



**Márcio André Grüger**

**DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR  
AUXILIAR PARA UM VEÍCULO MODELO SAVEIRO DIESEL**

**Horizontina**

**2014**

**Márcio André Gröger**

**DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR AUXILIAR  
PARA UM VEÍCULO MODELO SAVEIRO DIESEL**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Ademar Michels, Doutor.

**Horizontina**

**2014**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Dimensionamento de um trocador de calor auxiliar para um veículo modelo  
saveiro Diesel”**

**Elaborada por:**

**Márcio André Grüger**

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 26/11/2014  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Prof. Dr. Ademar Michels  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Prof. Esp. Leonardo Teixeira Rodrigues  
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

---

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen  
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Horizontalina**

**2014**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho de final de curso aos meus pais que tornaram este sonho possível, a minha esposa Cátia e filho Matheus pela compreensão, aos amigos que de alguma forma contribuíram para a realização do mesmo, a FAHOR e ao professor e doutor Ademar Michels pela orientação e auxílio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela vida que me foi dada, pela proteção no caminho e pela força para a conclusão deste trabalho, pois alguns não tiveram a mesma sorte, partiram antes mesmo de concluir este curso (lamentável).

Agradeço aos meus pais Francisco e Helma pelo apoio e incentivo, pois sem isto não seria possível realizar este sonho.

Agradeço a minha esposa Cátia pela compreensão, maturidade, incentivo e motivação, deixando assim esta jornada mais suave e alegre e ao meu filho Matheus, pela compreensão pelas horas que não pude dedicar a ele.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Ademar Michels pela dedicação, orientação e conhecimentos repassados com alegria em sala de aula.

A FAHOR e a todos os professores e em especial aos Professores Anderson Dall Mollin, Richard Thomas Lermen e Valmir Vilson Beck pela seriedade, dedicação e conhecimentos repassados com profissionalismo.

“Posso pegar meu telescópio e ver milhões de quilômetros de distância no espaço; mas também posso pôr meu telescópio de lado, ir para o meu quarto, fechar a porta e, em oração fervorosa, ver mais do Céu e me aproximar mais de DEUS do que quando estou equipado com todos os telescópios e instrumentos do mundo.”

*Isaac Newton*

## RESUMO

Um trocador de calor é um dispositivo que visa transferir energia térmica de forma eficiente de um meio para outro, ou seja, de propiciar calor de um fluido para o outro, encontrando-se estes a temperaturas diferentes. Em motores de combustão interna um terço da energia é liberada na forma de calor, sendo para tanto necessário o emprego de um trocador de calor bem dimensionado, para que não ocorram problemas com aquecimentos excessivos. O objetivo deste trabalho é o dimensionamento de um trocador de calor para auxiliar no arrefecimento de um motor de combustão interna ciclo Diesel de um automóvel tipo saveiro, que tem as suas temperaturas altas e oscilantes quando submetido a maiores esforços. Este trabalho justifica-se em manter a temperatura mais baixa para que haja um aumento na vida útil do motor. Os dados utilizados para parâmetros de entrada e saída dos fluidos quente e frio bem como a vazão da bomba foram coletados a partir de testes experimentais. Dadas as condições de escoamento dos fluidos e das suas respectivas temperaturas de entrada e saída, as análises térmicas foram feitas para determinação das características geométricas do trocador de calor e do tipo do material empregado, através de cálculos. O trocador de calor auxiliar dimensionado não foi produzido, porém foi adquirido um com características semelhantes para a realização dos testes experimentais; Os testes experimentais foram realizados coletando-se a temperatura do veículo durante a realização de um percurso de 45 km com e sem o trocador de calor auxiliar instalado no veículo. O resultado foi significativo, pois obteve-se um melhor controle da temperatura, conforme especificado para motores Diesel.

**Palavras-chave:** Trocador de calor. Temperatura alta. Saveiro Diesel.

## **ABSTRACT**

A heat exchanger is a device which aims to transfer heat efficiently from one medium to another, or to provide heat from one fluid to another, meeting these at different temperatures. In internal combustion engines a third of the energy is released as heat, and to do so requires the use of a well dimensioned heat exchanger, to prevent any problems with overheating. The objective of this work is the design of a heat exchanger to aid in cooling an internal combustion diesel engine cycle of a car sloop type, which has its high and fluctuating temperatures when subjected to greater efforts. This work is justified in maintaining the lowest temperature so that there is an increase in engine life. The data used for input and output parameters of the hot and cold fluids and pump output were collected from experimental tests. Due to the flow conditions of fluids and their respective inlet and outlet temperatures, thermal analyzes were performed to determine the geometric characteristics of the heat exchanger and the type of material used, by calculation. The scaled auxiliary heat exchanger was not produced, but was acquired with similar characteristics to perform the experimental tests; Experimental tests were performed by collecting the temperature of the vehicle during execution of a route of 45 km with and without the auxiliary heat exchanger installed in the vehicle. The result was significant because it gave better control of temperature, as specified for diesel engines.

**Keywords:** heat exchanger. High temperature. Diesel Saveiro.

## LISTA DE FIGURA

Figura 1: Esquema de um trocador de calor casco e tubo .....	16
Figura 2: Trocador de calor tipo placa.....	16
Figura 3: Tipos de tubos aletados .....	17
Figura 4: Diferentes regimes de escoamento e perfis de temperatura .....	20
Figura 5: Fator de correção F para correntes cruzadas .....	22
Figura 6: Gráfico eficiência da aleta.....	24
Figura 7: Mapa do percurso usado para a coleta dos dados.....	28
Figura 8: Trocador de calor auxiliar instalado .....	28
Figura 9: Esquema de instalação do trocador de calor auxiliar .....	29
Figura 10: Indicador de temperatura com escala em graus Celsius e Fahrenheit .....	30
Figura 11: Sistema de Refrigeração com a posição de sensor de temperatura instalado ....	30
Figura 12: Sensor de temperatura da água instalado.....	31
Figura 13: Trocador de calor semelhante ao do projeto .....	32
Figura 14: Material para instalação do trocador de calor auxiliar .....	32
Figura 15: Termômetro digital .....	33
Figura 16: Gráfico de fator de correção F para trocador de calor com único passe .....	39
Figura 17: Eficiência da aleta.....	41
Figura 18: Aletas (mm) .....	42
Figura 19: Trocador de calor auxiliar (mm) .....	43
Figura 20: Gráfico da Altitude X Percurso .....	44
Figura 21: Gráfico da Temperatura T1 X Percurso .....	45
Figura 22: Gráfico da Temperatura T2 X Percurso .....	47
Figura 23: Gráfico da Temperatura T1 e Altitude X Percurso.....	47
Figura 24: Temperatura T1 e T2 X Percurso.....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Dados de entrada para os cálculos .....	34
Quadro 2: Dados consultados em tabela .....	35
Quadro 3: Dados calculados.....	36
Quadro 4: Critérios para otimização do projeto .....	36
Quadro 5: Características para o trocador de calor auxiliar.....	37
Quadro 6: Características impostas levando em conta os critérios de otimização .....	37
Quadro 7: Altitudes entre o percurso de Santa Rosa e Horizontina (RS) .....	43

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	13
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	14
2.1 TRANSFÊRENCIA DE CALOR.....	14
2.2 TROCADOR DE CALOR .....	14
2.3 CLASSIFICAÇÕES DOS TROCADORES DE CALOR .....	15
2.3.1 TROCADORES DE CALOR TUBULARES.....	15
2.3.2 TROCADOR DE CALOR TIPO PLACA .....	16
2.3.3 TROCADORES DE CALOR DE SUPERFÍCIE ESTENDIDA E ALETADA.....	17
2.4 OTIMIZAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR .....	17
2.5 TEMPERATURA DO MOTOR DIESEL .....	18
2.6 EQUACIONAMENTO DE TROCADOR DE CALOR.....	18
2.6.1 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	19
2.6.2 METODO DTML PARA ANÁLISE DO TROCADOR DE CALOR.....	20
2.6.3 FATOR F DE CORREÇÃO DTML.....	21
2.6.4 ESCOAMENTO TURBULENTO EM TUBOS .....	22
2.6.5 EFICIÊNCIA DA ALETA.....	23
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	25
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS .....	25
3.1.1 MODELO MATEMÁTICO .....	25
3.1.2 COLETA DE DADOS.....	26
3.1.3 O PERCURSO .....	27
3.1.4 INSTALAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR AUXILIAR.....	28
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	29
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	34
4.1 EQUACIONAMENTO DE TROCADOR DE CALOR.....	34
4.1.1 TAXA NECESSÁRIA PARA A TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	35
4.1.2 NUMERO DE REYNOLDS PARA ESCOAMENTO.....	38
4.1.3 METODO DTML PARA A TRANSFERENCI DE CALOR .....	38
4.1.4 FATOR DE CORREÇÃO F .....	38
4.1.5 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	39
4.1.6 EFICIÊNCIA DA ALETA.....	40
4.2 DIMENSÕES DO TROCADOR DE CALOR AUXILIAR.....	42
4.3 VALORES DOS DADOS COLETADOS .....	43

4.3.1 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS .....	47
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>
<b>APENDICE A - FICHA DE REGISTRO DAS ALTITUDES .....</b>	<b>52</b>
<b>APENDICE B - FICHA DE REGISTRO DE DADOS DA ETAPA 1 .....</b>	<b>53</b>
<b>APENDICE C - FICHA DE REGISTRO DE DADOS DA ETAPA 2 .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO A - CARACTERÍSTICAS DA MANGUEIRA .....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um trocador de calor é um dispositivo que efetua a transmissão de calor de um fluido para outro. São mais comuns, no entanto, os trocadores de calor nos quais um fluido é separado do outro por uma parede ou partição através da qual passa o calor. Essas unidades, de trocador de calor, são largamente empregadas porque podem ser construídas com grandes superfícies de troca de calor num volume relativamente pequeno e são adequados para aquecimento, resfriamento, evaporação ou condensação de todas as espécies de fluidos (CELSO ARAÚJO, 1978).

O sistema para o qual o trocador de calor auxiliar foi dimensionado, pertence a um veículo de passeio da marca Volkswagen, modelo Saveiro. O motor do veículo é um motor de combustão interna ciclo Diesel e refrigerado a água. O trocador de calor já existente no sistema de refrigeração do motor é precário, não atendendo a demanda que o motor realmente necessita, o que acaba gerando temperaturas superiores às especificadas para motores de combustão interna ciclo Diesel, reduzindo desta forma a vida útil do motor.

Sendo, desta forma, necessário a adição de mais um trocador de calor, para baixar e manter estáveis as temperaturas altas e oscilantes que o motor produz quando submetido a maiores esforços, temperaturas que oscilam entre 82°C e 104°C.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Abordado como ponto principal deste trabalho foi o resfriamento do fluido refrigerante de um veículo Saveiro Diesel, através do dimensionamento de um trocador de calor auxiliar, pois tem as suas temperaturas altas e oscilantes,

Este trabalho Justifica-se pela necessidade de manter a temperatura dentro das condições normais de trabalho especificadas para motores Diesel, para que se garanta o bom funcionamento do motor e um aumento na vida útil do mesmo.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi projetar um trocador de calor auxiliar para um veículo modelo saveiro equipado com motor ciclo Diesel, para auxiliar na refrigeração do mesmo. Para chegar ao objetivo geral os objetivos específicos devem ser atendidos, os quais são: Elaborar um memorial de cálculo para o dimensionamento correto do trocador de calor; projetar e dimensionar o trocador de calor para que atenda às necessidades do problema, e; Testar o trocador de calor auxiliar no veículo com um trocador de calor com características semelhantes ao dimensionado.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Com o intuito de melhorar o conhecimento relativo ao assunto do dimensionamento de um trocador de calor, foram consultadas algumas obras, para conhecer assim a forma como este assunto foi abordado e analisado em estudos anteriores e para saber quais são as variáveis para o dimensionamento de um trocador de calor.

### 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sempre que existir um gradiente de temperatura no interior de um sistema, ou que dois sistemas a diferentes temperaturas forem colocados em contato, haverá transferência de energia. O processo pelo qual a energia é transportada chama-se transmissão de calor. A entidade em trânsito, chamada calor, não pode ser medida ou observada diretamente, mas os efeitos por ela produzidos são susceptíveis à observação e à medida (KREITH, 1977).

Segundo Araújo (1978), sempre que um corpo está a uma temperatura maior que a de outro, ou, inclusive, no mesmo corpo existem temperaturas diferentes, ocorre uma cessão de energia da região de temperatura mais elevada para a mais baixa e a esse fenômeno dá-se o nome de transmissão de calor.

Para Incropera e DeWitt (1996), transferência de calor é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, haverá, necessariamente, transferência de calor.

### 2.2 TROCADOR DE CALOR

O trocador de calor é um equipamento térmico, no qual um fluido quente cede calor a um fluido frio, ou seja, exige a presença de dois fluidos, um quente e um frio, proporcionando, dependente da natureza do equipamento, uma transferência de calor sensível ou latente (ARAÚJO, 1978).

O processo de troca de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida ocorre em muitas aplicações em engenharia. O equipamento usado para implementar essa troca é

conhecido por “trocador de calor” (INCROPERA; DEWITT, 1996).

Para Kreith (1977), um trocador de calor é um dispositivo que efetua a transmissão de calor de um fluido para outro. O tipo mais simples de trocador de calor é um recipiente no qual um fluido quente e um frio são misturados diretamente. Num sistema como esse, ambos atingem a mesma temperatura final e a quantidade de calor transferida pode ser estimada igualando-se a energia perdida pelo fluido mais quente com a energia ganha pelo mais frio.

## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Segundo Incropera e DeWitt (1996), os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. No trocador de calor mais simples, os fluidos quente e frio se movem no mesmo sentido ou em sentidos opostos em uma construção com tubos concêntricos.

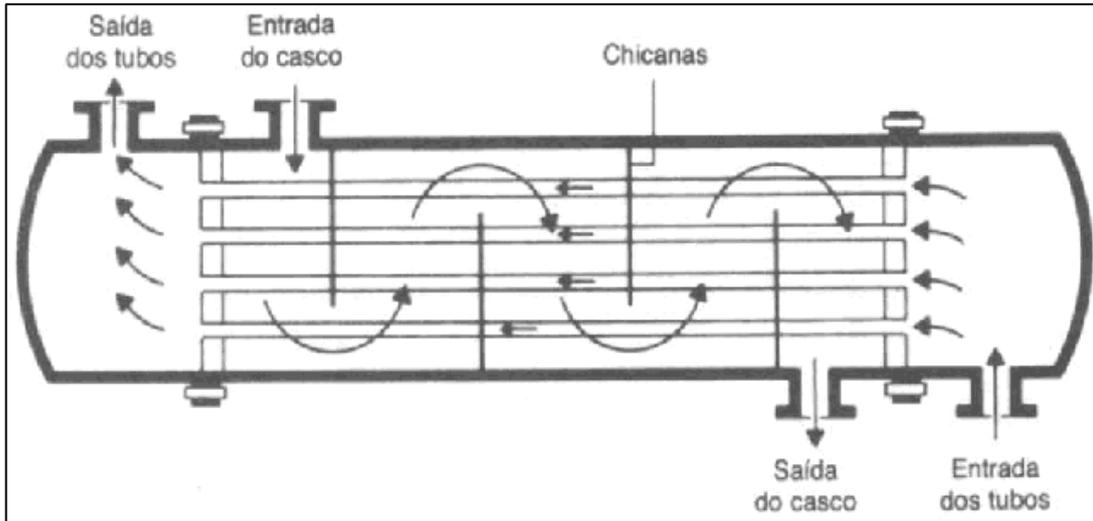
Para Braga Filho (2004), os trocadores de calor podem ser classificados de diversas maneiras: quanto ao modo de operação, ao número e natureza dos fluidos envolvidos, ao tipo de construção etc.

De maneira mais básica, a forma de classificar que realmente interessa para o desenvolvimento do trocador de calor auxiliar, é a classificação em função das suas características de construção.

### 2.3.1 Trocadores de calor tubulares

Os trocadores de casco e tubos são os mais comuns em aplicações industriais, constituídos de pequenos tubos dispostos “lado a lado” no interior de uma carcaça. Um fluido percorre o interior dos tubos enquanto o outro fluido é forçado a escoar através da carcaça, como observado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de um trocador de calor casco e tubo.

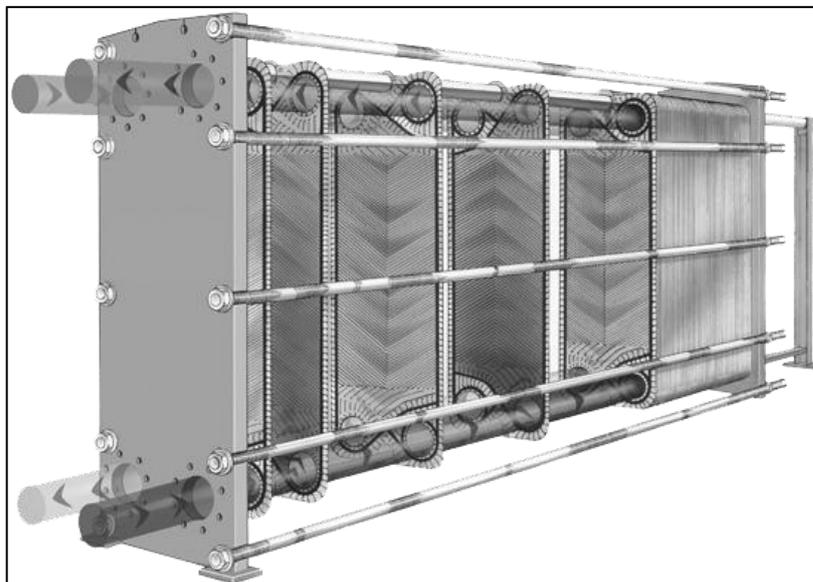


Fonte: Çengel e Ghajar, 2012, p. 631.

### 2.3.2 Trocador de calor tipo placa

Trocadores de calor do tipo placa são geralmente construídos de placas delgadas, lisas ou onduladas. Este trocador, pela geometria da placa, não suporta pressões e diferenças de temperatura tão elevadas quanto um tubo cilíndrico, são ordinariamente projetados para temperaturas ou pressões moderadas, conforme Figura 2.

Figura 2 – Trocador de calor tipo placa.

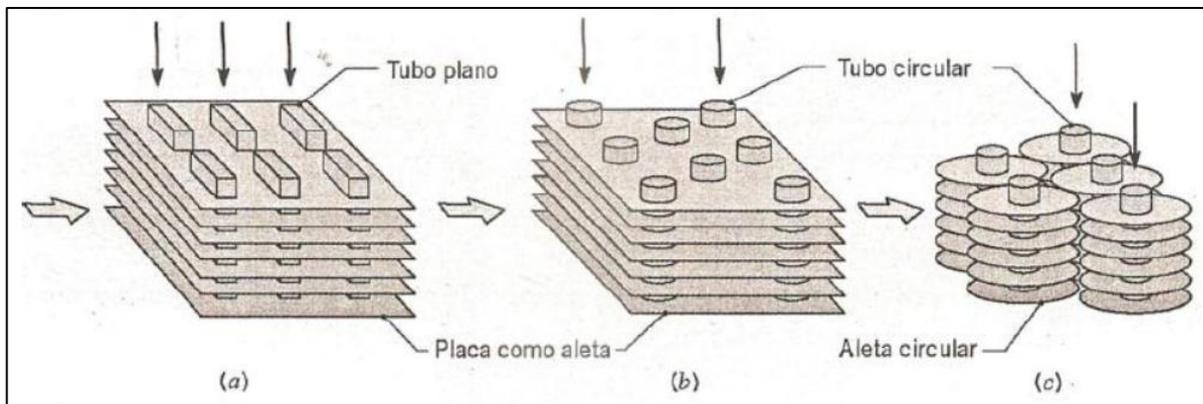


Fonte: adaptado de Çengel e Ghajar, 2012, p. 632.

### 2.3.3 Trocadores de calor de superfície estendida e aletada

Uma classe importante de trocadores de calor é utilizada para atingir altas áreas de transferência de calor por unidade de volume. Conhecidos por trocadores de calor compactos, esses equipamentos possuem densas matrizes de tubos ou placas aletadas. Os tubos podem ser planos ou circulares e as aletas podem ser planas ou circulares conforme mostra na Figura 3 (INCROPERA; DEWITT, 1996).

Figura 3 – Tipos de tubos aletados. (a) tubos planos, aletas planas contínuas. (b) Tubos circulares, aletas planas contínuas. (c) Tubos circulares, aletas circulares.



Fonte: Adaptado de Incropera e DeWitt, 1996, p. 319.

## 2.4 OTIMIZAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Embora os projetos padrões dos trocadores de calor possam satisfazer às necessidades da maior parte das unidades pequenas e simples, operando em temperaturas moderadas e pressões baixas é possível que sejam necessárias unidades individualmente projetadas.

Os trocadores de calor são projetados para uma vasta variedade de aplicações, por isso, os critérios de otimização dependem do tipo de aplicação. Por exemplo, os critérios de otimização podem requerer um mínimo de peso, um mínimo de volume ou superfície mínima de transferência de calor, custo inicial mínimo, ou custos inicial e operacional mínimos, maior taxa de transferência de calor, perda de carga mínima para uma certa taxa de transferência de calor, diferença média de temperatura mínima, e assim por diante.

Por isso, para efetivar um estudo de otimização, deve ser executado o projeto térmico do trocador de calor e os cálculos devem ser repetidos para cada variável do projeto até que o critério de otimização seja satisfeito.

Uma vez escolhida a geometria da superfície, o projetista tem a opção de impor restrições adicionais, como os valores da altura da aleta, espessura da aleta, passe da aleta, condutividade térmica da aleta, comprimento da aleta, etc. Então, o problema se reduz à resolução do problema do cálculo térmico dentro dos limites das variáveis especificadas.

## 2.5 TEMPERATURA DO MOTOR DIESEL

Para ARIAZ-PAZ (1970), a refrigeração esta calculada para dar um bom rendimento em tempo de calor o mais desfavorável, de forma que a temperatura da água não suba além do normal, nem seja muito baixa a ponto de o óleo não ter boa fluidez dificultando a lubrificação. Ao por o motor em movimento, convém que se aqueça rapidamente para dar fluidez ao óleo e facilitar a lubrificação. O motor trabalha nas melhores e devidas condições quando sua água mantém-se em torno de 85°C.

Para Soares, et al (1978), a necessidade de regulagem da refrigeração é mais importante em um motor Diesel pois é mais sensível do que em um motor a gasolina para as variações da temperatura. Para se obter as condições ideais de viscosidade do óleo lubrificante do motor Diesel, a temperatura não deve ultrapassar os 99°C, baseada em óleos que utilizem a classificação SAE. Já a temperatura ideal de funcionamento do motor Diesel é de 80 a 85°C. Fazendo-se uma analogia da máxima temperatura admitida pelo óleo (para que não perca as propriedades lubrificantes) e a máxima temperatura ideal de funcionamento do motor Diesel, encontra-se uma temperatura média de 92°C.

## 2.6 EQUACIONAMENTO DE TROCADOR DE CALOR

Para Incropera e DeWitt (1996), as equações geralmente usadas nos projetos de trocadores de calor estão baseadas em um conjunto de hipóteses clássicas, como coeficiente global de transferência de calor e propriedades termofísicas

constantes ao longo da área de transferência. Estas considerações permitem soluções analíticas, funções da configuração do escoamento, do balanço de energia e da equação de projeto ao longo da área de transferência de calor, representadas pelas relações conhecidas do Método DTML (Diferença de Temperatura Média Logarítmica). Entretanto, há processos térmicos que não são apropriadamente descritos por estas equações convencionais.

### 2.6.1 Coeficiente global de transferência de calor

Segundo Incropera e DeWitt (1996), para projetar ou prever o desempenho de um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor a grandezas tais como:

- Temperaturas de entrada dos fluidos
- Temperaturas de saída dos fluidos
- Coeficiente Global de transferência de calor
- Área superficial total disponível para a transferência de calor

Uma etapa essencial, e a mais imprecisa, de qualquer análise de trocadores de calor é a determinação do coeficiente global de transferência de calor. A equação fundamental para o dimensionamento de trocador de calor é dado pela Equação 1.

$$\dot{Q} = U A \Delta T_{ml} \quad (1)$$

Onde:

- $\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor (W);
- $A$  é a área de troca térmica (m<sup>2</sup>);
- $U$  ou  $h$  é o coeficiente global de transferência de calor (W/ m<sup>2</sup>°C);
- $\Delta T_{ml}$  é diferença média logarítmica de temperatura entre os fluidos (°C).

Assumindo-se que a transferência de calor dos fluidos entre o trocador de calor e a vizinhança sejam desprezíveis, assim como as mudanças nas energias potencial e cinética do sistema, e que não ocorram mudanças de fase dos fluidos e se forem admitidos calores específicos constantes é possível chegar à taxa de transferência de calor do fluido quente, conforme a Equações 2 (INCROPERA E DEWITT, 1996).

$$\dot{q}_q = \dot{m}_q C_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s}) \quad (\text{Fluido quente}) \quad (2)$$

Onde:

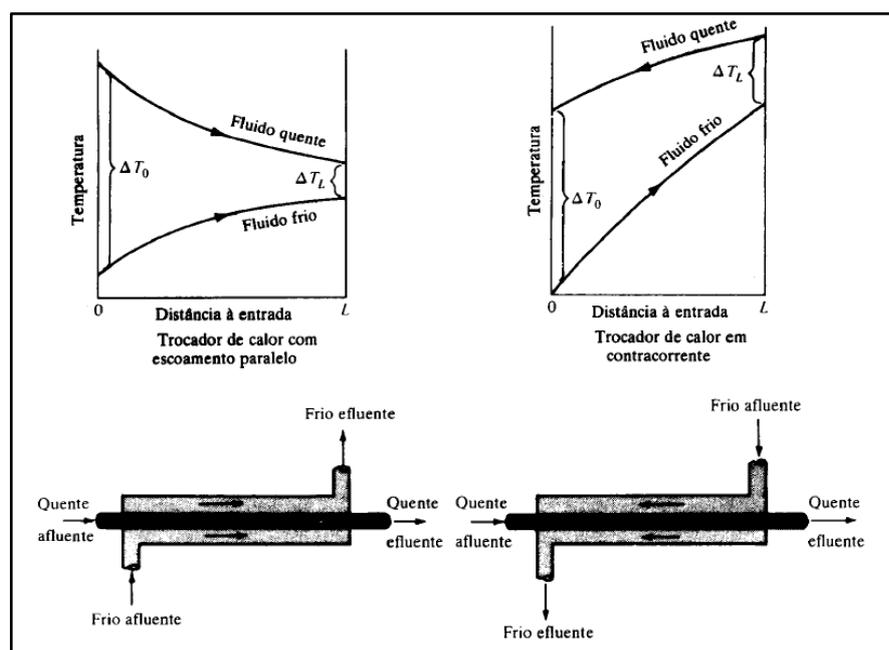
- $\dot{m}_q$  é a vazão mássica do fluido quente (kg/s);
- $c_{p,q}$  é o calor específico a pressão constante fluido quente (J/kg°C);
- $T_{q,e}$  é a temperatura de entrada do fluido quente (°C)
- $T_{q,s}$  é a temperaturas de saída do fluido quente (°C);

## 2.6.2 Método DTML para análise do trocador de calor

A solução de um problema em um trocador de calor é facilitada através da utilização de um método adequado ao problema, onde o mesmo pode ser classificado como problema de projeto e problema de desempenho.

Na Figura 4, uma diferença de temperatura cria a força motriz que determina a transmissão de calor de uma fonte a um receptor. Sua influência sobre um sistema de troca de calor é o objeto para o estudo deste trabalho. Os tubos concêntricos conduzem duas correntes, e, em cada uma destas duas, existe um coeficiente de película particular, e suas respectivas temperaturas, da entrada e saída, variam.

Figura 4 – Diferentes regimes de escoamento e perfis de temperatura associados em trocador de calor de tubo duplo.



A diferença de temperatura entre os fluidos quente e frio varia ao longo do trocador de calor e que é conveniente dispor da diferença da temperatura média  $\Delta T_{ml}$  para uso na Equação  $Q = U A \Delta T_{ml}$ .

O valor de  $\Delta T_{ml}$  é obtido pela Equação 3:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (3)$$

Onde:

$$\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,s}$$

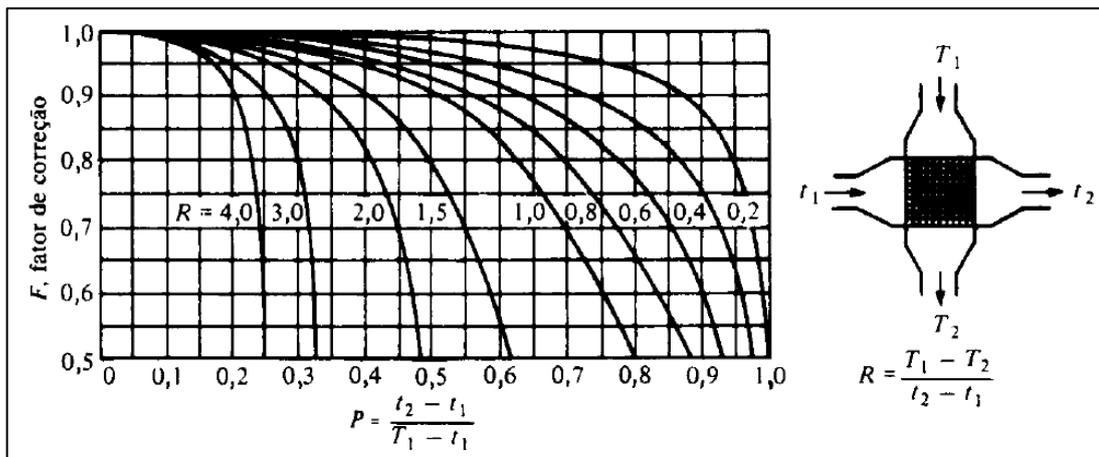
$$\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,e}$$

Este método é mais adequado para determinar o tamanho de um trocador de calor quando todas as temperaturas de entrada e saída são conhecidas, conforme a equação 4 (Çengel e Ghajar, 2012).

### 2.6.3 Fator F de correção DTML

Para Çengel e Ghajar (2012), trocadores de calor de multipasses e escoamento cruzado a DTML não se aplica à análise da transferência de calor nestas condições. As diferenças efetivas de temperatura foram determinadas nos escoamentos de correntes cruzadas e também multipasse, mas as expressões resultantes são muito complicadas. Por isso, nessas situações, é costume introduzir um fator de correção  $F$  de modo que a DTML simples  $\Delta T_{lm}$  possa ser ajustada para representar a diferença efetiva de temperatura  $\Delta T_{lmCorr}$  correta para a disposição de correntes cruzadas e multipasse. No gráfico da Figura 5 é mostra o fator de correção  $F$  em função dos parâmetros  $P$  e  $R$ .

Figura 5 – Fator de correção F para correntes cruzadas, um só passe, dois fluidos sem mistura.



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012, p. 645.

Após encontrar o valor dos parâmetros  $P$  e  $R$  encontra-se no gráfico o fator de correção  $F$ , logo aplica-se a Equação 4.

$$\Delta T_{\text{lm Corr}} = F * \Delta T_{\text{lm}} \quad (4)$$

#### 2.6.4 Escoamento turbulento em tubos

Para Çengel e Ghajar (2012), os escoamentos turbulentos são flutuações caóticas e rápidas nas regiões de redemoinhos do fluido ao longo do escoamento, também chamadas de turbilhões, e proporcionam um mecanismo adicional de transferência de calor. Esses turbilhões transportam massa e a quantidade de movimento e energia para outras regiões do escoamento muito rapidamente, aumentando muito a transferência de calor.

No escoamento no interior de um tubo circular, o número de Reynolds, é utilizado para definir se o escoamento é turbulento ou não. O número de Reynolds para essa situação é definido pela Equação 5.

$$Re = \frac{u_m * D}{\nu} \quad (5)$$

Onde:

- $u_m$  é a velocidade média do fluido
- $D$  é o diâmetro interno do tubo
- $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido

Para Incropera e DeWitt (1996), para um número de Reynolds alto, as forças de inércia são suficientemente elevadas para amplificar as perturbações, e ocorre a transição do regime laminar para o regime turbulento. Em um escoamento completamente desenvolvido, o número de Reynolds crítico, que corresponde ao surgimento de turbulência, é de  $Re > 2300$  e é adimensional.

### 2.6.5 Eficiência da aleta

Para Çengel e Ghajar (2012), em uma aleta de área transversal constante, fixada a uma superfície com perfeito contato o calor é transferido a partir da superfície para a aleta por condução e a partir da aleta para o meio circundante por convecção com um certo coeficiente de transferência de calor. A convecção a partir da superfície da aleta causa uma diminuição da temperatura ao longo da aleta, causando uma transferência de calor menor por causa da diferença de temperatura em direção a ponta da aleta. Para considerar o efeito da diminuição da diferença da temperatura na transferência de calor, é definida a eficiência da aleta na Equação 6.

$$\eta = \frac{Q_{aleta}}{Q_{ideal}} \quad (6)$$

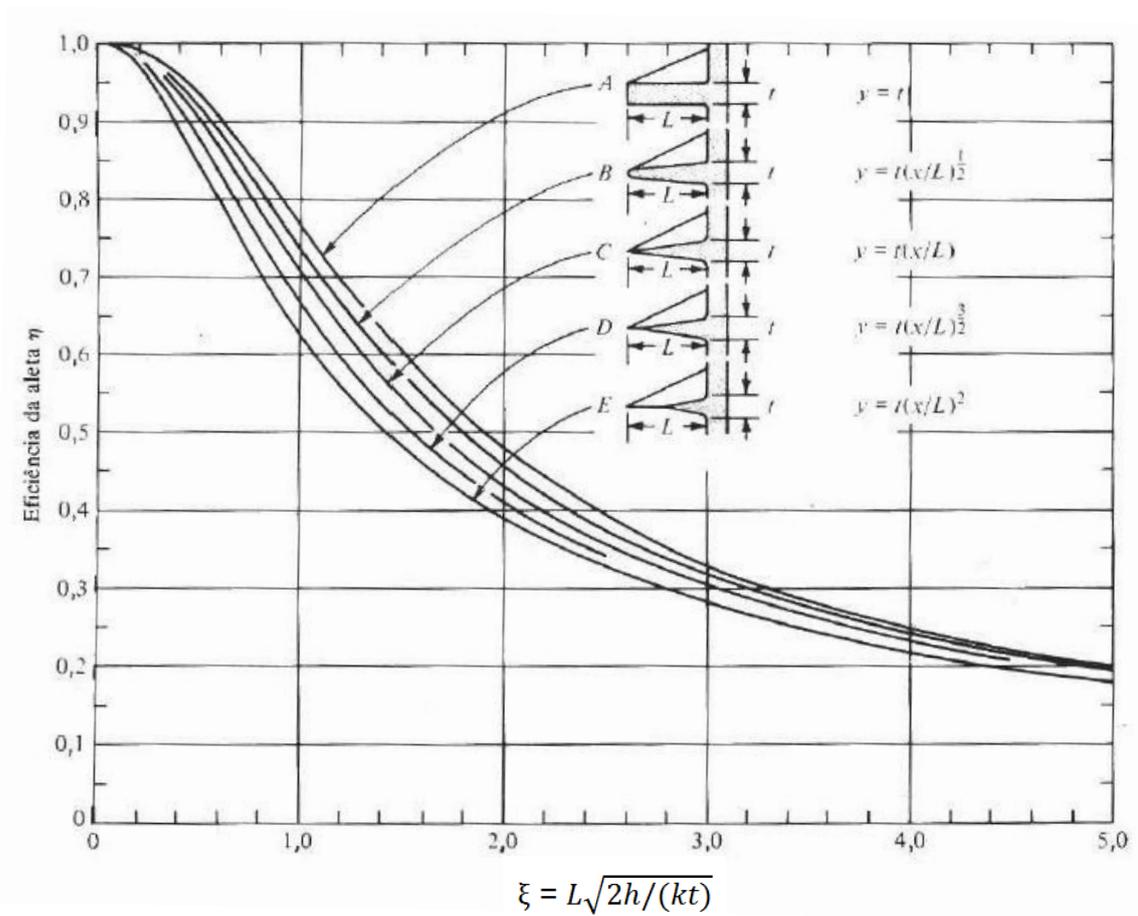
Onde:

- $Q_{aleta}$  = Transferência real de calor através da aleta;
- $Q_{ideal}$  = Transferência ideal de calor através da aleta;

O gráfico da Figura 6 mostra a eficiência da aleta em função do parâmetro  $\xi = L\sqrt{2h/(kt)}$  com geometrias típicas das aletas, onde:

- $L$  é o comprimento da aleta;
- $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção;
- $k$  é a condutividade térmica do material;
- $t$  é a espessura da aleta.

Figura 6 – Gráfico eficiência da aleta.



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012, p 172.

### **3. METODOLOGIA**

O objetivo deste capítulo é apresentar completamente e detalhadamente os métodos e as técnicas utilizadas para o projeto de trocador auxiliar, visando simplificar e esclarecer os procedimentos adotados, e também a descrição dos materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

#### **3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS**

Para a realização do dimensionamento do trocador de calor auxiliar, faz-se uma pesquisa bibliográfica para ter um melhor conhecimento sobre o assunto e assim, dimensionar o trocador de calor auxiliar com os equacionamentos necessários.

Logo, adquiriu-se um trocador de calor similar ao do projeto e procedeu-se a instalação do mesmo. Faz-se também necessário uma pesquisa experimental coletando-se dados de temperatura do veículo, com e sem o trocador de calor auxiliar instalado, gerando assim tabelas e gráficos para melhor visualização e compreensão dos resultados.

##### **3.1.1 Modelo matemático**

Para aquisição do modelo matemático foram adotadas algumas simplificações, apresentadas na sequência:

- As propriedades de transporte de calor dos fluidos, quente e frio, não variam com a temperatura;
- Não há mudança de fase nos fluidos considerados;
- As variações de energia cinética e de energia potencial são desprezíveis;
- Pressão e perda de cargas são desprezíveis.

Os processos de transferência de calor considerados na representação matemática do sistema estudado foram os seguintes:

- Transferência de calor por convecção entre o fluido quente e os tubos do lado interno,

- Transferência de calor por condução nas paredes dos tubos e aletas,
- Transferência de calor convecção entre o fluido frio e os tubos e aletas do lado externo.

O método DTML para análise do trocador de calor foi utilizado para o dimensionamento do trocador de calor, e é efetuado levando em consideração os dados coletados e devidamente registrados. Dados estes que foram coletados diretamente no veículo.

Dados para o cálculo:

- Vazão média de fluido quente do sistema ( $m^3/s$ );
- Temperatura de entrada do fluido quente  $T_{q,e}$  ( $^{\circ}C$ );
- Temperatura de saída desejada do fluido quente  $T_{q,s}$  ( $^{\circ}C$ );
- Temperatura de entrada do fluido frio  $T_{f,e}$  ( $^{\circ}C$ );
- Temperatura de saída fluido frio  $T_{f,s}$  ( $^{\circ}C$ );
- Fluido quente do sistema é a água;
- Fluido frio do sistema é o ar;

### 3.1.2 Coleta dos dados

Uma primeira coleta de dados fez-se necessária para o reconhecimento das altitudes do percurso em relação ao nível do mar e a cada 3 km percorridos, iniciando-se a primeira leitura da altitude na Avenida Tuparendi, nº 588, na cidade de Santa Rosa e finalizando-se na Avenida dos Ipês nº 565 na cidade de Horizontina, totalizando 16 leituras durante todo o percurso. Nos registros seguintes não se fez mais a leitura das altitudes já que o percurso é sempre o mesmo.

Após a verificação das altitudes do percurso iniciou-se a coleta dos dados referentes à temperatura do motor do veículo, para isso, realizou-se a coleta em duas etapas: A etapa 1 caracteriza-se por não ter instalado o trocador de calor auxiliar no veículo, e a temperatura é definida como T1, e a etapa 2 etapa caracteriza-se por ter instalado o trocador de calor auxiliar no veículo, e a temperatura neste caso é definida como T2.

Os dados coletados no percurso são os seguintes:

- Data;
- Hora;
- Trocador de calor auxiliar instalado no veículo (sim ou não);
- Temperatura ambiente (°C);
- Clima/Tempo (sol, nublado ou chuvoso);
- Altitude (m);
- Temperatura do veículo T1 e T2 (°C);
- Tempo total do percurso (min);
- Velocidade média (km/h);

O método utilizado para a coleta dos dados foi a verificação da temperatura do veículo ao longo de um percurso, esta temperatura foi registrada em um tabela a cada 3 km percorridos e foi realizada da seguinte maneira:

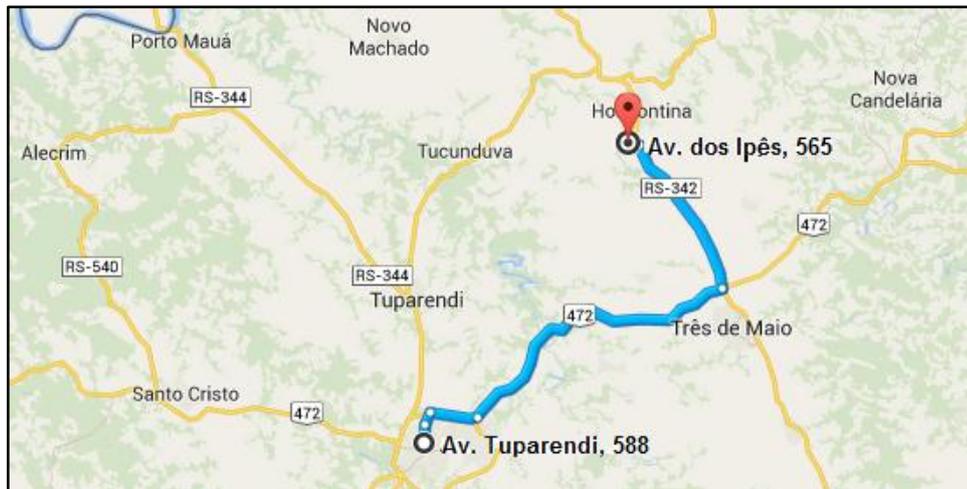
- Antes de iniciar o percurso tomou-se nota da data e da hora, temperatura do ambiente e o clima: se sol, nublado ou chuvoso;
- Durante o percurso tomou-se nota da temperatura da água a cada 3 km rodados;
- E após o término do percurso tomou-se nota do tempo que foi gasto para a realização do percurso e da velocidade média do percurso.

A vazão média da bomba foi adquirida através de sucessivas amostras coletadas no veículo.

### **3.1.3 O percurso**

O percurso adotado para a coleta dos dados situa-se entre as cidades de Santa Rosa e Horizontina (RS), com uma distância total de 45 km, com início na Avenida Tuparendi, nº 588, na cidade de Santa Rosa e segue na direção do parque de exposições, chegando na BR 472, na rotatória saindo pela direita, seguindo na direção do Hotel Villa Romana, passando pela ponte sobre o Rio Santa Rosa, até a RS 342 que dá acesso a cidade de Três de Maio, na rotatória tomando a direção da esquerda para a cidade de Horizontina, até a rua da Campina (acesso para o Campus da FAHOR), seguindo até o campus na Avenida dos Ipês nº 565, onde termina o percurso. Todo o percurso é visualizado no mapa da Figura 7.

Figura 7 – Mapa do percurso usado para a coleta dos dados.

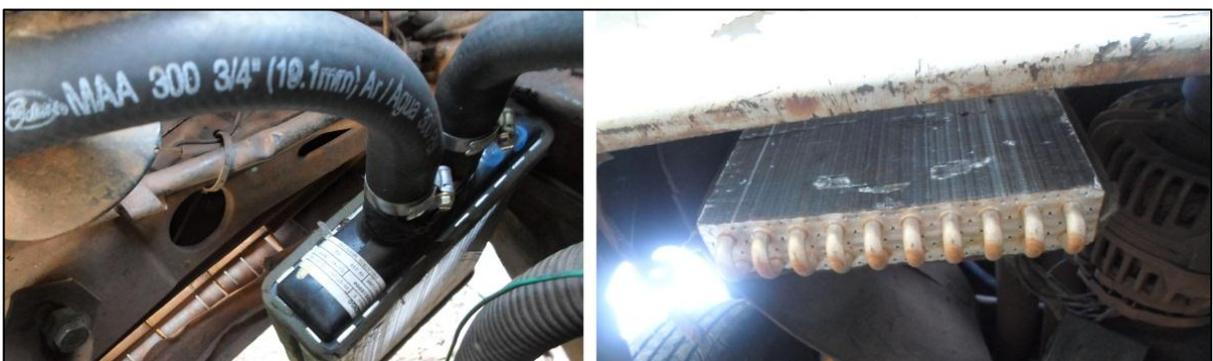


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4 Instalação do trocador de calor auxiliar

O trocador de calor auxiliar foi instalado na parte frontal esquerda do veículo, de maneira a receber o ar ambiente diretamente sobre ele, para que haja convecção naturalmente quando o veículo estiver parado e convecção forçada quando estiver em movimento. Na Figura 8 é visto o trocador de calor já instalado no veículo, na parte frontal esquerda, logo abaixo do elemento do filtro do ar.

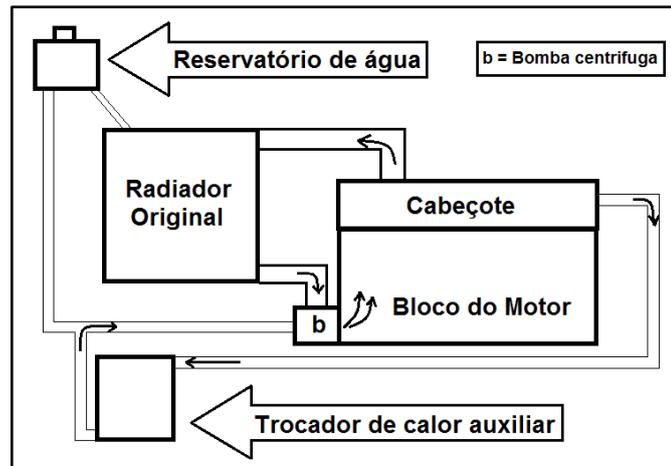
Figura 8 – Trocador de calor auxiliar instalado. Na esquerda: Vista superior; Na direita: vista inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A entrada do fluido quente no trocador de calor auxiliar é proveniente da parte de traz do cabeçote do motor, e a saída do fluido quente do trocador de calor foi conectada à mangueira do reservatório de água, conforme visto no esquema da Figura 9.

Figura 9 – Esquema de instalação do trocador de calor auxiliar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para que este trabalho fosse realizado, bem como as pesquisas experimentais foi necessário a intervenção de alguns materiais.

O veículo utilizado para os teses, trata-se de uma camionete cabine dupla da marca Volkswagen, modelo Saveiro CL de ano 1988, equipado com motor AP 1.6 litros ciclo Diesel, e tem as suas temperaturas altas e oscilantes quando submetida a maiores esforços por diversos fatores como um aclave, altas velocidades, temperaturas elevadas de ambiente, como no verão, ou com muita carga. E, tem suas temperaturas reduzidas quando submetido a fatores como um declive, baixas velocidades, com pouca carga, ou em temperaturas de ambiente baixas como no inverno ou dias chuvosos. Por tanto, o veículo possui as suas temperaturas altas e oscilantes o que compromete a vida útil do motor, não passando dos 50 mil km rodados sem que seja feita uma reforma no mesmo.

O veículo possui instalado um indicador de temperatura, visto na Figura 10, com graduação em graus Celsius e Fahrenheit instalado no console, usado para coletar os dados de temperatura do fluido quente (água que sai do motor).

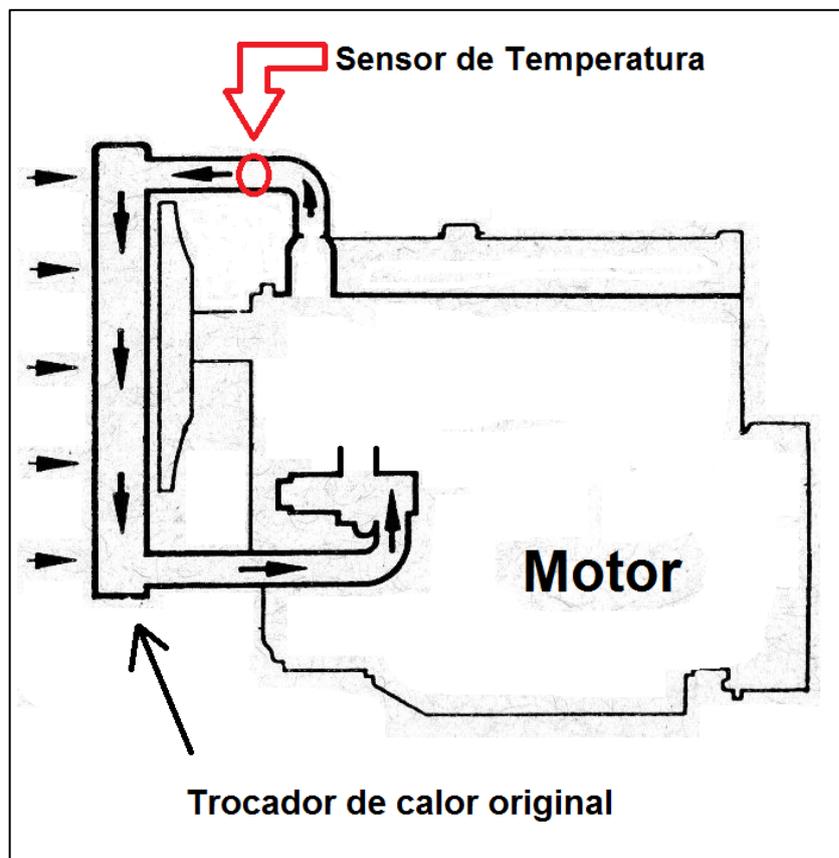
Figura 10 – Indicador de temperatura com escala em graus Celsius e Fahrenheit.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sensor de temperatura é instalado na mangueira superior do motor, saída do fluido quente, representado esquematicamente na Figura 11 e visto já instalado na Figura 12.

Figura 11 – Sistema de Refrigeração com a posição do sensor de temperatura instalado.



Fonte: Adaptado de Soares, et al, 1978, p. 258.

Figura 12 – Sensor de temperatura da água instalado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um GPS da Marca BAK, modelo BK-GPS5003, instalado no para-brisas do veículo através de seu suporte, usado para a verificação e registro das altitudes em relação ao nível do mar, durante todo o percurso e a cada 3 km, também usado para o registro do tempo gasto no percurso e a velocidade média do percurso.

O trocador de calor auxiliar não foi devidamente fabricado ou construído, devido aos altos custos para a produção de apenas um único produto. Para Çengel e Ghajar (2012), um trocador de calor de prateleira tem grande vantagem de custo em relação aos feitos sob encomenda, então se buscou um com a capacidade de transferência de calor e dimensões similares aos do projeto deste trabalho, o mesmo aplicado nos veículos da Volkswagen modelo Gol Geração 5, utilizado para o uso do ar quente do mesmo, visto na Figura 13.

Figura 13 – Trocador de calor auxiliar, semelhante ao do projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na instalação foram usados dois metros de mangueira  $\frac{3}{4}$ ' da marca Gates, modelo MAA 300, resistente a alta pressão e temperatura, e para a fixação da mesma foram usadas quatro abraçadeiras e uma conexão em forma de "T"  $\frac{3}{4}$  de metal, material visto na Figura 14.

Figura 14 – Material para instalação do trocador de calor auxiliar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 15 observa-se um termômetro digital que foi utilizado para a coleta de dados referentes à temperatura do fluido frio na saída do trocador de calor original do veículo.

Figura 15 – Termômetro digital.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fez-se uso do software Microsoft Word 2010 para a digitação, edição e formatação de todo este trabalho, bem como para a criação de tabelas para a coleta dos dados,

Também utilizou-se o software Excel 2010 para a criação de tabelas com os dados coletados no percurso, a partir das quais usou-se para a confecção dos gráficos existente neste trabalho, todos devidamente editados e formatados.

O software Solidworks 2012 foi utilizado no projeto para desenhar o trocador de calor auxiliar e suas partes principais, seguindo rigorosamente todos os valores e medidas resultantes dos cálculos deste trabalho, para assim melhor atender as necessidades do problema.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 EQUACIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR

A partir das equações de balanço global de energia adquiriu-se um modelo matemático do trocador de calor com aletas. Estabeleceu-se o projeto do trocador de calor auxiliar, capacidades e dimensões, com tubos aletados, determinando a taxa de transferência global de calor. Para tanto considerou-se:

- O tipo de trocador de calor,
- Material empregado na construção,
- Disposição das correntes,
- Vazões,
- Geometria das superfícies,
- Temperaturas de entrada e saída.

No Quadro 01 estão representados os valores de temperatura de entrada e saída do fluido quente, que neste caso é a água, temperatura de entrada e saída do fluido frio, que neste caso é o ar, e também a vazão média do fluido quente. Estes dados foram coletados no veículo,

Quadro 01 – Dados de entrada para os cálculos.

DADOS INICIAIS		
Descrição	Valor	Unidade
Temperatura de entrada da água ( $T_{q,e}$ )	104	°C
Temperatura requerida na saída da água ( $T_{q,s}$ )	92	°C
Temperatura de entrada do ar ( $T_{f,e}$ )	23	°C
Temperatura de saída do ar ( $T_{f,s}$ )	65	°C
Vazão média do fluido quente (Q)	0,3	l/s

Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

Na Tabela 1 são mostrados diversos coeficientes de transmissão de calor por convecção, em vários materiais e situações. O trocador de calor do projeto em questão está instalado em um veículo de passeio, que pode estar em diversas

situações: parado, em baixas velocidades, médias velocidades e ainda a ventoinha pode estar ligada forçando a passagem do ar pelo trocador de calor em qualquer situação. Por tanto, optou-se por um valor médio de coeficiente de transmissão de calor por convecção de  $150 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Tabela 1 – Coeficientes de transmissão de calor por convecção.

Material	$\text{W/m}^2 \text{ K}$	$\text{Kcal/h m}^2 \text{ °C}$
Ar, convecção natural	6-30	5-25
Vapor ou ar, superaquecido, convecção forçada	30-300	25-250
Óleo, convecção forçada	60-1800	50-1500
Água, convecção forçada	300-6000	250-10000
Água, em ebulição	3000-60000	2500-50000
Vapor, em condensação	6000-120000	5000-100000

Fonte: Adaptado de Kreith, 1977, p. 11.

No Quadro 2 estão relacionados algumas informações necessárias para o dimensionamento e que foram pesquisadas em tabelas.

Quadro 2 – Dados consultados em tabela.

DADOS COLETADOS EM TABELAS		
Descrição	Valor	Unidade
Calor específico da água a $100\text{°C}$ ( $C_p$ )	4,211	$\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$
Massa específica da água a $90\text{°C}$ ( $\rho$ )	965	$\text{kg/m}^3$
Viscosidade cinemática da água a $90\text{°C}$ ( $\nu$ )	$0,326 \times 10^{-6}$	$\text{m}^2/\text{s}$
Condutividade térmica do alumínio ( $K$ )	230	$\text{W/m}^{\circ}\text{c}$
Coeficiente de transferência de calor por convecção adotado ( $h$ )	150	$\text{W/m}^2\text{°c}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.1 Taxa necessária para a transferência de calor

Primeiramente calcula-se a taxa de transferência de calor necessária para resfriar o fluido quente que está a temperatura de  $104\text{°C}$  para uma temperatura de  $92\text{°C}$ , e o cálculo se dá por meio da Equação 2. Logo a vazão mássica do fluido é:

$$\dot{m}_q = Q * \rho = 0,0003 * 965 = \underline{0,2895 \text{ kg/s}}$$

Então tem-se:

$$\dot{q}_q = \dot{m}_q C_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s}) \quad \dot{q}_q = 0,289 * 4,211 * (104 - 92) \quad \dot{q}_q = \underline{14.600 \text{ W}}$$

No Quadro 3 demonstra-se a taxa de transferência de calor necessária para reduzir a temperatura do fluido quente e a vazão mássica do fluido quente.

Quadro 3 – Dados calculados.

DADOS CALCULADOS		
Descrição	Valor	Unidade
Vazão mássica do fluido quente a 90°C ( $\dot{m}_q$ )	0,289	kg/s
Taxa de transferência de calor necessária ( $\dot{q}_q$ )	14,6	kW

Fonte: Elaborado pelo autor.

A taxa de transferência de calor, necessária para reduzir a temperatura do fluido quente é de 14,6 kW. Faz-se, então, necessário a construção de um trocador de calor com esta capacidade de transferência de calor e com os critérios de otimização.

Também alguns critérios de otimização foram observados tais como: espaço disponível no veículo, custo mínimo para a realização do projeto, pouco peso dos materiais e condutividade térmica do material boa. Para isso optou-se pelo material alumínio, que é adequado aos critérios de otimização do projeto. Os detalhes são vistos no Quadro 4.

Quadro 4 – Critérios para otimização do projeto.

CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO	
Critério	Descrição
Espaço disponível no veículo (base, altura e profundidade)	200 x 300 x 100 (mm)
Peso	Abaixo de 2 Kg
Condutividade térmica	Acima de 200 W/m <sup>2</sup> °C

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 5, estão dispostos as características e dimensões dos materiais empregados no projeto do trocador de calor auxiliar como o diâmetro comercial do tubo, espessura do tubo, espessura da aleta e a condutividade térmica do alumínio.

A geometria do trocador de calor escolhida foi de feixe de tubos cilíndricos com aletas de chapas contínuas.

Quadro 5 – Características para o trocador de calor auxiliar.

CARACTERISITCAS E CRITÉRIOS PARA O DIMENCIONAMENTO		
Material: Alumínio		
Descrição	Valor	Unidade
Diâmetro comercial do tubo encontrado	8,0	mm
Diâmetro interno do tubo	6,0	mm
Espessura do tubo	1,0	mm
Espessura da aleta comercial encontrada (t)	0,2	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ter escolhido a geometria da superfície dos materiais a serem empregados no projeto de trocador de calor auxiliar e observando os critérios de otimização impôs-se as restrições adicionais vistas no Quadro 6.

Quadro 6 – Características impostas levando em conta os critérios de otimização.

CARACTERISITCAS IMPOSTAS PELO AUTOR		
Descrição	Valor	Unidade
Comprimento dos tubos	180	mm
Numero de tubos	20	Qnt
Passo dos tubos na longitudinal	18	mm
Passo dos tubos na transversal	21	mm
Espaçamento entre aletas	1,0	mm
Comprimento da aleta	192	mm
Largura da aleta	39	mm
Diâmetro dos furos da aleta	8,0	mm
Numero de aletas	150	Qnt

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.2 Número de Reynolds para o escoamento

Para o conhecimento do escoamento no interior dos tubos circulares do projeto do trocador de calor auxiliar foi determinado o número de Reynolds a partir da velocidade média do escoamento, do diâmetro interno do tubo e da viscosidade cinemática da água a 90°C, aplicando-se a Equação 5.

$$Re = \frac{u_m * D}{\nu} \qquad Re = \frac{0,19 * 0,006}{0,326 \times 10^{-6}} \qquad Re = 3500$$

O escoamento é turbulento para essas condições pois segundo Incropera e DeWitt (1996),  $Re > 2300$  corresponde ao surgimento de turbulência.

#### 4.1.3 Método DTML para transferência de calor

Sendo que:

$$\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,s} = 104^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C} = 39^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,e} = 92^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} = 69^\circ\text{C}$$

Aplicando-se a Equação 3 tem-se:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \qquad \Delta T_{lm} = \frac{39^\circ\text{C} - 69^\circ\text{C}}{\ln \frac{39^\circ\text{C}}{69^\circ\text{C}}} \qquad \Delta T_{lm} = 52,6^\circ\text{C}$$

#### 4.1.4 Fator de correção F

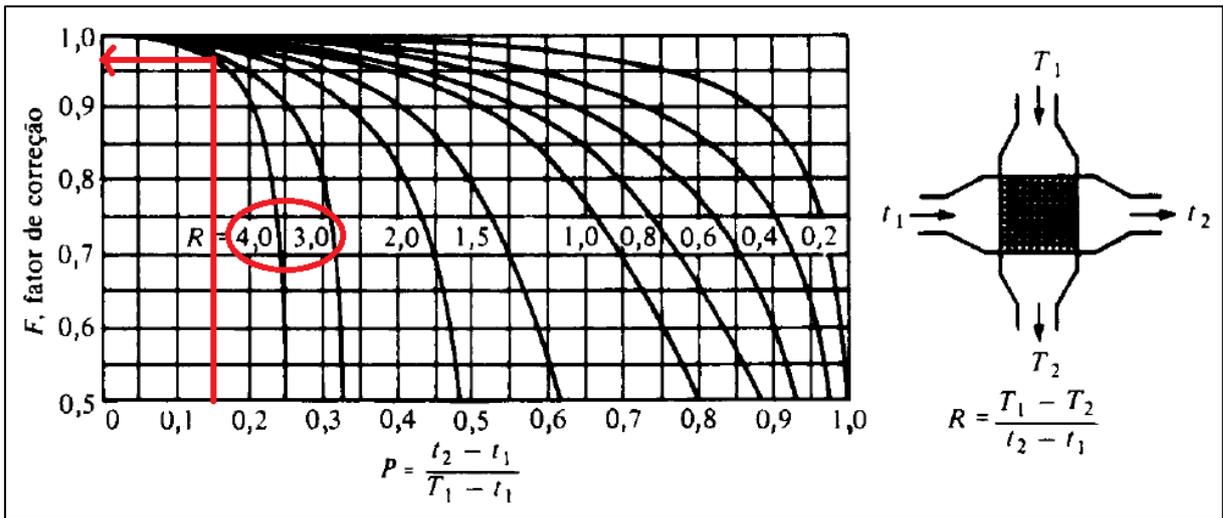
A  $\Delta T_{lm}$  deve ser calculada nas condições de contracorrente e o fator de correção F deve ser aplicado, para isso os parâmetros  $P$  e  $R$  devem ser calculados:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \qquad P = \frac{92 - 104}{23 - 104} \qquad P = 0,15$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \qquad R = \frac{23 - 65}{92 - 104} \qquad R = 3,5$$

Com os parâmetros já calculados encontra-se o fator de correção F no gráfico da Figura 16. O valor de F encontrado é 0,96.

Figura 16 – Gráfico de fator de correção F para trocador de calor com único passe, com escoamento cruzado e com dois fluidos sem mistura.



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012, p. 645.

Aplicando-se o fator de correção  $F$  ao  $\Delta T_{lm}$ , tem-se:

$$\Delta T_{lm} = \Delta T_{ml} * F$$

$$\Delta T_{lm} = 52,6 * 0,96$$

$$\Delta T_{lm} = 50,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### 4.1.5 Coeficiente global de transferência de calor

Calculado a partir da Equação 1 ( $\dot{Q} = U A \Delta T_{lm}$ ), onde  $A$  é a área de transferência de calor do trocador de calor auxiliar dimensionado e é dada por:

$$A = A_{tc} = A_f + A_l \text{ (m}^2\text{)}$$

Onde:

- $A_f$  é a área de transferência de calor total das aletas e,
- $A_l$  é a área de transferência de calor total da fração lisa dos tubos.

E são dadas por:

$$A_f = N_{al} * 2(A_{al} - A_{fr})$$

$$A_l = N_{tb} * [(A_{tb}) - (A_{pf}) * N_{al}]$$

Onde:

- $A_{al}$  é a área de uma aleta ( $b * h$ );
- $A_{tb}$  é a área externa do tubo ( $2 * \pi * R_{tubo} * l$ );

- $A_{pf}$  é a área do perímetro do furo ( $2 \cdot \pi \cdot R_{tubo} \cdot t$ );
- $A_{fr}$  é a soma das áreas dos furos das aletas ( $20 \cdot \pi \cdot R_{tubo}^2$ );
- $N_{al}$  é o numero total de aletas do trocador de calor (150);
- $N_{tb}$  é o numero total de tubos do trocador de calor (20);
- $l$  é o comprimento total dos tubos;
- $t$  é a espessura da aleta;

$$A_f = N_{al} \cdot 2(A_{al} - A_{fr})$$

$$A_f = 150 \cdot 2(0,00748 - 0,001)$$

$$\underline{A_f = 1,944 \text{ m}^2}$$

$$A_l = N_{tb} \cdot [(A_{tb}) - (A_{pf}) \cdot N_{al}]$$

$$A_l = 20 \cdot [(0,00452) - (0,00000502) \cdot 150]$$

$$\underline{A_l = 0,07534 \text{ m}^2}$$

$$A_{tc} = A_f + A_l$$

$$A_{tc} = 1,944 + 0,07534$$

$$\underline{A_{tc} = 2,019 \text{ m}^2}$$

$$\dot{Q} = U A \Delta T_{lm} \quad \dot{Q} = 150 \cdot 2,02 \cdot 50,5 \quad \underline{\dot{Q} = 15.301,5 \text{ w}}$$

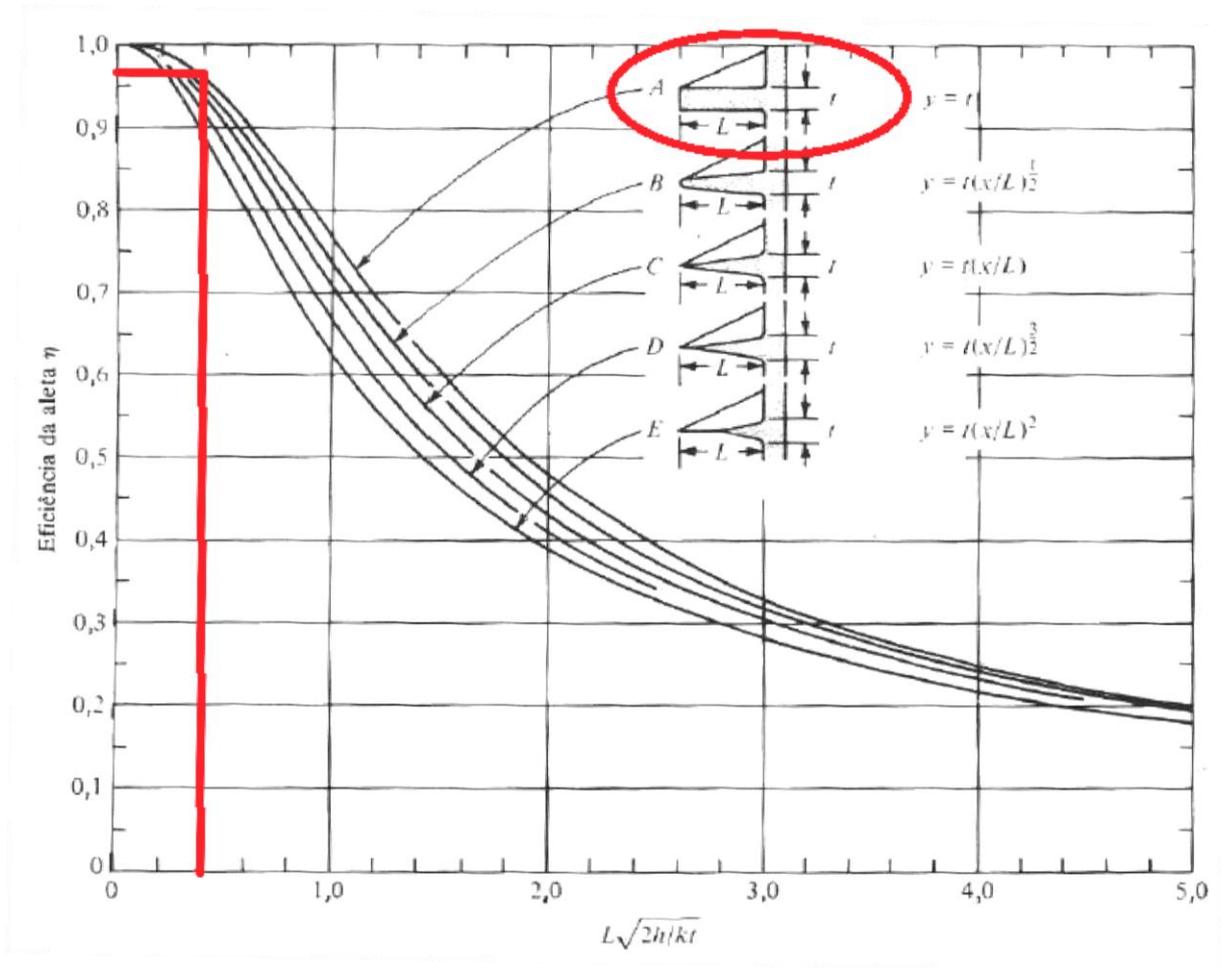
Isto significa que o coeficiente global de transferência de calor, para um trocador de calor ideal (sem perdas nas aletas), é de 15,3 kW, porém sabe-se que existem perdas nas aletas que devem ser levado em consideração.

#### 4.1.5 Eficiência da aleta

Para ter um valor mais próximo da realidade deve-se determinar a eficiência da aleta calculando o parâmetro  $\xi = L\sqrt{2h/(kt)}$  e aplicando o valor no gráfico da Figura 17.

$$\xi = L\sqrt{2h/(kt)} \quad \xi = 0,005 \sqrt{\frac{2 \cdot 150}{230 \cdot 0,0002}} \quad \xi = 0,4$$

Figura 17 – Eficiência das aletas.



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar, 2012, p 172.

O valor da eficiência da aleta encontrado no gráfico é de  $\eta = 0,96$ . Assim determina-se a transferência de calor real do trocador de calor auxiliar dimensionado. Aplicando-se a Equação 6 tem-se:

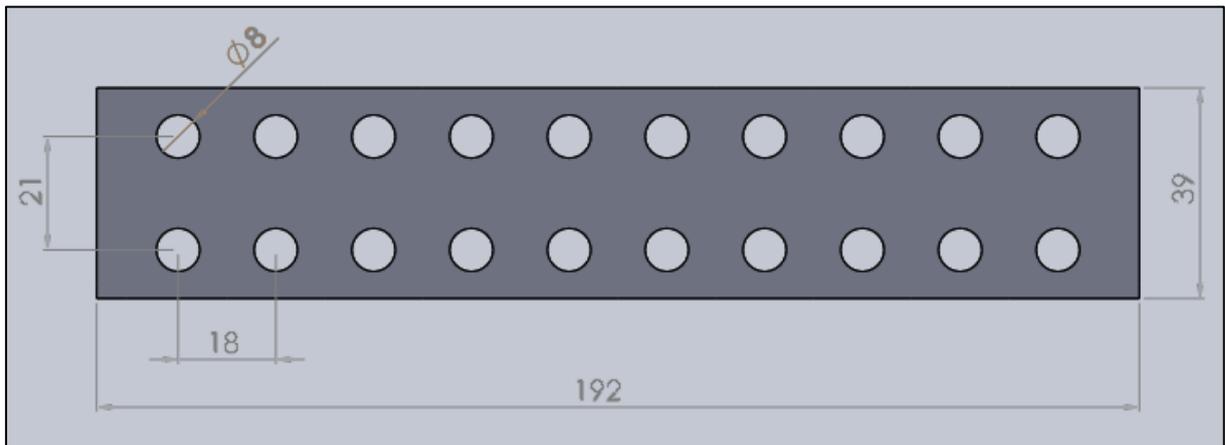
$$\eta = \frac{Q_{aleta}}{Q_{ideal}} \qquad 0,97 = \frac{Q_{aleta}}{15,3} \qquad Q_{aleta} = 14,84 \text{ kw}$$

Isto significa que o trocador de calor auxiliar calculado neste trabalho tem a taxa de transferência de calor real na ordem de 14,8 kW. Logo, entende-se que, para uma necessidade de 14,6 kW o projeto atende as necessidades do problema.

#### 4.1 Dimensões do trocador de calor auxiliar

Após a conclusão dos cálculos o dimensionamento do trocador de calor foi efetuado, observando todos os resultados obtidos, algumas simplificações foram feitas, sempre procurando aumentar a eficiência do trocador de calor. As dimensões das aletas, são vistas na Figura 18, bem como o passo dos tubos.

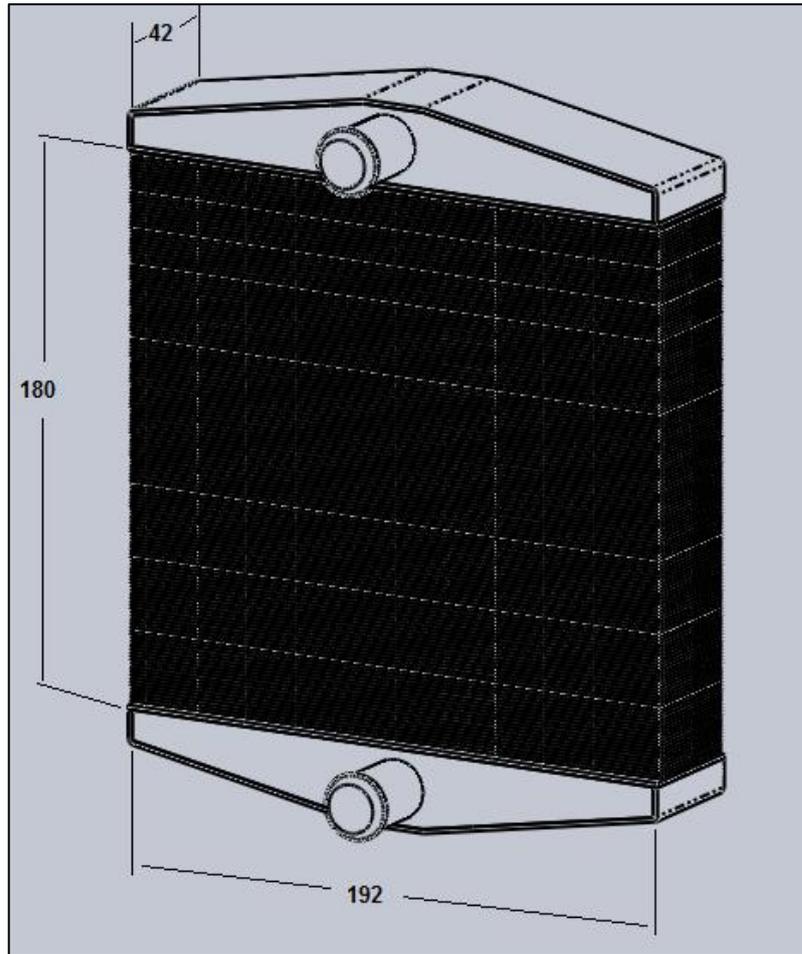
Figura 18 – Aletas (mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

As dimensões finais do trocador de calor auxiliar estão dispostas na Figura 19, que foram obtidas utilizando-se do software SolidWorks 2012.

Figura 19 – Trocador de calor auxiliar (mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3 VALORES DOS DADOS COLETADOS

Os dados coletados no percurso referentes às altitudes, estão todos relacionados no Quadro 7, a partir destes dados criou-se o gráfico visto na Figura 20, que representa graficamente as altitudes do percurso, assim, pode-se ter uma ideia dos aclives e declives existentes entre as cidades de Santa Rosa (RS) e Horizontina (RS) respectivamente.

Quadro 7 – Altitudes entre Santa Rosa e Horizontina (RS).

Quadro das Altitudes																
<b>N° Leitura</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Km</b>	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45
<b>Altitudes</b>	290	320	340	320	290	230	200	310	310	310	350	340	350	360	330	320

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na leitura de nº 7, do Quadro 7, no km 18 do percurso, registrou-se a menor altitude do percurso: 200 m, que se encontra exatamente sobre a ponte do rio Santa Rosa; Na leitura de nº 14, no km 39 do percurso, registrou-se a maior altitude: 360 m, que se encontra a 6 km da cidade de Horizontina.

Figura 20 – Gráfico da Altitude X Percurso.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após ter-se descoberto os aclives e declives do percurso, buscou-se as informações referentes às temperaturas do fluido quente T1 e T2, que sai do motor.

Na Tabela 2 estão dispostas as temperaturas do fluido quente T1 sem o trocador de calor auxiliar instalado no veículo.

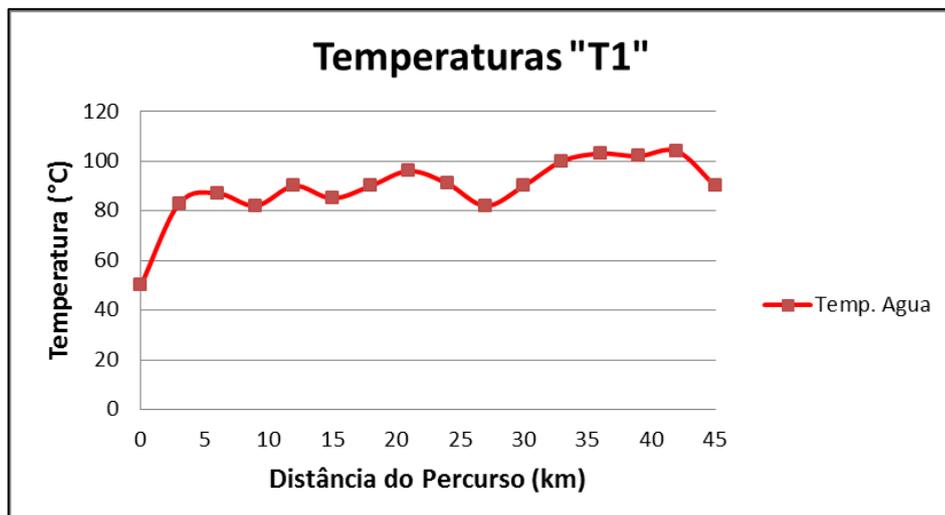
Tabela 2 – Dados coletados na etapa 1  
(sem o trocador de calor auxiliar).

<b>TABELA DE DADOS - Etapa1</b>				
<b>Data:</b>	17/09/2014	<b>T. Amb.:</b>	23°C	
<b>n° leitura</b>	<b>Km</b>	<b>Altitude</b>	<b>Temp. Agua</b>	<b>Outros</b>
1	0	290	50	<b>Hora I:</b>
2	3	320	83	15:02
3	6	340	87	<b>Tempo:</b>
4	9	320	82	40 min
5	12	290	90	<b>Vel. Média:</b>
6	15	230	85	67km/h
7	18	200	90	
8	21	310	96	<b>Hora f</b>
9	24	310	91	15:42
10	27	310	82	
11	30	350	90	<b>Clima:</b>
12	33	340	100	Nublado
13	36	350	103	
14	39	360	102	
15	42	330	104	
16	45	320	90	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das informações registradas da Tabela 2 criou-se o gráfico: Temperaturas T1 em função de Percurso, visto na Figura 21, para uma melhor compreensão e visualização dos dados fornecidos pela pesquisa da etapa 1.

Figura 21 – Gráfico da Temperatura T1 X Percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste gráfico é visível o real problema em questão, como: temperaturas altas que chegam até 104°C e temperaturas oscilantes que variam ao longo de todo o percurso, mostrando uma real instabilidade na temperatura do veículo.

Após a instalação do trocador de calor auxiliar no veículo, iniciou-se a coleta das informações da etapa 2 que são mostrados na Tabela 3.

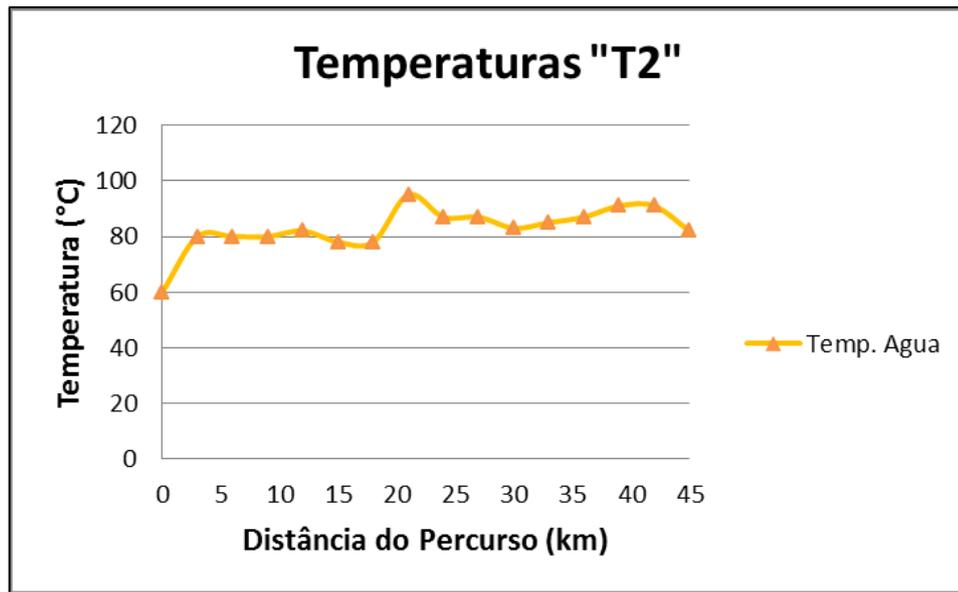
Tabela 3 - Dados coletados na etapa 2.  
(com trocador de calor auxiliar)

<b>TABELA DE DADOS - Etapa 2</b>				
<b>Data:</b>	07/10/2014	<b>T. Amb.:</b>	23 °C	
<b>n° leitura</b>	<b>Km</b>	<b>Altitude</b>	<b>Temp. Agua</b>	<b>Outros</b>
1	0	290	60	<b>Hora I:</b>
2	3	320	80	14:57
3	6	340	80	<b>Tempo:</b>
4	9	320	80	38 min
5	12	290	82	<b>Vel. Média:</b>
6	15	230	78	71 km/h
7	18	200	78	
8	21	310	95	<b>hora f:</b>
9	24	310	87	<b>15:35</b>
10	27	310	87	
11	30	350	83	<b>Clima:</b>
12	33	340	85	Sol
13	36	350	87	
14	39	360	91	
15	42	330	91	
16	45	320	82	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente foi criado o gráfico da Temperatura T2 em função do Percurso, visto na Figura 22.

Figura 22 - Gráfico da temperatura T2 X Percurso.

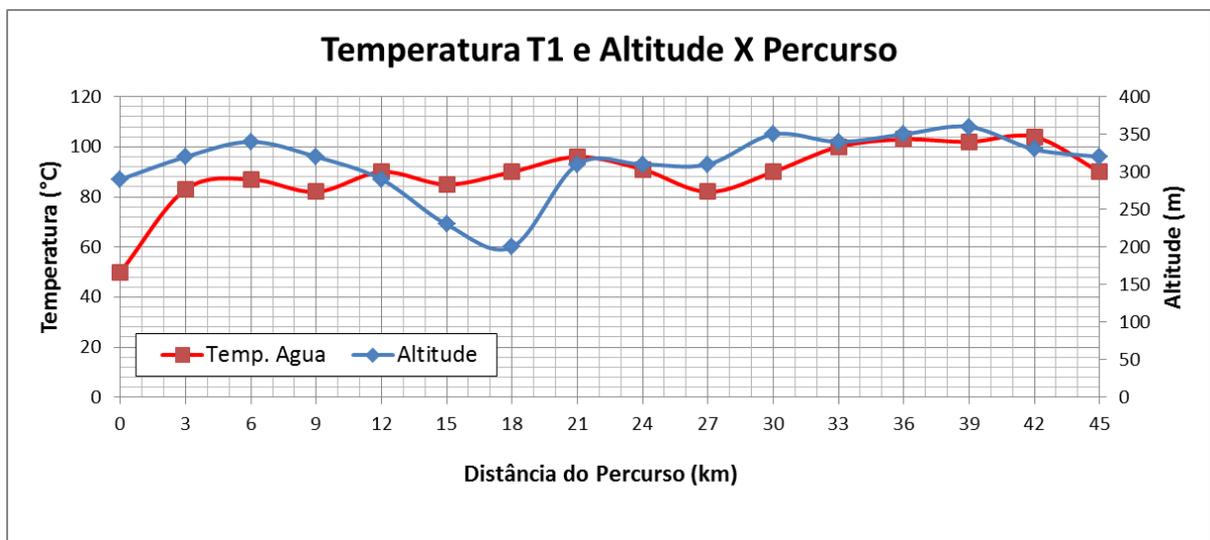


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.1 Análise dos dados coletados

Na Figura 23 encontra-se um gráfico cujo cruzamento de dados é referente da Tabela 1 (T1) e do Quadro 7 (Altitudes) pela distância do percurso, onde pode-se comprovar que: Quando há um aumento na altitude, ou seja, um acive, há também um aumento na temperatura do fluido quente que sai do motor e pode ser evidenciado nos quilômetros 0 à 6, 18 à 21 e 27 à 30;

Figura 23 – Gráfico da Temperatura T1 e Altitude X Percurso.



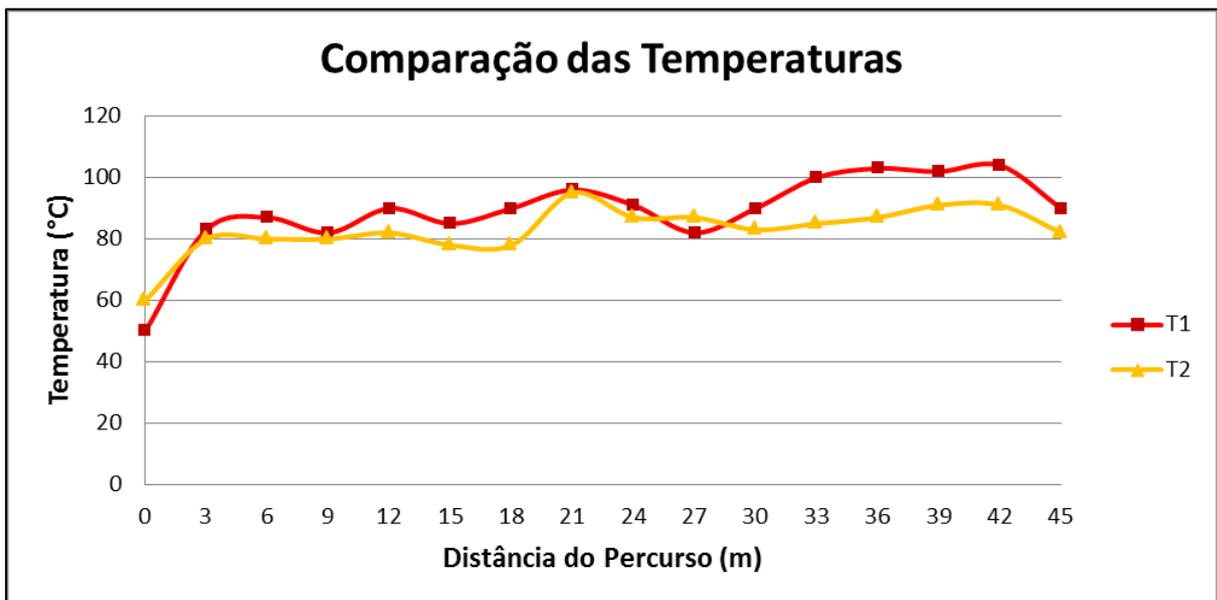
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando há uma diminuição da altitude, ou seja, um declive, há uma diminuição da temperatura do fluido quente que sai do motor, fato evidenciado no quilômetros 6 à 9, 12 à 15 e 42 à 45.

Quando há uma planície, a temperatura também diminui, fato evidenciado entre os quilômetros 21 à 27.

A comparação das informações das temperaturas T1 e T2 das etapas 1 e 2 são representadas no gráfico: Temperaturas T1 e T2 em função do Percurso, da Figura 24. Neste gráfico pode-se comparar as duas temperaturas e evidenciar a diferença entre elas, devido a presença do trocador de calor auxiliar instalado no veículo.

Figura 24 – Temperatura T1 e T2 X Percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na linha T1, onde não existe trocador de calor auxiliar instalado, evidencia-se curvas mais agressivas. Já na linha T2, onde o trocador de calor auxiliar encontra-se instalado, são encontradas curvas menos agressivas do que as curvas da linha T1.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o dimensionamento de um trocador de calor para auxiliar para o arrefecimento de um motor ciclo Diesel de uma camionete cabine dupla saveiro do fabricante Volkswagen, onde há um problema de aquecimento excessivo e oscilante da temperatura do motor, quando o mesmo é submetido a maiores esforços.

O memorial de cálculo para o dimensionamento correto do trocador de calor auxiliar foi executado com clareza e objetividade, revisou-se todos os cálculos para que a taxa de erros nos valores finais sejam as menores possíveis, e assim estão mais próximos da realidade.

O dimensionamento do trocador de calor auxiliar obteve-se com clareza e simplicidade, mas o mesmo não foi produzido, por motivos de custos, pois fabricar apenas um produto encarece-o significativamente, então foi encontrado um com características semelhantes que suprisse as necessidades do projeto, satisfazendo assim as necessidades do problema.

Os testes foram feitos, antes e após a instalação do trocador de calor auxiliar, coletando todos os dados com clareza e fidelidade, visando sempre a qualidade e a precisão das informações. Na comparação das informações percebeu-se a real diferença entre a etapa 1 e a etapa 2.

Conclui-se que o trocador de calor auxiliar calculado, dimensionado e testado obteve melhoras significativas nas temperaturas do veículo, mantendo-se mais próximas dos padrões estabelecidos para motores Diesel satisfazendo as necessidades do problema em questão e o que certamente aumentará a vida útil do motor.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Uma sugestão para trabalhos futuros é o dimensionamento de um único trocador de calor para o veículo, ou seja, somando-se as taxas de transferência de calor dos dois trocadores de calor, o original e o dimensionado neste trabalho e aplicando-se em um projeto de um único trocador de calor e melhorando ainda mais a eficiência da troca.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, CELSO DE. **Transmissão de Calor**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos S.A., 1978.

ARIAZ-PAZ, MANUEL. **Manual de automóveis**. 2º ed. Madrid: EDITORA MESTRE JOU, 1970.

BRAGA FILHO, WASHINGTON. **Transmissão de calor**. São Paulo: Editora THOMSON PIONEIRA, 2004.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. 4º ed. Porto Alegre. Editora Mc Graw Hill bookman AMGH Editora Ltda, 2012.

INCROPERA F. P.; DEWITT. D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicas e Científicos Editora S.A., 1996.

KREITH, FRANK. **Princípios da transmissão de calor**. 3º ed. São Paulo: EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA, 1977.

SOARES, J. DE B. et al. **Motores Diesel**. São Paulo: Editora hemus livraria editora limitada, 1978.

APÊNDICE A – FICHA DE REGISTRO DAS ALTITUDES

<b>Registro de dados</b>		
<b>ALTITUDES (m)</b>		
<b>Leitura</b>	<b>Km</b>	<b>Altitude</b>
1	0	290
2	3	320
3	6	340
4	9	320
5	12	290
6	15	230
7	18	200
8	21	310
9	24	310
10	27	310
11	30	350
12	33	340
13	36	350
14	39	360
15	42	330
16	45	320
<b>Data</b>	10/09/14	

APÊNDICE B - FICHA DE REGISTRO DE DADOS DA ETAPA 1

Registro de Dados					
Antes do percurso	Data: <u>17/09/14</u>		Hora: <u>15:00</u>		
	Trocador de Calor auxiliar:				
	<input checked="" type="checkbox"/> Não instalado (1ª Etapa)		<input type="checkbox"/> Instalado (2ª Etapa)		
Temp. Amb.: <u>23</u> °C		Clima: <u>Nublado</u>			
Durante o percurso	TABELA PARA COLETA DE DADOS				
	N°	Km	Km GPS	Altitude	Temp. Agua
	1	0	46	290	<u>50 °C</u>
	2	3	43	320	<u>83 °C</u>
	3	6	40	340	<u>87 °C</u>
	4	9	37	320	<u>82 °C</u>
	5	12	34	290	<u>90 °C</u>
	6	15	31	230	<u>85 °C</u>
	7	18	28	200	<u>90 °C</u>
	8	21	25	310	<u>96 °C</u>
	9	24	22	310	<u>91 °C</u>
	10	27	19	310	<u>82 °C</u>
	11	30	16	350	<u>90 °C</u>
	12	33	13	340	<u>100 °C</u>
	13	36	10	350	<u>103 °C</u>
	14	39	7	360	<u>102 °C</u>
	15	42	4	330	<u>104 °C</u>
16	45	1	320	<u>90 °C</u>	
Após o percurso	Tempo do percurso: <u>40:00</u> min				
	Velocidade média: <u>67</u> km/h				
	Responsavel: <u>Mio</u>				

APÊNDICE C - FICHA DE REGISTRO DE DADOS DA ETAPA 2

Registro de Dados					
Antes do percurso	Data: <u>07/10/14</u>		Hora: <u>14:57</u>		
	Trocador de Calor auxiliar:				
	<input type="checkbox"/> Não instalado (1° Etapa)		<input checked="" type="checkbox"/> Instalado (2° Etapa)		
Temp. Amb.: <u>23</u> °C		Clima: <u>SOL</u>			
Durante o percurso	TABELA PARA COLETA DE DADOS				
	N°	Km	Km GPS	Altitude	Temp. Agua
	1	0	46	290	<u>60°C</u>
	2	3	43	320	<u>80°C</u>
	3	6	40	340	<u>80°C</u>
	4	9	37	320	<u>80°C</u>
	5	12	34	290	<u>82°C</u>
	6	15	31	230	<u>78°C</u>
	7	18	28	200	<u>78°C</u>
	8	21	25	310	<u>95°C</u>
	9	24	22	310	<u>87°C</u>
	10	27	19	310	<u>87°C</u>
	11	30	16	350	<u>83°C</u>
	12	33	13	340	<u>85°C</u>
	13	36	10	350	<u>87°C</u>
	14	39	7	360	<u>91°C</u>
	15	42	4	330	<u>91°C</u>
16	45	1	320	<u>82°C</u>	
Após o percurso	Tempo do percurso: <u>38</u> min				
	Velocidade média: <u>71</u> km/h				
	Responsável: <u>[Assinatura]</u>				

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DA MANGUEIRA



### MANGUEIRAS E MANGOTES INDUSTRIAIS

## MAA 300 Ar/Água 300 psi - Aire/Agua 300 psi



**Aplicação:** Recomendada para uma vasta gama de aplicações com ar comprimido em equipamentos pneumáticos em geral e para água, podendo apresentar teor alcalino e glicóis. Utilizada geralmente em indústrias, postos de serviços e manutenção em geral, onde se requer boa resistência ao calor, abrasão e intempéries. Não indicada para uso com óleo ou derivados de petróleo.

**Construção:**  
**Tubo Interno:** Borracha Sintética EPDM até 1" e SBR acima de 1".

**Reforço:** Uma trança de fios sintéticos até 1" e lona têxtil multicord acima de 1".

**Cobertura:** Borracha Sintética EPDM até 1" e SBR acima de 1" na cor preta.

**Nota:** Disponível também nas cores vermelha, verde, azul e amarela sob consulta até 1".

**Terminais:** Retos, com Punhos e Flange Full Face.  
**Temperatura de operação:** -40 a +90° C.

**Aplicación:** Recomendada para una variada gama de aplicaciones con aire comprimido en equipamientos neumáticos en general y para agua, pudiendo presentar tenor alcalino e glicólicos.

Utilizada generalmente en industrias, puestos de servicios y manutención en general, donde se requiera una buena resistencia al calor, abrasión y intemperies. No indicada para uso con aceites o derivados de petróleo.

**Construcción:**  
**Tubo Interno:** Goma sintética EPDM hasta 1" y SBR superior a 1".

**Reforzo:** Una tranza de hilos sintéticos hasta 1" y lona textil multicord superior a 1".

**Cobertura:** Goma sintética EPDM até 1" y SBR superior a 1" en color negro.

**Nota:** Disponible también en los colores rojo, verde, azul y amarillo bajo consulta, hasta 1".

**Terminales:** Rectos, con Puños y Flange Full Face.  
**Temperatura de operación:** -40 a +90° C.

Descrições	Pol	mm	mm	Nº de Reforços	Psi	Kg/cm <sup>2</sup>	Psi	Kg/cm <sup>2</sup>	Comprimento Máximo m	kg/m
MAA300 1/4	1/4"	6,4	12,7	1	300	20	1200	80	-	0,133
MAA300 5/16	5/16"	7,9	14,5	1	300	20	1200	80	-	0,162
MAA300 3/8	3/8"	9,5	17,0	1	300	20	1200	80	-	0,194
MAA300 1/2	1/2"	12,7	20,6	1	300	20	1200	80	-	0,253
MAA300 5/8	5/8"	15,9	24,1	1	300	20	1200	80	-	0,319
MAA300 3/4	3/4"	19,1	28,2	1	300	20	1200	80	-	0,420
MAA300 1	1"	25,4	35,6	1	300	20	1200	80	-	0,596
MAA300 1.1/4	1.1/4"	32,0	43,5	2	300	20	1200	80	20	1,080
MAA300 1.1/2	1.1/2"	38,0	51,5	3	300	20	1200	80	20	1,251
MAA300 2	2"	50,0	64,5	4	300	20	1200	80	20	1,683
MAA300 2.1/2	2.1/2"	63,0	78,0	4	300	20	1200	80	20	2,322
MAA300 3	3"	75,0	90,5	4	300	20	1200	80	20	2,727
MAA300 4	4"	100,0	118,0	4	300	20	1200	80	20	3,870
MAA300 5	5"	125,0	145,0	6	300	20	1200	80	10	5,670
MAA300 6	6"	150,0	171,0	6	300	20	1200	80	10	7,200

## MAA 150 Ar/Água 150 psi - Aire/Agua 150 psi



**Aplicação:** Recomendada para aplicações de condução e descarga de água e ar comprimido. Utilizada geralmente na indústria, construção civil e agricultura. Apresenta excelente resistência à abrasão e intempéries. Não indicada para uso com óleo ou derivados de petróleo.

**Construção:**  
**Tubo Interno:** Borracha Sintética SBR.

**Reforço:** Lona têxtil multicord.

**Cobertura:** Borracha Sintética SBR na cor preta, com faixa de gravação amarela.

**Terminais:** Retos, com Punhos e Flange Full Face.

**Temperatura de operação:** -40 a +90° C.

**Aplicación:** Recomendada para aplicaciones de conducción y descarga de agua y aire comprimido.

Utilizada generalmente en la industria, construcción civil y agricultura. Presenta excelente resistencia a abrasivos e intemperies. No indicada para uso con aceite o derivados de petróleo.

**Construcción:**  
**Tubo Interno:** Goma sintética SBR.

**Reforzo:** Lona textil multicord.

**Cobertura:** Goma sintética SBR en color negro, con faixa de grabación amarilla.

**Terminales:** Rectos, con Puños y Flange Full Face.

**Temperatura de operación:** -40 a +90° C.

Descrições	Pol	mm	mm	Nº de Reforços	Psi	Kg/cm <sup>2</sup>	Psi	Kg/cm <sup>2</sup>	Comprimento Máximo m	kg/m
MAA150 1.1/4	1.1/4"	31,8	43	2	150	10	600	40	20	0,850
MAA150 1.1/2	1.1/2"	38,1	49	2	150	10	600	40	20	1,000
MAA150 2	2"	50,8	62	2	150	10	600	40	20	1,150
MAA150 2.1/2	2.1/2"	63,5	75	2	150	10	600	40	20	1,600
MAA150 3	3"	76,2	89	2	150	10	600	40	20	2,100
MAA150 4	4"	101,6	114	2	150	10	600	40	20	2,800
MAA150 5	5"	127	151	4	150	10	600	40	20	4,350
MAA150 6	6"	152,4	178,1	4	150	10	600	40	10	5,600

