



# Dimensionamento de um trocador de calor compacto para um veículo do tipo Fórmula utilizando MatLab®

*Design of a compact heat exchanger for a Formula-type vehicle using MatLab®*

Matheus Lucca Versuti Viégas      Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto

## RESUMO

A competição nacional de Fórmula SAE reúne milhares de estudantes de Engenharia anualmente. Os participantes projetam e constroem um veículo do tipo Fórmula e competem em etapas estáticas e dinâmicas. O sistema de arrefecimento do veículo é imprescindível para o bom funcionamento do protótipo nas provas dinâmicas. O presente trabalho visa dimensionar o radiador do veículo com a criação de uma ferramenta computacional utilizando o MatLab®. Para o dimensionamento do trocador, as especificações do problema, propriedades dos fluidos e características da superfície do trocador devem ser conhecidas. A taxa de transferência de calor requerida pelo radiador foi obtida segundo a curva de potência (hp) e rotações do motor (rpm), utilizando simulação feita no software Ricardo Wave, enquanto as vazões mássicas, as propriedades dos fluidos e características da superfície foram encontradas na literatura. Utilizando o método da efetividade-NTU e uma iteração de doze passos, a área total de troca de calor, o volume total e as dimensões do trocador são encontrados. Os resultados encontrados para a equipe Fórmula – CP, apesar de ainda necessitarem validação, são satisfatórios e mostram uma redução no volume total em relação ao trocador utilizado atualmente pela equipe, garantindo redução de massa e melhora na *performance* do veículo.

**Palavras-chave:** Fórmula SAE, dimensionamento, radiador, MATLAB.

## ABSTRACT

The national Formula SAE competition brings together thousands of engineering students annually. Participants must design and build a Formula-type vehicle that competes in static and dynamic tests. The vehicle's cooling system is essential for the proper functioning of the prototype in the Endurance test. The present work aims to design the vehicle's radiator with the creation of a computational tool using MatLab®. For exchanger sizing, the problem specifications, fluid properties and exchanger surface characteristics must be known. The heat transfer rate required by the radiator was obtained according to the power (hp) and engine revolutions (rpm) curve found in simulation made by the Ricardo Wave software, while the mass flow rates, fluid properties and surface characteristics have been found in the literature. Using the NTU-effectiveness method and a twelve-step iteration, a total heat exchange area, total volume and dimensions of the exchanger are found. The results found for the Formula - CP team, despite still needing validation, are satisfactory and show a reduction in the total volume in relation to the exchanger currently used by the team, ensuring a reduction in mass and improvement in vehicle performance.

**Keywords:** Formula student, sizing, radiator, MATLAB.

## 1 INTRODUÇÃO

Organizada anualmente pela Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE), a competição nacional de Fórmula SAE é uma oportunidade de aplicação dos conhecimentos teóricos dos estudantes de Engenharia (SAE BRASIL, 2021). A equipe, formada por alunos, deve desenvolver um projeto completo de um veículo



do tipo *open-wheel* e, ainda, construí-lo. As habilidades requeridas pelo evento (comunicação, gestão de projeto, gerenciamento de recursos, etc) são valiosas para o mercado de trabalho, e os participantes têm a chance de colocá-las à prova diante de grandes empresas da mobilidade (SAE, 2021).

Dentre as etapas realizadas pela equipe, a prova de *Endurance* representa metade da pontuação possível para a etapa de dinâmica, e requer que o veículo realize um percurso de 22 quilômetros. Caso a equipe consiga completar a prova, recebe uma pontuação baseada no tempo de realização (KORCZAK, 2009).

Diante do desafio de assegurar que todos os sistemas se mantenham em pleno funcionamento durante o *Endurance*, é necessário destacar a importância do sistema de arrefecimento em veículos com motores refrigerados à água, responsável por garantir que o motor se mantenha na sua temperatura ótima de trabalho (KIM, 2008).

Para garantir que as demandas de confiabilidade do sistema e redução de massa do carro sejam atendidas, se mostra imperativo o correto dimensionamento do trocador de calor compacto. Caso seja superdimensionado, a massa adicional afetará a *performance* geral do veículo. O subdimensionamento, entretanto, traz o superaquecimento do motor do veículo. Com isto em mente, como dimensionar o radiador do veículo de forma automatizada?

## 2 MÉTODO

Segundo Kays e London (2018), o projetista deve ter como parâmetros de entrada: as especificações do problema, as características da superfície do trocador, e as propriedades físicas dos materiais envolvidos. Estes parâmetros de entrada serão utilizados durante o dimensionamento para encontrar as possíveis soluções para o problema em questão, visto que como resultados serão encontrados valores de área frontal, volume e perda de pressão do trocador, possibilitando geometrias e dimensões variadas que atinjam os mesmos resultados.

### 2.1 Especificações do problema

As especificações do problema dizem respeito: à especificação dos fluidos utilizados, à necessidade energética imposta ao trocador, às vazões mássicas (dos dois fluidos envolvidos) e ao material de construção.

A temperatura média prevista para o mês da competição é de 23,8°C segundo CLIMATE-DATA.ORG. Para a temperatura da água, é considerada a faixa de temperatura 86°C – 95°C, seguindo o catálogo do motor.

Os fluidos utilizados no trocador em questão serão ar ambiente e água, visto que o regulamento da competição nacional de Fórmula SAE determina que o líquido de arrefecimento seja água pura (SAE, 2021).

Segundo Quim (2007) um terço da potência do motor representa a taxa de transferência de calor requerida para que ele se mantenha na temperatura ótima de trabalho. Através do *software* “Ricardo WAVE – Engine Performance” (RICADOR PLC, 2021) foi determinada a potência do motor e conseqüentemente a necessidade energética imposta ao trocador

Devido à impossibilidade de realizar a medição da vazão mássica de água por meios próprios, visto que até a data de publicação deste trabalho o veículo não se encontra em pleno funcionamento, os dados aqui apresentados foram encontrados por outros autores, que aferiram estes valores em motores do tipo Honda CB600F. Ramos (2017) calculou a vazão mássica da água utilizando um manômetro para água quente, fazendo a medição em faixas diferentes de rotações do motor. Enquanto que Kuntzer (2015), devido à falta de instrumentação, fez a medição do fluxo de água com o sistema aberto à pressão atmosférica, com o sistema à aproximadamente 90°C. Os valores são de 1,09 e 0,95 kg/s respectivamente.



A vazão mássica do ar na entrada do radiador tem uma influência muito forte na capacidade de transferência de calor do radiador e na *performance* geral do sistema de arrefecimento (KIM, 2008), uma vez que o coeficiente global de transferência de calor do radiador (U) é predominantemente controlado pelo coeficiente de transferência de calor do ar (h) (WATKINS, 2004). A vazão de um fluido pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\dot{m}_{ar} = A_{fr} * \rho_{ar} * vel_{ar} \quad (1)$$

Onde:

$A_{fr}$  – área frontal do radiador

$\rho_{ar}$  – densidade do ar ambiente

$vel_{ar}$  – velocidade do ar na entrada do radiador.

Foi utilizada a área do atual trocador de calor da equipe como sendo uma aproximação de  $A_{fr}$ . A densidade foi obtida na tabela A.4 (INCROPERA, 2011). Porém, a literatura diverge quando se trata de cálculo da velocidade do ar na entrada do radiador. Borsatti (2010) afirma que não há uma redução significativa da velocidade de fluxo livre do ar até a entrada do radiador, já Korczak (2009) utiliza um anemômetro de fio aquecido, produzido pela Omega Engineering, modelo HHF42. Devido à essa diferença, foi considerado um valor médio entre os autores como uma aproximação. Futuramente, um valor proveniente de teste empíricos deve ser utilizado.

Por fim optou-se por alumínio como material de construção do radiador por ser um metal de baixa densidade, aumentando assim a eficiência do veículo (TAKASHI, 1992).

## 2.2 Características da superfície

São um conjunto de dados sobre a construção de um determinado núcleo de radiador. Os dados são divididos entre o lado do ar (aletas) e da água (tubos) e foram compilados e apresentados na obra de Kays e London (2018). A superfície denominada 9.68-0.87R é a que mais se aproxima da geometria do núcleo do radiador atual, produzido pela MasterCooler.

## 2.3 Propriedades termo físicas da matéria

As propriedades termo físicas da matéria são assim chamadas pois variam conforme a temperatura do fluido estudado. Normalmente, são avaliadas na chamada temperatura de filme, que neste caso será adotada como a simples média aritmética entre as temperaturas de entrada e saída de cada fluido. Os dados para o ar e água foram retirados das tabelas A.4 e A.6 de INCROPERA (2011), respectivamente.

## 2.4 Procedimento para o dimensionamento

### 2.4.1 Método da efetividade-NTU

O dimensionamento de um radiador automotivo visa encontrar a área de transferência de calor requerida para que a temperatura de saída prescrita seja atingida. Portanto foi utilizado do método da Efetividade-NTU, defendido por Kays e London (1984) e descrito a seguir.

A efetividade de um trocador de calor pode ser calculada por:



$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \text{ ou } \varepsilon = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2)$$

O número de unidades de troca (NTU) é um parâmetro adimensional utilizado na análise de trocadores de calor, definido por:

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}} \quad (3)$$

Com (U) sendo o coeficiente global de transferência de calor e (A) a área total de transferência de calor.

Kays e London (1984) fornecem, em seu trabalho, as relações entre efetividade e NTU para cada tipo de escoamento. No caso do radiador automotivo estudado, o escoamento é do tipo cruzado, com os dois fluidos não-misturados. Para este tipo de escoamento, não é possível expressar a solução analítica em uma equação. Portanto, uma tabela que relaciona efetividade, NTU e a razão entre  $C_{min}$  e  $C_{max}$  é utilizada.

#### 2.4.2 O processo iterativo

Para dar início ao processo iterativo, as condições de contorno devem ter sido definidas. O procedimento para dimensionamento proposto por Kays e London faz uso de um processo iterativo que visa encontrar a área total de troca de calor (de ambos os lados), o volume total do trocador e as dimensões ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ).

O procedimento utiliza como variável iterativa a velocidade mássica (G). Ela seria normalmente calculada como a razão entre a vazão mássica do fluido ( $\dot{m}$ ) e área de escoamento livre ( $A_c$ ), entretanto, como a área de escoamento livre não é conhecida, a obra propõe o cálculo da velocidade mássica (G) a partir de uma aproximação, apresentada abaixo:

$$G = \sqrt{\frac{StPr^{2/3}}{f} * \frac{\Delta P}{NUT} * \frac{g_c}{v_m Pr^{2/3}}} \quad (4)$$

A razão ( $StPr^{2/3}/f$ ) é encontrada utilizando as tabelas fornecidas na obra de Kays e London, e são relacionadas ao número de Reynolds. As tabelas são específicas para cada superfície de trocador de calor. Uma vez que o número de Reynolds será calculado a partir da velocidade mássica, é necessária uma estimativa inicial para essa razão (chamada de Fator Colburn), e os autores da obra afirmam que 0,3 é uma boa estimativa.

Com base na velocidade mássica inicial calculada, doze etapas de cálculos devem ser efetuadas em sucessão. Estas etapas estão descritas abaixo:

- 1) Re – Número de Reynolds
- 2)  $StPr^{2/3}$  – Fator de Colburn
- 3)  $f$  – Fator de atrito
- 4)  $h$  – Coeficiente de transferência de calor
- 5)  $\eta_f$  – Eficiência de uma aleta
- 6)  $\eta_o$  – Eficiência global das aletas
- 7)  $U$  – Coeficiente global de transferência de calor
- 8)  $A$  – Área total de transferência de calor
- 9)  $V$  – Volume total do trocador de calor
- 10)  $ac$  e  $bc$  – Áreas frontais do trocador ( $ac$  sendo a área frontal do ar e  $bc$  da água)



- 11)  $a, b$  e  $c$  – Dimensões do trocador
- 12)  $\Delta P$  – Queda de pressão

Ao fim de cada ciclo, um novo valor para a velocidade mássica ( $G$ ) deve ser calculado, e um novo ciclo se inicia. A iteração deve ser feita para cada um dos fluidos e converge quando a queda de pressão calculada esteja suficientemente próxima da queda de pressão desejada.

## 2.5 Implementação do dimensionamento em MATLAB

A fim de acelerar o processo de dimensionamento de um radiador para a equipe e de diminuir os possíveis erros que o cálculo manual pode trazer, o autor deste trabalho decidiu criar uma rotina no programa MATLAB®. O programa depende que o usuário forneça as especificações do problema, as características da superfície e as propriedades termo físicas da matéria, portanto, estes devem ser conhecidos antes da utilização da rotina.

### 2.5.1 Leitura dos dados de entrada

O programa recebe inicialmente os dados de condutividade térmica do material e a espessura desejada para o trocador. Em seguida o usuário insere as características de superfície tanto para o lado da água quanto para o lado do ar. Por fim o usuário é responsável por obter as propriedades termo físicas dos fluidos e, caso necessário interpolá-las antes da utilização do programa.

### 2.5.2 Rotinas de cálculos

Na primeira rotina o programa calcula capacidade calorífica de ambos os fluidos ( $C$ ), em seguida determina apenas a efetividade do trocador ( $\epsilon$ ), para que depois seja encontrado o número de unidades de troca (NTU) a partir de interpolações dos dados disposto nas tabelas fornecidas por Kays e London.

### 2.5.3 A iteração

Logo antes de começar a iteração, o usuário deve inserir suas estimativas iniciais para o cálculo da vazão mássica e, ainda, inserir a queda de pressão desejada, para ambos os fluidos.

Por fim, o programa segue os doze passos descritos por Kays e London, afim de calcular as seguintes informações:

- As dimensões  $a, b$  e  $c$  do trocador de calor
- As áreas frontais, do lado do ar ( $ac$ ) e da água ( $bc$ )
- O volume total do radiador
- As perdas de pressão (do lado do ar e da água)
- O número de aletas no núcleo

## 3 RESULTADOS

Quando utilizados os dados descritos na seção 2.1 até 2.3., de modo a encontrar um radiador compatível com o problema, o programa retornou como resposta:

- Altura –  $a$ : 579,29 mm



- Espessura –  $b$ : 60 mm
- Largura –  $c$ : 129,84 mm
- Área frontal (lado do ar) –  $ac$ : 34961,82 mm<sup>2</sup>
- Área frontal (lado da água) –  $bc$ : 7790,16 mm<sup>2</sup>
- Volume total –  $V$ : 4512764,26 mm<sup>3</sup>
- Queda de pressão do ar –  $\Delta P_{ar}$ : 449,72 Pa
- Queda de pressão da água –  $\Delta P_{agua}$ : 1281,77 Pa
- Número total de aletas –  $N_{aleta}$ : 221 aletas

Estes valores representam uma redução de 10% no volume quando comparados com o radiador atualmente utilizado pela equipe. Essa redução se traduz em significativa redução de massa do protótipo sem aumento do risco de superaquecimento do protótipo.

#### 4 CONCLUSÃO

A ferramenta criada possibilita o dimensionamento de um trocador de calor compacto desde que inseridas as informações necessárias: especificação do problema, características da superfície de troca e características dos fluidos. Entretanto, para que ela seja confiável e possa ser utilizada pela equipe, será necessário adquirir empiricamente os valores de vazão mássica de ambos os fluidos, bem como uma decisão fundamentada de qual a perda de pressão desejada para cada fluido, pois como precedentemente discutido, a precisão destes valores vai determinar a qualidade do dimensionamento.

Ainda, é imperativo ressaltar que a ferramenta deverá ser validada, ou seja, o radiador dimensionado pela aplicação deve ser construído, instalado no carro, e testes empíricos devem ser conduzidos para determinar a quantidade de calor trocada e sua efetividade, e estes valores devem ser comparados com a previsão inicial.

#### REFERÊNCIAS

- KORCZAK, P.E. **Cost effective method for the evaluation of a Formula SAE engine cooling system**. University Of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2009.
- KIM, H.J. **A numerical analysis for the cooling module related to automobile air-conditioning system**. Science Direct, Applied Thermal Engineering 28, 1896–1905, 2008.
- BORSATTI, E.J. **Estudo do sistema duto-trocador de calor compacto para veículos de competição**. Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo, São Paulo, 2010.
- KAYS, W.M., London, A.L. **Compact Heat Exchangers**. MEDTECH, 2018.
- INCROPERA, F. P., et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, 2011.
- RAMOS, B.Z. **Seleção de um trocador de calor compacto para um protótipo tipo Fórmula SAE**. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017
- NG, E. Y., Watkins, S., Johnson, P.W. **New Pressure-Based Methods for Quantifying Radiator Airflow**. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering, 2004. 218: 361
- TAKAHASHI, H., Ogino, S., Nishimura, T., Okuno, Y. **Experimental Analysis for the Improvement of Radiator Cooling Air Intake and Discharge**. International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February 24-28, 1992.