



28 · 29 · 30  
de OUTUBRO

**XII SEGET**  
SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
TEMA 2015  
Otimização de Recursos e Desenvolvimento



# Análise e Modificação em Trocador de Calor para atender Ensaio de Motores Ciclo OTTO em Dinamômetro

**Alberto Mendonça Loureiro**  
alberto.loureiro@outlook.com  
AEDB

**Gustavo Correia e Ferreira**  
gustavo.cferreira@hotmail.com  
AEDB

**Márcio Campbell de Almeida Seixas**  
marcio.campbell@hotmail.com  
AEDB

**Leonardo de Carvalho Vidal**  
leonardo.carvalho.vidal@hotmail.com  
AEDB

**Resumo:** No momento em que ocorre a explosão da mistura ar e combustível e expansão dos gases, o interior dos cilindros alcançam temperaturas da ordem de 2300 a 2700K e pressões acima de 3000Kpa. Por sua vez, na exaustão, as temperaturas caem para a faixa de 900 a 1100K. Ainda assim, estas temperaturas estão muito acima dos valores de trabalho do fluido que se mantém em torno dos 95° C. Para manter a temperatura ideal de trabalho, o motor, quando montado sobre o veículo, conta com o sistema de arrefecimento que dentre seus principais componentes estão a bomba d'água, geralmente instalada no bloco do motor, além do radiador, moto ventilador e tubulação que circula o fluido entre o motor, radiador e em alguns casos para o reservatório de expansão. O estudo tem como objetivo analisar a utilização de um trocador de calor do tipo placas como substituto ao radiador de um veículo em uma célula de testes de motor em uma indústria automotiva localizada na cidade de Porto Real, Rio de Janeiro, Brasil. É demonstrado neste estudo de caso, os ajustes necessários para se atender um ensaio específico, onde o elevado delta de temperatura ocorre a um curto espaço de tempo, superando assim a capacidade do trocador instalado no banco de testes. Com o estudo, foi concluído que a quantidade de placas instaladas na concepção da sala de testes era inferior ao necessário para os novos ensaios, onde conclui-se que para atender as normas seria necessária a instalação de novas placas que aumentam a capacidade térmica do trocador possibilitando a realização dos testes.

**Palavras Chave:** Trocador de Calor - Motores - Arrefecimento - -



28 · 29 · 30  
de OUTUBRO

**XII SEGET**  
SIMPOSIUM DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
TEMA 2015  
Otimização de Recursos e Desenvolvimento



## 1 Introdução

Em 6 de maio de 1986 a resolução CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) nº 18 criou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, coordenado pelo IBAMA. O PROCONVE tem como objetivo definir os limites de emissão de poluentes por veículos leves contribuindo dessa forma para o atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar instituídos pelo PRONAR (Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar). Em 28 de outubro de 1993 a lei nº 8.723 endossou a obrigatoriedade de redução dos níveis de emissão de poluentes de origem veicular, contribuindo para induzir o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes de combustíveis, motores e autopeças e permitindo que veículos nacionais e importados passassem a atender os limites estabelecidos. O cumprimento dessas exigências é aferido por meio de ensaios padronizados em dinamômetro e com combustíveis de referência. A estratégia de implantação do PROCONVE para veículos leves seguem em fases (Fases “L”): *Fonte: RESOLUÇÃO CONAMA Nº 18, de 6 de maio de 1986*

### 1.1 Fase L5 2009 - 2013

Com os limites de emissão da Resolução CONAMA nº 315/2002, da mesma forma que na fase L4, a prioridade na fase L5 é a redução das emissões de HC e NO. De maneira análoga à fase L4, as inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica. Nesta fase deu-se a redução de 31% das emissões de hidrocarbonetos não-metano para os veículos leves do ciclo Otto e de 48% e 42% para as emissões de NOx para os veículos leves do ciclo Otto e Diesel, respectivamente. Além disso, as emissões de aldeídos foram reduzidas em, aproximadamente, 67% para os veículos do ciclo Otto.

### 1.2 Fase L6 A partir de 2013

A fase L6 determinou reduções de 67% e 65% nas emissões de CO e Nox, respectivamente, além de melhorias na qualidade dos combustíveis. A principal inovação tecnológica prevista nessa fase é a utilização de dispositivos/sistemas para auto diagnose (OBD), obrigatória para veículos automotores leves do ciclo diesel, a partir de 1º de janeiro de 2015.

Com o rigor no atendimento aos programas de redução das emissões nasce a necessidade das montadoras realizarem cada vez mais pesquisas, ensaios e análises em motores. Estes ensaios e análises que envolvem emissões de poluentes e desempenho dos motores necessitam ser realizado em célula de testes, ambiente que proporcione segurança aos controladores do dinamômetro, integridade do ensaio e precisão na obtenção de dados originados do funcionamento do motor.

Durante o projeto de uma montadora de veículos Francesa instalada na região sul fluminense para lançamento de novo motor 1.5 no mercado Brasileiro foi realizado um trabalho de elaboração de ensaio específico chamado de “C<sub>máx</sub>/P<sub>máx</sub> Térmico” cujo objetivo era submeter o motor a condições severas de funcionamento no que diz respeito à variação na temperatura de operação.

Tal ensaio implica manter o motor em funcionamento a um regime de rotação que varia ao longo de 8 horas de teste, *gráfico 1:*



Gráfico 1: Regime de rotação do motor em período de oito horas de teste (fonte: Software AVL Puma Open)

O ensaio consiste basicamente e alternar a temperatura do fluido de arrefecimento em ciclos ao longo do tempo de teste (*gráfico 2*) que variam entre 31° e 118° C, sabendo-se que a temperatura nominal do fluido durante operação normal do motor gira em torno dos 90° C.

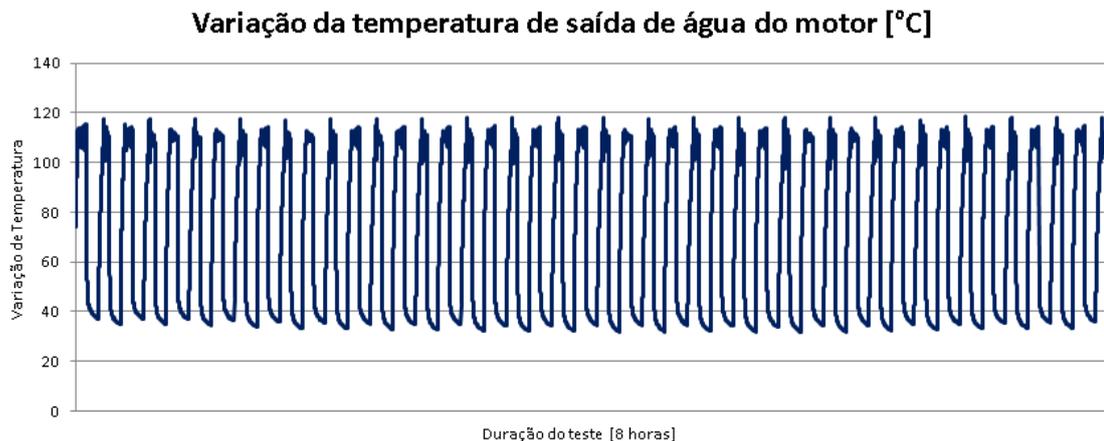


Gráfico 2 – Variação na temperatura na condição final de ensaio. (fonte: Software AVL Puma Open)

O objetivo da variação na temperatura é justamente submeter o motor a condições de funcionamento severas quanto à dilatação térmica dos componentes móveis metálicos, o que influencia diretamente no consumo de combustível e emissões de poluentes.

A dificuldade enfrentada durante a execução do ensaio foi a capacidade do trocador de calor em proporcionar o resfriamento do fluido de arrefecimento do motor em curto espaço de tempo, o que foi solucionado com ajustes realizados no próprio trocador de calor e também no controlador PID para adequação do equipamento ao ensaio desejado.

### 1.3 Célula de testes para motores

Célula de testes de motores de combustão interna é o conjunto de equipamentos, instrumentos e serviços aos quais operam juntos e sob supervisão de um operador, além de instruções e comandos previamente programados que controlam o funcionamento do motor, esforço do dinamômetro e aquisição de dados. Um dos principais componentes de uma célula de testes para motores é o dinamômetro que é capaz de medir a potência, e o trabalho executado pelo motor em um determinado espaço de tempo em diferentes condições de funcionamento. A célula de testes objeto deste estudo utiliza um dinamômetro de correntes de

Foucault que é constituído por um rotor acionado pelo motor em prova e que gira imerso a um campo magnético. A intensidade do campo é controlada por uma bobina alimentada por corrente contínua, dessa forma obtêm-se a variação desejada no esforço que é submetido ao motor. Este modelo de dinamômetro também utiliza sistema de resfriamento que em alguns casos é compartilhado com o sistema do motor.

## 1.4 Trocadores de Calor

Trocador de calor é um dispositivo utilizado na célula de teste de motor que tem a função de realizar a troca térmica entre dois ou mais fluídos de temperaturas diferentes. Trocadores de calor são amplamente utilizados em indústrias para transferência de calor em máquinas e equipamentos. A utilização de trocadores de calor é necessária toda vez em que houver um gradiente de temperatura entre diferentes fluídos onde a transferência de calor faz com que a temperatura dos fluídos sejam alteradas, em geral, um dos fluídos tem sua temperatura reduzida enquanto outro fluído tem sua temperatura elevada.

### 1.4.1 Trocador de calor do tipo placas

Os trocadores de calor do tipo placas são construídos por uma série de placas estampadas em aço inox dispostas lado a lado e separadas por gaxetas de borrachas. As placas são dispostas em uma estrutura metálica de forma que criam canais por onde flui o fluído. Estes canais têm por objetivo proporcionar ao fluído maior velocidade e turbulência evitando desta forma a estagnação líquida e maior transferência de calor.

A estrutura interna das galerias formadas faz com que o fluído frio percorra um lado da placa e o fluído quente percorra o outro lado. As gaxetas por sua vez fazem o papel de vedar e definir o sentido do fluxo de fluído. Como os fluídos fluem em sentidos opostos no interior das galerias, o fluído frio esquenta e o fluído quente esfria. Em sua estrutura externa são encontrados os bocais de entrada e saída de fluídos.

Este modelo de trocador de calor proporciona intensa troca de calor, pois os fluídos quentes e frios escoam em galerias alternadas, dessa forma, cada escoamento de fluído quente é cercado por dois escoamentos de fluído de frio (ou vice-versa) o que intensifica a transferência de calor. Outra grande vantagem deste modelo de trocador e objetivo deste estudo é a capacidade de adicionar ou remover placas em função da demanda de troca de calor.

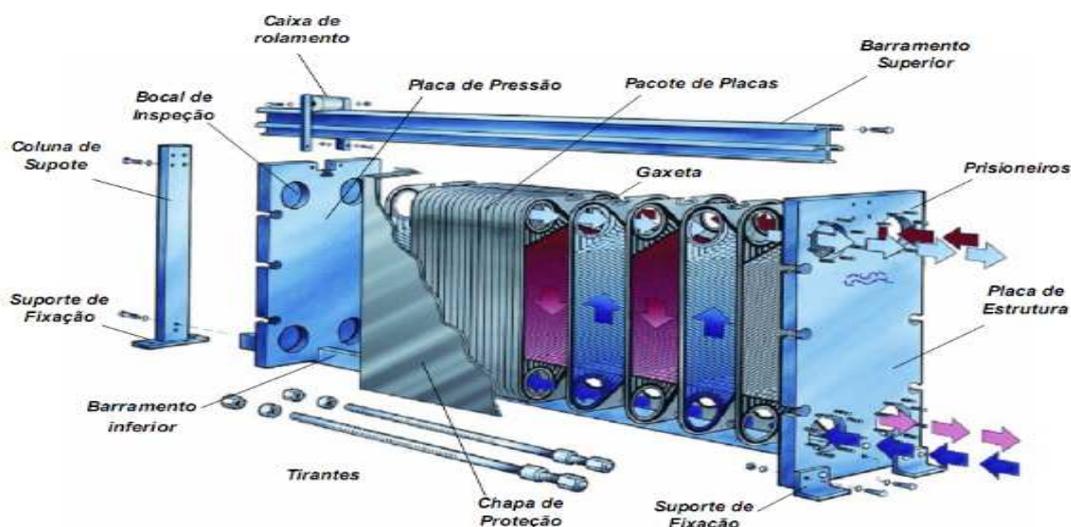


Figura 1: Exemplo de trocador de calor do tipo placas (Fonte: Catálogo Alfa Laval - [www.alfalaval.com.br](http://www.alfalaval.com.br))



28 · 29 · 30  
de OUTUBRO

**XII SEGET**  
SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
TEMA 2015  
Otimização de Recursos e Desenvolvimento



#### 1.4.1.1 As placas

As placas convencionais são corrugadas e comprimidas pela estrutura externa criando um arranjo de canais de fluxos paralelos. Um fluido circula pelos canais ímpares e outro pelos pares trocando calor.

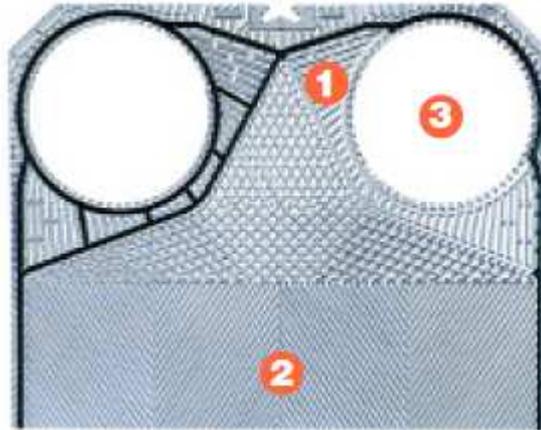


Figura 2: Estrutura interna de placa convencional (Fonte: Catálogo Alfa Laval - [www.alfalaval.com.br](http://www.alfalaval.com.br))

A placa pode ser dividida em três principais regiões:

1. Área de distribuição: Localizada na parte superior e inferior da placa. Esta área é responsável por garantir fluido seja distribuído uniformemente em toda a largura da placa, eliminando pontos mortos ou de estagnação do líquido.
2. Área de transferência de calor: Esta região cria uma maior turbulência proporcionando a máxima eficiência.
3. Canal de entrada: Tem a função de alimentar o trocador e as placas com os fluidos. Os canais de entrada devem garantir um controle no fluxo de fluido evitando erosões nas estruturas internas das placas.

#### 1.4.1.2 Alimentação das Placas

O arranjo das placas é definido acordo com as vazões dos fluidos, suas propriedades físicas, perda de carga e temperaturas.

O principal motivo pelo uso deste modelo de trocador de calor em células de testes de motores se dá pelo fato de que o fluido quente (motor) e frio (refrigerador) não se misturam, importante condição, tendo em vista que o sistema de arrefecimento dos motores utilizam uma proporção aproximada de 50% de aditivo antioxidante e anticongelante e 50% de água destilada, variando de acordo com as especificações do fabricante e o fluido do sistema de resfriamento do trocador de calor utiliza água industrial.

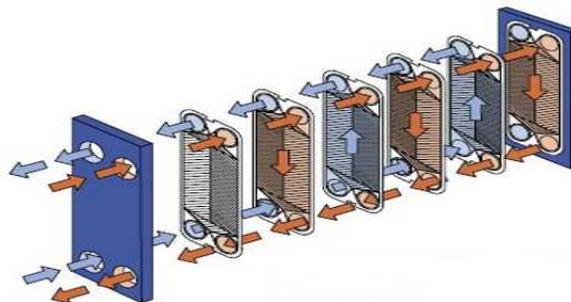


Figura 3: direcionamento do fluxo (Fonte: Princípio de funcionamento trocador de calor <http://vmbrasil.com/>)

## 1.5 Controladores PID

Controlador PID, de significado Proporcional – Integral – Derivativo é um sistema de controle amplamente utilizado em indústrias. Os controladores PID apresentam alta robustez em diversas aplicações e nas mais variadas condições de funcionamento. *Fonte: National Instruments* - <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>

Será priorizado nesta pesquisa o estudo de controladores PID dedicados a sistemas de controle de temperatura ao qual será aplicado ao circuito de abastecimento e retorno de fluido de arrefecimento do motor montado em uma célula de testes para motores.

O princípio básico de operação de um controlador PID aplicado a sistemas de controle de temperatura em célula de testes se dá inicialmente pela leitura de um sensor, neste caso, da temperatura do fluido de arrefecimento que sai do motor, em seguida o controlador lógico realiza os cálculos necessários para fornecer a proporcionalidade, integral e derivativo. A partir deste momento, com o resultado destes componentes é calculada a saída, que por sua vez é enviado ao mecanismo de controle.

Para sistemas como o de controle da temperatura [°C], um sensor é utilizado para fornecer a informação da temperatura de saída de água do motor ao sistema de controle. Set Point é o valor desejado, em nossa aplicação, este valor é fornecido pelo controlador do teste de acordo com o ensaio selecionado. A partir do momento em que o set point é definido pelo controlador de teste, o controlador PID efetua os cálculos que resulta em um comando ao atuador, que controlará o fluxo de fluido e conseqüentemente ajuste da temperatura desejada.

## 2 Estudo de caso

Ao iniciar o teste denominado “Cmáx/Pmáx Térmico” foram observados resultados inesperados no comportamento dos dados obtidos no que diz respeito à variação da temperatura de saída de água do motor, tendo em vista que o ensaio selecionado possui uma característica específica quanto a sua variação de temperatura que deve ser entre 31°C e 118°C, no entanto os valores obtidos deixavam evidentes uma defasagem no tempo de resfriamento do fluido de arrefecimento do motor, bem como na capacidade resfriamento do fluido a temperatura mínima desejada (*gráfico 3*), após uma rápida análise foi possível determinar em se tratar de uma condição do equipamento, já que a temperatura normal de trabalho do fluido do motor em outros ensaios se mantém próximo dos 95°C. Ou seja, o equipamento até então instalado e que nunca havia sido submetido à realização de tal ensaio atendia perfeitamente as condições esperadas.

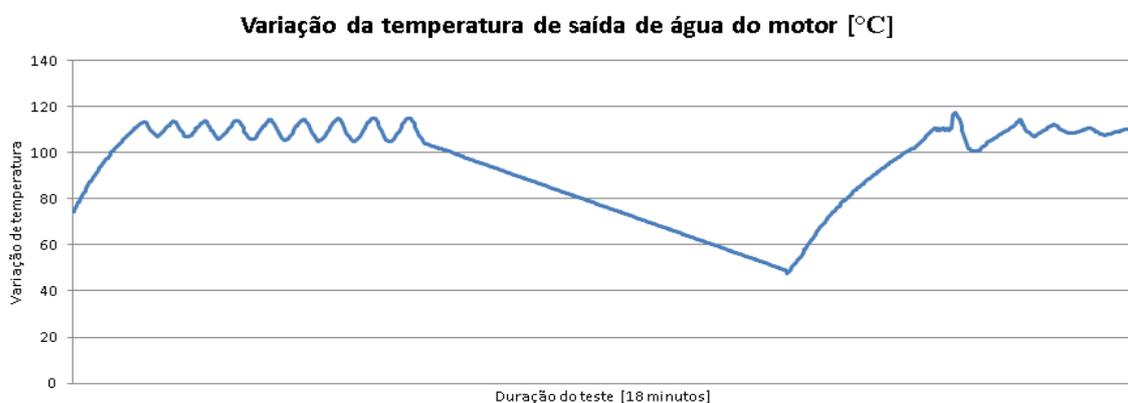


Gráfico 3 - Variação na temperatura na condição inicial de ensaio (fonte: Software AVL Puma Open)

A partir deste momento o ensaio foi abortado, onde as equipes de qualidade e manutenção seguiram em busca de soluções para que o trocador de calor atenda a demanda necessária de resfriamento para o teste proposto. Ao analisar as placas do trocador de calor foi observada a presença de 20 placas, que representa 10 placas permitindo a passagem de fluido de origem do motor (arrefecimento do motor) e 10 placas permitindo a passagem de fluido de origem da utilidade (resfriamento do trocador).

Devido a fatores que impossibilitaram a consulta ao fabricante do trocador de calor (ALFA LAVAL), a equipe de manutenção iniciou de forma empírica a instalação de novas placas permitindo uma maior capacidade de troca de calor do equipamento. Foram instaladas 10 novas placas, o que resultou em 15 placas de fluido de arrefecimento do motor e 15 placas de água gelada para resfriamento.

Além da instalação de novas placas ao sistema de troca de calor, um grande trabalho de ajuste do controlador PID precisou ser realizado. Os ganhos do controlador também foram obtidos pelo método de tentativa e erro, uma vez que a experiência dos técnicos em manutenção e operadores da sala de testes foi primordial para se alcançar o objetivo de proporcionar uma troca de calor precisa para o fluido do motor ensaiado.

O objetivo foi alcançado. Um teste preliminar de 17 minutos foi realizado para confirmação dos resultados esperados (*gráfico 4*) e o trocador de calor atingiu a temperatura mínima no tempo exigido.



Gráfico 4 - Variación na temperatura na condição final de ensaio (fonte: Software AVL Puma Open)

Sobrepondo os resultados antes e depois da aplicação das novas placas e ajuste do controlador PID é possível observar o ganho obtido (*gráfico 5*), onde as curvas em vermelho representam os dados utilizando-se 20 placas no trocador de calor, enquanto as curvas em azul representam os dados utilizando-se 30 placas e após ajuste do controlador PID.



Gráfico 5 - Variación na temperatura na condição final de ensaio (fonte: Software AVL Puma Open)

### 3 Conclusão:

Com programas governamentais cada vez mais exigentes no intuito de reduzir e controlar a contaminação atmosférica por veículos automotores, as montadoras correm contra o tempo para adequar seus produtos as legislações vigentes. Mas, desenvolver grupos motopropulsores que atendam as limitações de emissões de poluentes na atmosfera exigem testes e ensaios cada vez mais rigorosos e que muitas vezes esbarram na capacidade das indústrias, em específico com máquinas e equipamentos que exigem investimentos e melhorias para atender tais ensaios. Dentre as dificuldades encontradas, destaca-se o momento em que após a concepção do produto, o mesmo é submetido a uma grande quantidade de horas de ensaios rigorosos, momento este onde os engenheiros e técnicos se deparam com dificuldades, muitas vezes pelo lado do produto, mas também, pelos equipamentos, que demandam investimentos e ajustes para atender os ensaios.

### Referências

MIGUÉIS, César Augusto Corrêa – Projeto de componentes da Célula de testes para motores de combustão interna do LMT. 2014. – *Utilizado no item 1.1*

BOSCH, Robert – *Manual da Tecnologia Automotiva*. 25ª Ed. – Editora: Edgard Blücher – 2005 - *Utilizado no item 1.1*

Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROVONVE. Ministério do Meio Ambiente.

[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE\\_atualizado%20em%2021nov13.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado%20em%2021nov13.pdf) - *Acessado em 24/05/2015*

CLAUDIO, José – Dinamômetros - <http://www.joseclaudio.eng.br/dinos1.html> - *Acessado em 24/05/2015*

Trocadores de calor do tipo placas - <http://vmbrasil.com/portfolio/alfa-laval/trocador-de-calor-a-placas-gaxetado/> - *Acessado em 26/05/2015*

[http://www.vmbrasil.com/Trocadores\\_port.pdf](http://www.vmbrasil.com/Trocadores_port.pdf) - *Acessado em 26/05/2015*

National Instruments - Explicando a Teoria PID

<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/> - *Acessado em 27/05/2015*