

ANÁLISE DE UM COLETOR DE ADMISSÃO PARA MOTOR VEICULAR 1.0 PELO MÉTODO DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

J. C. de Lira Jr^a, R. S. B. de
Carvalho, J. A. P. da Costa^b
and J. R. Henríquez^a.

^aUniversidade Federal
de Pernambuco - Brazil

^bInstituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Contact Information
claudino.lira@ufpe.br

RESUMO

A simulação numérica é um campo da engenharia em constante expansão, sendo utilizado nos mais diversos tipos de indústria, principalmente a automobilística e aeroespacial. O ramo trouxe a possibilidade de executar testes e projetos antes muito difíceis ou custosos por limitações práticas e de investimento financeiro. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) encaixa-se nessa área envolvendo o estudo físico dos fluidos, sendo capaz de simular em com precisão os mais diversos fenômenos físicos. Suas principais atuações encontram-se em análises térmicas hidráulicas, integração sólido-fluido, análises de equipamentos, combustão, transferência de calor, aerodinâmica, dentre outros. Este trabalho apresenta a análise de um coletor de admissão de um motor veicular 1.0 Fiat utilizando CFD para estudar o fluxo interno do coletor e determinar os principais parâmetros que influenciam o escoamento. Para as análises, foi utilizado dados reais do coletor de um veículo de passeio.

Keywords: Coletor de Admissão, Motor 1,0, eficiência, CFD

NOMENCLATURA

| | |
|--------------------------------------|--|
| M e Mo | Peso molecular do fluido de trabalho e do ar atmosférico |
| r_v | Taxa de compressão |
| P_{ex} | Pressão de exaustão |
| AFR | Taxa ar/combustível em massa (Air to fuel ratio) |
| P_i e P_e | Pressão da mistura e pressão nas condições exteriores |
| γ | Razão entre os calores específicos a pressão e volume constantes |
| R | Constante dos gases |
| V₀₁ | Cilindrada de um motor |

INTRODUÇÃO

A Mecânica dos Fluidos que estuda o comportamento de escoamentos baseada em métodos numéricos compilados em algoritmos também denominada CFD, são implementadas por *softwares* como o *FLUENT*, *CFX*, *Star CCM+* entre outros. Essas ferramentas de simulação numérica são utilizadas para diminuir a necessidade de testes

físicos em projetos de engenharia, bem como o emprego de equipamentos necessários. A possibilidade de implementar condições de operação extrema em geometrias complexas, tornaram a simulação numérica uma ferramenta indispensável nos projetos de engenharia.

Para estruturar uma simulação, precisamos definir a Geometria, propriedades das Propriedades dos Fluidos (viscosidade, densidade, condutividade térmica, etc.), condições iniciais (regime permanente ou transiente) e condições de contorno (especificações das condições de entrada e saída, agentes externos, perfis de velocidade, etc.). Após essas etapas é possível elaborar as simulações e análises dos resultados. Esta metodologia tem sido amplamente utilizada em várias aplicações da engenharia como o design aeronáutico, automotivo, climatologia, engenharia civil, engenharia naval, oceanografia entre outras. Neste trabalho será aplicada no estudo de um coletor veicular.

O motor FIRE (*Fully Integrated Robotised Engine*) é produzido pela *FCA-Powertrain Technologies* em Betim (MG - Brasil) e Termoli, (Itália). Este motor é conhecido pelo seu

baixo custo de manutenção e longa vida útil. Além disso, pode ser bicomustível e apresenta a melhor distribuição de torque nos modelos 1.0. Sua curva de distribuição de torque menos acentuada, possibilita uma relação de marchas relativamente mais longas, melhor uso de energia e maior economia de combustível. A eficiência Volumétrica participa diretamente na potência de saída do motor e determina a quantidade de combustível enviado ao cilindro para combustão. [1], obteve uma melhora de 16% de potência útil somente utilizando coletor de admissão otimizado num motor a diesel de ônibus urbano. As temperaturas mais baixas os efeitos de perdas de cargas durante o escoamento e as perdas das válvulas de admissão impactam diretamente na eficiência volumétrica. Segundo [2] as variáveis que afetam a eficiência são:

- Tipo de combustível, mistura ar-combustível, vaporização do combustível na entrada e calor de vaporização
- A temperatura da mistura ar-combustível
- Razão pressão de entrada/saída
- Taxa de compressão
- Velocidade do motor (RPM)
- Projeto da válvula de admissão e exaustão, comprimento, largura, abertura
- Projeto do coletor de admissão e exaustão

Os efeitos e algumas dessas variáveis são quase-estáticos, isto é, variam pouco com a rotação do motor ou podem ser mensuradas/definidas em termos de uma velocidade média do motor. Entretanto, algumas dessas variáveis possuem efeitos que dependem de um escoamento turbulento. “Em geral, o deslocamento de gases induz, vórtices nos cilindros (tangencialmente, *swirl*) e movimentos rotacionais (*tumble*). Segundo [1] os efeitos de redemoinho e vórtices geram um movimento de turbulência intenso no cilindro durante o intervalo de admissão e que podem ser mantidos no intervalo de compressão. A eficiência volumétrica em um coletor de admissão num ciclo *Otto* padrão pode ser dada alternativamente por:

$$\eta_v = \frac{m_a}{V_s \rho_a} = \frac{m_1 (1 - AFR)}{\rho_a (1 + ARE)} \frac{r_v}{(r_v - 1) V_1} \quad (1)$$

$$P_i V_{O_1} = \frac{R}{M} m T_1 \quad (2)$$

$$P_{i,o} = \rho_{ad,o} \frac{R}{M_o} m T_{ad,o} \quad (3)$$

$$\frac{T_1}{T_{ad}} = \frac{1 - F_r}{1 - \frac{1}{1 - \frac{1}{\gamma r_c \left[\frac{P_i}{P_e} + (\gamma - 1) \right]}}} \quad (4)$$

Unindo-se as equações pode-se chegar à seguinte expressão geral:

$$\eta_v = \left(\frac{M}{M_0} \right) \left(\frac{P_i}{P_{ad,0}} \right) \left(\frac{T_{i,0}}{T_1} \right) \frac{AFR}{AFR + 1} \left\{ \frac{r_v}{(r_v - 1)} - \frac{1}{\gamma (r_v - 1)} \left[\frac{P_e}{P_i} + (\gamma + 1) \right] \right\} \quad (5)$$

Quanto a perda de carga atrelada ao escoamento de ar, esta pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach (para escoamentos laminares ou turbulentos em dutos):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (6)$$

Essa equação é válida para tubos lisos onde $Re > 10^5$. Em casos onde $4000 < Re < 10^5$, o fator de atrito é dado pela equação de *Blasius*:

$$f = 0,316 Re^{-0,25} \quad (7)$$

O coletor de admissão é o elemento primário do motor, sua principal tarefa é distribuir o ar uniformemente pelos seus dutos (*runners*) até os cilindros de combustão. O volume aberto por onde entra o ar é chamado de *Plenum*.

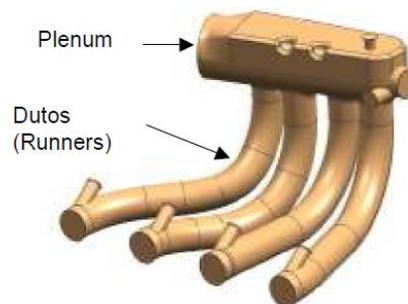


Figura 1: Representação básica de um coletor de admissão. Fonte: Delphi Automotive Systems

Os coletores têm sido historicamente fabricados a partir do alumínio ou ferro fundido. No entanto, materiais plásticos estão ganhando popularidade, segundo [3] hoje, cerca de 90% dos coletores são fabricados utilizando-se plástico. Segundo [4] os principais parâmetros que influenciam o design de um coletor de admissão são:

- Distribuição Uniforme do ar em todos os cilindros
- Diminuição do atrito no coletor
- Designs que favoreçam as ondas de choque
- Turbulências e vórtices
- Escolher a posição correta da válvula de admissão
- Taxa de Compressão
- Rotação do Motor
- Geometria das válvulas de admissão e compressão

Alguns destes parâmetros são de efeitos permanentes, ou seja, não oscilam com a rotação do motor. No entanto, algumas destas variáveis sofrem alterações em regime permanente como, por exemplo, a presença de ondas de choque. Logo devem ser feitas simulações em regime permanente e em regime transiente. Segundo [5] as principais funções do coletor de admissão são:

- Geometria compatível com o espaço dentro do capô
- Aumentar a eficiência do motor
- Atenuar ruídos
- Vedação das interfaces com a atmosfera
- Resistir a altas pressões e vibrações
- Diâmetro mínimo possível

Quanto a fabricação, são os principais métodos são: Núcleo Perdido (*Lost Core*), Injeção deslizante (DSI) e Injeção de partes separadas seguido de solda por vibração. O método de núcleo perdido baseia-se na construção do volume interno da peça chamado de núcleo, onde se funde uma liga metálica ou plástica de baixo ponto de fusão. O método DSI se apresenta como uma alternativa mais barata se comparado ao método de núcleo perdido. O coletor é dividido em três partes e a injeção ocorre separadamente. Para a união das partes. O processo de Injeção de partes separadas seguido de solda por vibração é o método mais utilizado atualmente. No Brasil este método é utilizado na maioria dos coletores aqui produzidos. Neste método, o coletor é feito por injeção em dois moldes diferentes de forma a produzir duas partes. A união dessas partes é promovida por solda de vibração. As partes são postas sob pressão e a máquina começa a vibrar, o calor afeta a interface entre as duas partes promovendo a união por atrito.

METODOLOGIA

A metodologia de simulação é composta de cinco etapas conforme descrito na Figura 2.



Figura 2: Modelo de fluxo das análises de Simulação numérica em CFD.

O processo começa com a importação da geometria desenvolvida através de uma ferramenta de CAD como indicado na Figura 3, neste trabalho, foi utilizado o *Geometry Designer*, o software de CAD do ANSYS. Nele foi feitos ajustes no desenho para facilitar a geração de malha.

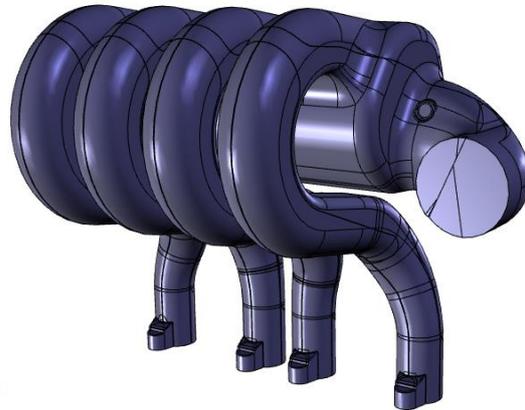


Figura 3: Geométrica do coletor de admissão.

Após a criação da geometria, o próximo passo consiste na geração da malha. Para fazer as análises descritas nesse trabalho, foram criadas 03 (três) tipos de malha: grosseira (*coarse*), a média (*Medium*) e a fina (*fine*). Devido à complexidade da geometria e suas variadas imperfeições, as malhas finas criadas levam por volta de 50 minutos e geram *inflatons* em locais indesejados, que o *software* interpreta como alguma parte importante do escoamento e exige um maior refinamento. Além disso, certas configurações de malha apresentam erro em sua geração. O processo é longo e requer um tempo para chegar à uma malha satisfatória. *Inflation*, é um recurso que permite o refino da malha nas regiões de fronteira da malha. Este refino possibilita a criação de camadas sobrepostas de elementos mais finos, possibilitando uma melhor percepção de fenômenos físicos nessas regiões. Também foi utilizada a opção *Curvature* (curvatura), uma ferramenta que possibilita o refino dos elementos de malha onde o *software* detectar curvaturas a partir de determinado grau.

A Figura 6 mostra a malha do coletor de admissão. Devido aos defeitos de importação da geometria criam-se pontos que necessita de um grande aperfeiçoamento. Esse problema não decorre do algoritmo da malha, mas sim da própria peça que apresentar suas imperfeições geométricas. Algumas dessas regiões podem ser identificadas pelos círculos vermelhos na Figura 4.

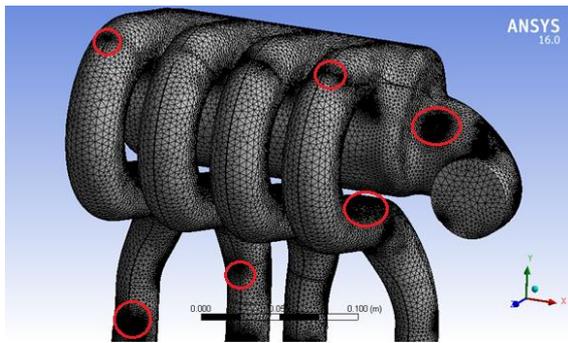


Figura 4: Representação da malha fina gerada.

O ANSYS apresenta alguns modelos estatísticos de verificação de qualidade da malha. O modelo estatístico usado para averiguar a qualidade dos elementos da malha foi o método *skewness*. O método *skewness* determina o quão próximo do ideal, isto é, equilátero, a célula está. Seus valores vão de 0 (equilátero) à 1 (degenerado). Valores ruins estão na faixa $0.9 < x < 1.0$, pobres; $0.75 < x < 0.90$, médio; $0.50 < x < 0.75$, bom; $0.25 < x < 0.50$ e excelentes; $0 < x < 0.25$. Embora foram feitas várias simulações, a malha aqui descrita representa a malha fina e mais precisa, de modo que a utilizamos para o cálculo de cada caso. Vale-se salientar que este processo de geração de malha exige um grande cuidado, pois a própria peça já apresenta seus defeitos geométricos.

Seguidamente foi analisada a modelagem do fluido, seus dados de parametrização e quais modelos representam da melhor forma o escoamento no coletor de admissão. Várias análises foram feitas, a primeira dela considera todos os 4 (quatro) *runners* abertos. A partir dessa primeira análise, serão determinados os desvios do fluxo de massa de ar em cada cilindro. Após essa simulação, consideraremos uma simulação com apenas 1 (um) *runner* aberto e os demais fechados, para cada saída, simulando um ciclo real em regime permanente, e os resultados serão discutidos.

Os dados das condições de contorno foram extraídos do software de simulação 1D GT POWER, que é utilizado pela maioria dos fabricantes automotivos de motores. O programa é projetado de forma a fornecer alguns parâmetros relativos aos motores como: potência, torque, eficiência volumétrica, consumo de combustível, performance de sistema turbo, perdas de bombeamento entre outros.

O ANSYS possui vários métodos de simulação de turbulência e no presente trabalho, foi utilizada uma intensidade média de turbulência de 5% e o modelo adotado foi RNG k-epsilon, pois apresenta boas aproximações para escoamentos onde os vórtices se apresentam. Este modelo, também foi verificado como apropriado para estudos de escoamento em coletores segundo [6]. O mesmo testou vários modelos de turbulência tais como: k-ε (RNG), k-ε padrão, k-omega (k-ω) e o modelo de tensões de Reynold (RSM). Segundo o estudo, o modelo k-ε (RNG) apresentou a melhor aproximação

para coletores, onde as equações de transporte são modificadas para incluir termos relativos à turbulência. O estudo de [7], também utilizou o mesmo modelo em seu estudo de design de coletores de exaustão.

O modelo k-ε (RNG) baseia-se na renormalização (alteração) de alguns termos das equações de *Navier-Stokes*. O modelo k-ε é um modelo utilizado na maioria das aplicações industriais de engenharia. Consiste na introdução de alguns termos na equação de continuidade e de momento. O modelo k-ε (RNG) apenas modifica alguns termos desse modelo de forma a otimizá-lo para aplicações que envolvam presença de vórtices.

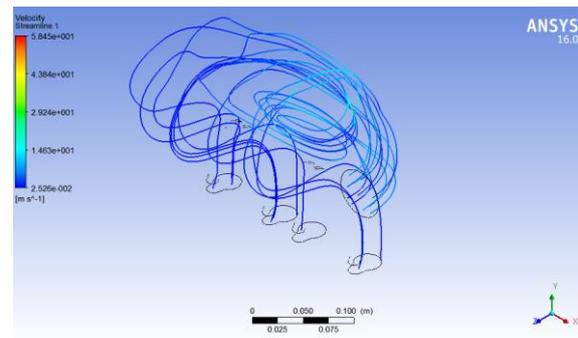


Figura 5: Diferença de velocidade entre as malhas

A figura 5 ilustra um comparativo da diferença de velocidades entre a malha grosseira e a malha fina, a variação de velocidade é da ordem de grandeza 10^{-2} , principalmente na saída e na entrada, que são os pontos mais importantes. Para realização das simulações será adotada a malha mais refinada para garantir maior precisão nos resultados. Todas as simulações feitas consideraram a peça como adiabática. A figura 23, conforme já dito anteriormente, ilustra as entradas (*Inlet*) e as saídas do coletor de admissão (1,2,3 e 4).

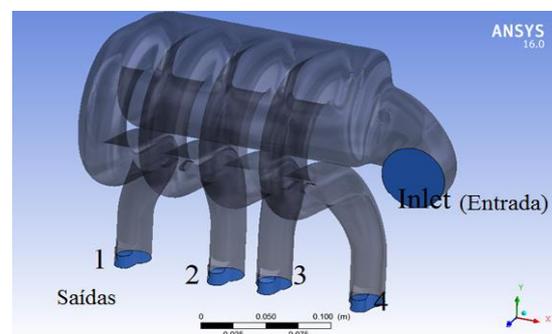


Figura 6: Entradas e saídas do coletor.

Para validação dos resultados obtidos com o modelo numérico, foi realizada uma análise experimental com o motor através de um ensaio de potência num dinamômetro construído pela equipe Mangue Baja da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a calibração e validação dos modelos foi realizada as simulações para identificar as condições de operação do coletor considerando a rotação máxima de operação. Inicialmente na Figura 7 será apresentado o campo de velocidade, considerando a distribuição em todos os dutos.

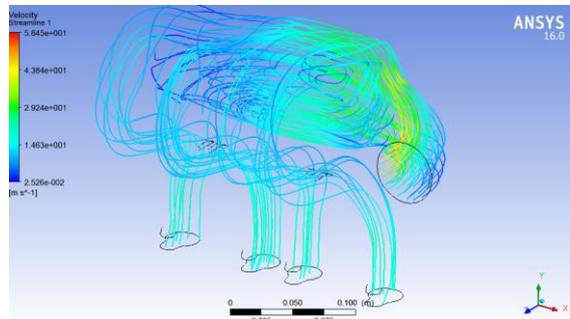


Figura 7: Distribuição de velocidade para o caso dos cilindros abertos.

As simulações das saídas dos coletores abertas mostraram que há um pequeno desvio de fluxo no coletor. Apesar de pequena, essa variação pode influenciar na combustão, justamente porque causam restrições na alimentação dos cilindros. O argumento de que os cilindros não operam com todos os cilindros abertos e em regime permanente é válido, entretanto o objetivo desse estudo é identificar as vantagens das simulações com o uso de ferramenta CFD. Seguidamente na Figura 8 será mostrada a distribuição de pressão dentro do coletor, também considerando todos os tubos abertos.

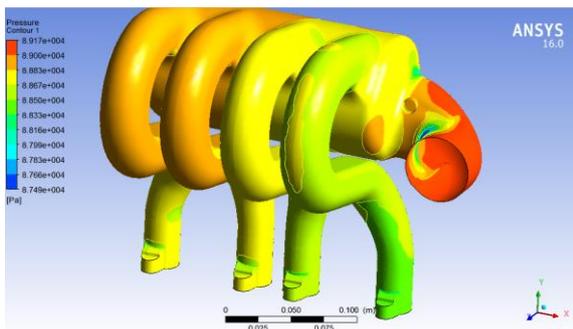


Figura 8: Distribuição de pressão nos cilindros

Quanto ao fluxo de massa, foi verificado um pequeno desvio nos cilindros 3 e 4 como pode ser observado na Tabela 1 que mostra a distribuição de massa no coletor.

Tabela 1: Fluxo de massa do coletor

| Rpm | Inlet | Out | Cyl 1 | Cyl 2 | Cyl 3 | Cyl 4 | %erro |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 6250 | 0.1326 | 0.1324 | 0.0340 | 0.0339 | 0.0326 | 0.0317 | 0.14% |
| % | 100.00% | 99.86% | 25.68% | 25.58% | 24.65% | 23.95% | - |

Outro fator que chama atenção são as curvas dos cilindros 1 e 4, ver Figura 9. As inclinações nos

cilindros 1 e 4 são maiores quando comparadas aos cilindros 2 e 3. Essa inclinação, contribui para uma maior perda de carga nesse dois runners. Na realidade, constatou-se que essas curvaturas existem para acomodação de elementos de fixação do coletor. Em ambiente *SolidWorks*, foi calculado, de forma aproximada, o arco-tangente dessas duas curvas. Os cálculos mostram um ângulo aproximado de 21° e 7°. Constatando a diferença entre as inclinações dos runners. Outro fator relacionado à geometria do coletor é a curva na parte de entrada, que apresenta pontos de perda de carga mais acentuada ao longo de sua curvatura.

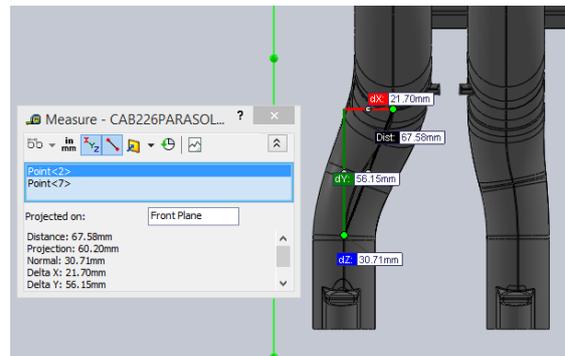


Figura 9: Curvas nos runner 1 do coletor.

CONCLUSÕES

A investigação do fluxo ar no coletor de admissão usando análise CFD possibilita inúmeras análises aproximando o projeto da realidade física das aplicações, é importante destacar que o conhecimento teórico dos fenômenos ainda é o principal instrumento para o desenvolvimento dessas atividades, porém o uso da ferramenta corrobora de forma bastante significativa com os resultados dos estudos. Este artigo é parte integrante de um trabalho de conclusão de curso onde foi possível experimentar de forma simplificada a aplicação da ferramenta CFD na análise de projeto de coletores veiculares possibilitando um novo aprendizado aplicando a modelagem computacional no estudo de motores.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem a FCA (FIAT CHRYSLER AUTOMÓVEIS BRASIL LTDA) e a FACEPE (FUNDAÇÃO DE AMPARO À CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO ESTADO DE PERNAMBUCO) pelo suporte financeiros através do convênio de cooperação Técnico Científico PROCESSO SIN-0384-3.05/15.

REFERENCIAS

1. Mohamed Ali Jemmi, Gueorgui Kantchev, Mohamed Salah Abid. Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and

experimental investigations. Laboratory of the Electromechanical Systems, National School Engineers of Sfax, BP 1173, Avenue of Soukra, 3038 Sfax, Tunisia, 2011.

2. R.Sameer Hussain, P.Ragupathi, S.Rajkumar , *“Design and Analysis of Diesel Engine Intake Manifold using CFD Simulation”*, International Journal of Modern Trends In Engineering and Science, IJMTESS. ISSN: 2348-3121.May, 2014.
3. Heywood, John B. Internal Combustion Engines Fundamentals. McGraw-Hill series in mechanical engineering,1988.
4. Simões, Thiago A. F. Aspectos a serem considerados no desenvolvimento de um coletor de admissão plástico soldado por vibração. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2010.
5. Maftouni, Negin; Ebrahimi, Reza. The Effect of Intake Manifold Runners Length on the Volumetric Efficiency by 3-D CFD Model. Sahand University of Technology. SAE, 2006.
6. Salim, S. M. Evaluation of CFD Sub-Models for the Intake Manifold Port Flow Analysis. EURECA 2013.
7. Naeimi, Hessamedin. Domiry, Davood. Gorji, Mofid, Ghasem. A Parametric Design Of Compact Exhaust Manifold Junction In Heavy Duty Diesel Engine Using Computational Fluid Dynamics Codes. Faculty of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran Thermal Science, 01 January 2011, Vol.15(4), pp.1023-1033
8. Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Pearson Prentice Hall, 2007.