



**Tobias Andre Mombach**

**DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR  
PARA VAPORIZAÇÃO DE ETANOL OPERANDO COMO COMBUSTIVEL  
EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA**

Horizontina

**2014**

**Tobias Andre Mombach**

**DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR  
PARA VAPORIZAÇÃO DE ETANOL OPERANDO COMO COMBUSTIVEL  
EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA**

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: Fabiano Cassol, Doutor.

**Horizontina**

**2014**

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

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

**“DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR PARA VAPORIZAÇÃO  
DE ETANOL OPERANDO COMO COMBUSTIVEL EM UM MOTOR DE  
COMBUSTÃO INTERNA”**

**Elaborada por:**

**Tobias Andre Mombach**

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

**Aprovado em: 25/Novembro/2014  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Doutor. Fabiano Cassol  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Doutor. Ademar Michels  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

**Mestre. Betine Rost  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina  
2014**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus familiares, em especial aos meus pais, grandes mestres na escola da vida, à minha esposa, ao corpo docente da FAHOR, especialmente ao professor Fabiano Cassol pelo apoio, auxílio e inspiração para a realização desta etapa. A eles, meu carinho e gratidão.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente a Deus pela dádiva de vida. À minha família pelo incentivo e por acreditar em meus sonhos. À minha esposa Catiusa, por compreender os momentos de ausência para que eu pudesse dedicar-me aos estudos. Aos colegas e amigos do Curso de Engenharia Mecânica, que estiveram comigo nessa caminhada. Ao professor Fabiano Cassol pelo apoio na orientação deste trabalho.

*“Como é feliz o homem que acha a sabedoria, o homem que obtém entendimento, pois a sabedoria é mais proveitosa do que a prata e rende mais do que o ouro”.*

Bíblia Sagrada: Provérbios, Cap. 3 -  
versículos 13 e 14

## RESUMO

A utilização em larga escala dos motores de combustão interna em veículos tanto na linha leve quanto na linha pesada, iniciada nos primórdios do século passado, gerou grandes mudanças no modo de vida da população, trazendo comodidade e facilidade de locomoção. Os motores empregados no transporte de cargas e pessoas trouxeram consigo algumas preocupações, como o uso incessante de combustíveis proveniente do petróleo e produção excessiva de dióxido de carbono proveniente de seu funcionamento. Diante deste cenário, combustíveis renováveis e a otimização no uso dos combustíveis estão sendo cada vez mais estudados e pesquisados para que se possa diminuir a emissão de gases, além de aumentar o rendimento desses motores. O objetivo do presente estudo é analisar o dimensionamento de um trocador de calor para vaporização de etanol operando como combustível em um motor de combustão interna. A utilização de etanol vaporizado aumenta a eficiência do motor devido ao fato de gerar uma mistura ar/combustível mais homogênea e em consequência resultar em uma combustão mais completa. O trocador de calor projetado apresenta como fluido quente a água do sistema de arrefecimento, na temperatura de 95° C. O etanol é transformado em vapor na temperatura de 78° C, o trocador de calor projetado é do tipo casco-tubo o qual apresenta dimensões que foram definidas através do tipo e modelo do veículo. Como resultados finais têm um trocador de calor com 82 tubos, de 0,03m de diâmetro e 0,18m de comprimento.

**Palavras-chave:** Combustíveis, Motores, Trocador de Calor

## **ABSTRACT**

The large-scale use of internal combustion engines in vehicles in both light and heavy line, started at the beginning of last century, has generated major changes in the population way of life, bringing comfort and ease of movement. The engines used in the transportation of cargo and people brought with them some concerns, as the incessant use of fuels from oil and excessive production of its operation from carbon dioxide. In this scenario, renewable fuels and optimizing the use of fuels are being increasingly studied and researched so that we can reduce greenhouse gas emissions, and increase the efficiency of these engines. The aim of this study is to analyze the design of a heat exchanger for ethanol vaporization operating as fuel in an internal combustion engine. The use of vaporized ethanol increases engine efficiency due to the fact generate an air / fuel more homogeneous and therefore result in a more complete combustion. The heat exchanger designed as a hot fluid has water cooling system, the temperature of 95° C. The ethanol is evaporated at a temperature of 78° C, the heat exchanger is designed shell-and-tube of the type which has dimensions were defined by the type and model of the vehicle. As a final result we have a heat exchanger with 82 tubes of 0.03 m in diameter and 0,18m long.

**Keywords** : Fuels , Engines, Heat Exchange

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Temperatura média dos componentes principais .....	10
Figura 2 - Principais componentes de um sistema de arrefecimento veicular .....	11
Figura 3 – Trocadores casco e tubo com um passe no casco.....	19
Figura 4 – Trocador de calor de placas.....	20
Figura 5 – Trocador de calor de aletas .....	20
Figura 6 – Trocador de calor escoamento paralelo (A) e contracorrente (B) .....	21
Figura 7 – Padrões de escoamento de bancos de tubos escalonados e em linha .....	23
Figura 8 – Diferentes regimes de escoamento e perfis de temperatura associados em trocador de calor de tubo duplo.....	25
Figura 9 – Gráfico representando rotação e temperatura ao longo do tempo.....	27
Figura 10 – Localização do trocador de calor no compartimento do motor. ....	28
Figura 11 – Termômetro digital .....	30
Figura 12 – Scanner automotivo, Rasther III Tm 540.....	31
Figura 13 - Trocador de calor casco e tubo.....	39

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 JUSTIFICATIVA.....	8
1.2 OBJETIVO GERAL.....	8
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1 DEFINIÇÕES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	9
2.2 SISTEMAS DE ARREFECIMENTO.....	9
2.2.1 Bomba d água.....	11
2.2.2 Válvula termostática.....	11
2.2.3 Vaso de expansão.....	11
2.2.4 Radiadores.....	12
2.2.5 Ventiladores.....	12
2.2.6 Mangueiras.....	13
2.2.7 Aditivos.....	13
2.3 ETANOL COMBUSTÍVEL VAPORIZADO.....	13
2.4 FONTES DE CALOR NO AUTOMÓVEL.....	14
2.5 TRANSFERÊNCIAS DE CALOR.....	15
2.6 TROCADORES DE CALOR.....	15
2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR.....	17
2.7.1 Classificação de acordo com os processos de transferência de calor.....	17
2.7.2 Classificação de acordo com o grau de compactação.....	18
2.7.3 Classificação de acordo com o tipo de construção.....	18
2.7.4 Classificação de acordo com a disposição das correntes do fluido.....	21
2.8 FLUXO CRUZADO EM TROCADORES DE CALOR.....	22
2.9 EQUACIONAMENTO DE TROCADORES DE CALOR.....	23
2.9.1 Coeficiente global de transferência de calor.....	23
2.9.2 Método de DTML para análise dos trocadores de calor.....	25
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	27
3.1.1 Coleta de dados.....	27
3.1.2 Definição do desempenho pretendido para o trocador.....	28
3.1.3 Dimensionamento do trocador.....	29
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	30
3.2.1 Termômetro digital infravermelho.....	30
3.2.2 Raster III.....	30
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	32
4.1 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	33
4.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE TRANSFERÊNCIA ATRAVÉS DA DTML.....	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40

## 1. INTRODUÇÃO

O mundo do século XXI segue a passos largos a sua trajetória, procurando alcançar as mais altas tecnologias, buscando facilitar as condições de vida do ser humano. Dentro desta trajetória de processos, o automóvel vem tendo uma evolução tecnológica amplamente necessária, envolvendo conforto, segurança e sobre tudo a eficiência energética, onde a economia de combustível é uma necessidade.

O elevado crescimento do número de automóveis aumentou exponencialmente a demanda mundial de petróleo, o que se tornou extremamente preocupante, pois sendo uma fonte finita de energia, impõe a necessidade de encontrarmos novas fontes de energia. Muitos estudos estão sendo realizados procurando utilizar outros combustíveis para o motor de combustão interna e conseqüentemente mover veículos. Carros bi-combustível e até mesmo a utilização de GNV já estão sendo utilizados no mercado mundial.

Os motores de combustão interna tem forte participação na poluição ambiental mundial contribuindo hoje com cerca de 70% do monóxido de carbono (CO), 36% dos hidrocarbonetos (HCs) e 46% dos óxidos de nitrogênio (NOx) (Cooper, 1994). O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um dos poluentes emitidos pelos motores, causador do efeito estufa, liberado de forma uniforme por todo o planeta com uma concentração que aumento de 290 para 355 ppm nos últimos 150 anos, ou de 315 para 355 ppm nos últimos 45 anos (Seinfeld e Pandis, 1998).

Em referência ao consumo energético e emissão de poluentes, este trabalho tem o propósito de dimensionar um trocador de calor para a pré-vaporização de etanol etílico e conseqüentemente utilizá-lo na combustão de um motor quatro tempos seja ele carburado ou injetado. O processo de troca de calor entre dois fluidos que apresentam temperaturas diferentes e se encontram afastados por uma parede sólida está presente em muitas situações dentro da engenharia.

O etanol vaporizado tem um maior aproveitamento energético em relação ao etanol líquido, utilizado na câmara de combustão, com ganhos expressivos em eficiência termodinâmica e na possibilidade de uso de grande excesso de ar, o que traz um ganho real e principalmente a baixa liberação de gases nocivos ao meio ambiente.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A conveniência de se pré-vaporizar o etanol é que a mistura com o comburente, também gasoso, pode ser feita com qualidade praticamente perfeita. Outra possibilidade além destas já mencionadas consiste em reaproveitar a energia associada aos gases de escape e ao sistema de arrefecimento, por exemplo, na vaporização do etanol e na compressão do ar comburente.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é desenvolver um trocador de calor capaz de vaporizar etanol etílico e que possa ser instalado em um veículo de passeio.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Definir conceitualmente os trocadores de calor;
- Demonstrar equações relacionadas ao dimensionamento de trocadores de calor.
- Projetar e identificar dentro do sistema de arrefecimento o trocador de calor que atenda as necessidades do problema.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 DEFINIÇÕES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O Motor de combustão Interna é um equipamento no qual a energia química dos combustíveis se transforma em trabalho mecânico através dos princípios da termodinâmica e com os conceitos de compressão e expansão de fluidos para gerar força e movimento rotativo.

Segundo Maximino et al (2011), é na câmara de combustão, que fica na parte interna do motor, que ocorre a transformação de energia resultante da queima de uma mistura de ar - combustível o qual pode ser definido como motor de combustão interna. Estes motores podem ser a gás, a gasolina, a álcool, a diesel, etc.

Na construção de um automóvel, existem vários componentes que formam os sistemas mecânicos e elétricos. Dentro desses sistemas podemos destacar o sistema de arrefecimento, o qual será a fonte fornecedora de calor para se conseguir a evaporação do etanol.

### 2.2 SISTEMAS DE ARREFECIMENTO

O sistema de arrefecimento tem um papel fundamental no controle da temperatura mínima e máxima de trabalho do motor, para que este tenha um melhor rendimento, um menor consumo de combustível e conseqüentemente uma redução de emissões de poluentes.

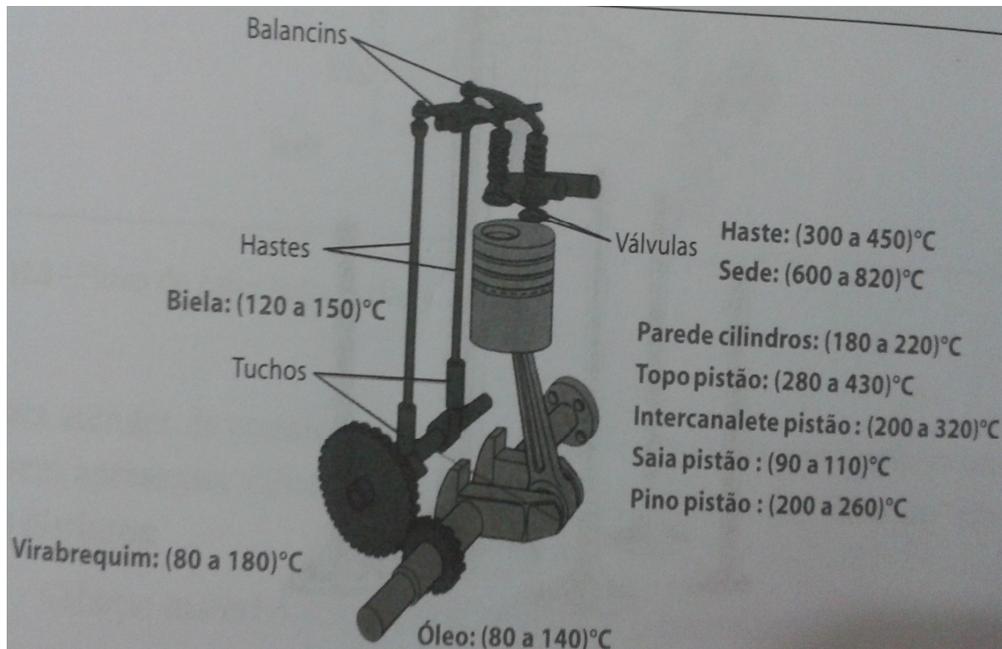
Todo trabalho que é gerado pela combustão produz uma parcela significativa de atrito e calor. Conforme Brunetti (1992) para manter a vida útil de alguns componentes do motor de combustão interna faz-se necessário o arrefecimento de alguns desses componentes uma vez que os meios arrefecedores mais usados são ar, água e óleo. O conjunto arrefecedor entra em contato com todas as partes aquecidas do motor, absorve o calor contido nessas partes para em seguida transferir para o meio ambiente.

Ainda conforme Brunetti (1992) pode-se experimentalmente verificar que 25% a 35% do calor gerado na combustão são transferidos para o fluido de arrefecimento nos motores arrefecidos a água e de 20% a 25% do calor gerado são transferidos nos motores arrefecidos a ar.

O sistema de arrefecimento é fundamental para um bom funcionamento do motor, devendo manter os seus componentes em temperaturas médias compatíveis com as características dos materiais que os constituem. Temperaturas elevadas em um longo tempo de trabalho promovem deformações, corrosão, desgaste, degradação do óleo e conseqüentemente levar ao fim da vida útil do motor.

A Figura 1 mostra de forma geral os principais componentes do motor de combustão interna com suas temperaturas médias. É possível observar na figura 1 que a sede de válvulas pode atingir uma temperatura de até 820° C.

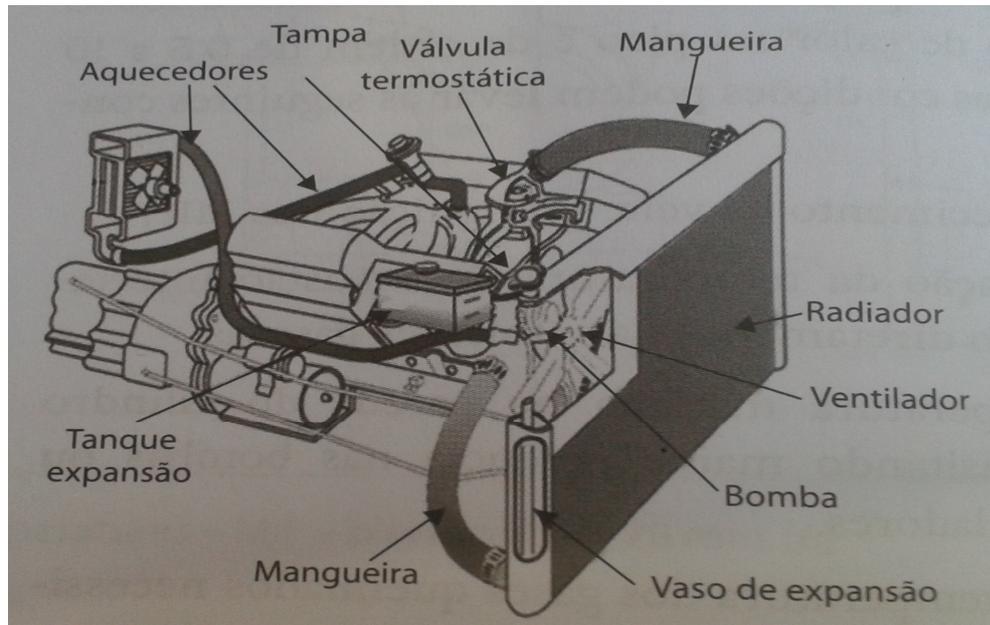
Figura 1 – Temperatura média dos componentes principais



**Fonte:** Brunetti, 1992, p.375.

Para conseguir manter a temperatura media de trabalho o sistema de arrefecimento é constituído por um conjunto de dispositivos eletromecânicos e hidráulicos, os quais podem ser observados e descritos conforme Figura 2. Os principais componentes que compõem o sistema de arrefecimento são o radiador, a válvula termostática, bomba d água, tanque de expansão e também o ventilador.

Figura 2 - Principais componentes de um sistema de arrefecimento veicular



Fonte: Brunetti, 1992,p.382.

### 2.2.1 Bomba d água

A bomba d`água tem a função de realizar a circulação do liquido de arrefecimento, água mais aditivo, nas diversas galerias do motor.

Segundo Brunetti (1992) a bomba normalmente é instalada na parte frontal do motor e gira sempre com a mesma rotação do motor alem de ser acionada em sua grande maioria por correia.

### 2.2.2 Válvula termostática

A válvula termostática é um componente de extrema importância no sistema de arrefecimento, não podendo ser eliminada sob qualquer hipótese. É a válvula termostática que controla o fluxo de água que circula pelo radiador em cada regime do motor.

### 2.2.3 Vaso de expansão

Trata-se de um reservatório que é designado a recolher o excesso de volume de água que sofreu expansão após o sistema ser aquecido. Esse vaso, além de possibilitar a visualização do nível em que o líquido de arrefecimento se encontra também auxilia na variação de volume, pois quando houver a dilatação do sistema, motor quente, o seu nível não poderá ser superior ao nível máximo do reservatório, e quando houver uma contração da água no sistema, motor frio, o seu nível não poderá ser inferior ao nível mínimo do reservatório. (Brunetti,1992).

#### **2.2.4 Radiadores**

Os radiadores são de grande importância em um sistema de arrefecimento, pois é ele que deve garantir a transferência de calor num sistema fechado, entre o ar atmosférico e o líquido de arrefecimento que é aquecido quando passa pelo motor, mantendo assim a temperatura de trabalho do sistema.

São normalmente constituídos por uma matriz de tubos e aletas de liga de alumínio, geralmente instalado na dianteira do veículo, conectado por mangueiras até o motor.

#### **2.2.5 Ventiladores**

Existem três sistemas de ventilação divididos pelo tipo de acionamento: ventiladores mecânicos, ventiladores viscosos, ventiladores elétricos.

Os ventiladores mecânicos são acionados por uma correia e são montados junto à bomba d'água. De acordo com Brunetti (1992) possuem algumas desvantagens, pois está ligado independente do calor em que o sistema se encontra, possui grande atrito da correia e um grande consumo de potência e combustível.

Já o ventilador viscoso possui uma embreagem térmica na sua construção, ele será acionado somente quando necessário, permitindo assim a utilização de ventiladores de grande porte e sobre tudo ser acionado em baixas velocidades, (Brunetti, 1992). Possui algumas desvantagens como o alto custo e consumo de potência e combustível quando acionado.

Finalizando existem também os ventiladores elétricos que na atualidade é o mais utilizado em veículos leves. Existem conjuntos montados com um ou dois ventiladores acionados cada um por um motor elétrico.

O acionamento desses motores é feito através de relés que recebem um sinal de uma unidade de comando após a temperatura atingir um limite calibrado. Normalmente estes ventiladores possuem duas velocidades dependendo da temperatura atingida pelo motor além de não consumir potência do motor.

### **2.2.6 Mangueiras**

Dentro de um sistema de arrefecimento, são as mangueiras as responsáveis no transporte do líquido de arrefecimento nos diferentes pontos do sistema, do motor para o radiador, do motor para o aquecimento do habitáculo, do radiador para o vaso de expansão ou até mesmo evitando o radiador quando o termostato está fechado, circulando no próprio motor.

Essas mangueiras são moldadas de acordo com a aplicação e com o modelo do veículo, são projetadas para suportar altas pressões e temperaturas, sujeitas assim ao desgaste sendo substituídas em manutenções rotineiras, (Brunetti, 1992).

### **2.2.7 Aditivos**

O líquido de arrefecimento que percorre o motor, as mangueiras, o radiador, em fim, todo o sistema deve ter a capacidade de resistir a temperaturas bem abaixo de zero, sem congelar, e também ter capacidade de resistir a temperaturas elevadas, acima de 120°C sem ferver. Deve conter em sua composição inibidores de ferrugem e capacidade de lubrificação.

## **2.3 ETANOL COMBUSTÍVEL VAPORIZADO**

Vários estudos já foram desenvolvidos para utilizar uma nova forma de alimentação em motores do ciclo Otto visando à injeção de etanol dentro da câmara de combustão na forma vaporizada, buscando assim obter motores com um melhor rendimento térmico e, conseqüentemente, uma redução na emissão de poluentes.

Corsini (1989) obteve uma concessão de patente pela invenção de se utilizar o combustível na forma de vapor, proporcionando um novo artifício de alimentação de motores de combustão interna caracterizando-se pelo aumento do rendimento termodinâmico. Eliminaram-se os inconvenientes da carburação e empregou o álcool hidratado como combustível, por ser uma substância pura ao invés da gasolina que é uma combinação de dezenas de hidrocarbonetos com características físicas distribuídas em larga faixa.

Bergmann (1982) disse que o calor transferido ao líquido de refrigeração dos motores pode ser recuperado para conseguir evaporar o combustível de alimentação dos mesmos, causando queimas em condição bastante pobre e, assim, melhorando o rendimento desses motores.

Galib et al. (1991) testaram um sistema vaporizador de álcool para alimentar um motor convencional de 4 cilindros e 1,6 litros de deslocamento volumétrico, sistema esse que aproveitava o calor dos gases de escape para vaporizar o etanol destinado a alimentar o motor. Os resultados obtidos confirmaram boa estabilidade acima de 3000 rpm para velocidades baixas onde houve falhas do motor, provocadas por misturas excessivamente pobres, obrigando a uma restrição da entrada de ar.

Ainda em Galib et al.(1991) observou-se que mesmo havendo recondensação do combustível, a homogeneidade da mistura não era prejudicada devido à perfeita atomização do álcool na corrente de ar.

## 2.4 FONTES DE CALOR NO AUTOMÓVEL

Nos motores utilizados em veículos automotores, existem três alternativas que podem fornecer calor necessário para conseguir a pré-evaporação do etanol. Dentro dos sistemas principais estão o óleo lubrificante, a água do sistema de arrefecimento e os gases liberados pelo escapamento.

Conforme D'Ávila (1994), o gás expelido pelo motor pode facilitar a transferência de calor, uma vez que possa aproveitar as altas temperaturas. Porém nesse processo, existem problemas de vazão e variação de temperatura o que causa a instabilidade no fornecimento de vapor ao motor.

Corsini (1989) utilizou os gases de escape no processo de pré-evaporação do etanol e, segundo o mesmo, este método traz grandes vantagens, uma vez que a

mistura ar/combustível é mais perfeita e a velocidade de queima é maior, entre outros benefícios.

Deve-se observar que grande quantidade de combustível pode evaporar repentinamente caso entre em contato com uma superfície que esteja próxima a temperatura de exaustão dos gases queimados. Outro processo de produção de vapor já estudado é a utilização do calor liberado pelo sistema de arrefecimento do motor de combustão interna. A água que sai do motor para o radiador passa primeiramente pelo trocador de calor para depois fechar o ciclo de refrigeração do motor.

Bergman (1982) informou que o calor fornecido pelo líquido de refrigeração do Motor de Combustão Interna pode ser recuperado vaporizando o etanol e assim promovendo queimas em níveis bastante pobres com uma maior porcentagem de ar para a combustão, e com isso consegue melhorar seu rendimento sem ter redução de potência.

## 2.5 TRANSFERÊNCIAS DE CALOR

A transferência de calor ocorre quando há uma interação entre duas partículas que apresentam temperaturas diferentes, as quais são colocadas em contato térmico. A transferência acontece sempre do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura. O calor por sua vez pode ser transmitido, transferido ou propagado por três tipos de processos: condução, convecção e radiação.

A transferência de calor é a energia transferida de um objeto para outro, porque há entre eles uma diferença de temperatura. O corpo que possui a maior temperatura passa o seu calor para o que tem menor temperatura, até que ocorra estabilização da temperatura entre eles, ou seja, um equilíbrio térmico (Bejan 1996). KERN (1987) diz que a transferência de calor é uma ciência que pesquisa a forma com que o calor se transfere entre as fontes e os receptores.

## 2.6 TROCADORES DE CALOR

Trocador de calor é o dispositivo utilizado no processo de troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas. Este processo é comum em muitas

aplicações da Engenharia e em processos industriais. Podem ser utilizados no aquecimento e resfriamento de ambientes, no condicionamento de ar, na produção de energia e na recuperação de calor. O trocador de calor aquece ou esfria um determinado fluido, sem contato direto entre eles, e isso é muito importante para a eficiência do processo em que o trocador é utilizado.

Segundo Bejan (1996) um trocador de calor é um equipamento capaz de promover a transferência de calor entre duas ou mais substâncias que apresentam em suas características temperaturas diferentes. Na maioria dos casos essa transferência ocorre entre dois fluidos. Para não ocorrer a mistura desses fluidos, os dois escoamentos são separados por estruturas sólidas denominadas superfícies de troca de calor.

Para Çengel e Ghajar (2012), a transferência de calor em um trocador normalmente engloba a convecção em cada fluido, e a condução através das paredes que separa os dois fluidos. Nos estudos de trocadores de calor, é importante trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor  $U$ , o qual representa a contribuição de todos os efeitos que podem ser englobados no processo de transferência de calor.

Kreith (1977) cita que existem vários tipos e muitas formas de trocadores de calor, desde os mais simples até os mais complexos, podendo ser condensadores ou evaporadores, com superfície de troca de calor chegando a milhares de metros quadrados.

Em relação ao projeto de um trocador de calor Kreith (1977), defende que os trocadores podem ser subdividido em três fases principais:

- **A análise térmica** - dada às velocidades de escoamento e as temperaturas dos fluidos então pode ser determinada área de troca de calor solicitada para transmitir o calor, numa determinada quantidade por unidade de tempo;

- **O projeto mecânico preliminar** – é a fase na qual envolve propriedades referentes às pressões e temperaturas de trabalho, as características corrosivas de um ou ambos os fluidos, as dilatações térmicas relativas e as conseqüentes tensões térmicas, além da relação do trocador de calor com os demais equipamentos;

- **O projeto de fabricação** – é a fase onde necessita de uma interpretação das características e dimensões físicas onde uma unidade possa ser

construída a um baixo custo. A seleção dos materiais, vedações, invólucros e arranjos mecânicos devem ser feitos, e os processos de fabricação devem ser especificados.

Para os diferentes tipos de trocador de calor existem aplicações em específico e regras fundamentais para serem seguidos, o que possibilita atender os requisitos de um projeto.

## 2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Para selecionar um trocador de calor uma análise térmica deve ser feita para determinar o tamanho e a geometria necessária para satisfazer os requisitos de aquecimento ou resfriamento de um dado fluido. A necessidade de ter um amplo conhecimento de alguns tipos de trocadores de calor existentes é fundamental para definir o equipamento correto.

Na transferência de calor existem diferentes aplicações que requerem diversos tipos de dispositivos e configurações de equipamentos, podendo ser citada uma ampla diversidade de tipos diferenciando os mesmos nas configurações, características e aplicações (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Basicamente os trocadores de calor são classificados segundo o processo de transferência de calor, grau de compactação da superfície, tipo de construção e da disposição das correntes dos fluidos (INCROPERA; DEWITT, 1998).

### 2.7.1 Classificação de acordo com os processos de transferência de calor

De acordo com o processo de transferência de calor, os trocadores de calor podem ser classificados em:

- **Contato indireto:** Nesse tipo de trocador de calor os fluidos permanecem separados entre si e o calor por sua vez é transferido continuamente através de uma parede, na qual acontece a transferência de calor, além disso, ambos os fluidos devem estar fluindo simultaneamente;

- **Contato direto:** nestes trocadores de calor os fluidos imiscíveis quentes e frios se misturam. Até mesmo em aplicações comuns de um trocador de contato direto envolvem transferência de massa além de transferência de calor, comumente um dos fluidos é gás e o outro é vapor ou líquido sob baixa pressão.

### **2.7.2 Classificação de acordo com o grau de compactação**

A característica principal deste tipo de trocador de calor está em garantir uma grande superfície de troca de calor por unidade de volume. Esta grande superfície de calor é constituída através do emprego de chapas finas ou aletas onduladas estreitamente espaçadas nas paredes que separam os dois fluidos.

Conforme Incropera e DeWitt (1998), este tipo de trocadores de calor é um equipamento que em suas características possui densas matrizes de tubos ou placas aletadas e são tipicamente usados quando pelo menos um dos fluidos é um gás, portanto é caracterizado por um pequeno coeficiente de transferência de calor.

Nos trocadores de calor com placas paralelas pode haver aletas ou ser corrugados, e podem ser empregadas modalidades de operação com único passe ou com múltiplos passes.

### **2.7.3 Classificação de acordo com o tipo de construção**

Diferentes aplicações requerem inúmeros tipos de configurações de equipamentos de trocador de calor, entre os mais utilizados pode-se destacar os trocadores tubulares, de placas, de superfície estendida e regenerativa.

Os trocadores tubulares é o tipo mais simples de trocador de calor, o qual é constituído na sua maioria por tubos circulares variando conforme a necessidade.

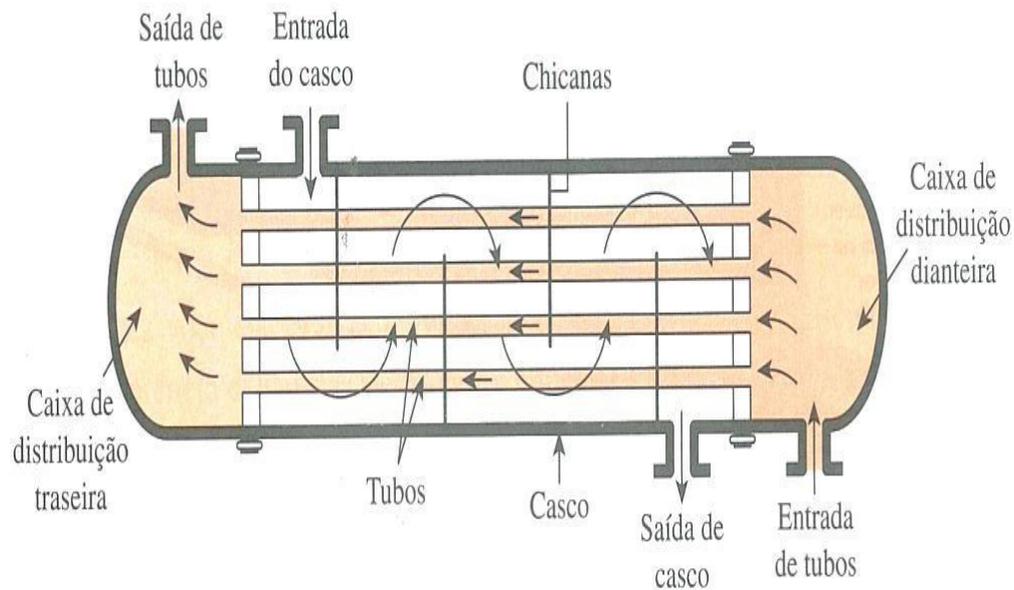
São usados na sua maioria na transferência de calor líquido/líquido e também nas fases gás-gás ou líquido-gás compensando o baixo coeficiente de transferência de calor associado ao escoamento do gás com maior superfície e principalmente quando pressões e/ou temperaturas operacionais são muito altas e onde nenhum outro tipo de trocador pode operar. Estes trocadores podem ser classificados como carcaça e tubo, tubo duplo e de espiral

O trocador de calor tubo duplo, é o mais simples e é constituído por dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros. Dentre as suas características pode se destacar o seu arranjo de escoamento, podendo ser de escoamento paralelo onde o fluido quente e frio entram e escoam na mesma direção, e o escoamento contra corrente, o fluido quente e frio entram e escoam em extremidades opostas.

Este é talvez o mais simples de todos os tipos de trocador de calor pela fácil manutenção envolvida, é geralmente usado em aplicações de pequenas

capacidades. Um fluido percorre por tubos enquanto o outro fluido é forçado a escoar através da carcaça, conforme Figura 3.

Figura 3 – Trocadores casco e tubo com um passe no casco

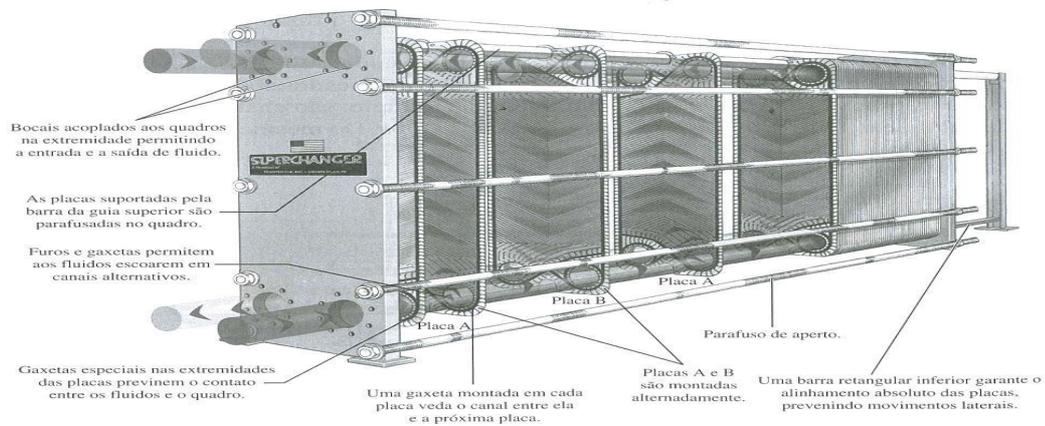


Fonte: Çengel e Ghajar, 2012, p.631.

Os trocadores de calor do tipo placas são normalmente construídos com placas planas lisas ou com alguma ondulação. De acordo com suas características, este trocador não pode agüentar pressões muito elevadas, comparado ao trocador tubular.

Para Çengel e Ghajar (2012), neste modelo de trocador de calor, os fluidos quentes e frios escoam em passagens alternadas e, assim, cada escoamento de fluido frio é cercado por dois escoamentos de fluido quente, resultando uma grande eficiência na transferência de calor. Esses dispositivos são bem adaptados na troca de calor entre líquido-líquido, uma vez que os escoamentos dos fluidos quentes e frios estejam mais ou menos com a mesma pressão, a Figura 4 ilustra um trocador de calor de placas.

Figura 4 – Trocador de calor de placas

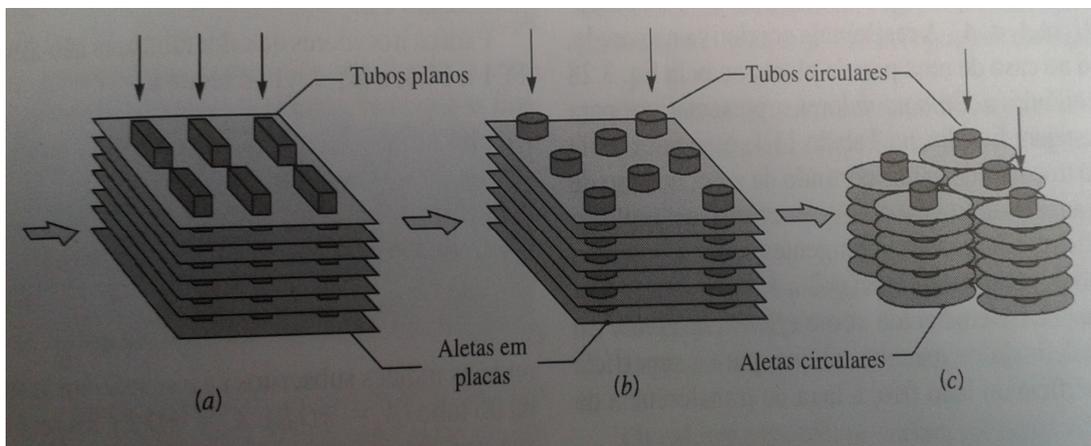


Fonte: Çengel e Ghajar, 2012, p.632.

Já os trocadores de calor de superfície estendida – aletas – subdividem-se em dois grupos: os de placas aletadas e os de tubos aletados conforme mostra a Figura 5. Apresentam como uma alternativa quando um dos fluidos envolvidos no processo de transferência de calor é um gás, ou apresenta um valor inferior na troca de calor por convecção.

Godoy (2008) afirma que são trocadores de calor mais leves e compactos, sendo utilizados em um amplo domínio de pressão do fluido nos tubos, não ultrapassando cerca de 30 atm e temperaturas de aproximadamente 850 °C, entretanto o emprego atual não permite a ocorrência de altos valores de pressão e temperatura, simultaneamente.

Figura 5 – Trocador de calor de aletas



Fonte: Incropera e Dewitt (1998)

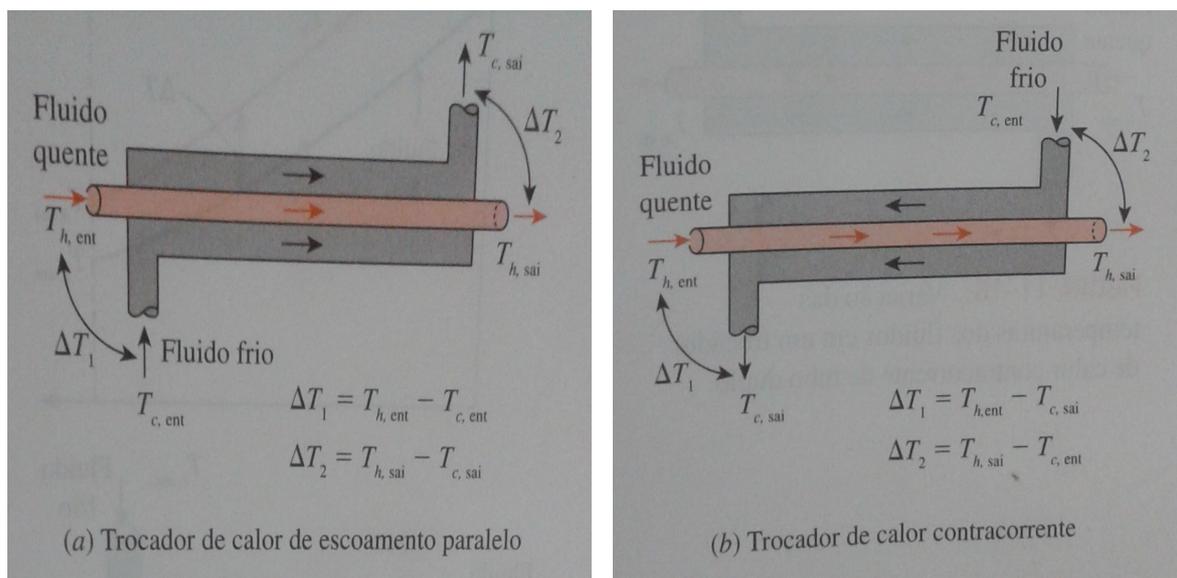
Os trocadores de calor regenerativo servem como meio de armazenamento temporário de calor, onde ambos os fluidos, quente e frio, escoam alternativamente nas mesmas passagens de troca de calor, e pode ser do tipo estático ou dinâmico. A superfície de transferência de calor normalmente é de uma estrutura denominada matriz. Em caso de aquecimento, o fluido quente atravessa a superfície de transferência de calor e a energia térmica é armazenada na matriz. Em seguida, quando o fluido frio é deslocado pelas mesmas passagens, a matriz “libera” a energia térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

#### 2.7.4 Classificação de acordo com a disposição das correntes do fluido

Existem várias possibilidades para a disposição do escoamento nos trocadores de calor dependendo da necessidade e critérios de projeto.

Çengel e Ghajar (2012) citam como modelos principais de escoamento: escoamento paralelo, contracorrente e escoamento cruzado. No escoamento paralelo o fluido quente e frio entram no trocador de calor na mesma extremidade e avança na mesma direção, enquanto que no escoamento em contracorrente os fluidos entram e circulam em extremos opostos e em direções opostas, conforme Figura 6.

Figura 6 – Trocador de calor escoamento paralelo (A) e contracorrente (B)



Fonte: Çengel e Ghajar 2012, p. 643.

Além do modelo citado, os autores citam ainda o escoamento cruzado, utilizado na sua maioria em trocadores compactos, onde geralmente os dois fluidos circulam perpendiculares um ao outro. De acordo com a configuração do escoamento, o escoamento cruzado é ainda classificado como sendo um escoamento com mistura ou ainda pode ser sem mistura.

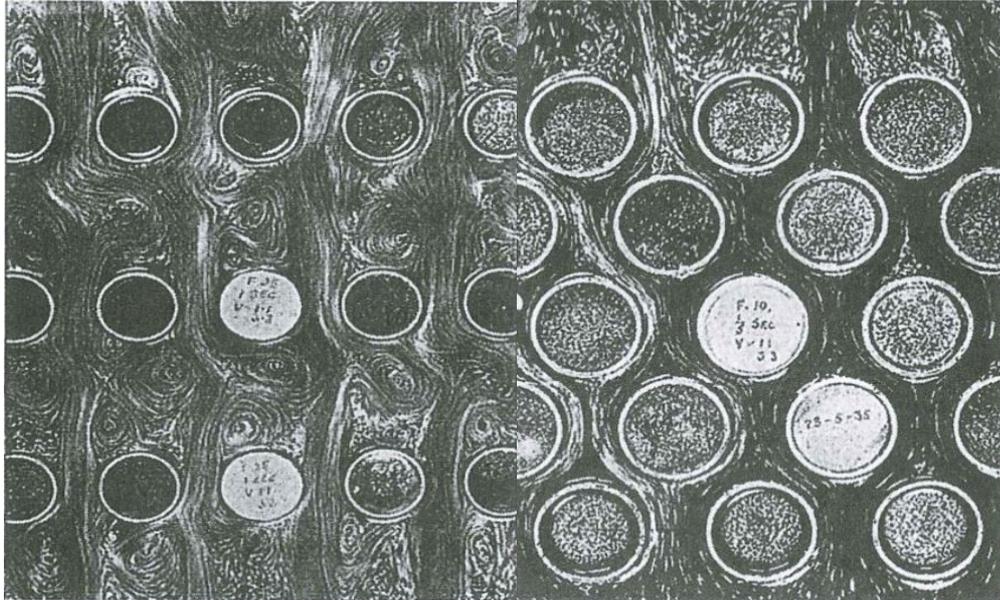
## 2.8 FLUXO CRUZADO EM TROCADORES DE CALOR.

Nos trocadores de calor de fluxo cruzado as direções do escoamento dos fluidos de trabalho são perpendiculares entre si. Um dos fluidos escoam internamente em um conjunto de tubos (feixe) enquanto o outro fluido escoam na parte externa do trocador, com temperatura diferente.

Conforme ÖZISIK (1985), os tubos do trocador de fluxo cruzado podem ser arranjados de várias formas, todas elas procurando elevar ao máximo a eficiência do equipamento através do aumento da taxa de transferência de calor e da redução de seu tamanho. O objetivo das várias formas de arranjos dos tubos é possibilitar condições do escoamento externo sobre o feixe de tubos, tais que prevaleçam os efeitos de separação de camada limite e interação de vórtices, tudo visando influenciar o coeficiente de transferência de calor por convecção. Ainda segundo Özisik (1985), o coeficiente convectivo externo é só um dos fatores que determina o coeficiente global de troca térmica.

Assim, para Çengel e Ghajar (2012) as fileiras de tubos que formam um feixe podem ser alinhadas ou escalonadas em relação à direção principal do escoamento do fluido. A configuração de um banco de tubos é caracterizada pelo diâmetro do tubo e pelo passo transversal e longitudinal entre os centros do tubo. O coeficiente de transferência de calor associado a certo tubo depende de sua posição no feixe. O coeficiente convectivo para um tubo colocado na primeira fileira em relação ao fluxo externo assemelha-se a de um tubo simples colocado em uma corrente cruzada. Os tubos colocados internamente no feixe terão maiores coeficientes convectivos por causa das esteiras formadas e da turbulência causada pelos tubos à jusante.

Figura 7 – Padrões de escoamento de bancos de tubos escalonados e em linha



Fonte: Çengel e Ghajar, 2012, p.439.

## 2.9 EQUACIONAMENTO DE TROCADORES DE CALOR

### 2.9.1 Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor é utilizado para determinar a transferência de calor total entre as duas correntes, quente e fria, de em um determinado trocador de calor. Levam em consideração os coeficientes de transferência térmicos individuais de cada corrente e também a resistência do material do tubo dependendo do caso.

A equação básica para um trocador de calor é:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (1)$$

Onde:

$U$  = coeficiente global de transferência de calor ( $W/m^2\text{°C}$ );  
 $\Delta T_{lm}$  = diferença média de temperatura entre os fluidos ( $\text{°C}$ ).

Definiu-se que a transferência de calor dos fluidos de um determinado trocador e a vizinhança seja desprezível e que ocorrem mudanças de fase em um dos fluidos. A partir desses critérios é possível chegar às taxas de transferência de calor dos fluidos quente e frio, usando as seguintes fórmulas:

$$Q_{\text{hot}} = m_h C_{p,h} (T_{h,e} - T_{h,s}) \quad (2)$$

$$Q_{\text{cold}} = m_c C_{p,c} (T_{c,e} - T_{c,s}) \quad (3)$$

Onde:

- $Q_{\text{hot}}$  = taxa de transferência de calor do fluido quente (W);
- $Q_{\text{cold}}$  = taxa de transferência de calor do fluido frio (W);
- $m_h$  = é a vazão mássica do fluido quente (kg/s);
- $C_{p,h}$  = é o calor específico a pressão constante fluido quente (j/kg. °C);
- $T_{h,e}$  e  $T_{h,s}$  = são respectivamente, as temperaturas de entrada e saída, relativos ao fluido quente (°C);
- $m_c$  = é a vazão mássica do fluido frio (kg/s);
- $C_{p,c}$  = é o calor específico à pressão constante do fluido frio (j/kg. °C);
- $T_{c,e}$  e  $T_{c,s}$  = são respectivamente, as temperaturas de entrada e de saída, relativos ao fluido frio(°C).

O coeficiente global de transferência de calor pode ser simplificado quando a parede do tubo apresenta uma espessura bem pequena e também a condutividade térmica do material utilizado é elevado, podendo então desprezar a resistência térmica do tubo, sendo assim obtemos a seguinte fórmula:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (4)$$

Sendo;

$h_i$  = coeficiente de calor por convecção interno (W/m<sup>2</sup>K);

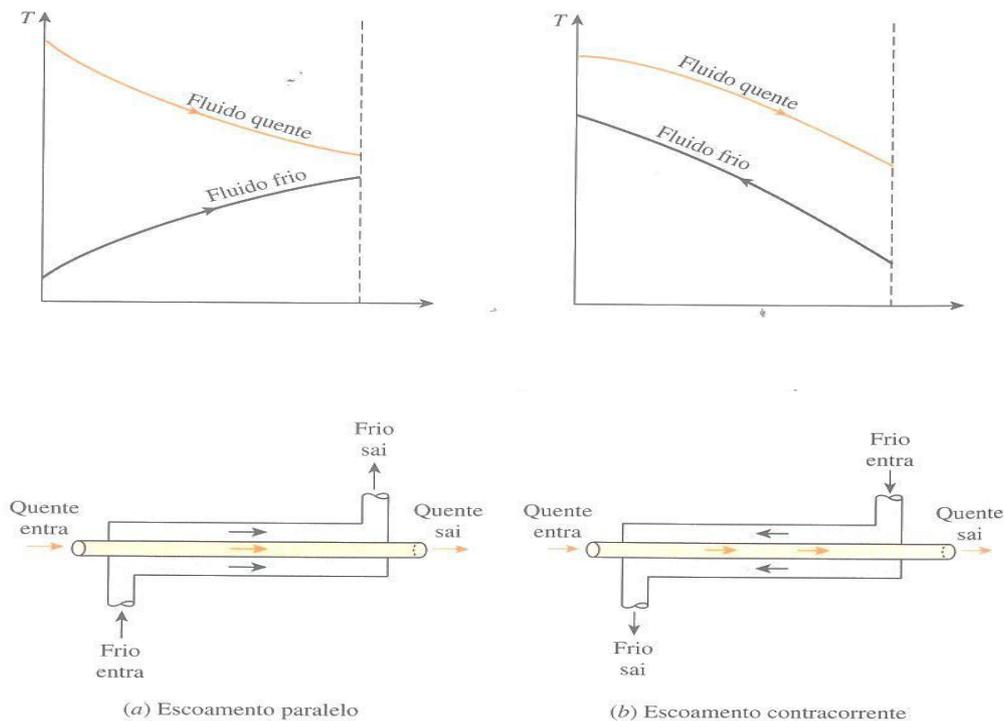
$h_o$  = coeficiente de calor por convecção externo (W/m<sup>2</sup>K);

## 2.9.2 Método de DTML para análise dos trocadores de calor

Conforme Çengel e Ghajar (2012), o método DTML, é a diferença de temperatura média logarítmica, que é a forma adequada da diferença de temperatura média para utilização na análise de trocadores de calor.

A figura 8 mostra o tipo mais simples de trocador de calor, o qual é constituído por dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, denominado de trocador de calor tubo duplo. Tem como característica dois tipos de escoamento, paralelo e contracorrente, e também a variação de temperatura de entrada e saída.

Figura 8 – Diferentes regimes de escoamento e perfis de temperatura associados em trocador de calor de tubo duplo.



Fonte: Çengel e Ghajar, 2012, p 630.

Utilizando um sistema contracorrente, com um trocador de calor tubo duplo utilizando determinadas hipóteses como, o coeficiente total de transmissão de calor é constante em todo o comprimento da trajetória, o calor específico é constante em todos os pontos da trajetória, existe mudanças de fase no sistema e as perdas de

calor são desprezíveis podemos através do método DTML determinar o tamanho do trocador.

$$\Delta T_{ml} = DTML = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[ \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right]} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \left( \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right)} \quad (5)$$

Onde:

DTML = diferença da Temperatura Média Logarítmica (°C);

$T_1$  = temperatura de entrada do fluido frio (°C);

$T_2$  = temperatura de saída do fluido frio (°C);

$t_1$  = temperatura de entrada do fluido quente (°C);

$t_2$  = temperatura de saída do fluido quente (°C).

No caso de um trocador de calor contracorrente as expressões  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  seguem a seguinte forma de solução.

$$\Delta T_1 = T_{h,ent.} - T_{c,sai.} \quad (6)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,sai.} - T_{c,ent} \quad (7)$$

As fórmulas 6 e 7 representam as diferenças de temperatura entre os fluidos em qualquer uma das extremidades do trocador de calor, e não à diferença para designar qual das extremidades é escolhida como entrada ou saída.

Assim consegue chegar à taxa de calor transferido através da equação (1):

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

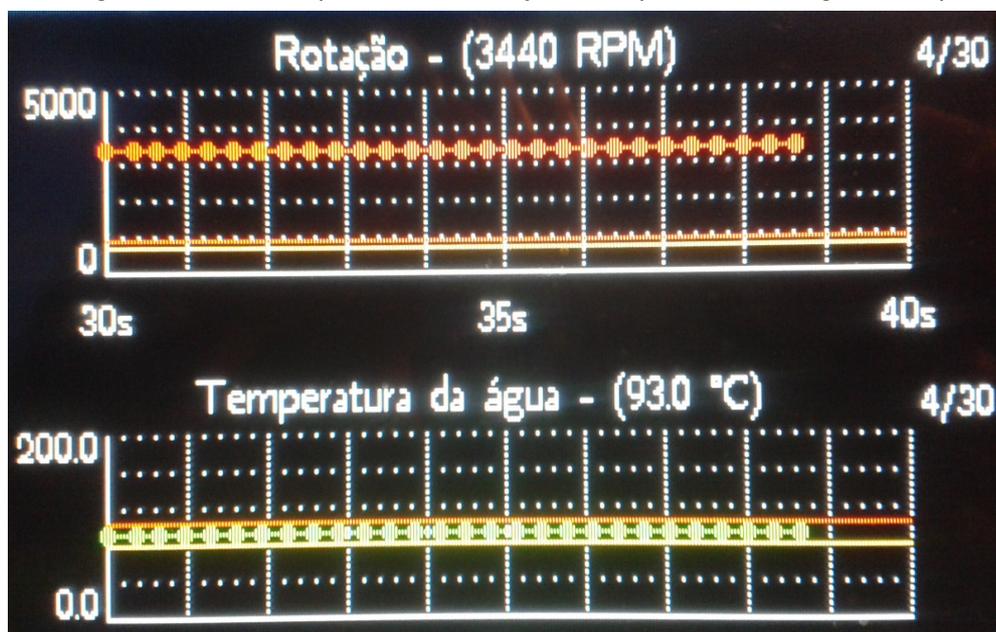
Como procedimento de execução de pesquisa, definiu-se para o presente estudo o seguinte:

1. Coleta de dados;
2. Definição do desempenho pretendido para o trocador;
3. Dimensionamento do trocador de calor.

##### 3.1.1 Coleta de dados

Inicialmente foi realizado o levantamento de dados através de um termômetro digital e de um scanner automotivo modelo Raster III para obter dados de temperatura nos diferentes pontos do sistema de arrefecimento e saber qual a temperatura de trabalho que o motor opera. A leitura dos dados pode ser verificada na Figura 9.

Figura 9 – Gráfico representando rotação e temperatura ao longo do tempo.



Fonte: Autor

O veículo que foi retirado os dados é da marca Volkswagen, modelo Pollo Sedam seu ano de fabricação é 2010 o qual possui uma potência de 104cv. Dentro de suas características possui um sistema de controle de injeção Bosch ME 7.5.30 com injeção indireta de combustível, multipoint, a sua temperatura de trabalho varia entre 90°C a 100°C.

Outros critérios importantes que foram levados em considerações foram, a possibilidade de instalar o trocador de calor no compartimento do motor, segurança, capacidade de atender rapidamente as alterações na demanda do combustível, facilidade de fabricação e manutenção. O local planejado para alocar o trocador de calor pode ser verificado na figura 10.

Figura 10 – Localização do trocador de calor no compartimento do motor.



Fonte: Autor

### 3.1.2 Definição do desempenho pretendido para o trocador

Baseado nos dados coletados no item anterior buscou-se através de bibliografias o trocador de calor que mais se adapta para o projeto.

Foram definidos alguns critérios que devem ser levados em consideração no dimensionamento:

- A mudança de fase no sistema;
- As variações de energia cinética e potencial serão desprezíveis;
- A temperatura da água deve variar pouco durante sua passagem pelo trocador de calor;
- Propriedades constantes;

Os processos de transferência de calor considerados na representação matemática do sistema estudado são 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 transferência de calor por convecção entre o fluido frio e os tubos do lado externo.

### **3.1.3 Dimensionamento do trocador**

O próximo passo é o dimensionamento do trocador de calor, com as dimensões de comprimento e diâmetro definidas após a medição feita junto à mangueira principal que liga o motor ao radiador do veículo.

O trocador de calor mais adequado para o projeto é o trocador tubo em tubo (casco e tubo) com escoamento contracorrente por permitir dimensões bem pequenas e atender as necessidades do trabalho. O etanol escoar no tubo interno do trocador enquanto a água escoar no tubo externo do trocador de calor em sentidos opostos de entrada.

As equações do trocador de calor têm como fonte de referência os autores Incropera e DeWitt (2003) e Çengel e Ghajar (2012).

. O método de dimensionamento aplicado neste TFC (Trabalho Final de Curso) é o método DTML por ser mais adequado quando se conhecem as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quentes e frios, uma vez que o valor pode ser facilmente calculado.

Através deste método podemos dimensionar o trocador de calor, determinando a taxa de transferência global de calor, uma vez que foi considerado o tipo de trocador de calor, geometria das superfícies, disposição das correntes, vazões, temperaturas de entrada e dimensões totais do núcleo.

## 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

### 3.2.1 Termômetro digital infravermelho

É um aparelho compacto resistente e de fácil utilização, conforme a Figura 11. Possui duas unidades de temperatura Farenheit e Celsius sendo muito útil para leituras de temperatura corporal, superfícies, ambientais entre outras.

O termômetro foi utilizado para obter diferentes pontos de temperatura nas diversas mangueiras que o sistema de arrefecimento possui. Através desta análise pode se decidir qual seria a posição em que o trocador ira ser instalado e se a temperatura neste ponto será suficiente para evaporar o etanol.

Figura 11 – Termômetro digital



Fonte: Autor

### 3.2.2 Raster III

Aparelho de diagnóstico automotivo capaz de fazer leituras e obter graficos de diferentes sensores e atuadores dentro do sistema de injeção eletrônica com precisão e agilidade, Figura 12.

Além do sistema de injeção eletrônica ele atende também ABS, Air Bag, Imobilizador, Transmissão e muitos outros sistemas da eletrônica embarcada.

Através deste recurso podemos obter a temperatura de trabalho do motor de combustão interna do veículo Polo e assim poder utilizar no dimensionamento do trocador de calor.

Figura 12 – Scanner automotivo, Rasther III Tm 540



Fonte: Autor

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, será apresentado o roteiro de cálculos necessários para o dimensionamento do trocador de calor. Os cálculos serão executados com base nas dimensões de diâmetros interno e externo, vazões da água e do etanol e comprimento do trocador fixado conforme demonstra no Quadro (1), o mesmo deve ser instalado em um lugar determinado junto ao motor e o radiador do automóvel.

Quadro 1: Dados do trocador de calor

Descrição	Valor
Diâmetro Externo	0,050 m
Diâmetro Interno	0,020 m
Vazão da Água	0,550 kg/s
Vazão do Etanol	0,001256 kg/s
Comprimento	0,18 m
Temperatura de Entrada (Etanol)	20 °C
Temperatura de Saída (Etanol)	78,2 °C
Temperatura de Entrada (Água)	95 °C
Temperatura de Saída (Água)	91,3 °C

Fonte: Autor

A vazão do etanol foi obtida através de um ensaio de vazão em bico injetor automobilístico. A vazão é de 0,000314 kg/s para um bico injetor numa rotação de 5000 rpm em um motor a gasolina (Pedroso e Pekelman 2010).

Ocorrendo mudança de fase no trocador de calor, através da equação (1) pode ser obtida a potência necessária que o etanol necessita para ocorrer a sua evaporação.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p (T_{c,s} - T_{c,e}) + h_{fg} \quad (1)$$

$$\dot{Q} = 2.892,8 \text{ W}$$

Onde:

$\dot{m}$  = é a vazão mássica do fluido (kg/s)

$h_{fg}$  = é a entalpia de vaporização do líquido (Kj/kg)

O valor da entalpia de vaporização de etanol “hfg” equivale a 838,3 kj/kg.

Utilizando a equação (2), considerando calor específico da água,  $C_p = 4,212$  J/Kg.K, determinando a temperatura de entrada ( $T_{c,e}$ ) e a temperatura de saída do etanol ( $T_{c,s}$ ) em 20 °C e 78,2 °C respectivamente, a temperatura de saída ( $T_{h,s}$ ) do fluido quente é facilmente calculada uma vez que a temperatura de entrada da água ( $T_{h,e}$ ) é igual a 95 °C.

$$T_{h,s} = T_{h,e} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \times C_p} \quad (2)$$

$$T_{h,s} = 91.3 \text{ °C}$$

Nos critérios que foram levados em consideração no dimensionamento do trocador de calor, a pouca variação de temperatura que ocorreu neste caso satisfaz a proposta do dimensionamento.

#### 4.1 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A área superficial do trocador de calor foi calculada a partir do coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), desprezando a resistência da parede do tubo. Quando a espessura da parede do tubo é pequena e a condutividade térmica do material é elevada a relação é simplificada, conforme equação (3) (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (3)$$

Para chegar ao valor do coeficiente global de transferência de calor devem ser calculados os coeficientes de calor por convecção do lado interno e externo, através dos números adimensionais de Reynolds, Prandtl e Nusselt que são definidas nas equações (4), como:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}c}{\pi \cdot Di \cdot \mu} \quad (4 a)$$

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} \quad (4 b)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{K} \quad (4 c)$$

Onde:

$Re$  = Número de Reynolds;

$Pr$  = Número de Prandtl;

$Nu$  = Número de Nusselt;

$D$  = diâmetro do tubo ( $m^2$ );

$Di$  = diâmetro interno do tubo ( $m^2$ );

$\dot{m}c$  = vazão mássica do fluido (kg/s)

$K$  = condutividade térmica do fluido quente ou frio ( $W / m.K$ );

$Cp$  = calor específico do fluido quente ou frio ( $j / kg. K$ );

$\mu$  = viscosidade dinâmica ( $kg/m.s$ ).

Calculando o número de Reynolds temos:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}c}{\pi \cdot Di \cdot \mu} \quad (5)$$

$$Re = 66,63$$

A viscosidade dinâmica e a vazão mássica para o etanol valem respectivamente  $\mu = 0,0012 \text{ kg/m. s}$  e  $\dot{m} = 0,001256 \text{ kg/s}$ .

O escoamento do etanol através do tubo é laminar, pois Reynolds é inferior a 2.300 (Incropera e Dewitt 1998). Supondo que a temperatura seja uniforme ao longo da superfície com escoamento completamente desenvolvido, o número de Nusselt do lado do tubo correspondente a relação  $Di/De$  e pode ser determinado a partir da Tabela (1) por interpolação.

Utilizando a relação  $D_i/D_e$  tem-se um valor igual a 0,4, interpolando através da Tabela (1) encontra-se um valor para Nusselt de 6,39.

Portanto:

$$Nu = 6,39$$

Tabela 1: Número de Nusselt para o escoamento laminar entre tubos circulares concêntricos.

$D_i/D_e$	$Nu_i$	$Nu_e$
0	—	3,66
0,05	17,46	4,06
0,10	11,56	4,11
0,25	7,37	4,23
0,50	5,74	4,43
1,00	4,86	4,86

Fonte: Incropera e Dewitt, 1998, p 246.

Através do número de Nusselt pode ser calculado o coeficiente de convecção do lado interno ( $h_i$ ), através da equação:

$$h_i = \frac{K \cdot Nu}{D_i} \quad (6)$$

$$h_i = 54,32 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

A condutividade térmica do etanol equivale  $K = 0,17 \text{ W/m.K}$

Repetindo as equações (4 a, b) podemos calcular o coeficiente de convecção do lado externo ( $h_e$ ) lado da água:

Serão utilizados os valores da viscosidade dinâmica  $\mu = 0,297 \times 10^{-3}$ , o calor específico  $C_p = 4,212$  j/kg.K e a condutividade térmica  $K = 0,677$  W/m.K todas propriedades da água.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m} c}{\pi \cdot (D_e - D_i) \cdot \mu}$$

$$Re = 78.595$$

E

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{K}$$

$$Pr = 1,85$$

Portanto,

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (7)$$

$$Nu = 232,61$$

Equação utilizada em tubos lisos quando:

$$Re > 10.000;$$

$$0,7 < Pr < 160 \text{ e};$$

$$L/D > 60$$

Então temos:

$$h_e = \frac{K \cdot Nu}{D_e} \quad (8)$$

$$h_e = 3.149 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

O coeficiente global de transferência de calor é obtido pela equação (3), onde temos:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U = 54,59 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE TRANSFERÊNCIA ATRAVÉS DA DTML

Conhecendo as temperaturas de entrada e saída dos fluídos, pode-se calcular a média apropriada entre estas temperaturas através da seguinte equação:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln(\Delta t_2 / \Delta t_1)} \quad (9)$$

Onde:

$$\Delta T_1 = T_{h,ent.} - T_{c,sai.} \quad (10)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,sai.} - T_{c,ent} \quad (11)$$

Portanto:

$$\Delta T_{ml} = 37,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

A partir da equação geral para projeto de trocador de calor, e com todos os dados necessários, a área correspondente do trocador de calor capaz de evaporar o etanol é dada pela equação:

$$Q = U.A.\Delta T_{lm} \quad (12)$$

Resolvendo a área (A) temos:

$$A = 1,40 \text{ m}^2$$

Conhecida a área necessária para a troca de calor, pode-se descobrir a quantidade necessária de tubos para o trocador. O comprimento do tubo é conhecido já que é limitada a sua instalação no compartimento do motor conforme mostra a figura 10, assim seu comprimento é conhecido e equivale a 0,18 m.

Para dimensionamento do diâmetro dos tubos, consideram-se padrões comerciais DIN 2440, com:

- \* Diâmetro interno do tubo de 0,029 m;
- \* Diâmetro externo do tubo de 0,03 m;

O número de tubos necessário é calculado através da equação:

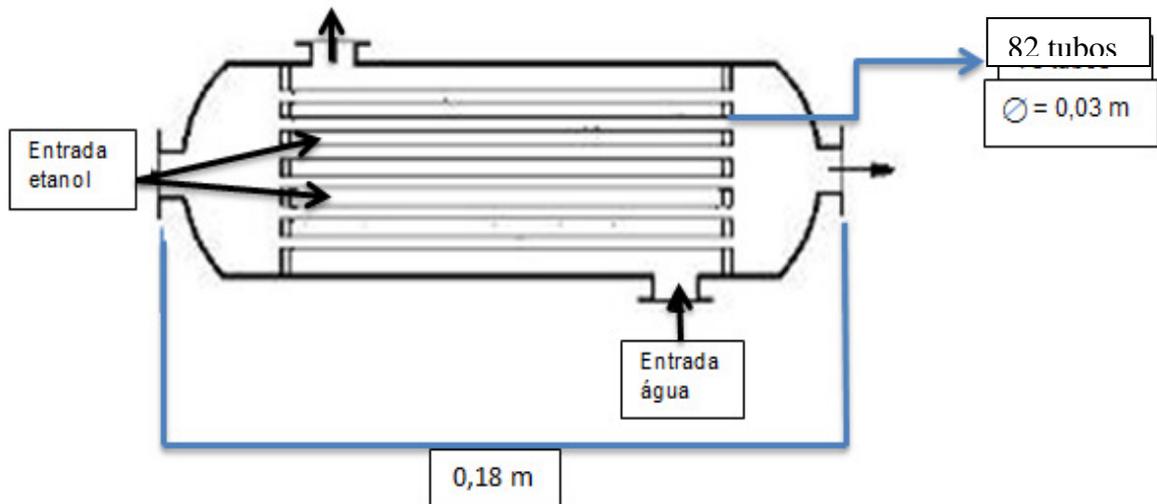
$$A = \pi \cdot n \cdot D \cdot l \quad (13)$$

$$n = 82 \text{ tubos}$$

Os cálculos para o dimensionamento do trocador de calor partiu de dimensões de comprimento do trocador de calor e diâmetros interno e externo definidas, pois há uma necessidade do trocador de calor ser instalado junto ao motor e o radiador do veículo. A partir daí, descobriram-se os coeficientes de convecção do lado interno e externo através dos números de Reynolds, Prandtl e Nusselt. Descobriu-se também a diferença média logarítmica das temperaturas através do método DTML, calculou-se o coeficiente global de transferência de calor para conseguinte descobrir a área de troca térmica e assim saber a quantidade de tubos necessários para haver a evaporação do etanol. O trocador de calor projetado é do tipo casco-tubo o qual apresenta dimensões que foram definidas através do tipo e modelo do veículo e como resultado final temos um trocador de calor com 82 tubos, de 0,03m de diâmetro e 0,18m de comprimento.

A figura 13 ilustra um trocador de calor do tipo casco e tubo que pode ser utilizado na evaporação do etanol, com suas dimensões.

Figura 13 - Trocador de calor casco e tubo



Fonte: Autor.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de etanol vaporizado como combustível para o funcionamento de um motor de combustão interna é um processo que possui uma série de vantagens se bem aproveitada. Toda a energia térmica necessária para o aumento da temperatura do combustível líquido e sua mudança de fase é fornecida pelo próprio calor proveniente do sistema de arrefecimento, elevando o nível energético do sistema e aumentando assim o rendimento termodinâmico do motor.

O uso de um combustível na fase de vapor misturado com o próprio ar admitido pelo motor acarreta em uma velocidade maior de queima da mistura, trazendo alguns benefícios e melhorias no sistema. A diminuição do consumo de combustível, acarretando a elevação no rendimento térmico do motor, uma redução acentuada na emissão de gases poluentes, aumento da durabilidade devido à pequena contaminação do óleo lubrificante pelo combustível. A partir dessas afirmativas, houve a preocupação de dimensionar um trocador de calor capaz de evaporar o etanol e utilizá-lo como combustível.

O trocador de calor casco e tubo escolhido neste trabalho é capaz de fornecer o calor necessário para evaporar o etanol, não haverá uma diminuição excessiva da temperatura da água quando a água passa pelo trocador de calor o que não afetará o funcionamento do motor, pois este trabalha com uma temperatura determinada pelo seu sistema de injeção eletrônica.

As suas dimensões estarão dentro do espaço disponível no cofre do motor, sendo um local que fornece segurança na sua instalação, não estando perto de componentes eletrônicos, além de ter um bom acesso na hora da sua manutenção.

As temperaturas de entrada e saída da água equivalem 95 e 91,3°C respectivamente, assim como a temperaturas de entrada vale 20°C e a de saída vale 78,2°C. O comprimento do trocador de calor vale 0,18m e precisa de 82 tubos para elevar a temperatura do etanol de 20°C até sua evaporação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁVILA, M. T. & SANTOS, A. M., **Uso do Etanol Pré-Vaporizado em Motores de Ignição por Centelha**, SAE Paper 931631, 1993.
- BEJAN, A. **Transferência de Calor**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1996.
- BERGMANN, H. K., **.A Highly Efficient Alcohol Vapor Aspirating Spark-Ignition Engine with Heat Recovery**, 1982.
- CORSINI, R., **Processo e Equipamento para Alimentação de Motores de Combustão Interna Movidos a Álcool**, Carta Patente de Invenção número PI 8402740, São Paulo, Brasil, 1989.
- COOPER, C. D. and ALLEY, F. C., 1994 - **Air Pollution Control - Waveland Press**, Inc., pg 694.
- D'AVILA, M. T. **Estudo de um motor de combustão interna do ciclo Otto movido a etanol pré – vaporizado**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, 1994.
- GALIB, F., PEEL, R. B. and ISMAIL, K. A. R. **O Desempenho de um Motor de Ignição por Centelha, Alimentado com Álcool Etílico Pré-Vaporizado**, *Revista de Ciência e Tecnologia*, Vol. 1, Nº 1, pp. 55-59, 1991.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999
- GODOY, S. M. **Eficiência térmica de trocadores de calor compactos através de simulação numérica**. 2008. Dissertação de mestrado. Disponível em <[www.teses.usp.br/teses/Dissertacao](http://www.teses.usp.br/teses/Dissertacao)>. Acesso em setembro de 2014.
- GRIMM, A., **Radiação e balanço de calor**, Disponível em: <[www.fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9.html](http://www.fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9.html)>. Acesso em 03 de julho de 2014.
- INCROPERA F. P.; DEWITT. D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicas e Científicos Editora, 1998.
- KERN, D. Q. **Processos de Transmissão de Calor**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987.
- KREITH. F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1991.
- ÇENGEL, A. Y. GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4° ed. Editora McGraw-Hill, 2012
- ÖZISIK, M. N. **Transfor Heat Approach a Basic**. Editora McGraw-Hill *Book Company*, 1985
- PEDROSO, A.B.; PEKELMAN, H. **Ensaio de vazão em bico injetor automobilístico**. Cobenge, Fortaleza – CE, 2010.
- SEINFELD, J. H. and PANDIS, S. N., 1998 - *Atmospheric Chemistry and Phisics* – Wiley Interscience, pg 1326.