

Análise do escoamento de ar no coletor de admissão de motor 1.6 utilizando ferramentas CFD

Rafael de Lira Pessoa Mota, rafaelpmota.rm@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife – PE, 50670-901.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo principal simular e avaliar a performance através de ferramentas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) do escoamento de ar através do coletor de admissão de um motor de carro de popular. A função primária do coletor de admissão é entregar a mistura ar-combustível para os cilindros do motor gerando a menor perda de carga possível. Também é função do coletor garantir uma distribuição uniforme da mistura, para que o processo de combustão em cada cilindro ocorra com as mesmas características, garantindo uma boa qualidade de operação. Os aspectos operacionais foram investigados neste trabalho para o coletor de admissão de ar do motor E.torQ 1.6 EVO fabricado pela FPT (Fiat Powertrain), dotado de 4 cilindros em linha, cada um com duas válvulas de admissão e duas de escape, totalizando 16 válvulas ao todo. Simulações CFD foram realizadas usando o software CFX da empresa ANSYS, onde foram investigadas perdas de carga, distribuição de ar e formação de vórtices. As simulações foram realizadas admitindo-se um regime permanente e sem perdas de calor pelas paredes do coletor de admissão. Após verificação dos resultados da simulação computacional foi notado perda de carga considerável nos dutos 2 e 3. Além disso, uma distribuição não uniforme de fluxo foi notada entre os dutos que conduzem o ar aos cilindros, podendo ser verificado na análise das linhas de corrente. Os resultados numéricos obtidos podem possuir algumas diferenças com a realidade, visto que uma simulação ideal reconheceria um estado transiente, levando em consideração as mudanças de condições de contorno de acordo com a abertura e fechamento das válvulas. Dados de experimentos práticos com o motor E.torQ 1.6 EVO seriam necessários para esse tipo de simulação. Apesar do autor não possuir esses dados, os resultados obtidos condizem com testes reais conduzidos com motores em regimes semelhantes.

Palavras-chave: Coletor de admissão, motor de combustão interna, CFD.

1. INTRODUÇÃO

Recentes avanços na simulação computacional proporcionaram novos métodos de projeto e manufatura na indústria automotiva. Safwan *et al.* (2009), afirma que ainda que esses resultados oriundos de métodos numéricos (CFD/FEA) são compatíveis com estudos experimentais, ainda há diversos estudos para aprimorar os resultados das simulações.

Essas inovações na indústria automotiva foram impulsionadas não apenas pela constante demanda de usuários para possuírem automóveis cada vez mais potentes, mas também em ordem da diminuição do impacto ambiental causado por carros no meio-ambiente.

As crescentes emissões de CO₂, como consequência da queima de combustíveis fósseis no interior dos motores de combustão interna fizeram projetistas e engenheiros repensarem cada vez mais os sistemas que formam os motores, além de aumentar o conhecimento sobre eles. Um desses sistemas objeto de novos estudos é o de admissão de ar.

É sabido que um motor de combustão interna de um carro precisa de ar para garantir o processo de combustão no interior dos cilindros. Brunetti *et al.* (2012), afirma que o coletor pode ter o formato de simples dutos ou ter a adição de um volume chamado plenum. Pode até formar sistemas complexos com várias câmeras, dutos de diferentes comprimentos e borboletas para desviar o fluxo (coletores de admissão variáveis).

O coletor de admissão de ar tem a importante função de garantir a quantidade de ar necessária para uma combustão eficiente e menor produção de gases poluentes. O ar aspirado entra nas câmeras de combustão através dos dutos do coletor, cujo plenum distribui o fluxo o mais uniformemente possível entre eles. São nos dutos do coletor que ocorrem a mistura do ar fresco com gasolina, no caso dos motores de ignição por faísca. Isso exige que a distribuição de ar seja a mais uniforme possível, pois a quantidade de gasolina injetada depende da massa de ar aspirada para cada duto. De acordo com Safwan *et al.* (2009), para otimizar o fluxo através do sistema de admissão é necessário um entendimento mais aprofundado da sua natureza, das distribuições de velocidades e perdas de carga.

A importância de reunir mais conhecimento acerca do fluxo de ar através do coletor é que esse entendimento pode levar ao desenvolvimento de equipamentos e peças do sistema de admissão mais eficientes, permitindo uma maior vazão de ar para os cilindros, fator fundamental pois a potência do motor se relaciona diretamente com a vazão mássica de ar, como mostrado na Eq. 1 abaixo, onde N_i representa a potência indicada em kW, m_a a vazão mássica de ar seco que escoar para os cilindros em kg/s, F é a relação combustível-ar estequiométrica, η_t eficiência térmica do motor e PCi o poder calorífico inferior dado em kJ/kg.

$$N_i = m_a * F * PCi * \eta_t \quad (1)$$

Um componente que não está presente em todos os motores, mas é essencial para uma maior performance dos mesmos, é a sobrealimentação. A mais eficiente é o turbocompressor, ele funciona elevando a pressão do ar que entra nos cilindros, utilizando a energia que seria perdida oriunda dos gases de escapamento para acionar a turbina, que por sua vez, possui um eixo compartilhado com o compressor para ativa-lo, injetando ar comprimido para o plenum.

A grande maioria da literatura consultada apresentou simulações CFD em coletores de admissão com todos os dutos abertos. No entanto, segundo D'Mello *et al.* (2016), essa condição não condiz com a realidade, em condições reais para motores de 4 cilindros, apenas 2 dutos (baseados na ordem de disparo) ficariam abertos. Os outros dois permaneceriam fechados. Uma condição de simulação semelhante foi feita nesse trabalho.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para atingir os objetivos desse trabalho, simulações computacionais usando ferramentas CFD foram realizadas com as condições de contorno apropriadas. O Software de simulação 1-D GT-Power foi usado para adquirir as condições de contorno. O GT-Power é um programa pertencente a empresa Gamma Technology, usado para simular pressão, temperatura, vazão de ar e diversas outras propriedades em várias partes do motor. É designado para simular diversos tipos de motores de combustão interna, usando dinâmica dos gases unidimensional para representar o fluxo e a transferência de calor nos componentes do modelo de motor.

Esta pesquisa teve como objeto de estudo o coletor de admissão do motor E.torQ 1.6 EVO fabricado pela FPT (Fiat Powertrain), composto pelo plenum e os dutos que direcionam a mistura ar e combustível para os cilindros. A Figura 1 mostra esses componentes. Outras partes do sistema de admissão como filtro, acelerador e outros dutos não foram abordados.

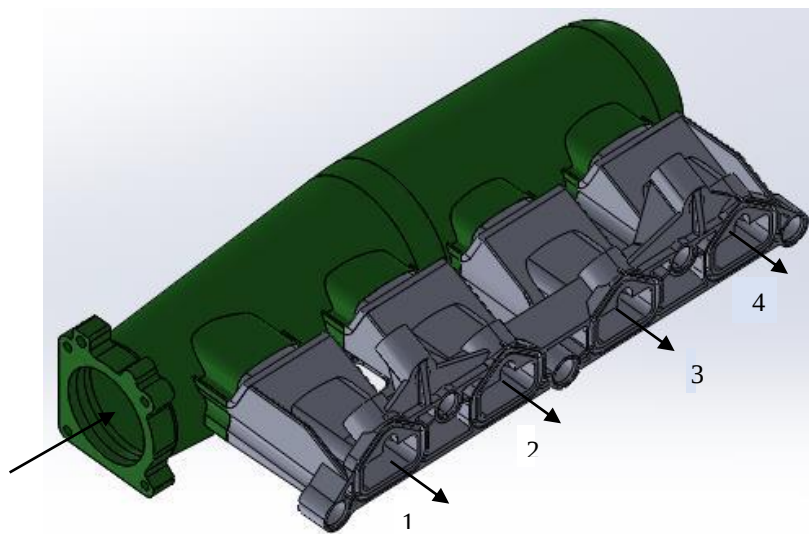


Figura 1. Plenum e dutos do coletor de admissão do motor E.torQ 1.6 EVO

Setas presentes na Fig. 1 indicam as direções de entrada e saída de fluxo. A sequência de abertura dos cilindros usada foi de 4-1-2-3, então, enquanto os dutos 4 e 2 estiverem abertos os dutos 1 e 3 estarão fechados. A condição inversa também foi aplicada.

Como citado em Heywood *et al.* (1988), a rotação do motor varia de acordo com a potência, e consequentemente, a massa de ar através dos cilindros também mudará. Portanto, é necessário escolher em qual faixa de operação as simulações ocorrerá. Para esse trabalho foi escolhida uma rotação de 4500 rpm, pois de acordo com as especificações técnicas do motor, oferece o maior torque, cerca de 152 Nm. Portanto, duas condições de simulação foram criadas, uma com o ar escoando para os cilindros 4 e 2, e outra escoando para os cilindros 1 e 3, ambas ocorrendo com a rotação de 4500 rpm.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Como a análise da pesquisa se deu usando um programa de simulação numérica, o primeiro passo da metodologia foi definir o domínio numérico do objeto de estudo. Se tratando de um problema de escoamento interno o domínio numérico compreende todo o volume interno do coletor, ou seja, o volume ocupado pelo fluido. A Figura 2 mostra esse volume interno extraído.

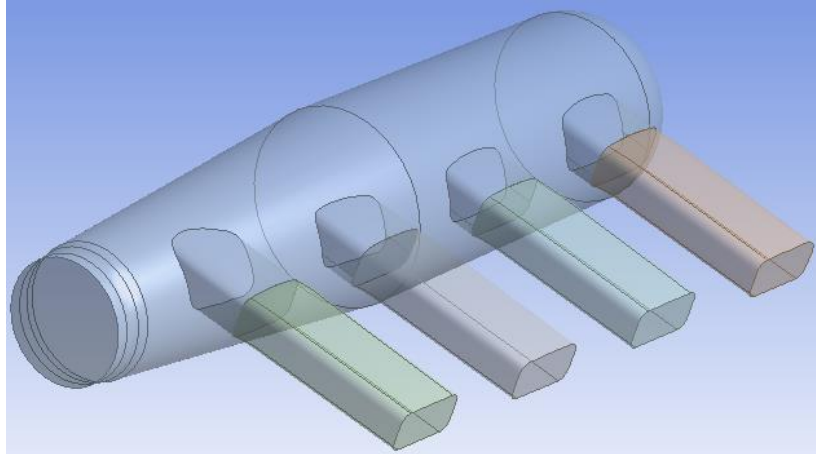


Figura 2. Volume interno do coletor de admissão.

Após extrair o domínio numérico os passos seguintes foram geração de uma malha adequada para o problema, aplicar as condições de contorno obtidas do GT-Power, obter a solução das equações de governo que compõe o modelo matemático, obter e avaliar os resultados.

3.1. Modelo Matemático

As equações de governo que precisam ser resolvidas para análise de escoamento de fluidos são as de conservação de massa, conservação de momento e conservação de energia, o conjunto dessas equações, quando expostas de forma diferencial, formam as equações de Navier-Stokes. Como no problema tratado o escoamento foi considerado incompressível, ou seja, a densidade do fluido é constante, a equação de conservação de energia, baseada na primeira lei da termodinâmica, não é aplicada. Abaixo as Eq. (2) e Eqs. (3) representam, em coordenadas cartesianas, a conservação de massa e momento, respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \quad (3)$$

Nas equações acima u , v e w representam respectivamente as velocidades nos eixos x , y e z . ρ é a densidade e μ a viscosidade dinâmica.

Segundo Fortuna *et al.* (2000), as equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não-lineares em praticamente todas as situações reais. Em alguns casos, tais como no fluxo unidimensional e no escoamento de Stokes, estas equações podem ser simplificadas em equações lineares.

O software usado para solução das equações de governo é o CFX, o mesmo usa o método dos volumes finitos para atingir a solução numérica das equações. A ideia principal do método dos volumes finitos é dividir o domínio fluido em elementos infinitesimais de volumes de controle e aplicar as equações de conservação nesses volumes, como resultado, se obtém uma serie de equações diferenciais para cada elemento infinitesimal. O software obtém a solução por meio de interações numéricas, que serão finalizadas quando atingir algum critério especificado.

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Todas as atividades de pré-simulação como limpeza da geometria exportada, extração do volume fluido, geração de malha e aplicação das condições de contorno foram realizadas em softwares da ANSYS. Uma malha não-estruturada composta por 567690 elementos tetraédricos e prismáticos e 200050 nós foi escolhida para discretizar o volume numérico, como mostrado abaixo na Fig. 3. Uma análise da qualidade da malha foi feita usando a qualidade Skewness, que leva em consideração o quão próximo do ideal os elementos se encontram, ou seja, o mais próximo de serem equiláteros equiângulos eles estão. A malha do problema apresentou uma média de Skewness de 0.24, o que corresponde a elementos de excelente qualidade por estar entre 0 e 0.25.

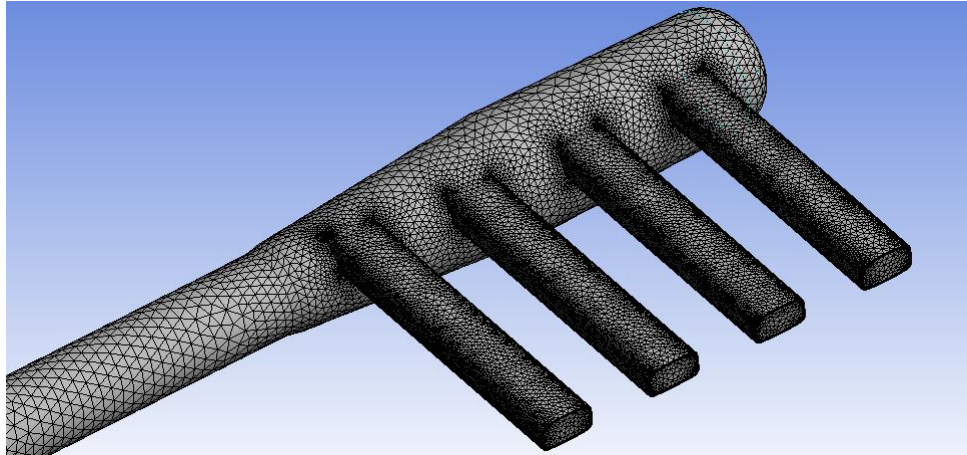


Figura 3. Malha usada no modelo.

É notável na Fig. 3 acima que a entrada (Inlet) e as saídas (Outlet) do domínio fluido foram alongados. Essa é uma prática muito comum em análises de escoamento interno usando CFD, visa fornecer ao fluido espaço para que esteja completamente desenvolvido ao atingir a área de interesse.

O comando inflation foi usado para gerar 5 camadas de elementos prismáticos próximo as paredes do domínio foram criadas para capturar o efeito da camada limite. A altura total das camadas prismáticas foi assegurada de ser maior do que a espessura da camada limite. As condições de contorno impostas podem ser vistas na Tab. 1 abaixo. As paredes (Wall) foram tratadas como não-deslizantes, estacionárias e adiabáticas. Os valores das condições de contorno foram obtidos para uma rotação de 4500 rpm.

Tabela 1. Valores das condições de contorno impostas para a simulação.

Inlet Vazão de massa (g/s)	Outlet Pressão (Pa)			
117,57	1	2	3	4
	2.06	2.05	2.05	2.06

As interações numéricas continuaram até o balanço de massa entre a entrada e as saídas ficar abaixo do critério padrão imposto pelo programa.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Perdas de carga e distribuição de velocidades foram observados no pós-processamento, contornos dessas propriedades, bem como valores das mesmas em pontos estratégicos e linhas de corrente foram obtidas através do software de pós-processamento, o CFX-post. A perda de carga foi definida como sendo a diminuição da pressão total da entrada até as saídas dos dutos. A Tabela 2 abaixo mostra a queda de pressão para cada um dos 4 cilindros.

Tabela 2. Queda de pressão para cada um dos cilindros

Duto	Perda de Carga (Pa)
1	3061
2	3789
3	3473
4	3275

Observando a tabela temos que a maior queda de pressão ocorre no segundo cilindro e que a menor no primeiro. Os valores de pressão usados para obter as quedas expostas acima foram coletados nos centros do duto de entrada e dos dutos de saída. Linhas de corrente de ambos os casos também foram plotadas, exibidas nas Fig. 4, Fig. 5 abaixo, elas representam as velocidades e trajetória das partículas de fluido.

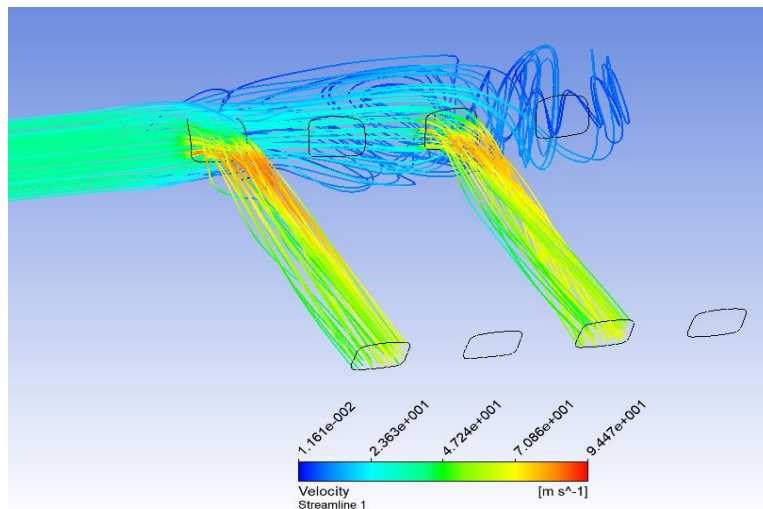


Figura 4. Linhas de corrente para o caso dos cilindros 1 e 3 abertos.

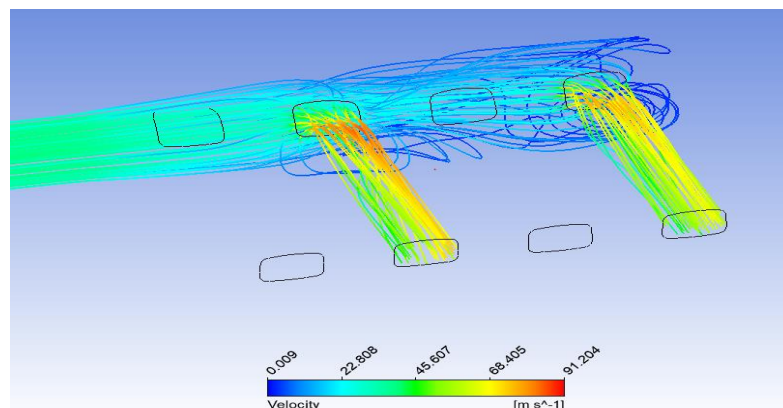


Figura 5. Linhas de corrente para o caso dos cilindros 2 e 4 abertos.

Nas Figuras 6 e 7 abaixo, as mesmas configurações são mostradas frontalmente aos dutos de saída, onde pode-se notar formação de vórtices, ou swirl, nas saídas dos dutos.

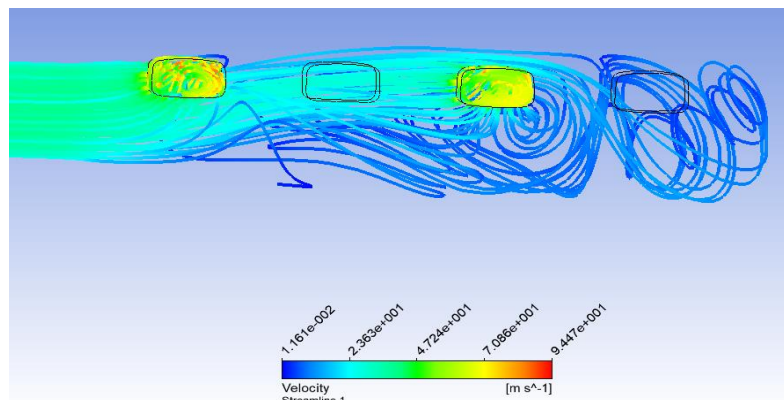


Figura 6. Linhas de contorno da configuração 1-3 mostrando o padrão de swirl nas saídas dos dutos.

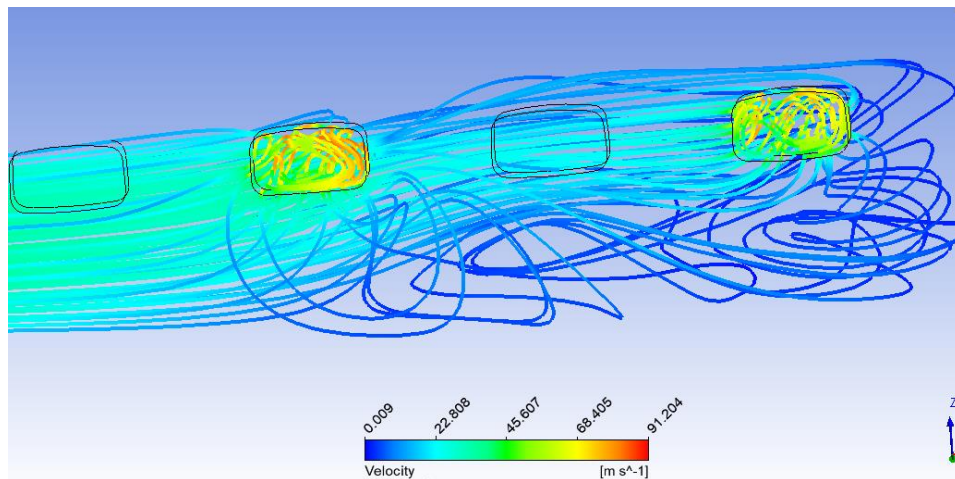


Figura 7. Linhas de contorno da configuração 2-4 mostrando o padrão de swirl nas saídas dos dutos.

Em todas as imagens de linhas de corrente nota-se que o volume posterior do coletor é pouco preenchido pelo escoamento, especialmente quando os cilindros 1 e 3 estão abertos.

As Figuras 8 e 9 abaixo mostra os contornos de velocidade nas saídas dos dutos, correspondendo as entradas dos cilindros. Pode-se notar algumas zonas de baixa velocidade, isso pode ser resultado de baixo nível de swirl.

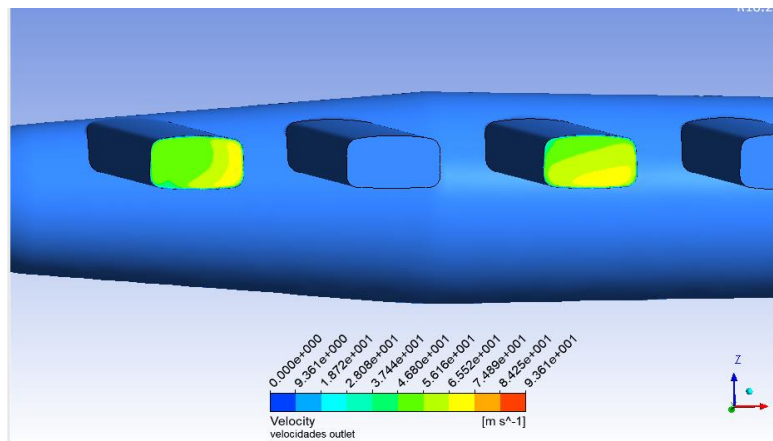


Figura 8. Contornos de velocidade na saída com os cilindros 1 e 3 abertos.

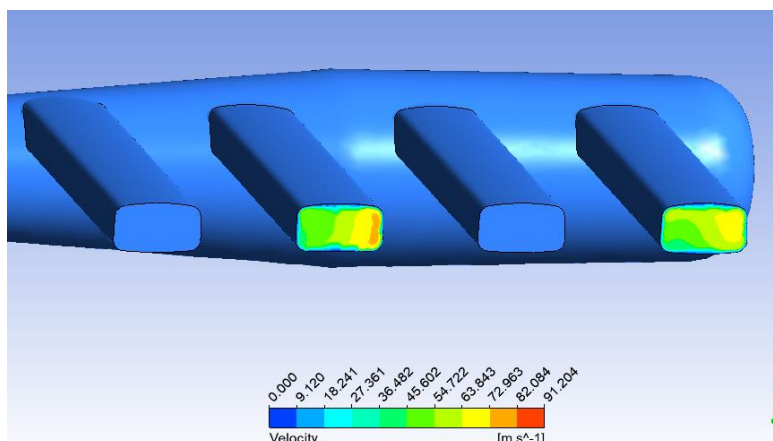


Figura 9. Contornos de velocidade na saída com os cilindros 2 e 4 abertos.

6. CONCLUSÕES

- 1) Os cilindros do coletor de admissão analisado recebem cargas de ar desiguais, resultando em perda de eficiência na combustão do motor.

- 2) Há uma grande variação de velocidades e pressão quando mudado da configuração dos cilindros 1 e 3 abertos para os 2 e 4 abertos.
- 3) Na configuração 1-3, a velocidade do fluxo no terceiro duto é muito superior ao fluxo do primeiro, levando a mal distribuição da massa de ar.
- 4) Foi notado recirculação e baixa velocidade de fluxo no espaço posterior do coletor de admissão, o que pode indicar mal utilização do volume e desperdício de material para confecção do coletor.
- 5) Zonas de baixa velocidade observadas nas saídas dos dutos que conduzem o fluxo até os cilindros causam não uniformidade da distribuição de ar o que pode prejudicar a eficiência de combustão.

7. REFERÊNCIAS

- M. Safwan, 2009, "Pressure Drop Analysis of 1.6l Car Air Intake System," Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang.
- Franco Brunetti, 2012, "Motores de Combustão Interna", Vol 2, 4ª Edição. São Paulo: Blucher.
- A. Jason D'Mello, B. Omkar S. Siras, 2016, "Performance Analysis for 4-Cylinder Intake Manifold: An Experimental and Numerical Approach", International Engineering Research Journal Page No 917-922.
- Heywood, John B., 1988, "INTERNAL COMBUSTION ENGINES FUNDAMENTALS", McGraw-Hill series in mechanical engineering.
- Fortuna, A.O., 2000. "Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações", Editora da Universidade de São Paulo.
- B.M.Angadi, A. S. Malipatil, V.V.Nagathan and R.S.Kattimani., 2010, "Modelling and Analysis of Intake manifold of a Multi-cylinder SI engine," in & 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power.
- H. K. Versteeg, W. Malalasekera, 2007, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", Pearson Prentice Hall.
- D. R. Jebamani, T. M. N. Kumar, 2008, "Studies on Variable Swirl Intake System for Diesel Engine Using Computational Fluid Dynamics," Thermal Science, vol. 12.
- M. M. Khan, S. M. Salim, 2013, "Evaluation of CFD Sub-Models for the Intake Manifold Port Flow Analysis", School of Engineering, Taylor's University, Selangor, Malaysia.

AIR FLOW ANALYSIS IN THE INTAKE MANIFOLD OF A 1.6 ENGINE USING CFD TOOLS

Rafael de Lira Pessoa Mota, rafaelpmota.rm@gmail.com¹

¹Federal University of Pernambuco, Prof. Moraes Rego Avenue, 1235 – University City, Recife – PE, 50670-901.

Abstract. *The main purpose of this research is evaluate the performance using computational fluid dynamics (CFD) tools of the behavior of the air flow through the intake manifold of a popular car engine. The primary function of the intake manifold is to deliver the air-fuel mixture to the engine's cylinders generating the least possible pressure drop. It is also the function of the collector to guarantee a uniform distribution of the mixture, so that the combustion process in each cylinder occurs with the same characteristics, guaranteeing a good operation quality. The operational aspects were investigated in this work for the air intake manifold of the E.torQ 1.6 EVO engine manufactured by FPT (Fiat Powertrain), with 4 in line cylinders, each one with two inlet valves and two exhaust valves, totaling 16 valves. CFD simulations were performed using CFX software from ANSYS, where pressure losses, air distribution, mass flow distribution between the engine cylinders and vortex formation were investigated. The simulations were performed assuming steady state condition and no heat loss through the walls of the intake manifold. After verification of the results of the computational simulation, considerable pressure drop was noticed in the ducts 2 and 3. In addition, a non-uniform mass flow distribution was noticed between the ducts that lead the air to the cylinders, which was possible to confirm by analyzing the velocity streamlines. The numerical results obtained may have some differences with reality, since an ideal simulation would recognize a transient state, taking into account the changes in boundary conditions according to the opening and closing of the valves. Data from practical experiments with the E.torQ 1.6 EVO engine would be required for this type of simulation. Although the author does not have such data, the results obtained are consistent with actual tests conducted with engines in similar conditions.*

Keywords: Intake Manifold, Intern Combustion Engine, CFD.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho.