado diretamente para fornecer um caminho para a corrente no indutor. Supondo que a tensão na saída V_o seja constante, a tensão no indutor é:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

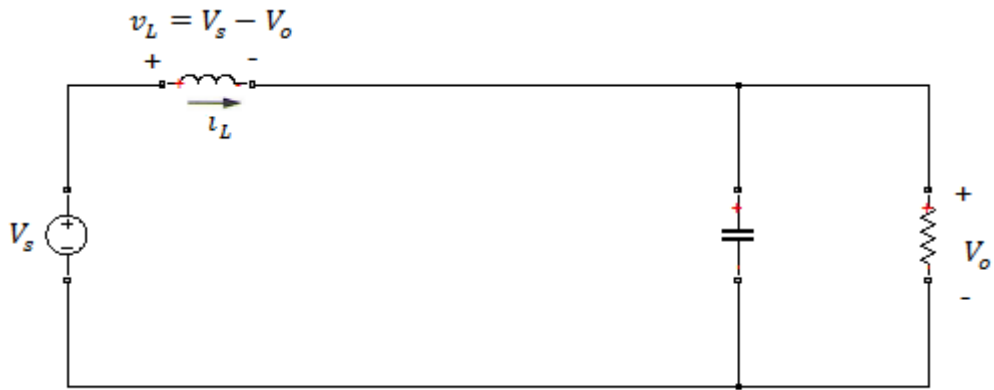


Figura 2.9 - Circuito equivalente para a chave aberta. (Hart, 2012)

A taxa de variação na corrente do indutor é uma constante, logo a corrente muda linearmente enquanto a chave está aberta. A variação na corrente do indutor enquanto a chave está aberta é:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

Resolvendo para Δi_L ,

$$(\Delta i_L)_{aberta} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \quad (2.28)$$

Para o funcionamento no estado estável, a variação líquida na corrente do indutor é zero. Usando as equações (2.27) e (2.28),

$$(\Delta i_L)_{fechada} + (\Delta i_L)_{aberta} = 0$$

$$\frac{V_s D T}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0$$

Resolvendo para V_o ,

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (2.29)$$

A equação (2.29) mostra que se a chave ficar sempre aberta e D for zero, a tensão na saída será a mesma da entrada. Como a razão cíclica aumenta, o denominador da equação (2.29) torna-se menor, resultando em uma tensão na saída maior.

A corrente média no indutor é determinada sabendo-se que a potência média fornecida pela fonte deve ser a mesma potência média absorvida pelo resistor de carga. A potência na saída é $V_o I_o$ e a potência na entrada é $V_s I_s = V_s I_L$. Equacionando as potências de entrada e de saída e usando a equação (2.29), a corrente no indutor I_L pode ser expressa como:

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_o^2}{V_s R} = \frac{V_o I_o}{V_s} \quad (2.30)$$

As correntes máxima e mínima no indutor são determinadas pelo uso do valor médio e da variação na corrente pela equação (2.27).

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s D T}{2L} \quad (2.31)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L} \quad (2.32)$$

A equação (2.29) foi desenvolvida com a suposição de que o modo é de condução contínua no indutor, significando que ela é sempre positiva. A condição necessária para um modo de condução contínua no indutor é que I_{min} seja positiva. Logo, o limite entre os modos contínuo e descontínuo no indutor é determinado por:

$$I_{min} = 0 = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s D T}{2L}$$

Portanto o valor mínimo de indutância que garante a operação no modo de condução contínua num conversor *boost*:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.33)$$

Um conversor *boost* projetado para funcionar no modo de condução contínua terá um indutor com valor maior que L_{min} . Como uma perspectiva de projeto, é útil expressar L em termos de Δi_L desejado.

$$L = \frac{V_s DT}{\Delta i_L} = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (2.34)$$

Tensão de ondulação na saída: as equações anteriores foram desenvolvidas com a suposição de que a tensão na saída era constante, implicando numa capacitância infinita. Na prática, uma capacitância finita resultará numa flutuação na tensão de saída ou ondulação.

A tensão de ondulação de pico a pico na saída pode ser calculada pela forma da corrente no capacitor, mostrado na Figura 2.10.

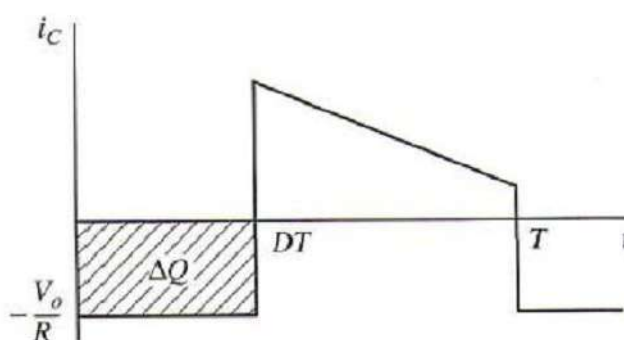


Figura 2.10 - Corrente no capacitor. (Hart, 2012)

Uma expressão para a tensão de ondulação é então:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.35)$$

Onde f é a frequência de chaveamento. Alternativamente, expressando a capacitância em termos da tensão de ondulação na saída produz:

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f} \quad (2.36)$$

Resistência no indutor: os indutores devem ser projetados para terem baixos valores de resistência para minimizar as perdas e maximizar a eficiência. A resistência no indutor afeta o funcionamento do conversor *boost*, em especial com razão cíclica elevada.

$$V_o = \left(\frac{V_s}{1-D} \right) \left(\frac{R(1-D)^2}{1+r_L} \right) \quad (2.37)$$

A equação (2.37) é similar àquela do conversor ideal, que leva em consideração a resistência do indutor. A Figura 2.11, mostra a tensão de saída do conversor *boost* com e sem a resistência do indutor.

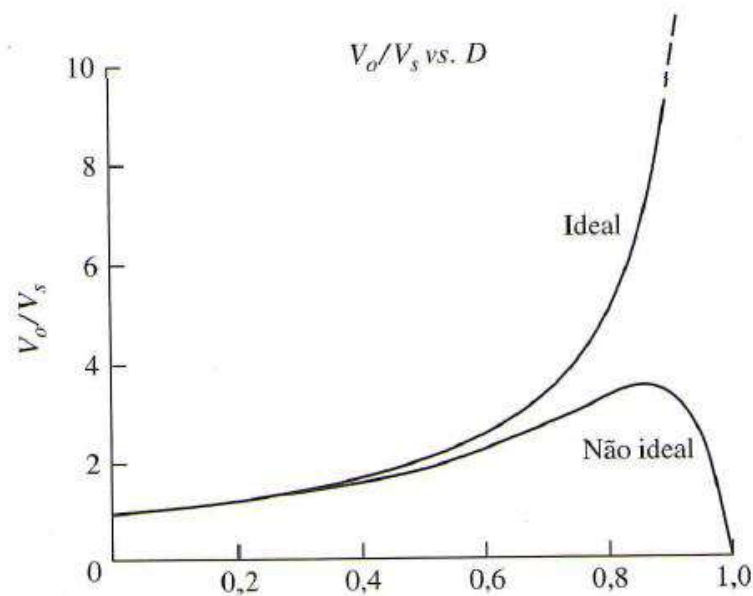


Figura 2.11 - Tensão na saída. (Hart, 2012)

A resistência do indutor também afeta a eficiência da potência do conversor. A eficiência é a razão da potência de saída pela potência de entrada mais as perdas.

$$\eta = \frac{V_o^2/R}{V_o^2/R + I_L^2 r_L} \quad (2.38)$$

Com o aumento da razão cíclica, a eficiência do conversor boost diminui, conforme indicado na Figura 2.12.

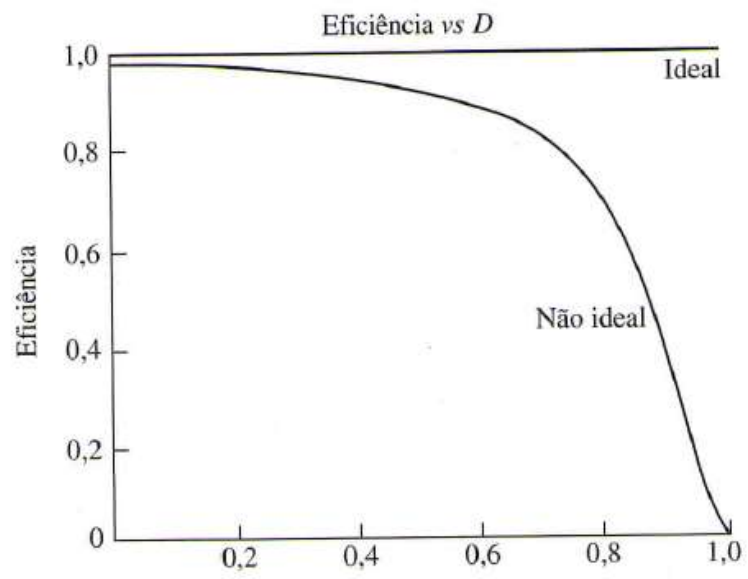


Figura 2.12 - Eficiência do conversor boost. (Hart, 2012)

2.4 Estado da Arte

Pesquisas para o reaproveitamento de energia na Fórmula 1 começaram na década de 90, mas apenas em 2009 o primeiro sistema foi implantado. O Sistema de Recuperação de Energia Cinética, do inglês – Kinetic Energy Recovery System - (KERS). O sistema funciona aproveitando a energia cinética das frenagens, transformando-a em energia elétrica, proporcionando ao piloto 60 KW, cerca de 81 cv, adicional de potência para até 6,67 segundos por volta. A partir da temporada de 2014, além do reaproveitamento da energia cinética das frenagens, a Fórmula 1 passou a adotar também o reaproveitamento da energia térmica proveniente do turbo-compressor, no qual é acoplado um gerador elétrico à turbina. Com o aproveitamento desses dois tipos de energia hoje o piloto tem uma potência extra de 120 KW, cerca de 163 cv, durante 10 segundos por volta.

Molan (2011) em seu trabalho que teve como objetivo geral desenvolver um projeto para atingir alta a eficiência de conversão em sistemas WHR (Waste Heat Recovery – Recuperação de Calor Desperdiçado) em veículos. O EGP (Exhaust Gas Pressure – Pressão de Gás de Exaustão) foi o alvo de pesquisas relacionadas recuperação de calor no automóvel, o sistema de exaustão contém uma grande parte do calor residual total do veículo. O fluxo de gás no tubo de escape é relativamente estável. Além disso, o tubo de gás de escape é facilmente acessível para montar dispositivos de captação de energia. O sistema de captação conseguiu uma potência de 16 W para uma temperatura quente de 200 °C, o conversor CC-CC projetado, teve tensão de entrada de 4,8 V e tensão de saída de 48 V, ou seja, uma amplificação de 10 vezes.

Wang *et al.* (2011) realizou um trabalho em que pesquisou sobre como o ciclo orgânico de Rankine - Organic Rankine Cycle (ORC) pode ser usado para recuperar o calor residual. O ciclo orgânico de Rankine é um processo promissor de conversão de energia térmica de baixa e média temperatura em eletricidade. O processo de funcionamento é semelhante ao ciclo fechado de Clausius-Rankine a vapor, envolvendo os mesmos componentes, mas utiliza fluido orgânico ao invés de usar água como fluido de trabalho. Quando um veículo está em movimento, os estados de gases de escape do motor tem uma ampla variação. No trabalho realizado na Universidade Tecnológica de Pequim, nove diferentes fluidos de trabalho foram

selecionados de acordo com as suas propriedades físicas e químicas. Os resultados foram comparados nas regiões em que potências líquidas tinham valor de 10 KW. Os níveis de segurança e impactos ambientais também foram avaliados. Os resultados indicam que a R11, R141b, R113 e R123 apresentam melhor performance termodinâmica do que os outros; no entanto, R245fa e R245ca são os fluidos de trabalho mais compatíveis com o ambiente para aplicações de recuperação de calor residual do motor.

Simões (2012) realizou um trabalho que teve como objetivo a aplicação do princípio do gerador termoelétrico nos processos industriais para efetuar a recuperação da energia térmica e com isso reduzir os gastos energéticos de uma empresa. Para isso, colocou-se junto aos tubos do circuito de refrigeração, uma seção em alumínio octogonal conectadas à células de Peltier, constituindo assim um gerador termoelétrico, utilizando como fonte primária de temperatura os cerca de 40 °C do fluido. Para uma diferença de temperatura de 6 °C, foi obtida uma tensão de 2,32 V, uma potência média de 0,217 W e um rendimento de 3,47 %.

Hargreaves, Vasconcellos e Barros (2013) realizaram um estudo em que foi feita a avaliação um sistema de refrigeração na qual pode-se aproveitar a própria energia térmica gerada por componentes eletrônicos como placas e processadores para gerar eletricidade através do efeito Seebeck, utilizando um módulo termoelétrico. O trabalho mostrou a grande dependência dos valores obtidos para tensão com a diferença de temperatura entre as duas faces do módulo. Na situação onde existe uma rápida variação da temperatura da fonte quente, a resposta de geração do sistema é muito variável. Considerando uma resistência de 60 Ω aplicada na saída do termoelétrico, obteve-se uma potência máxima de 0,1225 W, o representou uma economia de 5,1% de energia. Observou-se também que o ponto de máxima de tensão ocorreu a uma temperatura pouco acima de 120°C.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada na efetivação do trabalho, incluindo o aparato experimental, os materiais utilizados e a sequência das atividades realizadas. O fluxograma do projeto é apresentado na Figura 3.1.

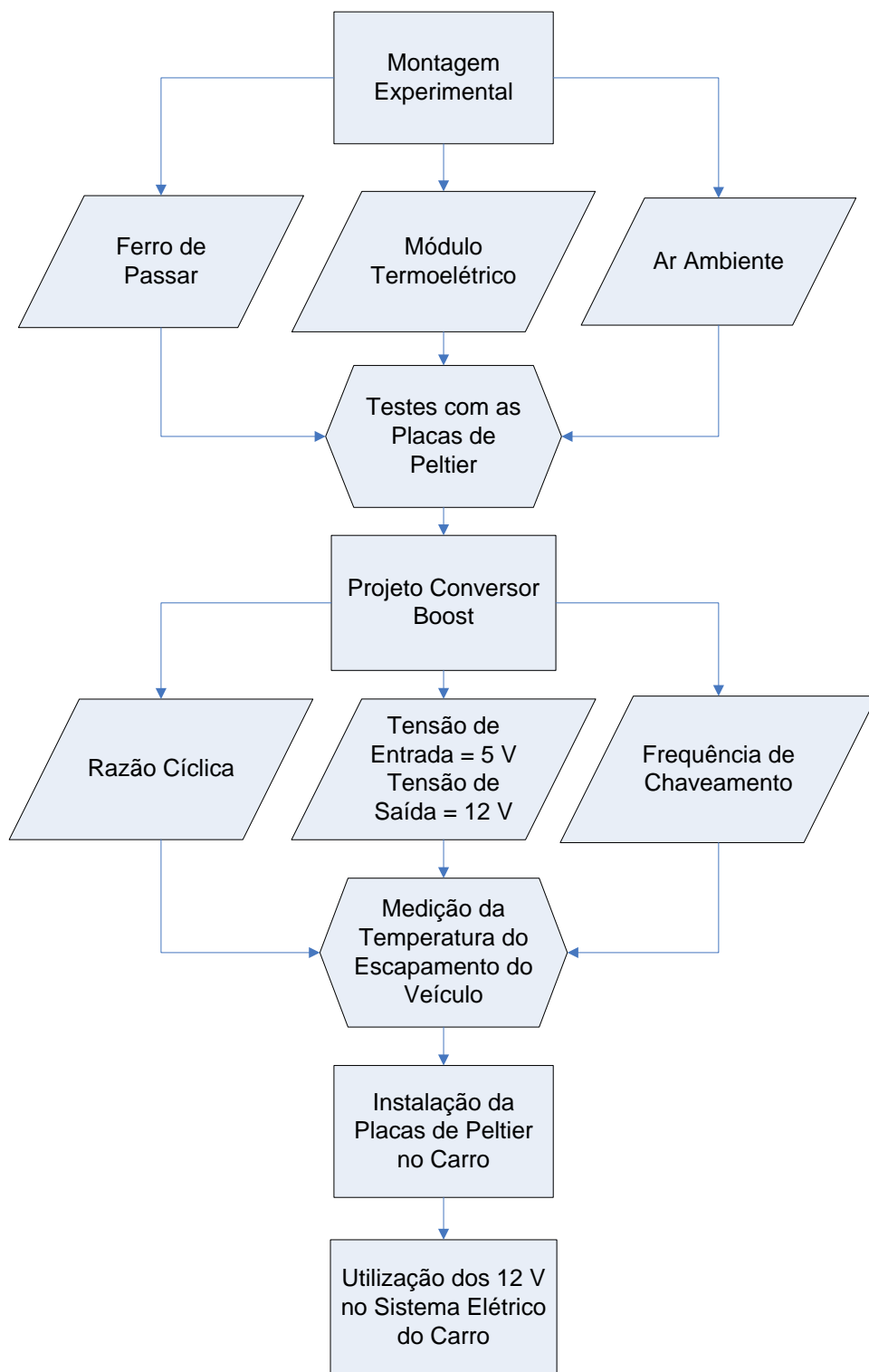


Figura 3.1 - Sequência das Atividades.

3.1 Aparato Experimental

Após inspeção dos equipamentos de medição, apresentados na Tabela 3.1, para detectar algum defeito, foi realizada a especificação e montagem experimental do sistema de captação composto por uma Placa de Peltier. Para o funcionamento do teste e para que fosse possível a avaliação do sistema em funcionamento, foi utilizado um ferro doméstico de passar roupas simples, como especificado na seção 3.2.2. O ferro, composto por uma placa metálica plana, favorece o contato e a transferência de calor entre a fonte quente e o sistema. Assim, ele foi usado como fornecedor de calor para o sistema, sendo conectado diretamente a fonte de energia elétrica.

O conjunto trocador de calor, temperatura ambiente (do lado frio), módulo termoelétrico e ferro de passar roupa (lado quente) foram fixados juntos, formando um conjunto único que favorece um melhor contato entre todos os componentes, como pode ser observado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Montagem do sistema com uma Placa de Peltier.

3.2 Materiais Utilizados

A Tabela 3.1, mostra os materiais utilizados durante a montagem.

Tabela 3.1 - Materiais utilizados durante o projeto.

Quantidade	Material
05	Termoelétricos TEC-12706
01	Ferro <i>Black and Decker</i>
01	Secador de Cabelos <i>Tany</i>
01	Termômetro
01	Multímetro
01	Gerador de Sinais
01	Fonte DC
01	Osciloscópio
01	Transistor 2n3055
01	Resistor de 0,2 Ω
01	Resistor de 1 Ω
01	Resistor de 2,7 Ω
01	Resistor de 3 Ω
01	Resistor de 10 Ω
01	Resistor de 33 Ω
01	Resistor de 1 K Ω
01	Termômetro <i>Laser</i>
01	<i>Protoboard</i>
01	Indutor
01	Transistor
01	Diodo
01	Capacitor
01	IRF540N
01	PIC16F877A
07	Abraçadeiras Tipo U
01	Acendedor de Cigarro 12 V

3.2.1 Módulo termoelétrico

Os termoelétricos adquiridos para o projeto são do tipo TEC, sendo o modelo: TEC-12706. Após algumas análises do manual de instruções (*DataSheet*) e observando que o modelo escolhido tem menor resistência interna do que os demais modelos, o TEC-12706 foi escolhido para ser o foco do trabalho, tendo em vista que ele apresentou a melhor eficiência de geração em relação a diferença de temperatura aplicada em suas superfícies. O TEC-12706 possui 127 pares termoelétricos e tem uma dimensão total de 40mm de largura, 40mm de comprimento e 3,3mm de espessura. Ele é construído em alumina e dos elementos bismuto, telúrio e estanho (BiT e Sn).

É importante ressaltar que os TEC's (*thermoelectric cooler*, refrigerador termoelétrico), são geralmente utilizados para refrigeração, como em aplicações de adegas climatizadas de baixo custo e bebedouros onde existe um controle eletrônico de temperatura. Porém os TEG's (*thermoelectric generator*, gerador termoelétrico) que são os termopares mais apropriados para a geração de energia elétrica, não foram encontrados à venda no mercado brasileiro, tendo sido encontrados apenas no mercado norte americano pelo valor de U\$120,00 (cento e vinte dólares), então por ser um valor elevado, optou-se por utilizar um TEC, que pode ser encontrado à venda no mercado brasileiro pelo valor de R\$ 19,00 (dezenove reais).

Os TEC's geralmente são especificados em duas temperaturas base de trabalho para a parte quente, 25°C e 50°C conforme especificado no manual do TEC-12706 no Anexo A.

3.2.2 Ferro de Passar Roupas

A fonte de calor utilizada no sistema foi um ferro de passar roupas modelo *Black & Decker Vapor Xpress 530*. Ele fornece para o sistema a energia requerida em forma de calor a partir do efeito Joule que ocorre quando se energiza a resistência do ferro. O ferro utilizado no projeto tem uma potência de 1200 W, o que permite a ele trabalhar com até 9,44 A de corrente quando é ligado em uma tomada de 127 V. Utilizando $V=R.I$, a resistência tem o valor de 13 Ω . Os dados técnicos estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados Técnicos do Produto. (Black & Decker)

Comprimento do Fio	1,5 m
Potência	1200 W
Tensão	110/220 V
Resistência Interna	13 Ω

3.2.3 Secador de Cabelos *Tany*

Durante a experiência, foi usado um secador de cabelos *Tany Professional PRO 3000* para simular a velocidade com que o vento atinge as Placas de Peltier. Os dados técnicos estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dados Técnicos do Produto. (Tany Produtos)

Potência	1400 Watts: secagem mais rápida
Motor	AC Profissional
Combinações	6 combinações de temperatura e velocidade
Tensão	110 ou 220 V

3.2.4 Termômetro

Para aquisição de dados de temperatura, durante a montagem experimental, foi utilizado um termômetro digital. Ele foi utilizado na medição das temperaturas das fontes fria e quente. Os dados técnicos do produto estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados técnicos do produto. (Digital Thermometer)

Faixa de temperatura de medição	-50 °C ~ 110 °C (-58 °F ~ 230 °F)
Precisão de temperatura	± 1 °C (-30 °C ~ +40 °C)
Display Resolução de temperatura	1(≤ -20 °C) 0,1(>-20°C)
Tensão de funcionamento	1,5V. Pilha LR44.

3.2.5 Multímetro Digital *Hikari*

O multímetro utilizado para medições de tensão e corrente no sistema foi do modelo *Hikari* HM-1000. Suas especificações técnicas estão representadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Especificações Multímetro Hikari. (Hikari Ferramentas)

Tensão DC	Faixas: 200mV, 2000mV, 20V, 200V, 600V Precisão: 200mV ~ 200V \pm (1.0%+2D); 600V \pm (1.2%+2D) Resolução: 0.1mV, 1mV, 10mV, 0,1V, 1V Impedância de Entrada: 1 MOhms Proteção de Sobrecarga: 600V DC / AC RMS
Tensão AC	Faixas: 200V, 600V Precisão: \pm (1.5%+10D) Resolução: 100mV, 1V Impedância de Entrada: 1 MOhms Proteção de Sobrecarga: 600V DC / AC RMS.
Resistência	Faixas: 200, 2000, 20k, 200k, 2000k Ohms Precisão: 200 ~ 200k Ohms \pm (1.2%+2D); 2000 k Ohms \pm (1.5%+2D) Resolução: 0.1, 1, 10, 100, 1 kOhms Tensão de Circuito Aberto: <3V DC (máximo) Proteção de Sobrecarga: 250V DC / AC RMS
Corrente DC	Faixas: 200 μ A, 2000 μ A, 20mA, 200mA, 10A Precisão: 200 μ A ~ 200mA \pm (1.2%+2D); 10A \pm (2.0%+2D) Resolução: 100nA, 1 μ A, 10 μ A, 100 μ A, 10mA Proteção de Sobrecarga: Fusível de Ação Rápida de 0.25A / 250V na Entrada mA; Sem Fusível na Entrada 10A.

3.2.6 Gerador de Sinais

Para realizar o teste específico para gerar a curva de potência do módulo termoeletrico, foi necessário utilizar o gerador de sinais, a fonte DC, o osciloscópio e o transistor 2n3055. Os dados técnicos estão apresentados nas Tabelas 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 respectivamente.

Tabela 3.6 - Dados Técnicos do Produto. (Politerm Produtos)

Display	LED 7 segmentos, 6 dígitos
Formas de Onda	Senoidal, Triangular, Quadrada, Pulso, Rampa, TTL, CMOS, Dente de Serra e Varredura
Faixa de Freqüência	0,02Hz a 2MHz
Ambiente de Operação	0°C a 40°C, RH < 85% (sem condensação)
Ambiente de Armazenamento	-20°C a 70°C
Alimentação	110V / 230V AC \pm 10%, 50Hz / 60Hz
Consumo	Aproximadamente 15W
Fusível de Proteção de Entrada	200mA / 250V
Dimensões	90(A) x 255(L) x 255(P)mm
Peso	Aproximadamente 5 Kg

3.2.7 Fonte DC

Tabela 3.7 - Dados Técnicos da Fonte DC. (Politerm Produtos)

Modo de Operação Independente	Duas saídas de 0 a 32V até 3A e uma fixa de 5V até 3A
Modo de Operação em série	Uma saída de 0 a 64V até 3A e uma fixa de 5V até 3A.
Modo de Operação em paralelo	Uma saída de 0 a 32V até 6A e uma fixa de 5V até 3A.
Tensão de Saída	de 0 a 32V continuamente ajustável
Regulação de tensão de linha	\leq 0,01% + 3mV (corrente \leq 3A)
Regulação de tensão de carga	\leq 0,01% + 3mV (corrente \leq 3A)
Corrente de saída	de 0 a 3A continuamente ajustável
Regulação de corrente de linha	\leq 0,2% + 3mA
Regulação de corrente de carga	20mA

3.2.8 Osciloscópio

Tabela 3.8 - Dados Técnicos do Produto. (Agilent Produtos)

Faixa de 100 MHz	2 canais; 4 kpts de memória; 2 GSa/s de taxa de amostragem; USB padrão e conectividade de dispositivos; GPIB e RS232 opcional.
Recursos	Monitor VGA a cores com resolução de 320 x 240; Disparo avançado, incluindo borda, largura de pulso e linha de vídeo selecionada
Análise	20 medições automáticas; 4 funções matemáticas, incluindo FFT's; Modo de seqüência e varredura retardada.

3.2.9 Transistor 2n3055

Tabela 3.9 - Dados Técnicos do Produto. (Mospec)

Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão Coletor-Emissor	V_{CEO}	60	V
Tensão Coletor-Emissor	V_{CER}	70	V
Tensão Coletor-Base	V_{CBO}	100	V
Tensão Emissor-Base	V_{EBO}	7	V
Corrente Contínua no Coletor	I_C	15	A
Corrente na Base	I_B	7	A
Potência Total dissipada ($T_C=25^\circ\text{C}$)	P_D	115	W
Faixa de Temperatura de Operação e Armazenamento da Junção	T_J, T_{STG}	-65 a +200	$^\circ\text{C}$

3.2.10 Termômetro *Laser*

Para realizar a medidas da temperatura ao longo do escapamento do veículo, foi utilizado um termômetro *laser* da marca Minipa, modelo MT-350. Os dados técnicos estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Dados Técnicos do Produto. (Minipa)

Emissividade	Pré ajustado em 0.95
Resposta Espectral	6 ~ 14 μ m
Elemento Detetor	Termo pilha
Lente Ótica	Lente Fresnel
Relação entre Distância do Objeto e Área de Medição	10:1
Mira	1 Marcador Laser < 1mW
Faixa	-30°C ~ 550°C ou -22°F ~ 1022°F
Precisão	-30°C ~ 100°C \pm 2°C -22°F ~ 212°F \pm 4°F 101°C ~ 550°C \pm 2% Leitura 213°F ~ 1022°F \pm 2% Leitura
Resolução	0.5°C / 1°C Automático ou 1°F Coeficiente de Temperatura: \pm 0.2% Leit. ou \pm 0.2°C/ \pm 0.36°F (o que for maior para < 18°C/ 64.4°F ou > 28°C/82.4°F)

3.2.11 IRF540N

No projeto do conversor *boost* o mosfet utilizado foi o IRF540N, esse componente foi projetado para atuar como uma chave. Os dados técnicos estão apresentados no Anexo B.

3.2.12 PIC16F877A

No projeto do conversor *boost* existe um mosfet atuando como chave, esse componente precisa ser acionado por uma onda quadrada. Foi utilizado um micro controlador PIC16F877A para gerar a onda quadrada na amplitude e frequência desejada, conforme Apêndice B. O manual de instruções (*DataSheet*) do micro controlador se encontra no Anexo D.

3.3 Sequência de Atividades

Abaixo está apresentado o passo a passo realizado durante todo o desenvolvimento do projeto, conforme descrito na Figura 3.1.

3.3.1 Atividade 1: Montagem experimental seguida de testes com as Placas de Peltier

O primeiro passo foi a montagem experimental do sistema de captação de energia térmica, com isso foi possível a avaliação do sistema em funcionamento, logo depois vieram os testes.

No primeiro teste avaliou-se a resposta do sistema utilizando apenas uma Placa de Peltier, que se deu aquecendo a placa do ferro de passar roupa até uma temperatura de aproximadamente 85°C, o lado frio do módulo termoelétrico estava exposto a temperatura ambiente de 26°C, em local fechado. Também foram usados vários resistores e foram colhidos os dados de tensão e corrente para este experimento, que foi realizado 5 vezes e em todas as vezes os resultados foram muito próximos. O resultado das medições está apresentado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Teste para diferença de 59°C.

R(Ω)	I(mA)	V(V)	P(W)
0	180	0	0
1	154	0,154	0,023716
2,7	126	0,3402	0,042865
3	112	0,336	0,037632
10	74	0,74	0,05476
33	37	1,221	0,045177
1000	1,8	1,8	0,00324

No segundo teste, utilizando também uma única célula de Peltier, a fonte de calor foi aquecida até ser atingida uma temperatura de aproximadamente 72°C na placa do ferro de passar roupa. Nessa hora foi aproximado do lado frio do módulo termoelétrico uma lata de alumínio, que estava dentro da geladeira (18°C). Vários resistores foram utilizados, visando obter os valores para tensão e corrente, que foram adquiridos através do multímetro digital. Com essa diferença de temperatura

(54°C), os resultados foram muito parecidos com os da Tabela 3.11, visto que a diferença de temperatura é quase igual, a única mudança foi que nesse experimento, as Placas de Peltier conseguiram gerar tensão por mais tempo, pelo fato de que a fonte fria demorou para esquentar.

Foi realizado também um teste em que aconteceu a associação das Placas de Peltier em série, tendo a experiência sido feita associando, duas, três, quatro e cinco células. A diferença de temperatura foi de 59°C. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Associação dos módulos em série.

Placas em série	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
1	0,75	0,18	0,135
2	1,43	0,34	0,486
3	2,09	0,52	1,086
4	2,95	0,7	2,065
5	3,7	0,87	3,219

Um outro teste foi feito associando os módulos termoelétricos em paralelo, o teste foi feito associando, duas, três, quatro e cinco células. A diferença de temperatura também foi de 59°C. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Associação dos módulos em paralelo.

Placas em paralelo	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
1	0,75	0,18	0,135
2	0,77	0,19	0,146
3	0,81	0,197	0,160
4	0,84	0,2	0,168
5	0,89	0,25	0,223

De acordo com os dados da Tabela 3.11, foi possível traçar a curva de potência ($V \times I$), como mostrado na Figura 3.3, e depois a curva tensão x potência, como ilustra a Figura 3.4, com isso descobriu-se o ponto de máxima potência, que acontece em uma tensão de 0,75 V, para uma potência de 0,055 W.

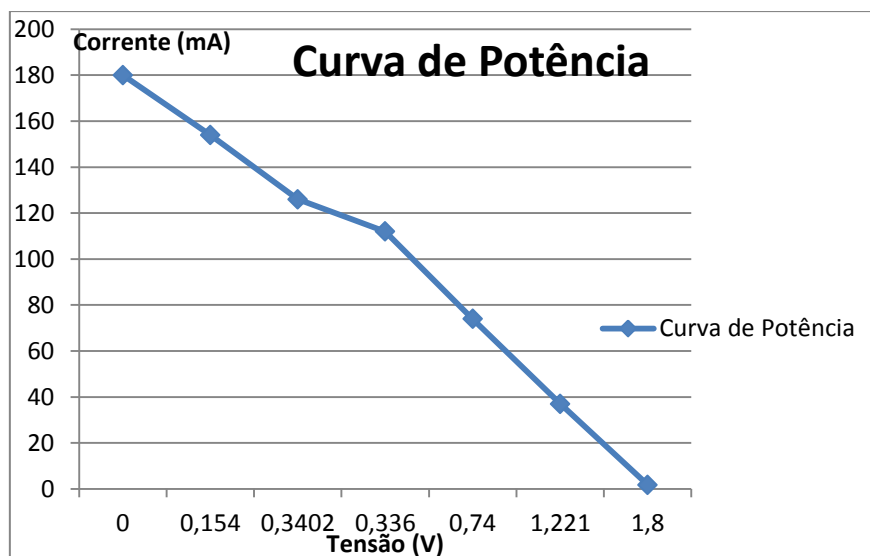


Figura 3.3 - Curva de Potência do módulo termoeétrico.

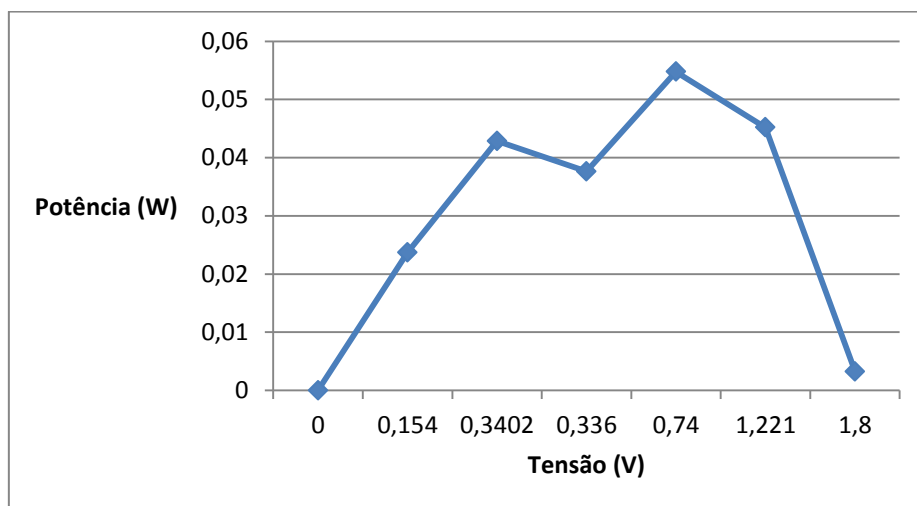


Figura 3.4 - Gráfico de Tensão x Potência.

Foi realizado um teste específico utilizando, o gerador de sinais, a fonte DC, o osciloscópio, o transistor 2n3055 e o resistor de $0,2 \Omega$, todos são equipamentos do Laboratório de Eletrônica do CEFET-MG.

Foi aplicada uma onda triangular na base para excitar o transistor, que foi escolhida para que a tensão e a corrente da célula de Peltier variassem, além disso foi colocado um resistor $0,2 \Omega$ em série com o emissor.

Três módulos termoeétricos foram utilizados, dois deles serviram como fonte quente e fonte fria para a outra célula. Foi aplicada uma tensão de $8,7 \text{ V}$ e uma

corrente de 1,22 A, nas duas placas que foram usadas com fontes de temperatura. O outro módulo, foi ligado junto ao transistor, o lado positivo foi ligado ao coletor e o negativo junto ao resistor. Depois disso, uma curva foi obtida através do osciloscópio, a curva de potência. O resultado do experimento está apresentado na Figura 3.5.

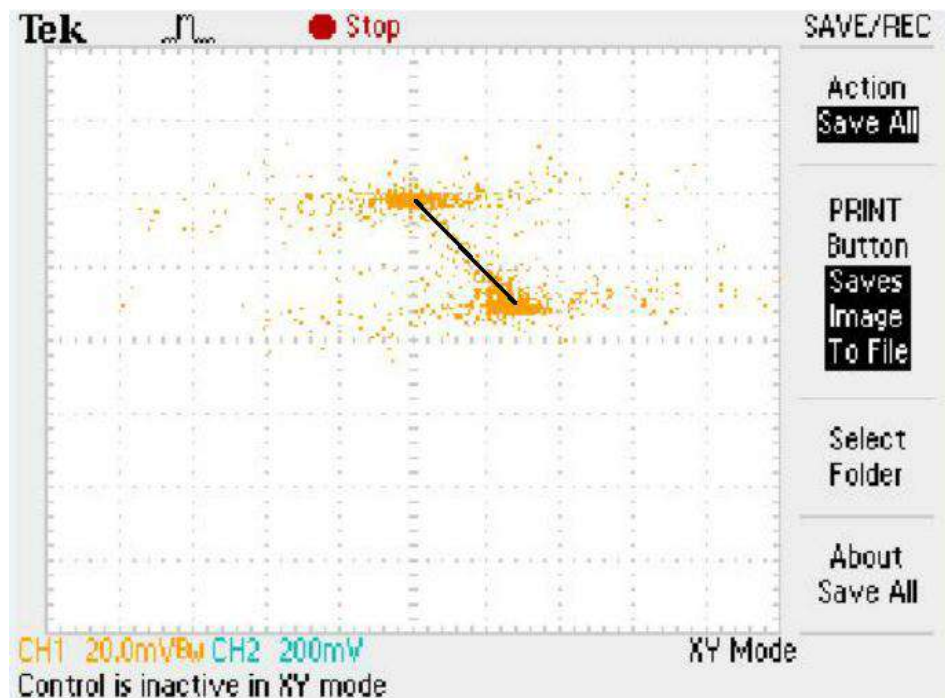


Figura 3.5 - Curva de Potência do módulo termoeletrico, feita utilizando um transistor.

Pode se observar que os dados das Figuras 3.3 e 3.5 são parecidos, o que é um bom sinal, visto que foram feitos de formas diferentes e obtiveram um resultado parecido.

Depois disso foram realizados os cálculos para a transferência de calor entre a fonte quente, a fonte fria e o módulo termoeletrico. Os cálculos estão apresentados no Apêndice A.

3.3.2 Atividade 2: Projeto do Conversor *Boost*

A atividade seguinte foi projetar o circuito elevador de tensão. Uma das principais características do projeto são as tensões de entrada e saída, pois é através delas que se obtém a razão cíclica do conversor *boost*. Como a tensão de saída desejada é de 12 V com variação máxima de 1% e a tensão de entrada conseguida utilizando 7 células de Peltier foi de 5 V, a razão cíclica teve o valor de 0,5833. Tendo os valores da tensão de entrada, tensão de saída, variação da tensão de saída e razão cíclica, os outros componentes do circuito foram projetados e os cálculos se encontram no Apêndice B. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram como ficou a placa do circuito impresso do conversor *boost*.

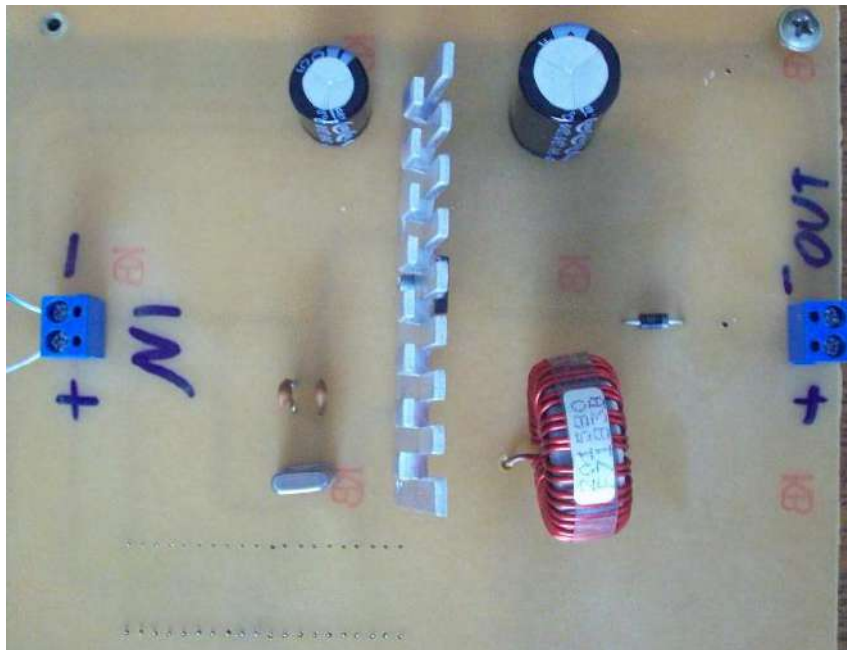


Figura 3.6 - Conversor *boost*, componentes eletrônicos.

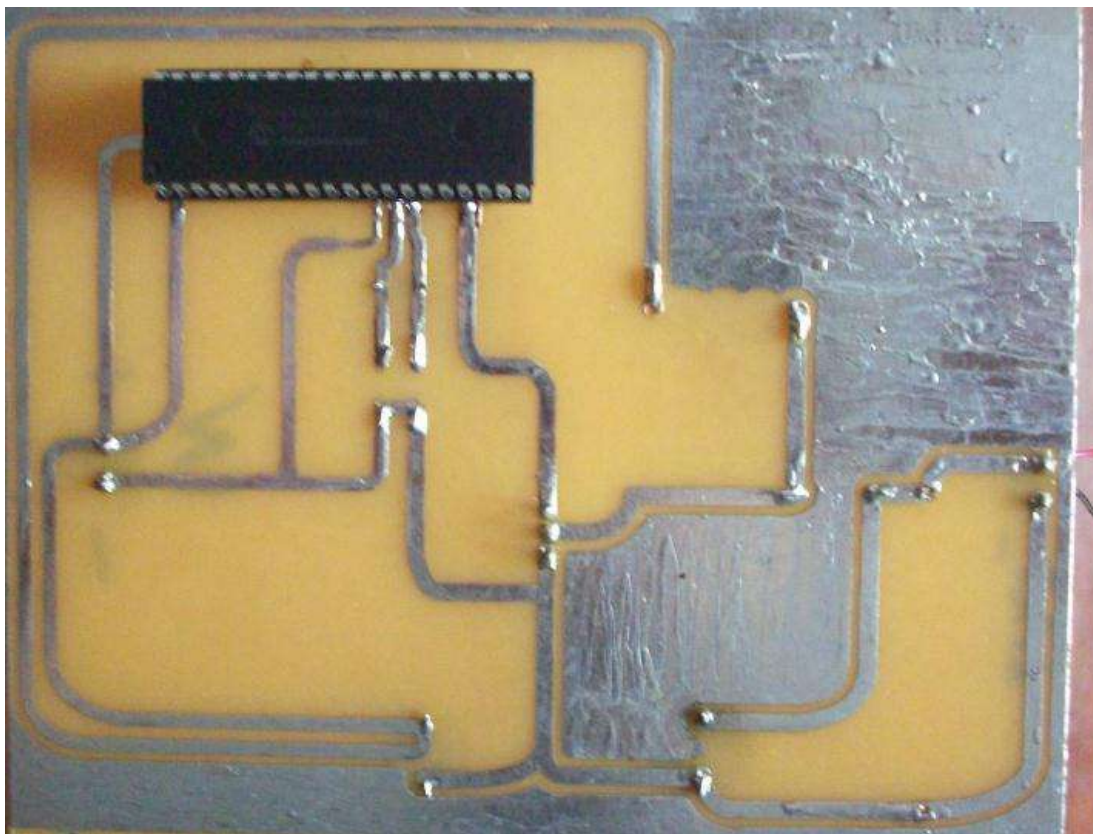


Figura 3.7 - Conversor *boost*, trilhas de condução.

3.3.3 Atividade 3: Instalação do Sistema de Captação

O passo seguinte foi a instalação do sistema de captação, composto pelas células de Peltier na parte de baixo do veículo, junto ao escapamento. O carro utilizado é equipado com motor 1.0. Com o auxílio do termômetro *laser*, mediu-se a temperatura de todo o tubo de escape, essa medição foi feita com uma temperatura ambiente de 32°C, os valores estão apresentados na Tabela 3.14. A Figura 3.8 mostra onde foi feita a medição no tubo do escapamento. As Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11 mostram como ficou instalado o sistema de captação da energia térmica na parte final do escapamento.



Figura 3.8 - Escapamento do veículo.

Tabela 3.14 - Temperaturas ao longo do escapamento do veículo.

	Manhã	Tarde	Noite
Abafador Traseiro	150°C ~ 180°C	160°C ~ 175°C	140°C ~ 160°C
Silenciador Traseiro	120°C ~ 140°C	140°C ~ 160°C	120°C ~ 135°C
Parte Final do Tubo	85°C ~ 115°C	90°C ~ 130°C	65°C ~ 100°C

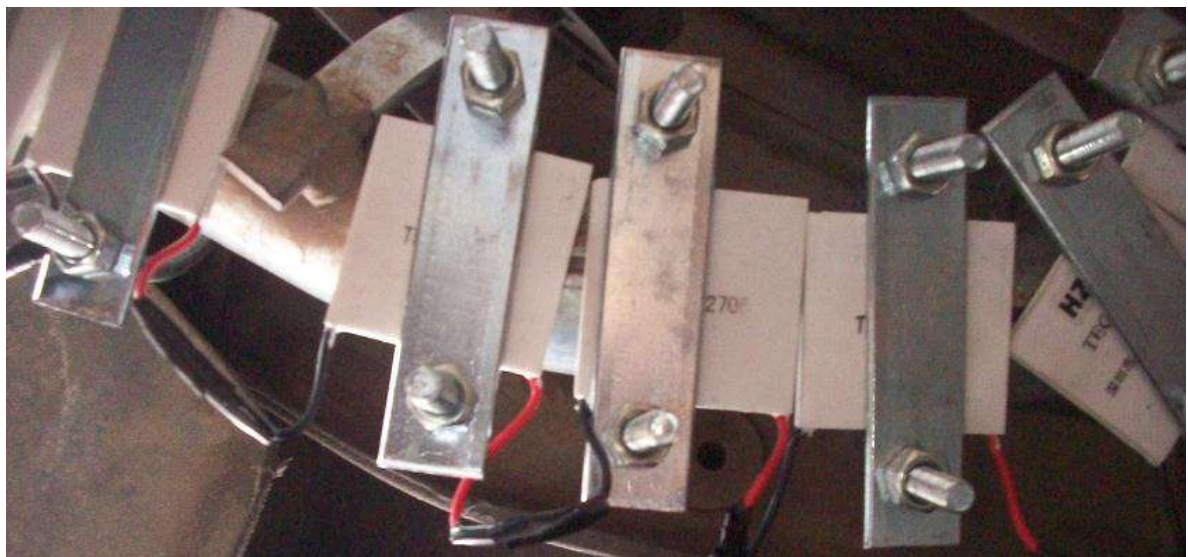


Figura 3.9 - Sistema de captação de energia térmica.



Figura 3.10 - Sistema de captação instalado no veículo.



Figura 3.11 - Sistema de captação instalado na parte final do escapamento.

3.3.4 Atividade 4: Utilização dos 12 V no sistema elétrico do carro

O último passo do trabalho foi a aplicação da tensão de 12 V obtida no sistema elétrico do carro.

O sistema de captação ficou instalado na parte final do escapamento, um fio de som fez a ligação entre as células de Peltier e o circuito elevador de tensão, que ficou instalado no porta-malas do carro. Na saída do conversor *boost* foi ligado um acendedor de cigarro, daqueles tradicionais utilizados atualmente, no acendedor foi ligado um carregador de celular. As Figuras 3.12 e 3.13 ilustram como ficou essa montagem.



Figura 3.12 - Ligação entre o sistema de captação e o conversor *boost*.

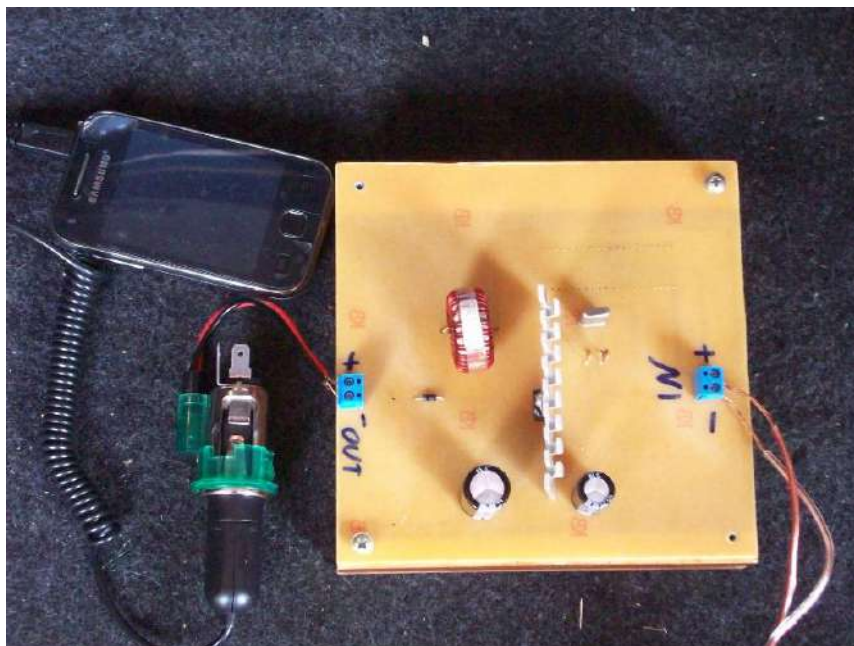


Figura 3.13 - Celular ligado à saída do conversor *boost*.

As variáveis a serem analisadas estão apresentadas na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Variáveis analisadas.

Variável	Atividade	Justificativa
Tempo para atingir os 5 V e os 12 V.	Atividade 3	Tempo para que o <i>boost</i> comece a funcionar.
Tempo de manutenção dos 5 V e dos 12 V.	Atividade 3	Tempo de geração de energia elétrica.
Potência final gerada	Atividade 2, Atividade 3 e Atividade 4	Potência aproveitada no sistema elétrico do carro.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos durante a realização do trabalho, além de estarem apresentadas as discussões sobre os resultados, comparações com outros projetos e os gastos do projeto.

4.1 Tempo para atingir 5 V na entrada e 12 V na saída e tempo de manutenção das tensões – Medição 1.

O escapamento do carro precisa de um certo tempo até atingir a temperatura máxima. Para obter os 5 V desejados na entrada do *boost*, é necessário que a temperatura da parte final do escapamento esteja próxima de 90°C, então fez-se preciso medir esse tempo.

É importante ressaltar aqui que as medições foram feitas com o carro em movimento, para que o escoamento de ar em cima das Placas de Peltier fosse forçado. O circuito de 1500 metros tinha dois morros e uma reta. Não foi possível manter a velocidade do carro constante por muito tempo, pelo fato do tráfego no local (bairro Liberdade na cidade de Divinópolis-MG). Se a velocidade do carro não foi mantida constante, a velocidade do vento também não foi constante. Com a medição feita utilizando o velocímetro do carro, a velocidade do veículo variou de 30 Km/h à 60 Km/h.

O resultado dessa medição é ilustrado pela Figura 4.1. A medição foi feita em três períodos do dia: pela manhã o dia estava nublado com temperatura de 25°C, umidade relativa do ar de 64% e velocidade do vento de 11 Km/h, a tarde também estava nublado com temperatura de 28°C, umidade relativa do ar de 69% e velocidade do vento de 9 Km/h, a noite a temperatura estava em 23°C, umidade relativa do ar de 62% e velocidade do vento de 11 Km/h. Outro resultado, também ilustrado na Figura 4.1, mostra por quanto tempo os 5 V são mantidos na entrada, o que vai implicar em quanto tempo os 12 V são mantidos na saída.

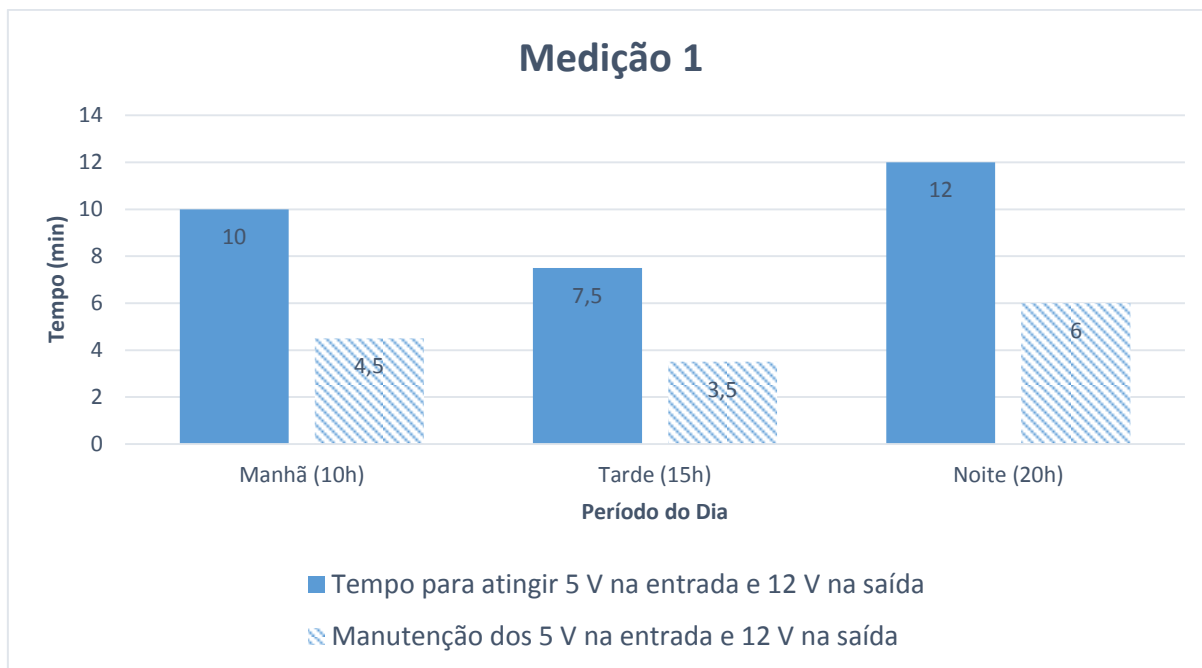


Figura 4.1 - Gráfico com os dados da Medição 1.

Analisando os dados do gráfico da Figura 4.1 observa-se que foi no período da tarde em que se atingiu os 5 V mais rapidamente (7 min e 30 seg). Pela manhã demorou 10 min e a noite 12 min. Porém observa-se que foi à noite em que a manutenção das tensões de entrada e saída foi mais longa (6 min), contra 4 min e 30 seg pela manhã e 3 min e 30 seg a tarde.

As tensões de entrada e saída são atingidas mais rapidamente a tarde pelo fato de ser o período mais quente do dia, fazendo com que o escapamento já comece a uma temperatura mais elevada, levando menos tempo até o aquecimento total.

O tempo de manutenção das tensões de entrada e saída é maior a noite pelo fato de ser o período mais frio do dia, fazendo com que ocorra uma melhor refrigeração dos módulos termoelétricos e conseqüentemente um maior tempo de geração de energia.

4.2 Tempo para atingir 5 V na entrada e 12 V na saída e tempo de manutenção das tensões – Medição 2.

A Medição 2 também foi feita em três períodos: pela manhã o dia estava ensolarado com temperatura de 31 °C, humidade relativa do ar de 45% e velocidade do vento de 7 Km/h, a tarde o dia também estava ensolarado com temperatura de 35 °C, humidade relativa do ar de 50% e velocidade do vento de 5 Km/h, a noite a temperatura estava em 29 °C, humidade relativa do ar de 43% e velocidade do vento de 7 Km/h O resultado dessa medição, juntamente com os dados que apontam por quanto tempo os 5 V permaneceram na entrada e os 12 V na saída estão apresentados na Figura 4.2.

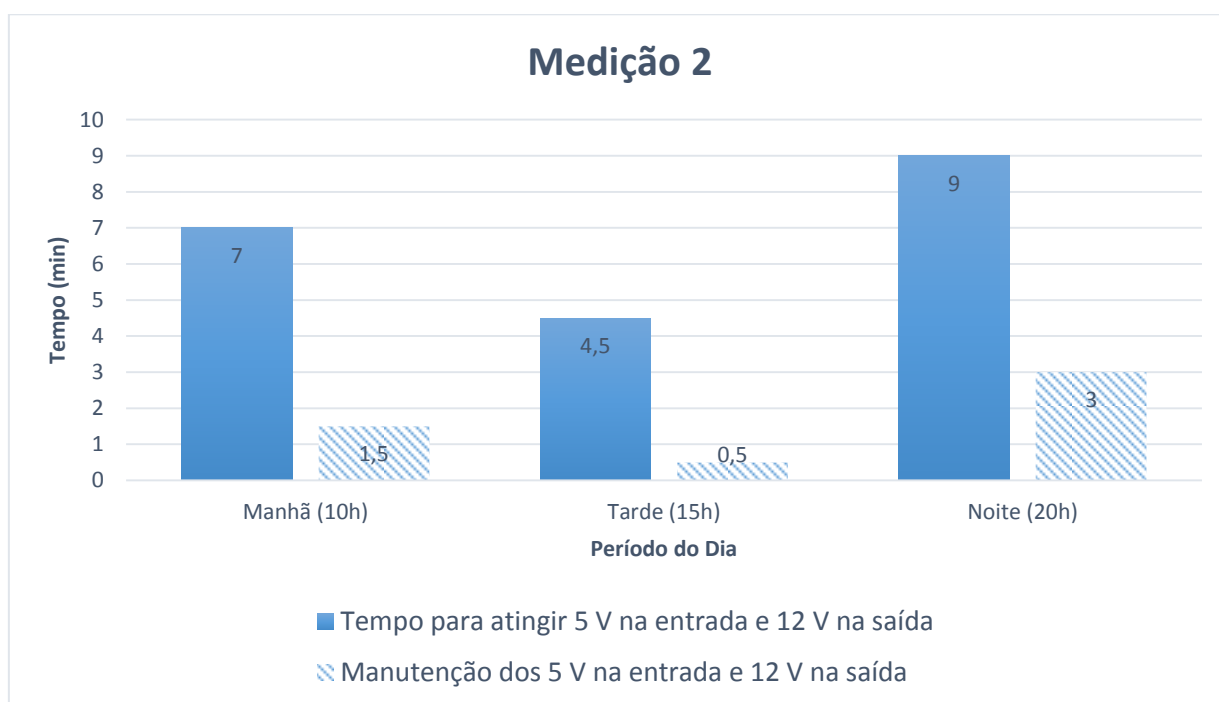


Figura 4.2 - Gráfico com os dados da Medição 2.

De acordo com os dados do gráfico da Figura 4.2 pode se observar que foi no período da tarde em que se atingiu os 5 V mais rapidamente (4 min e 30 seg), contra 7 min pela manhã e 9 min à noite. Todavia observa-se que foi à noite em que a manutenção das tensões de entrada e saída foi mais longa (3 min), contra 1 min e 30 seg pela manhã e apenas 30 seg a tarde.

A Figura 4.3 faz a comparação da Medição 1 com a Medição 2.

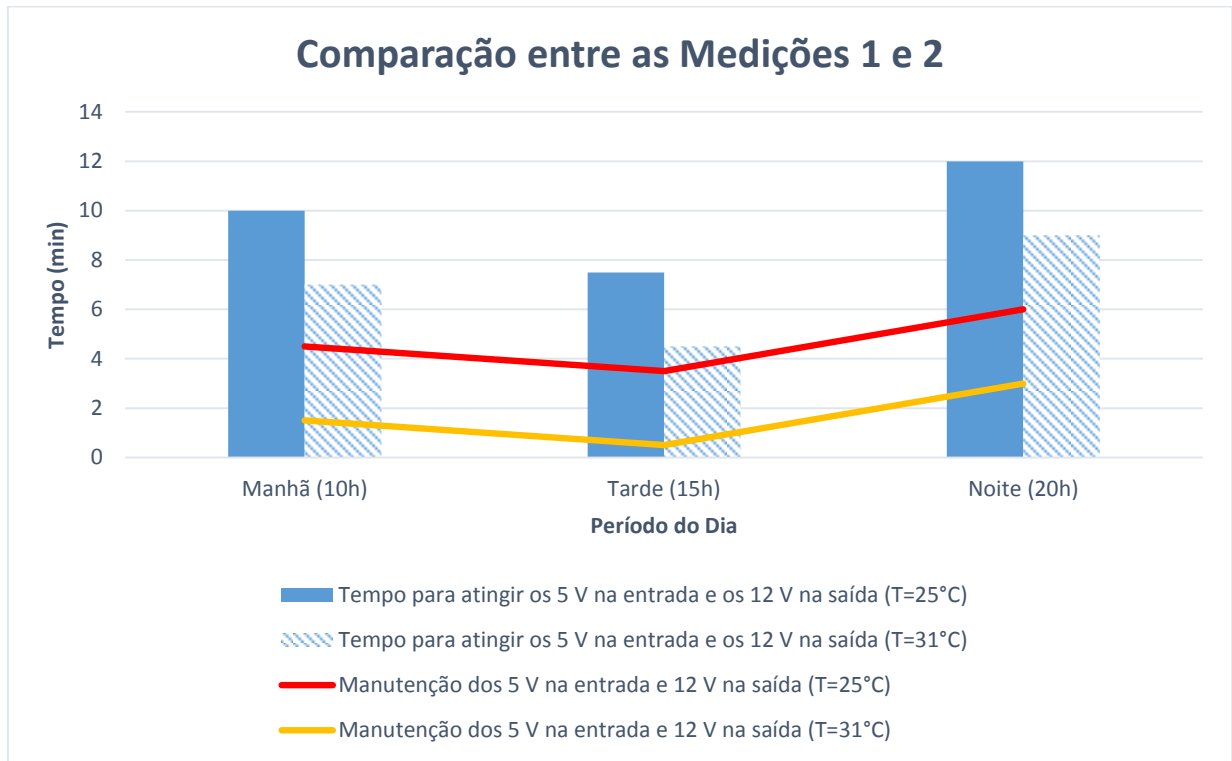


Figura 4.3 - Gráfico comparando as duas medições feitas.

Comparando as duas medições, observa-se que em dias com temperaturas frias (Medição 1) a eficiência da conversão da energia térmica em energia elétrica é melhor do que em dias com temperaturas quentes (Medição 2). Essa eficiência diz respeito ao tempo em que os 12 V são mantidos na saída. Isso acontece porque levando em conta que a temperatura do escapamento vai estar sempre por volta de 90 °C, a maior diferença de temperatura ocorre em dias frios onde a temperatura ambiente é por volta dos 25 °C, contra 31 °C em dias quentes.

Depois de feita a comparação entre as duas medições e fazendo alguns cálculos estatísticos para se obter o tempo médio, encontrou-se que o tempo médio para se atingir os 5 V na entrada e os 12 V na saída é de 8 minutos e 20 segundos. Já o tempo médio de manutenção das tensões de entrada e saída é de 3 minutos e 10 segundos.

4.3 Potência Gerada e Comparações com Outros Projetos

Durante todo o desenvolvimento do trabalho a preocupação foi com o quanto de potência seria gerada no final. Agora tem-se o resultado concreto da potência gerada. São gerados 5 V na entrada utilizando 7 módulos termoelétricos. Esses 5 V são aplicados no conversor *boost* e no final temos uma tensão de 12 V com uma corrente de 0,43 A. Se utilizarmos a tradicional fórmula $P=V \cdot i$, pode-se obter a potência total gerada, que vale: **5,16 watts**.

Como essa potência é utilizada no acendedor de cigarro de um automóvel, foi possível carregar um celular SAMSUNG Galaxy Y Modelo: GT-S5360B. É importante ressaltar que o carregamento do celular não é feito de modo contínuo, pois de acordo com os itens 4.1 e 4.2, o máximo de tempo em que os 12 V são mantidos na entrada foi de 6 minutos.

A montadora alemã BMW desenvolveu em 2008 um projeto, ilustrado nas Figura 4.5 e Figura 4.6, parecido com o que foi desenvolvido neste trabalho, então pode-se comparar os resultados. Enquanto a montadora de Munique conseguiu atingir a marca de 200 W, o que foi considerado pelos engenheiros alemães um valor baixo em termos de eficiência de energia, o presente trabalho conseguiu chegar a marca dos 5,16 W.

O uso de novos materiais e melhorias no peso e tamanho dos módulos termoelétricos levou a novos desenvolvimentos de modo que a última geração de TEG's instalados em 2011 nos gases de escape de um BMW X6 foram capazes de gerar 600 W de energia elétrica.



Figura 4.4 - Módulos Termoelétricos instalados junto ao tubo do escapamento.
(BMW, 2009)



Figura 4.5 - Vista lateral dos módulos termoelétricos instalados junto ao escapamento. (BMW, 2009)

4.4 Gastos do Projeto

Os gastos com projeto estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Gastos do projeto.

Peça	Quantidade	Valor
Placas de Peltier	15 unidades	R\$ 222,00
Multímetro	1 unidade	R\$ 29, 00
Protoboard	1 unidade	R\$ 65,00
Caixas de Plástico	1 unidade	R\$ 28,00
Termômetro	1 unidade	R\$ 26,00
Componentes Eletrônicos	150 unidades	R\$ 100,00
Placa de Fenolite	1 unidade	R\$ 7,00
Acendedor de Cigarro	1 unidade	R\$ 25,00
Fio de Som	3 metros	R\$ 5,00
Abraçadeiras Tipo U	7 unidades	R\$ 35,00
Gasolina para os Testes	26 litros	R\$ 80,00

O gasto total do projeto foi de **R\$ 622, 00.**

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e o que pode ser feito no futuro com o objetivo de melhorar o projeto inicial.

5.1 Conclusões

O trabalho cumpriu com seu objetivo geral de estudar e desenvolver todo um sistema para captação de energia térmica e conversão desta em energia elétrica para utilização no sistema elétrico do carro, na saída auxiliar de 12 V.

O sistema para a captação da energia térmica proveniente de um motor a combustão interna foi construído utilizando-se 7 Placas de Peltier, que foram instaladas na parte final do tubo de escapamento de um carro popular fabricado no Brasil com motor 1.0.

As Placas de Peltier converteram a energia térmica captada em energia elétrica, de tensão contínua, fornecendo 5 V.

Para um automóvel, os 5 V gerados não são suficientes. Então foi necessário construir um circuito elétrico para elevar a tensão. O circuito construído, chamado conversor *boost*, em que uma tensão de 5 V na entrada foi elevada para 12 V na saída, com uma corrente de 0,43 A, gerando uma potência de 5,16 W. Os 12 V foram ligados na saída auxiliar (acendedor de cigarro) do carro e a potência foi utilizada para carregar um *smatphone*.

Uma conclusão importante que se chegou ao final do projeto foi a respeito do resfriamento do sistema de captação da energia térmica. Durante os testes feitos com a montagem experimental a refrigeração foi feita com o ar ambiente e com um secador de cabelos. Os módulos termoelétricos conseguiram gerar energia por no máximo 30 segundos. Já na montagem final com sistema de captação instalado no escapamento do carro e o resfriamento sendo feito também pelo ar ambiente, mas com o vento chegando a uma velocidade maior, foi possível a geração de energia por um tempo maior (6 minutos) uma vez que o escoamento para a refrigeração dos módulos termoelétricos foi forçada, em vez de livre.

Outra conclusão que se chegou foi que como este foi o primeiro trabalho do CEFET-MG *campus V* a pesquisar sobre o efeito Peltier-Seebeck, ele teve o caráter

de iniciar as pesquisas nessa área pouco investigada até então. Sendo assim este projeto passa a ser uma referência para trabalhos que venham a ser desenvolvidos no futuro.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Um aprimoramento que pode ser feito é uma melhor manutenção da refrigeração do lado frio do módulo termoelétrico, com o objetivo de se obter uma maior diferença de temperatura e conseqüentemente uma melhor eficiência, fazendo com que o sistema de captação forneça energia por mais tempo. Essa melhor refrigeração pode ser feita, instalando as células de Peltier próxima ao radiador, onde a diferença entre as temperaturas quente e fria é maior do que na parte final do tubo de escape. O problema dessa instalação é encontrar uma posição onde a temperatura máxima seja de até 120 °C, além de encontrar um local onde o sistema possa ser instalado sem danificar o motor e de forma segura, sem correr riscos de se desprender.

Outra opção para incrementar o projeto, é procurar por módulos termoelétricos com maior espessura, visto que os utilizados tem espessura de 4 mm, o que implica em a temperatura quente atingir o lado frio rapidamente, impedindo a célula de Peltier de gerar energia por um longo período de tempo. A utilização dos TEG's (geradores termoelétricos) também aumentaria a eficiência do sistema de captação de energia térmica.

A terceira opção para melhorar o projeto atual, diz respeito a fazer o controle da razão cíclica do conversor *boost*. Neste trabalho a razão cíclica é sempre constante no valor de 0,5833, pelo fato de as temperaturas quente e fria se manterem sempre dentro de uma determinada faixa. Se o controle for feito as temperaturas podem variar que mesmo assim o circuito elevador continuará fornecendo uma tensão de 12 V na saída.

6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BMW. **BMW Efficient Dynamics Means Ongoing Research. Exhaust Heat Offers the Greatest Potential for the Future** - BMW Eficiência Dinâmica, A Investigação em Curso. Calor proveniente do Escapamento Oferece Maior Potencial para o Futuro. BMW (*Bayerische Motoren Werke* - Fábrica de Motores da Baviera). 2009.
- [2] CARNOT, Nicolas L.S. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu** - Reflexões Sobre a Potência Motriz do Fogo. Paris: Bachelier. 1824
- [3] FÓRMULA 1. **Energy Recovery Systems (ERS) – Sistemas de Recuperação de Energia.** Disponível em: http://www.formula1.com/inside_f1/understanding_f1_racing/8763.html. 2013
- [4] GEOCITIES, **Motor a Combustão Interna.** Disponível em: <http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/motor.html> 2009
- [5] HARGREAVES, Bernardo O.; VASCONCELLOS, Guilherme L.F.; BARROS, Lucas T. **Estudo de Um Sistema de Refrigeração Auto Suficiente.** Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica (ênfase em Mecatrônica). 2013.
- [6] HART, Daniel W., **Eletrônica de Potência – Análise e Projetos de Circuitos.** AMGH Editora Ltda. 2012
- [7] HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals.** Professor of Mechanical Engineering. Director, Sloan Automotive Laboratory Massachusetts Institute of Technology. 1988.
- [8] LEE, Ho Sung. **Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells.** Hoboken. 2010. 630 p..
- [9] MÁQUINAS TÉRMICAS, **O Ciclo de Carnot.** Disponível em: <http://www.casadasciencias.org/dmdocuments/OK%20CarnotEngine.pdf>. Casa das Ciências 2009
- [10] MOLAN, Li. **Thermoelectric Generator Based DC- DC Conversion Network for Automotive Applications.** Master of Science Thesis Stockholm, Sweden 2011

[11] MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; MUNSON, Bruce R.; DEWITT, David P. **Introdução a Engenharia de Sistemas Térmicos**. Editora LTC. 2005.

[12] PELTIER, Jean C. **Nouvelles experiences sur la caloricite des courans electriques**, Annales de chimie LVT, 1934.

[13] SIMÕES, Alberto E.S.F. **Conversão de Energia com Células de Peltier**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis - Conversão Elétrica e Utilização Sustentáveis. Universidade Nova de Lisboa. 2012

[14] SEEBECK, Thomas J. **Magnetische Polarisation der Metalle und Erse Durch Temperature-Differens**, Abhandlungen der Deutxhen Akademieder Wissenschaften su Berlin, 1822.

[15] STONE, Richard. **Introduction to Internal Combustion Engines**. Nova Iorque, EUA: SAE, 1997.

[16] SKVARENINA, T. L. **The Power Electronics**. Indiana: Purdue University, 2002.

[17] TAYLOR, Charles F. **The Internal Combustion Engine in Theory and Practice**. Massachusetts Institute of Technology, 1971. 558 p.

[18] TERMOPARES, **Placas de Peltier**. Disponível em: <http://www.peltier.com.br/faqs.htm>. 2010

[19] THERMOELECTRICS, **Caltech Materials Science**. California Institute of Technology. Disponível em: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/index.html>. 2008.

[20] WANG, E. H.; ZHANG, B. Y.; FAN, M. G.; OUYANG, Y.; ZHAO, W.; MU, Q. H. **Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery**. 2011.

APÊNDICE A

Cálculo das Propiedades Físicas TEC-12706

A partir de alguns valores fornecido pelo fabricante, foi possível calcular o valor da condutividade térmica k (W/m.K), necessária para os cálculos térmicos, que estão descritos abaixo.

Valores fornecidos pelo fabricante:

Tensão de Seebeck do módulo termoelétrico:

$$S_m = 0,05077 \text{ V/K}$$

Condutância térmica do módulo termoelétrico:

$$K = 0,01167 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}$$

Conforme a condutância térmica acima e com a equação 2.23, é possível encontrar a condutividade térmica do módulo termoelétrico:

$$K = 0,01167 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$A = 0,0016 \text{ m}^2$$

$$L = 0,04 \text{ m}$$

$$k = 4,668 \times 10^{-4} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

De acordo com o experimento 3.3.2, a diferença de temperatura foi de 59°C e pra essa diferença a tensão máxima em circuito aberto obtida foi de 1,9 V. Então de acordo com equação 2.22, é possível encontrar o coeficiente de Seebeck:

Voc = 1,9 V;

$\Delta T = 59^\circ\text{C}$.

$$\alpha = 0,0322 \text{ V/K}$$

De acordo com os dados da Tabela 2.1, tendo as duas primeiras linhas da tabela como parâmetro, pode-se observar que a Figura de Mérito do módulo termoeétrico tem o valor de $2,5 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$.

Cálculos Térmicos

1- Condução

De acordo com as temperaturas quente e fria encontradas acima, o valor de k calculado acima e com a equação 2.10 é possível encontrar a taxa volumétrica uniforme de geração de calor do módulo termoeétrico, como mostra a Figura A:

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2} \frac{x}{L} + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

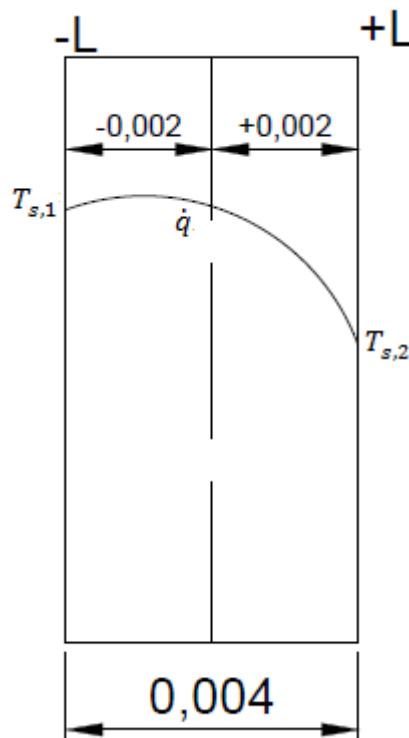


Figura A - Condução em uma parede plana com geração uniforme de calor.

$$k = 4,668 \times 10^{-4} \text{ W/m.K}$$

$$T_{s,1} = 85^\circ\text{C} - 358 \text{ K}$$

$$T_{s,2} = 26^\circ\text{C} - 299 \text{ K}$$

$$L = 0,004 \text{ m}$$

$$V = \text{volume de uma célula de Peltier} = 6,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Para $x = -0,002 \text{ m}$ e $T(0) = 358 \text{ K}$:

$$358 = \frac{\dot{q} \cdot 0,004^2}{2 \cdot 4,668 \times 10^{-4}} \left(1 - \frac{-0,002^2}{0,004^2} \right) + \left(\frac{299 - 358}{2} \cdot \frac{-0,002}{0,004} \right) + \left(\frac{358 + 299}{2} \right)$$

$$\dot{q} = 25,6 \times 10^3 \text{ W/m}^3$$

$$q = 25,6 \times 10^3 \cdot 6,4 \times 10^{-6}$$

$$q_{cond} = 0,164 \text{ W}$$

2- Convecção

De acordo com a equação 2.16 e consultando a Tabela TC-3 (Anexo C), pode-se achar o número de Reynolds local. Dados da Tabela: $T = 300 \text{ K}$ e $p = 1 \text{ atm}$.

$$u_\infty = 10 \text{ m/s}$$

$$L = 0,04$$

$$\nu = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re_L = \frac{10 \cdot 0,04}{15,89 \times 10^{-6}}$$

$$Re_L = 0,25173 \times 10^5$$

Como $Re_L < Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, o escoamento é laminar sobre toda a placa.

De acordo com a equação 2.18, e consultando a Tabela TC-3 (Anexo C), pode-se encontrar o número de Nussel local. Dados da Tabela: T = 300 K e p = 1 atm.

$$Pr = 0,707$$

$$Re_L = 0,25173 \times 10^5$$

$$\overline{Nu}_x = 0,664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$\overline{Nu}_x = 0,664 \cdot \sqrt{0,25173 \times 10^5} \cdot \sqrt[3]{0,707}$$

$$\overline{Nu}_x = 93,846$$

O coeficiente médio de transferência de calor por convecção é dado também pela equação 2.18:

$$\overline{Nu}_x = 93,846$$

$$k = 4,668 \times 10^{-4} \text{ W/m.K}$$

$$x = 0,04.$$

$$\overline{Nu}_x = \frac{\overline{h}_x \cdot x}{k}$$

$$93,846 = \frac{\overline{h}_x \cdot 0,04}{4,668 \times 10^{-4}}$$

$$\overline{h}_x = 1,095 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}$$

De acordo com a equação 2.12, foi possível encontrar a taxa de resfriamento por unidade de largura da placa, ilustrado na Figura B:

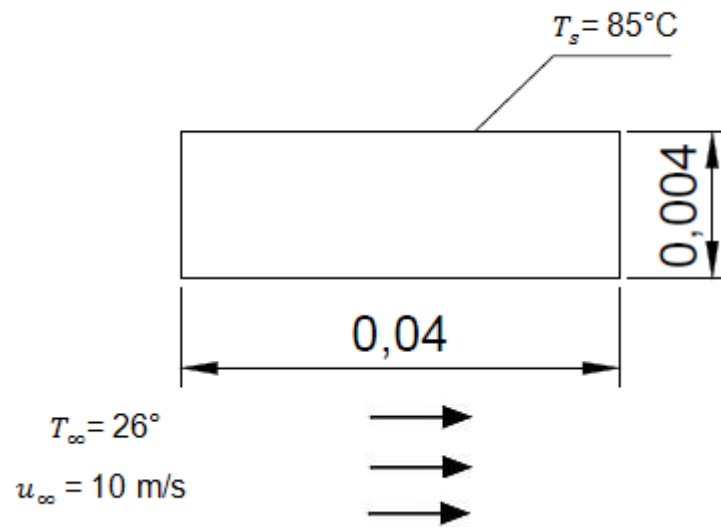


Figura B: Escoamento de ar no módulo termoeétrico.

$$\bar{h}_x = 1,095 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}$$

$$T_s = 85^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 26^\circ$$

$$A = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$q = \bar{h}_x \cdot A (T_s - T_\infty)$$

$$q = 1,095 \cdot 0,0016 \cdot (85 - 26)$$

$$\mathbf{q_{conv} = 0,103 \text{ W}}$$

3- Radiação

De acordo com a equação 2.21 pode-se obter o fluxo de calor transferido por radiação.

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$$

Considerando $\varepsilon = 0,6$;

$$T_s = 358K;$$

$$T_{viz} = 299K$$

$$A = 1,6 \times 10^{-3} m^2$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

$$q_{rad} = 0,6 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot 1,6 \times 10^{-3} (358^4 - 299^4)$$

$$q_{rad} = 0,459 W$$

APÊNDICE B

Projeto do Conversor Boost

A tensão de saída desejada é de 12 V, com variação de 1%. A tensão de entrada é tensão obtida nas células de Peltier, utilizando 7 células foi obtida uma tensão de 5V. De acordo com a equação 2.29, pode-se encontrar a razão cíclica:

$$V_o = 12 V$$

$$V_s = 5 V$$

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D}$$

$$12 = \frac{5}{1 - D}$$

$$D = 0,5833$$

De acordo com a equação 2.33 pode-se encontrar a indutância mínima, que depende da frequência de chaveamento, da razão cíclica e da carga na saída. A frequência de chaveamento para este projeto foi de 15000 Hz, este valor foi escolhido para evitar ruídos de áudio. Para a carga foi utilizado um resistor de 2,4 Ω , que foi escolhido para simular uma bateria, que possui uma tensão de 12 V e para carregá-la é necessária uma corrente de 5 A. Substituindo os valores na equação $V=R.i$, encontra-se o valor de 2,4 Ω . A utilização da carga simulando uma bateria foi para projetar o conversor *boost* para o pior caso possível, transformando o circuito no mais robusto possível.

$$D = 0,5833$$

$$R = 2,4 \Omega$$

$$f = 15000 Hz$$

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f}$$

$$L_{min} = \frac{0,5833(1 - 0,5833)^2 2,4}{30000}$$

$$L_{min} = \mathbf{8,1 \mu H}$$

De acordo com a equação 2.36, pode-se projetar a capacitância, que depende da variação de tensão na saída, da razão cíclica, da carga e da frequência de chaveamento. Esse capacitor foi projetado visando minimizar o *ripple* na saída do conversor boost.

$$D = 0,5833$$

$$R = 2,4 \Omega$$

$$f = 15000 \text{ Hz}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = 1\% = 0,01$$

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f}$$

$$C = \frac{0,5833}{2,4 \cdot 0,01 \cdot 15000}$$

$$C = \mathbf{1620,3 \mu F}$$

O mosfet utilizado foi o IRF540N (*DataSheet* no Anexo B), pois é um componente largamente utilizado, inclusive nas aulas de eletrônica do curso de Engenharia Mecatrônica do CEFET-MG *Campus V*. Este mosfet precisa ser acionado, então foi utilizado o PIC16F877A (*DataSheet* no Anexo D) para gerar uma onda quadrada na frequência de 15000 Hz, com razão cíclica de 0,5833, para satisfazer as especificações do projeto. Para gerar a onda quadrada utilizou-se a

saída PWM do PIC, como mostra a Figura C. O código para gerar o PWM se encontra no Apêndice C.

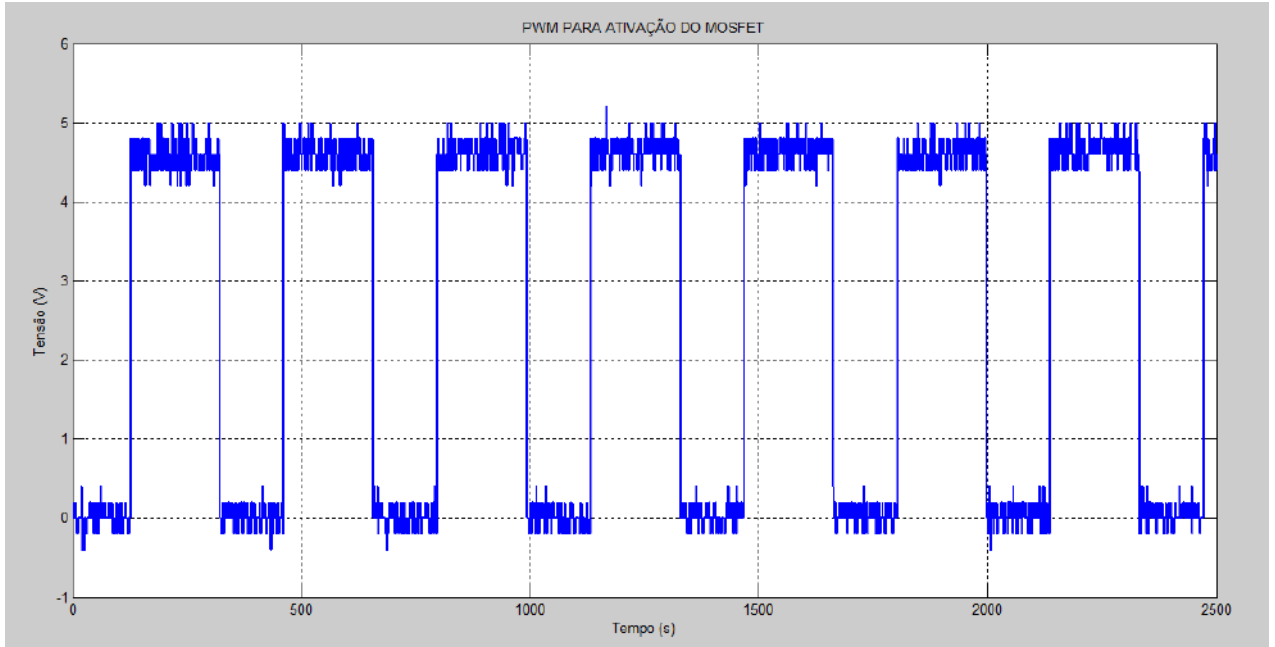


Figura C - Onda quadrada para a ativação do mosfet.

De acordo com o valor dos componentes, o circuito elétrico do conversor *boost* é mostrado na Figura D.

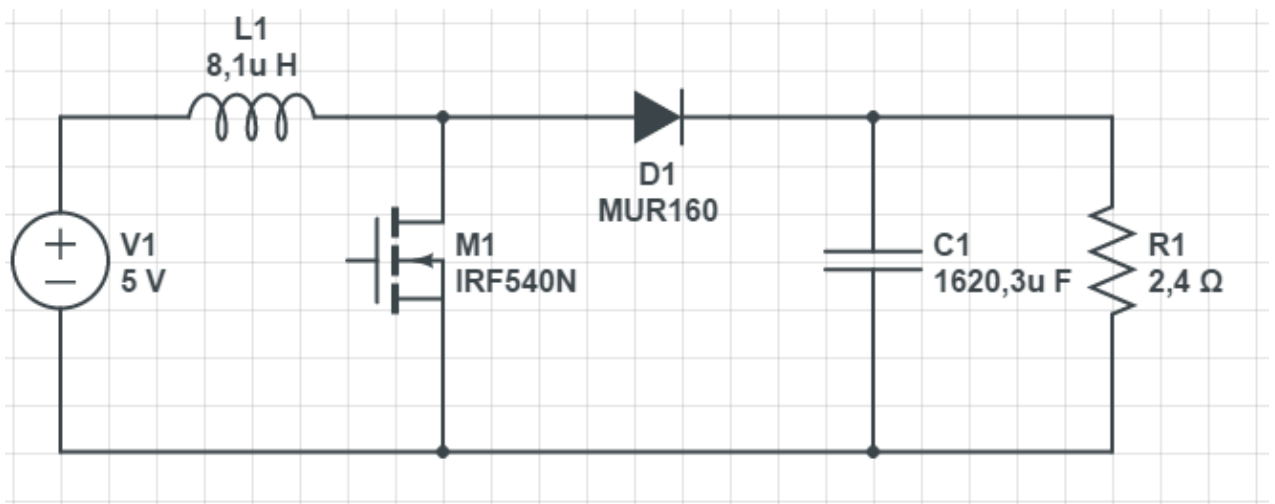


Figura D - Conversor *Boost*.

A Figura E mostra a entrada de 5 V e a saída 12 V do conversor *boost*.

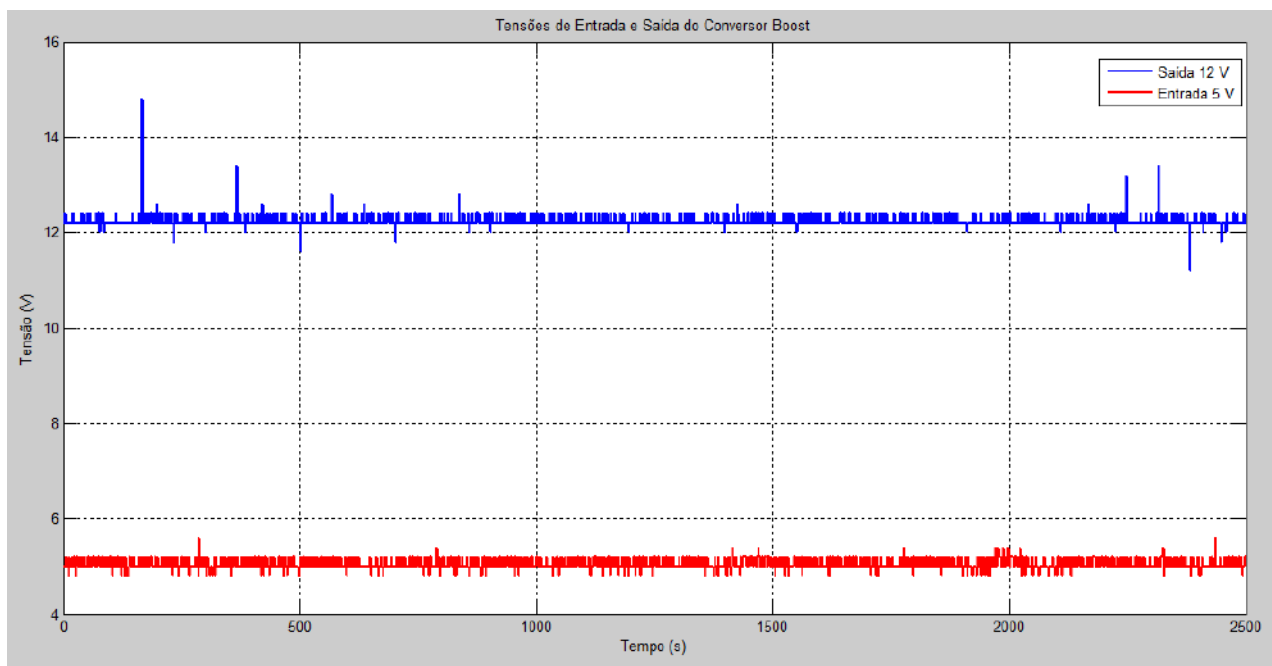


Figura E - Tensões de saída e entrada do conversor *boost*.

APÊNDICE C

Código do Programa que Gerou o PWM

Código PWM

Arquivo .h

```
#include <main.h>
```

```
void main()
{
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,66,1);          //67.0 us overflow, 67.0 us interrupção

    setup_ccp1(CCP_PWM);
    setup_ccp2(CCP_PWM);
    set_pwm1_duty((int16)156);
    set_pwm2_duty((int16)156);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);

    while(TRUE)
    {
        //TODO: User Code
    }
}
```

Arquivo .cpp

```
#include <main.h>
#include <16F877A.h>
#device PIC16F877A
#list
#device adc=16

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES XT              //Crystal osc <= 4mhz for PCM/PCH , 3mhz to 10
                        mhz for PCD
#FUSES PUT             //Power Up Timer
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18)
used for I/O

#use delay(clock=4000000)
```

```
void main()
{
    CLRWF 04
    BCF 03.7
    MOVLW 1F
    ANDWF 03,F
    MOVLW FF
    MOVWF 20
    BSF 03.5
    BSF 1F.0
    BSF 1F.1
    BSF 1F.2
    BCF 1F.3
    MOVLW 07
    MOVWF 1C

    setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,66,1);          //67.0 us overflow, 67.0 us interrupt

    MOVLW 00
    MOVWF 78
    IORLW 04
    BCF 03.5
    MOVWF 12
    MOVLW 42
    BSF 03.5
    MOVWF 12
```


Código PWM

```
setup_ccp1(CCP_PWM);

BCF    03.5
BCF    20.2
MOVF   20,W
BSF    03.5
MOVWF  07
BCF    03.5
BCF    07.2
MOVLW  0C
MOVWF  17

setup_ccp2(CCP_PWM);

BCF    20.1
MOVF   20,W
BSF    03.5
MOVWF  07
BCF    03.5
BCF    07.1
MOVLW  0C
MOVWF  1D

set_pwm1_duty((int16)156);

MOVLW  27
MOVWF  15
MOVF   17,W
ANDLW  CF
MOVWF  17

set_pwm2_duty((int16)156);

MOVLW  27
MOVWF  1B
MOVF   1D,W
ANDLW  CF
MOVWF  1D

setup_comparator(NC_NC_NC_NC);

MOVLW  07
BSF    03.5
MOVWF  1C
MOVF   05,W
MOVWF  05
MOVLW  02
MOVWF  77
DECFSZ 77,F
GOTO   03B
GOTO   03E
NOP
MOVF   1C,W
BCF    03.5
BCF    0D.6

while(TRUE)
{
}
GOTO  042
}
SLEEP
```

ANEXOS

ANEXO A: TEC-12706



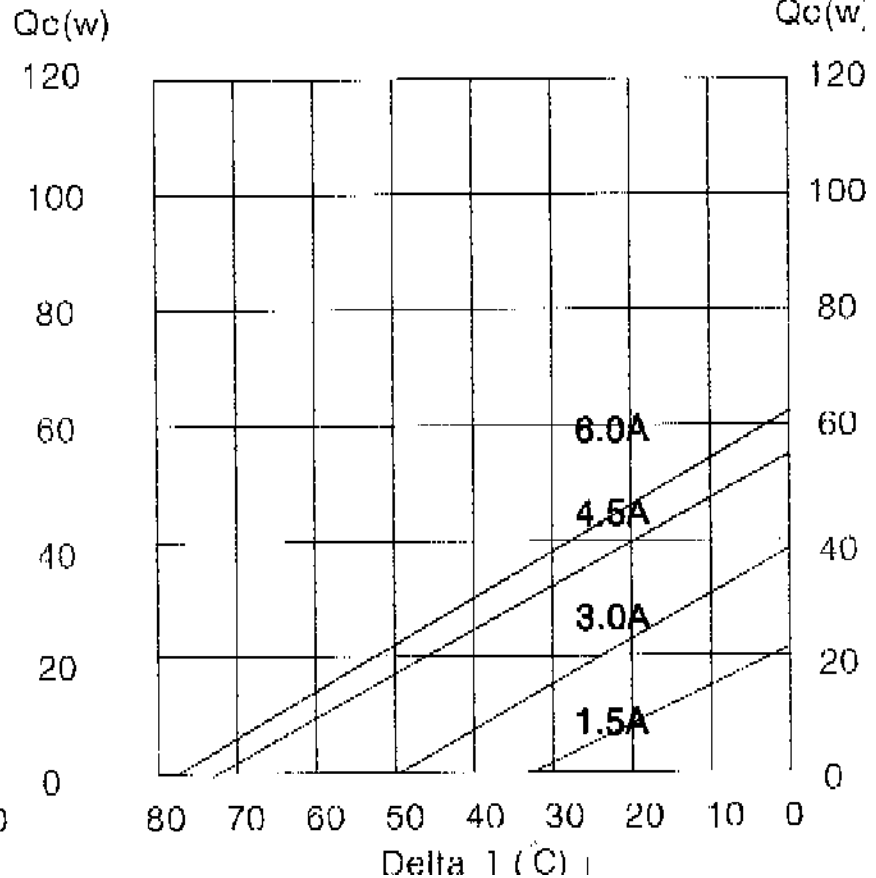
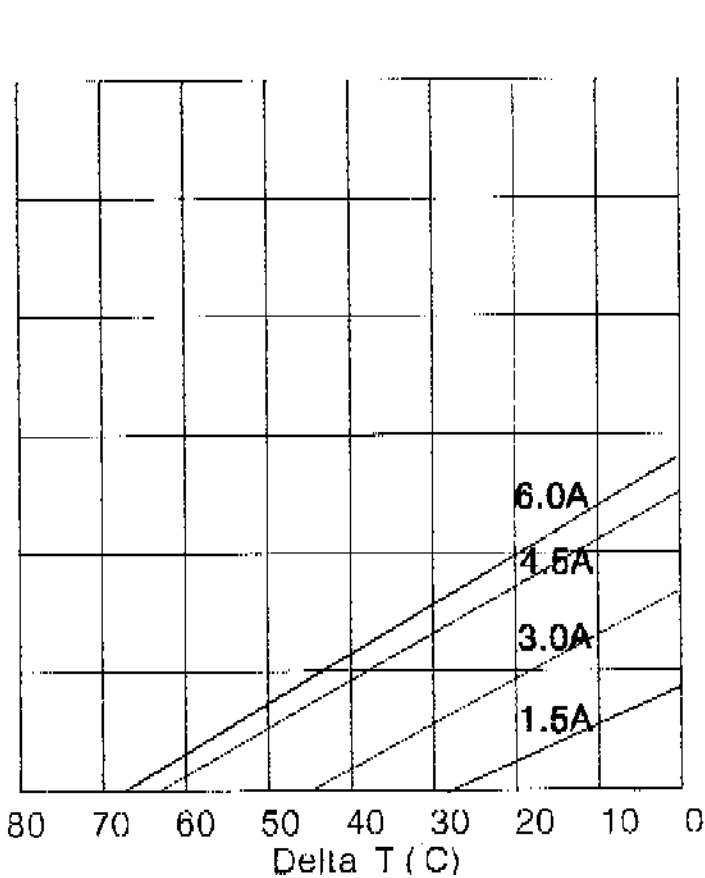
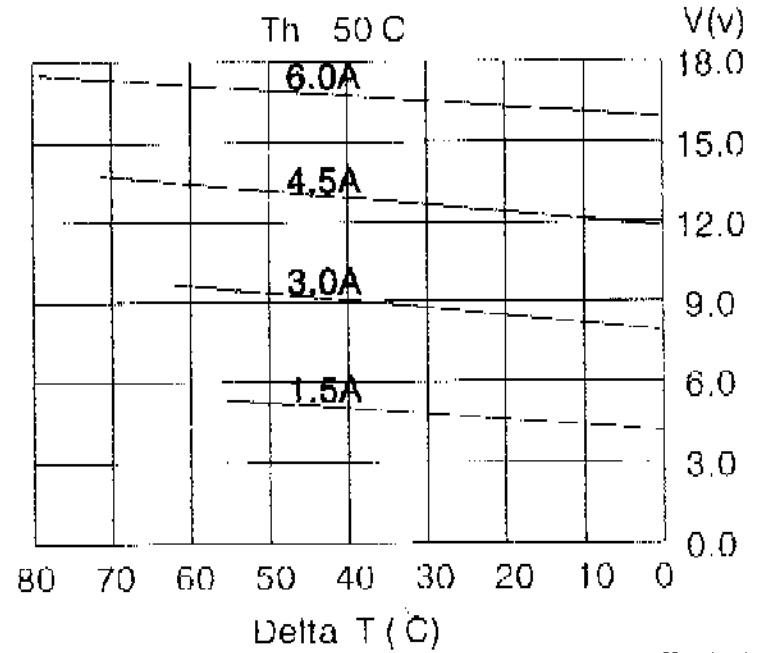
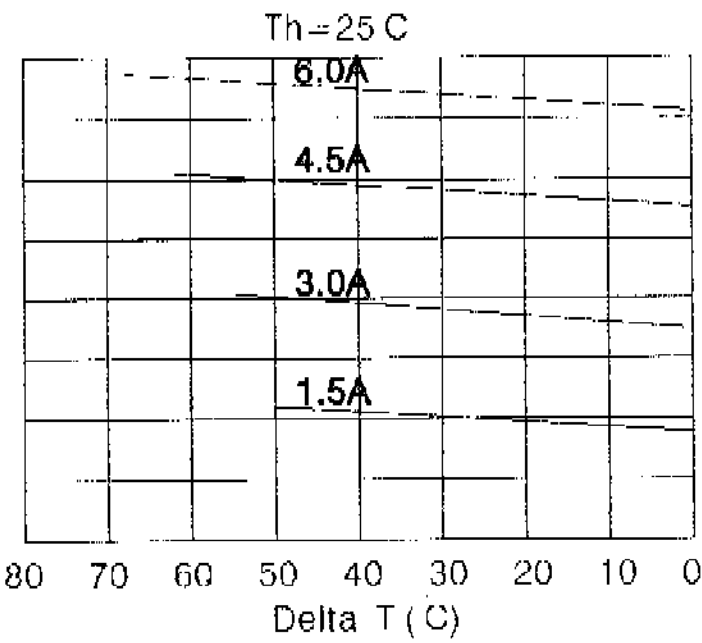
Performance Specifications

Hot Side Temperature (° C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (° C)	66	75
I _{max} (Amps)	6.4	6.4
V _{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



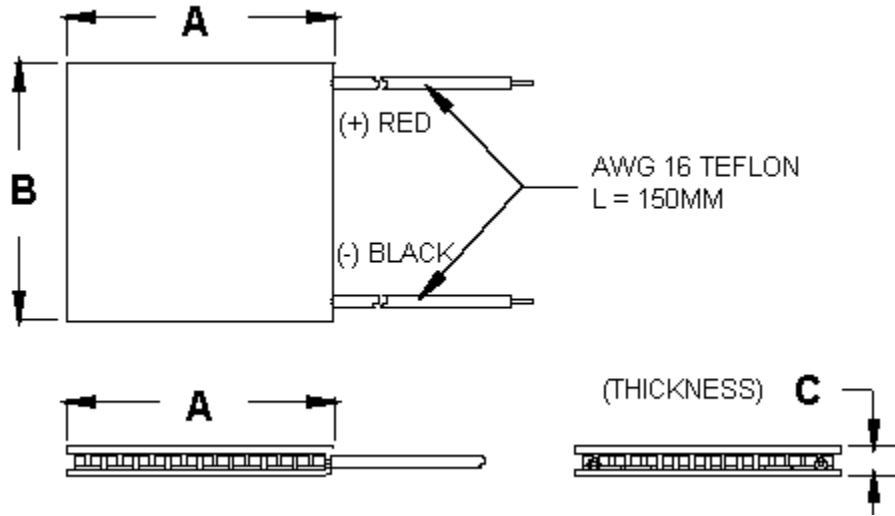


Performance curves:





TEC1-12706



Ceramic Material: Alumina (Al₂O₃)
 Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

Size table:

A	B	C			
40	40	3.9			

Operating Tips

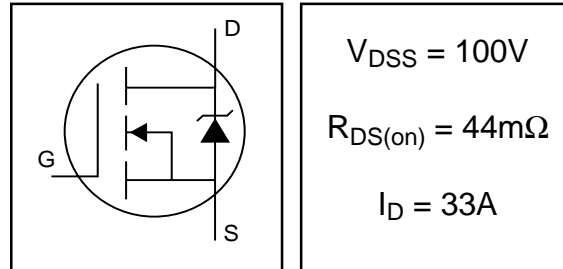
- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed I_{max} or V_{max} when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.

ANEXO B: IRF540N

IRF540N

HEXFET® Power MOSFET

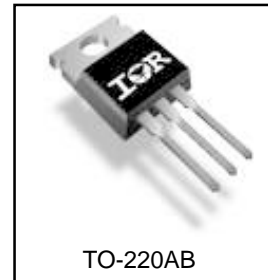
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

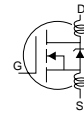
	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	33	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	23	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	110	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	130	W
	Linear Derating Factor	0.87	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	13	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	7.0	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
T_{STG}			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	44	$m\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 16A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	21	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 16A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 100V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	71	nC	$I_D = 16A$ $V_{DS} = 80V$ $V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	21		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	11	—	ns	$V_{DD} = 50V$ $I_D = 16A$ $R_G = 5.1\Omega$ $V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
t_r	Rise Time	—	35	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	39	—		
t_f	Fall Time	—	35	—		
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1960	—	pF	$V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 25V$ $f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
C_{oss}	Output Capacitance	—	250	—		
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	40	—		
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	700 ⑤	185 ⑥	mJ	$I_{AS} = 16A, L = 1.5\text{mH}$



Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	33	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	110		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 16A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	115	170	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 16A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	505	760	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 1.5\text{mH}$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 16A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 16A$, $di/dt \leq 340A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

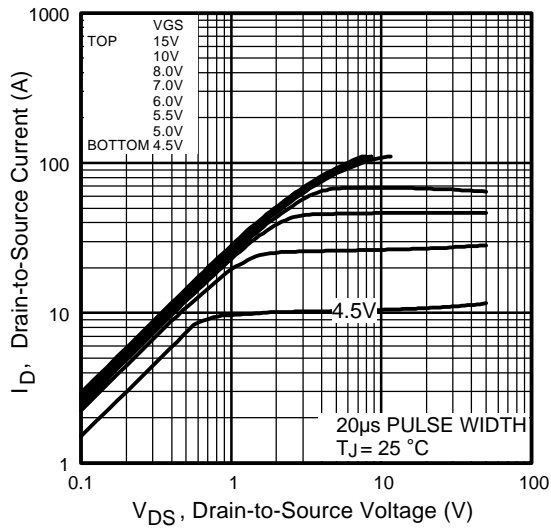


Fig 1. Typical Output Characteristics

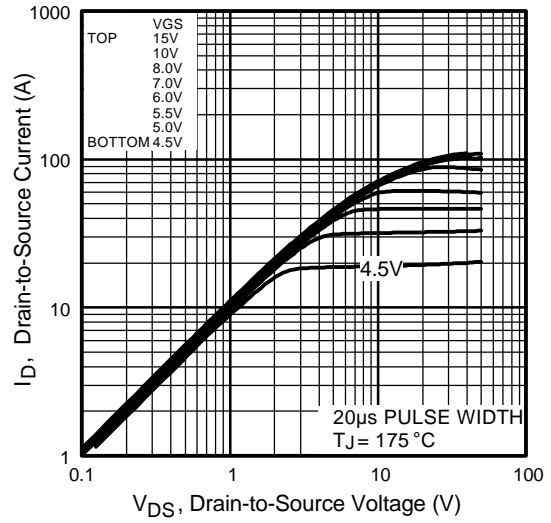


Fig 2. Typical Output Characteristics

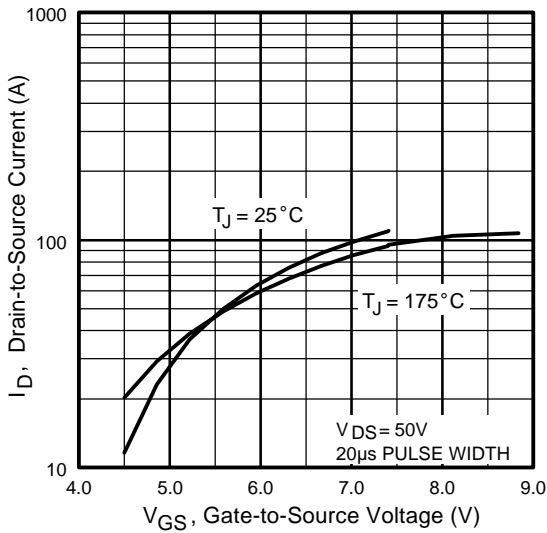


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

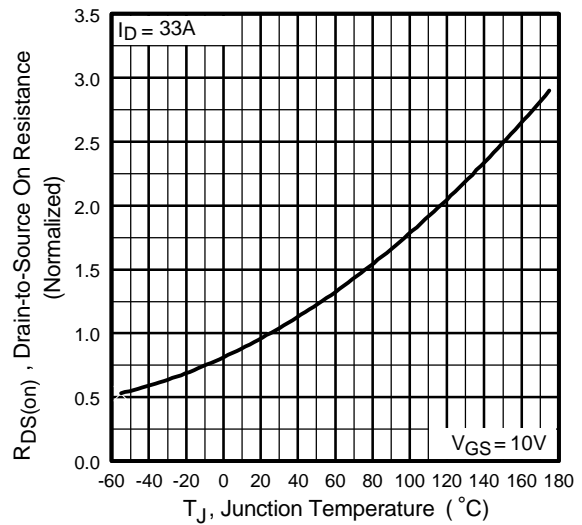


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRF540N

International
IR Rectifier

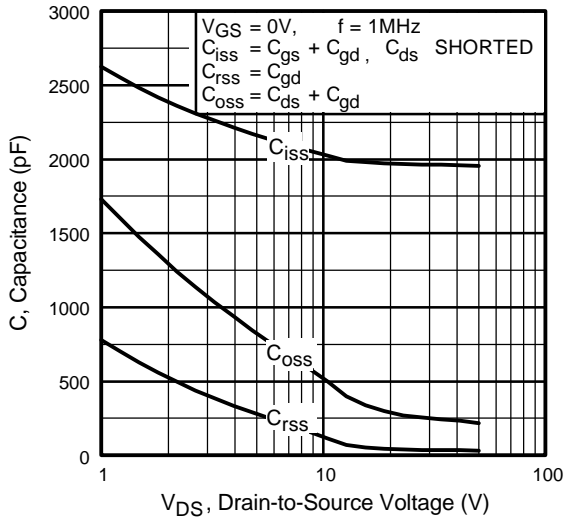


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

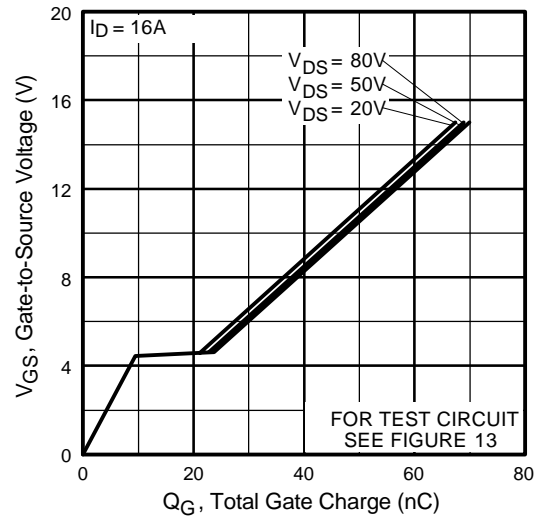


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

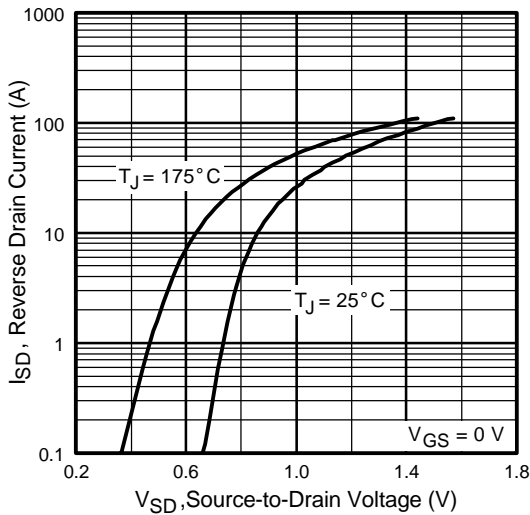


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

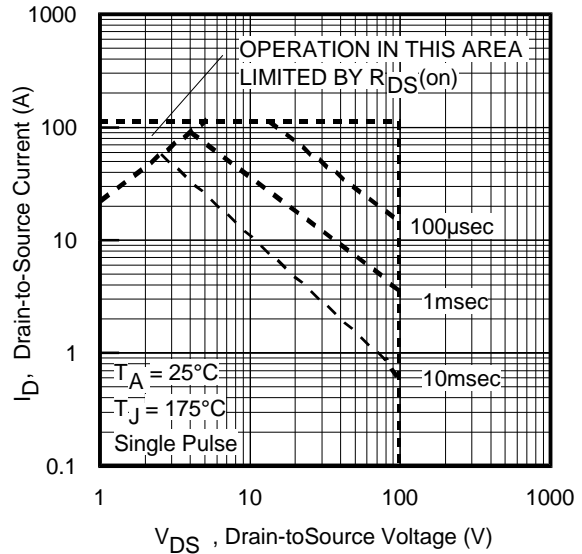


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

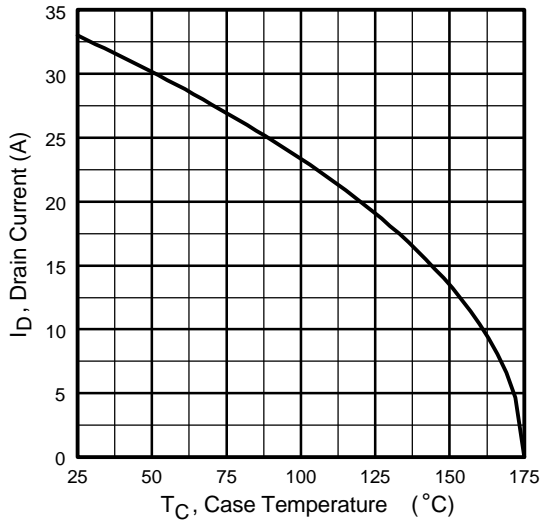


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

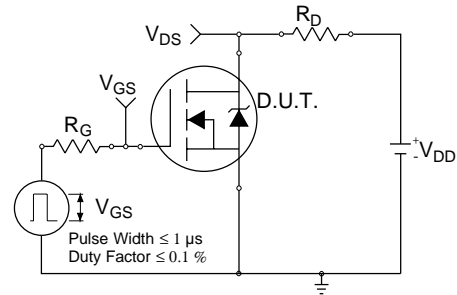


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

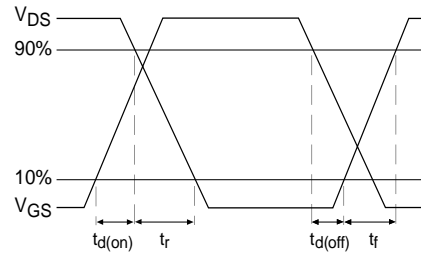


Fig 10b. Switching Time Waveforms

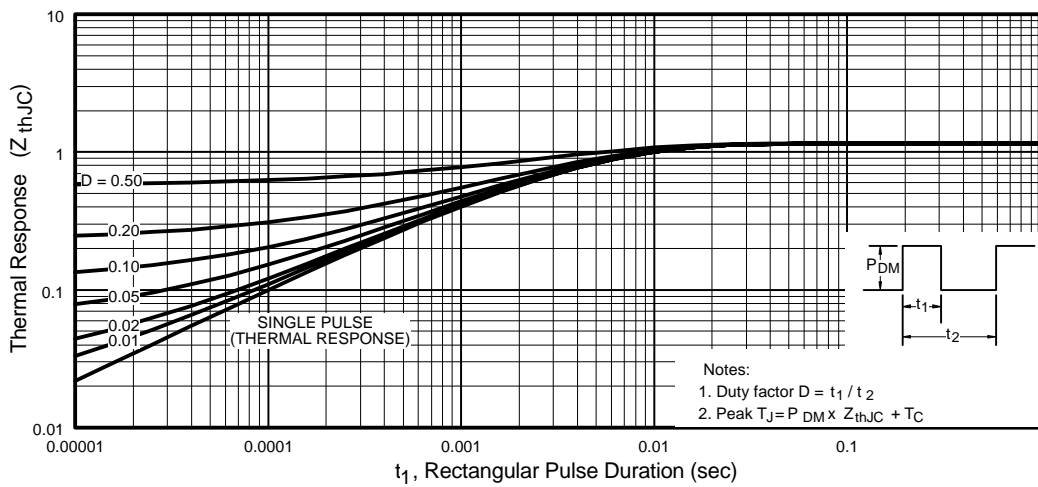


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRF540N

International
IR Rectifier

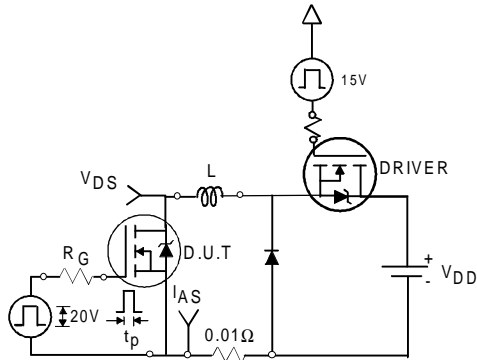


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

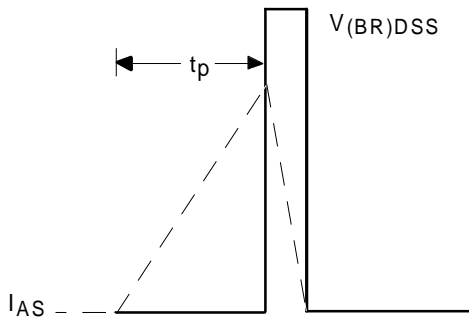


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

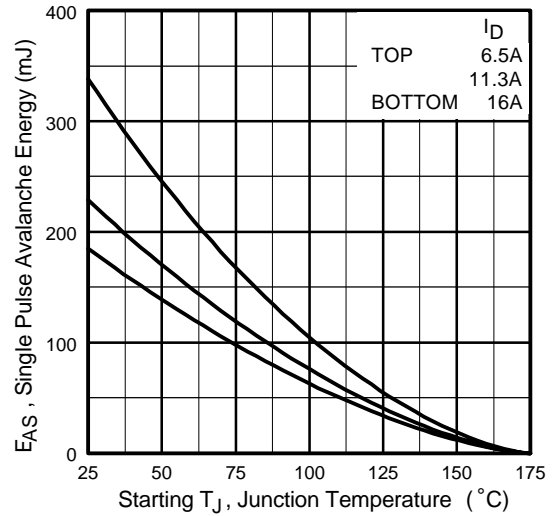


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

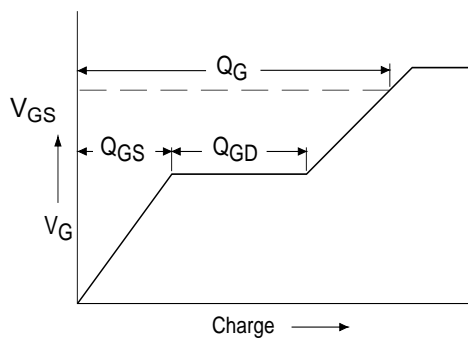


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

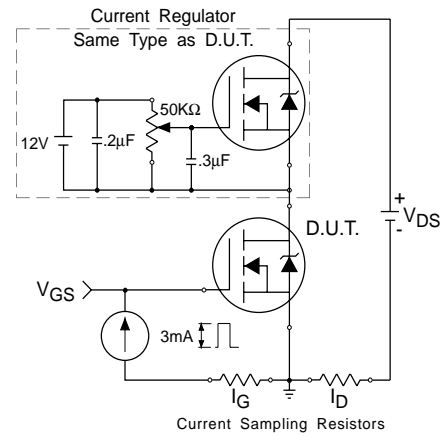
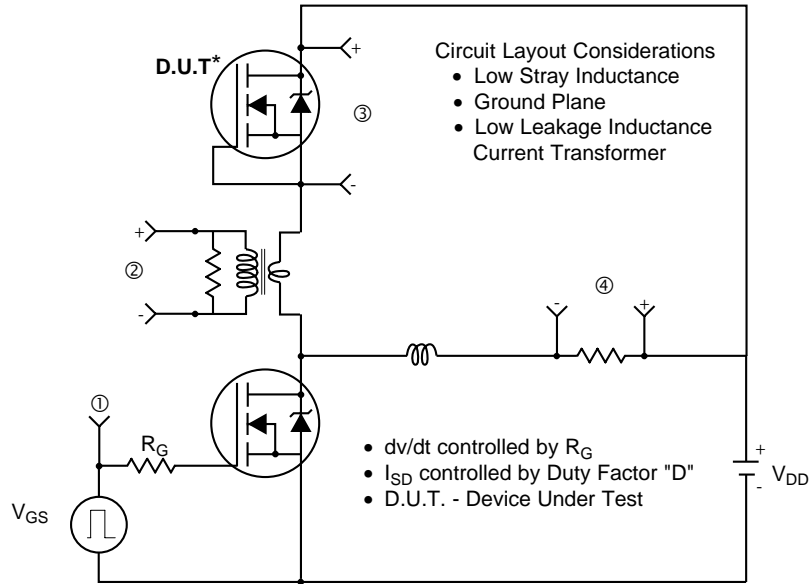
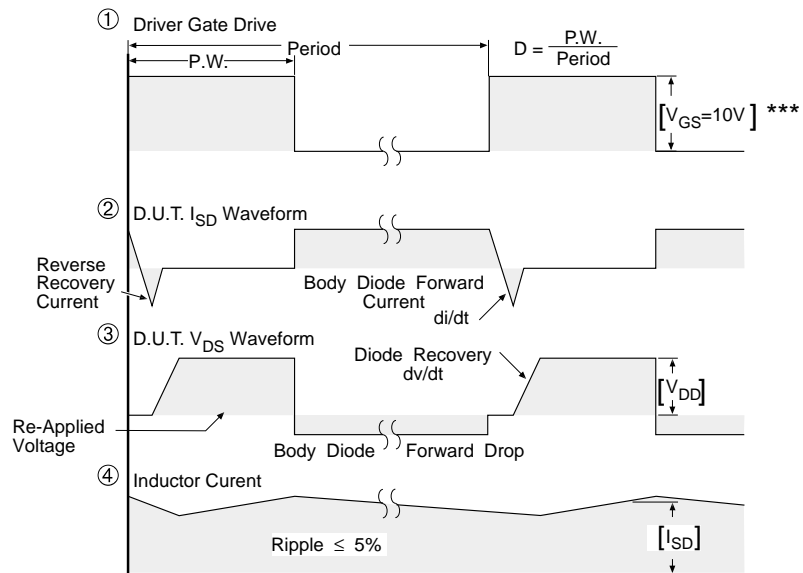


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



* Reverse Polarity of D.U.T for P-Channel



*** $V_{GS} = 5.0V$ for Logic Level and 3V Drive Devices

Fig 14. For N-channel HEXFET® power MOSFETs

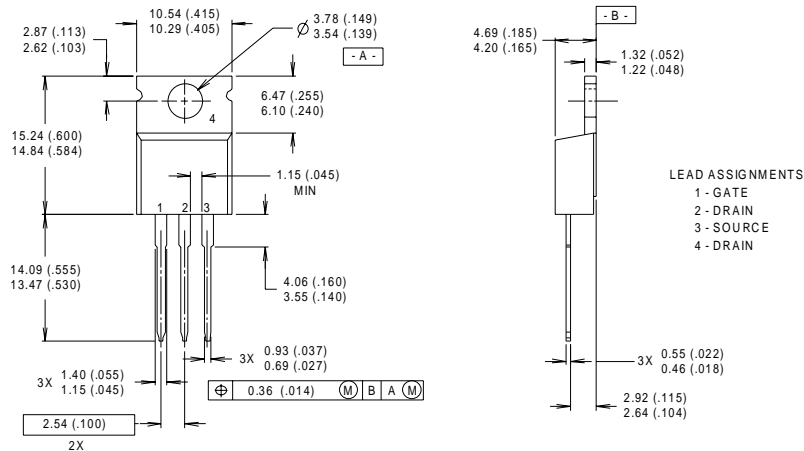
IRF540N



Package Outline

TO-220AB

Dimensions are shown in millimeters (inches)

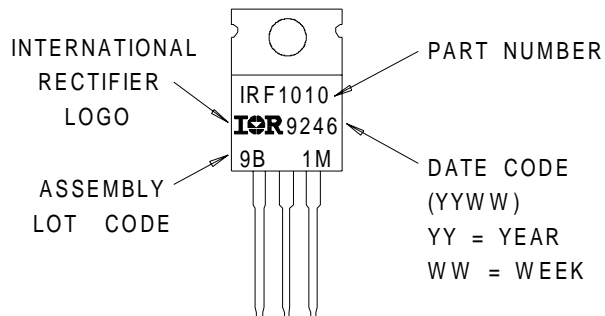


- NOTES:
 1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSII Y14.5M, 1982.
 2 CONTROLLING DIMENSION : INCH
 3 OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-220AB.
 4 HEATSINK & LEAD MEASUREMENTS DO NOT INCLUDE BURRS.

Part Marking Information

TO-220AB

EXAMPLE : THIS IS AN IRF1010
 WITH ASSEMBLY
 LOT CODE 9B1M



Data and specifications subject to change without notice.
 This product has been designed and qualified for the industrial market.
 Qualification Standards can be found on IR's Web site.



IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
 TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at www.irf.com for sales contact information.03/01
www.irf.com

Note: For the most current drawings please refer to the IR website at:
<http://www.irf.com/package/>

ANEXO C: Tabela TC-3

TABELA TC-3 Propriedades Termofísicas de Gases à Pressão Atmosférica¹

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Ar							
100	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
150	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
200	1,7458	1,007	132,5	7,590	18,1	10,3	0,737
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,690
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
600	0,5804	1,051	305,8	52,69	46,9	76,9	0,685
650	0,5356	1,063	322,5	60,21	49,7	87,3	0,690
700	0,4975	1,075	338,8	68,10	52,4	98,0	0,695
750	0,4643	1,087	354,6	76,37	54,9	109	0,702
800	0,4354	1,099	369,8	84,93	57,3	120	0,709
850	0,4097	1,110	384,3	93,80	59,6	131	0,716
900	0,3868	1,121	398,1	102,9	62,0	143	0,720
950	0,3666	1,131	411,3	112,2	64,3	155	0,723
1000	0,3482	1,141	424,4	121,9	66,7	168	0,726
1100	0,3166	1,159	449,0	141,8	71,5	195	0,728
Hélio (He)							
100	0,4871	5,193	96,3	19,8	73,0	28,9	0,686
120	0,4060	5,193	107	26,4	81,9	38,8	0,679
140	0,3481	5,193	118	33,9	90,7	50,2	0,676
180	0,2708	5,193	139	51,3	107,2	76,2	0,673
220	0,2216	5,193	160	72,2	123,1	107	0,675
260	0,1875	5,193	180	96,0	137	141	0,682
300	0,1625	5,193	199	122	152	180	0,680
400	0,1219	5,193	243	199	187	295	0,675
500	0,09754	5,193	283	290	220	434	0,668
700	0,06969	5,193	350	502	278	768	0,654
1000	0,04879	5,193	446	914	354	1400	0,654

¹ Para gases à pressão atmosférica, o modelo de gás ideal (Seção 4.5) se aplica, e $\rho = p/RT$.

TABELA TC-4 Propriedades Termofísicas de Líquidos Saturados

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$\beta \cdot 10^3$ (K ⁻¹)
Etileno Glicol (C ₂ H ₄ (OH) ₂)								
273	1130,8	2,294	6,51	57,6	242	0,933	617	0,65
280	1125,8	2,323	4,20	37,3	244	0,933	400	0,65
290	1118,8	2,368	2,47	22,1	248	0,936	236	0,65
300	1114,4	2,415	1,57	14,1	252	0,939	151	0,65
310	1103,7	2,460	1,07	9,65	255	0,939	103	0,65
320	1096,2	2,505	0,757	6,91	258	0,940	73,5	0,65
330	1089,5	2,549	0,561	5,15	260	0,936	55,0	0,65
340	1083,8	2,592	0,431	3,98	261	0,929	42,8	0,65
350	1079,0	2,637	0,342	3,17	261	0,917	34,6	0,65
360	1074,0	2,682	0,278	2,59	261	0,906	28,6	0,65
370	1066,7	2,728	0,228	2,14	262	0,900	23,7	0,65
373	1058,5	2,742	0,215	2,03	263	0,906	22,4	0,65
Glicerina (C ₃ H ₈ (OH) ₃)								
273	1276,0	2,261	10,60	83,10	282	0,977	85,000	0,47
280	1271,9	2,298	5,34	42,00	284	0,972	43,200	0,47
290	1265,8	2,367	1,85	14,60	286	0,955	15,300	0,48
300	1259,9	2,427	79,9	634	286	0,935	6780	0,48
310	1253,9	2,490	35,2	281	286	0,916	3060	0,49
320	1247,2	2,564	21,0	168	287	0,897	1870	0,50
Óleo de Motor (Novo)								
273	899,1	1,796	3,85	4280	147	0,910	47,000	0,70
280	895,3	1,827	2,17	2430	144	0,880	27,500	0,70
290	890,0	1,868	99,9	1120	145	0,872	12,900	0,70
300	884,1	1,909	48,6	550	145	0,859	6400	0,70
310	877,9	1,951	25,3	288	145	0,847	3400	0,70
320	871,8	1,993	14,1	161	143	0,823	1965	0,70
330	865,8	2,035	8,36	96,6	141	0,800	1205	0,70
340	859,9	2,076	5,31	61,7	139	0,779	793	0,70
350	853,9	2,118	3,56	41,7	138	0,763	546	0,70
360	847,8	2,161	2,52	29,7	138	0,753	395	0,70
370	841,8	2,206	1,86	22,0	137	0,738	300	0,70
380	836,0	2,250	1,41	16,9	136	0,723	233	0,70
390	830,6	2,294	1,10	13,3	135	0,709	187	0,70
400	825,1	2,337	0,874	10,6	134	0,695	152	0,70
410	818,9	2,381	0,698	8,52	133	0,682	125	0,70
420	812,1	2,427	0,564	6,94	133	0,675	103	0,70
430	806,5	2,471	0,470	5,83	132	0,662	88	0,70

ANEXO D: PIC16F877A