

MODELO SIMPLIFICADO DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO OPERANDO COM ETANOL

Delso Antonio Zanata Filho

delso.filho@gmail.com

Resumo. Com o aumento das pressões pela utilização de combustíveis ecologicamente corretos, o uso da biomassa torna-se cada vez mais importante, sendo o Brasil, através da produção do álcool da cana de açúcar, um exemplo mundial em utilização de uma fonte renovável de energia em automóveis.

O presente trabalho tem como objetivo simular um motor de ignição por compressão operando com o álcool combustível.

Inicialmente apresenta-se o funcionamento básico de um motor operando segundo o ciclo Otto e segundo o ciclo Diesel.

Também são mostradas algumas metodologias de cálculo utilizadas por códigos de CFD (Computational Fluid Dynamics), tais como os métodos $k-\epsilon$ e RSM.

Como gerador de malhas utilizou-se o software comercial Ansys ICEM e para sua simulação, o software FLUENT.

Foi aplicado o método de malhas móveis (Dynamic Layering Method), que também está descrito neste trabalho.

Os resultados das simulações realizadas em 2D e 3D são mostrados neste relatório.

Palavras chave: simulação, motor de combustão interna, métodos numéricos

1. Introdução

Essa discussão é de grande importância atualmente devido à preocupação ambiental relacionada à redução de emissões de poluentes e também devido à necessidade de uso de combustíveis alternativos aos derivados de petróleo.

No Brasil essa discussão se torna ainda mais interessante tendo em vista a possibilidade de produção em grande escala do álcool combustível (etanol) através da cana-de-açúcar, sendo assim considerada uma energia renovável.

2. Revisão de Material Técnico

No trabalho desenvolvido por Bertoldi, Dalton [1], dá-se atenção aos fenômenos físicos e químicos associados à dinâmica do escoamento, a combustão e a transferência de calor no interior do cilindro de um motor de combustão interna de quatro tempos a gás natural, naturalmente aspirado e com injeção direta.

Os resultados obtidos visavam analisar os mecanismos que afetam o desempenho do motor. As propriedades que se destacaram nesse aspecto foram pressão, temperatura, fluxos de massa, taxas de combustão e de transferência de calor além do campo de velocidades e da intensidade da turbulência.

As simulações foram realizadas utilizando-se o código computacional de volumes finitos Fluent, 2006. Optou-se por uma formulação bidimensional axissimétrica do problema.

São consideradas superfícies adiabáticas as paredes dos sistemas de exaustão, de admissão e o corpo da válvula. O cilindro, o pistão, o cabeçote e a cabeça da válvula são considerados superfícies a temperatura constante.

Para a solução das equações, é utilizado o método de Gauss-Seidel com auxílio de um procedimento Multigrid, para as interpolações nas faces, o upwind (de segunda ordem) e o Power-law (de primeira ordem), e para o acoplamento pressão velocidade é utilizado o método PISO.

No trabalho de Dalton, foi utilizada a metodologia conhecida como Dynamic Layering Method, que é facilmente utilizada em malhas quadrangulares e em problemas bidimensionais.

As expressões abaixo são utilizadas para definição do tamanho das células das malhas móveis. Para o aumento da célula, temos:

$$h_{\min} > (1 + \alpha_s) h_{ideal} \quad (2.1)$$

h_{\min} = menor altura para a célula na camada j.

h_{ideal} = tamanho ideal da célula.

α_s = fator de divisão e utilizado igual a 0,4.

Quando a condição da equação acima é atingida, as células são divididas.

No caso de compressão das células, temos a expressão:

$$h_{\min} < \alpha_c h_{ideal} \quad (2.2)$$

Onde:

α_c = Fator de colapso, utilizado igual a 0,04.

Quando a condição desta expressão é atingida, as células da camada em questão (j) são ligadas às células da camada i.

As magnitudes das velocidades radiais e axiais são inicializadas com valores próximos a 0,1 m/s. Os campos de energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação turbulenta são também assumidos uniformes e com valores iguais a $0,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $0,14 \text{ m}^2/\text{s}^3$, respectivamente.

Foram assumidos valores manométricos de pressão iguais a 0 Pa para o sistema de admissão e de 800 Pa para o sistema de exaustão e para a câmara de combustão.

Todas as equações adotaram como critério de convergência um resíduo menor do que 10^{-3} , exceto para a equação da energia, cujo critério de convergência foi satisfeito no caso de o resíduo ser menor do que 10^{-6} .

A razão de compressão utilizada foi de 10:1.

3. Metodologia

3.1. Modelos de Turbulência

Nenhum modelo de turbulência é aceito como superior para todos os tipos de problemas. A escolha do modelo de turbulência depende de vários fatores, como:

- Física do problema
- Prática adquirida para solução do tipo de problema
- Nível de precisão requerido
- Recursos computacionais disponíveis
- Tempo disponível para a simulação

Os principais modelos clássicos de turbulência são: modelo Mixing Length, modelo k- ϵ , modelo Reynold Stress Equation (modelo da Equação do Tensor de Reynolds (RSM)), modelo Algebraic Stress Equation.

O modelo da Equação do Tensor de Reynolds é o mais complexo dos modelos clássicos de turbulência, sendo fisicamente o modelo mais balanceado. Assim, devido à importância deste modelo, ele está descrito nos itens que se seguem.

Além do modelo Reynold Stress Equation, outro importante modelo disponível no Fluent é o modelo k- ϵ , um modelo computacionalmente estável e aplicável a muitos tipos de problemas de escoamento. Assim este modelo também segue descrito nos próximos itens.

3.1.1. Modelo k- ϵ

Temos que:

$$\frac{L}{l} \gg \text{Re}^{\frac{3}{4}} \quad (4.1)$$

Sendo:

L= Escala de comprimento

l= Diâmetro do tubo.

Velocidades e pressão instantâneas na turbulência:

$$\begin{aligned} u(x,t) &= \bar{u}(x,t) + u'(x,t) \\ v(x,t) &= \bar{v}(x,t) + v'(x,t) \\ w(x,t) &= \bar{w}(x,t) + w'(x,t) \\ p(x,t) &= \bar{p}(x,t) + p'(x,t) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Equação de Reynolds:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.3)$$

Onde:

$$u_i = U_i + u'_i \quad p = P + p'$$

Equação de Reynolds e de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (4.4)$$

$$\text{Onde } \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{U}, \bar{\mathbf{v}} = \mathbf{V}, \bar{\mathbf{w}} = \mathbf{W} \text{ e } \bar{p} = P \quad (4.5)$$

Da Equação da Continuidade, temos que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4.6)$$

Para um fluido Incompressível, caso analisado, temos então:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.7)$$

Tensões Laminares:

$$\sigma_{ij} = -\delta_{ij} p + \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (4.8)$$

Onde $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$.

O tensor de Reynolds para o caso turbulento é dado por:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = -\delta_{ij} \rho \frac{2}{3} k + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (4.9)$$

Onde k é a energia cinética da turbulência e é dada por:

$$k = \frac{\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}}{2} \quad (4.10)$$

Para fluidos incompressíveis, temos que:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = -\delta_{ij} \rho \frac{2}{3} k + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.11)$$

Assim, da equação de Navier-Stokes resulta:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \left(P + \rho \frac{2}{3} k \right)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] \quad (4.12)$$

A equação do Transporte de k é mostrada abaixo.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\overline{u_i' u_i' u_j'}}{2} - \frac{\overline{u_j' p'}}{\rho} \right) - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \quad (4.13)$$

Onde:

$$P_k = -\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad \text{Termo relativo á produção de k} \quad (4.14)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \quad \text{Termo relativo á dissipação de k} \quad (4.15)$$

A equação para k fica então:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho P_k - \rho \varepsilon \quad (4.16)$$

Com σ_k sendo uma constante.

A equação para ε é:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.17)$$

Onde σ_ε , C_1 e C_2 são constantes.

A viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.18)$$

Com C_μ sendo uma constante, de medições obtemos que $C_\mu = 0,09$.

Desconsiderando-se os efeitos de turbulência e os efeitos difusivos, temos:

$$U \frac{\partial k}{\partial x} = -\varepsilon \quad (4.19)$$

$$U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = -C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.20)$$

Medidas realizadas sugerem que $C_2=2$.

Na condição de a produção de turbulência ser igual à dissipação, temos que:

$$k = \frac{U^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (4.21)$$

Ainda na condição de equilíbrio local na camada logarítmica, obtemos:

$$\mathcal{E} = \frac{U^{*3}}{\chi y} \quad (4.22)$$

Deste modo, considerando o transporte convectivo e a difusão longitudinal desprezíveis, obtemos finalmente:

$$C_1 = C_2 - \frac{\chi^2}{\sqrt{C_\mu} \sigma_\mathcal{E}} \quad (4.23)$$

Deve-se lembrar que o nó mais próximo da parede deve estar dentro da camada logarítmica.

3.1.2. Modelo da Equação do Tensor de Reynolds (RSM)

Este se trata de outro importante modelo utilizado em códigos de CFD para solução de escoamentos envolvendo efeitos de turbulência.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4.24)$$

Esta equação acima, Equação de Boussinesq estendida, que é usada para o cálculo do tensor de Reynolds no modelo k-ε, representa pobremente escoamentos com campos de tensão complexos ou com forças de corpo significantes.

A equação exata do transporte de Reynolds leva em consideração os efeitos direcionais do campo de tensões de Reynolds.

Sendo $R_{ij} = -\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \overline{u'_i u'_j}$ o tensor de Reynolds, temos que o termo relativo à energia cinética deveria ser mais preciso.

A equação exata para o transporte de R_{ij} é:

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = P_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad (4.25)$$

Taxa de transformação de $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ + Transpo de R_{ij} por convecção = Taxa de produção de R_{ij} + Transpo de R_{ij} por difusão - Taxa de dissipação de R_{ij} + Transpo de R_{ij} devido à turbulência + Transpo de R_{ij} devido à rotação

Códigos usando CFD com a equação do Transporte de Reynolds mantêm o termo de produção em sua forma exata, mostrado abaixo:

$$P_{ij} = - \left(R_{im} \frac{\partial U_j}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial U_i}{\partial x_m} \right) \quad (4.26)$$

Para obter uma forma da equação 2 que possa ser resolvida, são necessários modelos para difusão, taxa de dissipação e termos de correlação de pressão-deformação do lado direito desta equação.

O termo de difusão D_{ij} pode ser modelado considerando-se que a taxa de transporte do tensor de Reynolds por difusão é proporcional aos gradientes de tensões de Reynolds.

Os códigos comerciais de CFD utilizam a forma simplificada mostrada abaixo:

$$D_{ij} = \frac{\partial \left(\frac{v_t \partial R_{ij}}{\sigma_k \partial x_m} \right)}{\partial x_m} - \text{div} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \text{grad}(R_{ij}) \right) \quad (4.27)$$

Com $v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_\mu = 0,09$ e $\sigma_k = 1,0$

A taxa de dissipação de ε_{ij} é modelada assumindo-se isotropia dos pequenos vórtices de dissipação.

Esta afeta somente as tensões normais de Reynolds ($i=j$) em igual intensidade, assim:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \quad (4.28)$$

Onde ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta definida por:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{e'_{ij} e'_{ij}} \quad (4.29)$$

e'_{ij} = raiz das taxas de deformação flutuantes

O delta de Kronecker, δ_{ij} é dado por $\delta_{ij} = 1$ se $i=j$ e $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$.

As interações pressão-deformação representam o termo mais difícil de ser obtido, ao mesmo tempo em que o mais importante para a acurácia do modelo. Seus efeitos no tensor de Reynolds são causados por diferentes processos físicos:

flutuações de pressão devido a interação de dois vórtices e flutuações de pressão devido a interação de um vórtice com a região do escoamento de diferente velocidade média.

O efeito do termo da pressão-deformação é de redistribuir energia entre as tensões normais de Reynolds ($i=j$) tanto como tornar estas tensões mais isotrópicas e para reduzir as tensões de cisalhamento de Reynolds ($i \neq j$).

São necessárias correções, devido à influência da proximidade da parede, nos termos de pressão-deformação. Estas correções são diferentes em natureza das funções de amortecimento de parede encontradas no modelo $k-\varepsilon$ e precisam ser aplicadas independentemente do valor do número de Reynolds da média do escoamento.

Medidas indicam que os efeitos de parede aumentam a anisotropia das tensões normais de Reynolds por amortecer as flutuações na direção normal à parede e diminuem a magnitude da tensão de cisalhamento de Reynolds.

Alguns códigos comerciais utilizam um modelo mais simples que levam em conta esses efeitos dado por:

$$\Pi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(R_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \quad (4.30)$$

Com $C_1=1,8$ e $C_2=0,6$

O termo rotacional é dado por:

$$\Omega_{ij} = -2\omega_k (R_{jm} e_{ikm} + R_{im} e_{jkm}) \quad (4.31)$$

Sendo ω_k e $ijk=-1$ se i, j e k forem diferentes e em ordem anti-cíclica, e $ijk=0$ se algum dos índices é igual.

A energia cinética turbulenta k é necessária na formulação abaixo e pode ser encontrada colocando-se as três tensões normais juntas:

$$k = \frac{1}{2} (R_{11} + R_{22} + R_{33}) = \frac{1}{2} (\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}) \quad (4.32)$$

As seis equações para o transporte do tensor de Reynolds são resolvidas pelo modelo da taxa de dissipação escalar de ε . Normalmente uma forma mais exata pode ser encontrada, porém, abaixo segue uma forma simplificada que é utilizada no modelo $k-\varepsilon$ de códigos comerciais de CFD.

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \text{div} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.33)$$

Taxa de deformação de ε + Taxa de transporte de ε por convecção = e de transporte de ε por difusão + Taxa de produção de ε - Taxa de destruição de ε

As condições de contorno usuais para escoamentos elípticos são necessárias para a solução da equação do transporte de Reynolds.

- Entrada: Distribuição específica de R_{ij} e de ε .
- Saída e Simetria: $\frac{\partial R_{ij}}{\partial n} = 0$ e $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$
- Jato Livre: $R_{ij}=0$ e $\varepsilon=0$
- Parede sólida: funções de parede.

Na ausência de informações, distribuições aproximadas na entrada para R_{ij} podem ser calculadas da intensidade de turbulência T_i e de um comprimento específico L do equipamento por meio das relações:

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2 \quad (4.34) \quad \varepsilon = C_\mu \frac{3}{4} \frac{k^2}{L} \quad (4.35) \quad l = 0,07L \quad (4.36)$$

$$\overline{u_1'^2} = k \quad (4.37)$$

$$\overline{u_2'^2} = \overline{u_3'^2} = \frac{1}{2} k \quad (4.38) \quad \overline{u_i' u_j'} = 0 \quad (i \neq j) \quad (4.39)$$

3.1. Malhas Dinâmicas

O modelo da malha dinâmica usa o *solver* do FLUENT para mover os contornos e/ou objetos e para ajustar a malha adequadamente. Este método é usado quando os contornos movem-se rigidamente um em relação ao outro e pode ser utilizado onde o formato do domínio está mudando com o tempo devido ao movimento dos contornos deste domínio. Para utilizá-lo, é necessária uma malha volumétrica inicial e uma descrição do movimento de cada zona móvel do modelo. O FLUENT permite a descrição do movimento através do uso de perfis de contorno, funções definidas pelo usuário (UDFs), ou pelo método de solução de seis graus de liberdade (6DOFs).

Se o modelo tiver partes móveis e não móveis, é necessário identificar estas diferentes regiões na malha volumétrica inicial. O contorno entre as várias regiões não precisa ser da mesma forma. O FLUENT tem a capacidade de conectar diferentes zonas no modelo final.

O principais métodos de malhas dinâmicas são:

- *Smoothing (Spring Based, Laplacian, Boundary Layer, Skewness-based)*

- *Dynamic Layering*
- *Remeshing*

3.1.1. *Smoothing*

No método *spring-based smoothing*, as linhas entre cada dois nós da malha são idealizadas como molas interconectadas, assim, a força gerada pelos deslocamentos é proporcional a estes.

Este método pode ser utilizado em qualquer células ou face móvel ou deformável.

Para as áreas de células não tetraédricas, no caso 3D, e não triangulares para o caso 2D, este método somente é recomendado quando as regiões se movem em uma direção e o movimento é predominantemente normal à área de contorno.

Laplacian smoothing é o método mais usado e o mais simples dos métodos de *smoothing*.

Quando se utiliza o *Laplacian smoothing*, um operador laplaciano é aplicado para reposicionar os nós da malha desestruturada. A nova posição dos nós é a média da posição dos nós vizinhos.

É um método computacionalmente barato, mas que não garante melhoras na qualidade da malha, pois o vértice alocado por este método pode resultar elementos de pouca qualidade. Para amenizar este problema, o FLUENT aloca os vértices no centro dos vértices vizinhos somente se este fato for melhorar a qualidade da malha. Pode ser aplicado a todas as malhas, mas é recomendado para utilização em malhas quadrilaterais e hexaédricas.

O fator de relaxação (com valor entre 0 e 1) multiplica o incremento da posição computada de cada nó. Um valor de zero resulta em nenhum movimento do nó e um valor de uma unidade resulta no movimento equivalente a todo incremento computado.

Este reposicionamento estratégico melhora o alinhamento da malha, mas relaxa a forma com que o nós são colocados juntos. Em casos extremos, esta operação pode criar linhas na malha que cruzam os contornos, criando células com volume negativo. Isto normalmente ocorre próximo a cantos vivos ou de malha grosseira, especialmente se forem utilizadas várias vezes a operação de *smoothing* com um grande fator de relaxação.

Os parâmetros padrões de *smoothing* tem como função melhorar a qualidade da malha com o mínimo de efeitos adversos, no entanto é importante salvar o arquivo antes de realizar esta operação. Se aplicado um fator de relaxação conservador em uma malha inicial de qualidade boa, a frequência de falhas devido ao *smoothing* é extremamente baixa em duas dimensões. Entretanto, a corrupção de malhas ocorre muito mais frequentemente em três dimensões, particularmente com a utilização de malhas tetraédricas.

O *smoothing* pode ser aplicado repetidas vezes, no entanto conforme o número de aplicações aumenta, os nós têm a tendência de saírem dos contornos e a malha tende a perder sua característica de “enclausurada”.

O método *boundary layer smoothing* é usado para deformar as camadas de contorno durante a simulação de movimento-deformação da malha. Para casos em que a UDF é aplicada à uma zona de face com camadas de contorno adjacentes, a camada de contorno deformará de acordo com a UDF. Este método preserva a alta qualidade de cada camada de contorno e pode ser aplicado às zonas de camadas de contorno de todos os tipos de malhas com cunhas ou hexaedros, em 3D, e quadrilaterais em 2D).

Quando se utiliza o *Skewness-Based Smoothing*, que é recomendado para malhas triangulares e tetraédricas, o Fluent aplica um operador de *smoothing* que reposiciona o interior dos nós de forma a reduzir o desvio máximo da malha. O Fluent tentará mover o interior dos nós para melhorar o desvio das células com desvio maior do que o mínimo. Este processo pode consumir muito tempo e por isso este método de *smoothing* deve ser utilizado somente em células com alto desvio.

Um melhor resultado pode ser obtido com a aplicação do *smoothing* por vezes repetidas. Há vários processos de checagem que previnem um nó de se mover se este movimento causa um aumento no desvio máximo, no entanto é comum o desvio de algumas células aumentar quando uma célula com desvio maior está sendo melhorada. Assim, a média de desvios aumenta enquanto o desvio máximo diminui.

Deve-se considerar cuidadosamente quando a melhora da malha devido à redução do desvio máximo é pior do que o aumento no desvio médio. Utilizando-se este método somente em células com um desvio muito grande pode reduzir os efeitos adversos no desvio médio.

3.1.2. *Dynamic Layering*

O método *dynamic layering*, que pode ser utilizado em zonas prismáticas, adiciona e remove camadas de células adjacentes a um contorno móvel, baseado na máxima altura da camada adjacente à que está se movimentado. Este modelo permite a especificação de um tamanho de camada ideal em cada contorno móvel, fazendo com que as células possam ser esticadas ou unidas sempre levando em conta o fator de colapso da camada.

Este método pode ser aplicado quando:

- As células adjacentes à face móvel são em cunha ou hexaédricas (quadrilaterais em 2D).
- As camadas de células precisam ser completamente contornadas por uma zona de face, exceto quando interfaces deslizantes são utilizadas.
- Se as zonas de face de contorno são paredes de dois lados, é necessário separar a parede e utilizar a opção de interface deslizante acoplada para acoplar as zonas de células adjacentes.

iv) Este método não pode ser utilizado juntamente com método de *hanging node adaption*.

3.1.3. Remeshing

O FLUENT possui vários métodos de *remeshing* entre os quais está o *local remeshing*, *local face remeshing*, *face region remeshing*, e o *2.5D surface remeshing*.

No método *local remeshing*, são refeitas as malhas que são demasiadamente tortas, pequenas ou grandes, de acordo com as escalas definidas.

O método *face region remeshing*, pode ser utilizado em regiões de células tetraédricas ou triangulares, e permite que malhas sejam refeitas nas faces móveis. Este método seleciona as faces dos contornos deformáveis, baseado em quão tortas estas estão e assim pode refazer a malha no localmente. Para isso as faces devem ser triangulares e não atravessar zonas de células.

O último método citado, *2.5D surface remeshing*, só pode ser aplicado á geometrias 3D *extrudadas* e é similar ao *local remeshing* bidimensional em uma malha de superfície triangular. Este método é utilizado para faces triangulares que têm a malha refeita e para prismas extrudados, que tiveram a malha refeita a partir de faces triangulares.

3.2. escoamento de Ar

Anteriormente ás simulações, para o aprendizado da utilização do método *Dynamic Layering*, foi realizado a criação e extinção de camadas de células em um cilindro.

As simulações realizadas inicialmente basearam-se em uma geometria modelo do Fluent que pode ser visualizada na figura 3.1 no centro.

Esta malha tem como características principais os elementos triangulares na região abaixo das válvulas, malha que passará pelo processo de *remeshing* e *smoothing*. Nas regiões acima das válvulas e imediatamente acima do pistão, podem ser observados elementos quadrilaterais. Nestas regiões será utilizado o método *Dynamic Layering*.

Foi realizada a simulação do escoamento de ar na câmara de combustão. Foram feitos tubos nas entradas e saídas do motor para tentar aproximar ao máximo do escoamento em um motor real. Também foram feitas superfícies esféricas no interior dos tubos na junção com a câmara de combustão, para que o ar entrasse e saísse da câmara de combustão por uma área anular, diminuindo assim a área de entrada e saída e aproximando a geometria de um motor real contendo as válvulas. A geometria utilizada pode ser observada na figura 3.1 à direita.



Fig. 3.1: À esquerda, temperaturas em um cilindro 3D com malhas dinâmicas. No centro, geometria utilizada na simulação do escoamento de ar 2D e à direita, geometria utilizada na simulação do escoamento de ar 3D

3.3. Simulação com Etanol

Para a simulação com etanol, uma nova geometria e malha foram geradas, de forma que pudesse ser inserido um orifício para injeção de combustível. A região de entrada e saída da câmara de combustão continuou a ser anular, exceto para o orifício de injeção de etanol. A malha não apresentava boa qualidade (poucos elementos) visando diminuição do tempo computacional.

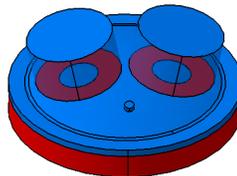


Fig.3.4: Geometria utilizada na simulação do motor à combustão interna utilizando como combustível o etanol

Esta simulação não teve uma configuração padrão, já que muitas foram testadas e em nenhuma delas foi obtido o resultado esperado.

Transitou-se entre o uso do *Solver Pressure Based* e do *Solver Density Based*. Para o acoplamento de Pressão-Velocidade foi utilizado o método SIMPLE.

O método k-epsilon utilizado foi o *standard* e todas as equações adotaram como critério de convergência um resíduo menor do que 10^{-3} .

Foi utilizado o modelo de *Species Transport* e para a Interação *Turbulence-Chemistry* foi utilizado o modelo Eddy Dissipation, considerando a mistura de C_2H_5OH e ar como gás ideal.

As células criadas pelo método Dynamic Layering possuíam dimensão de 1 mm.

A admissão de combustível inicia-se no *crank angle* de 350° e é finalizada no *crank angle* de 384° .

4. Resultados

A figura 4.1 mostra uma simulação realizada sem a injeção de partículas e sem combustão, ou seja, somente o escoamento de ar em uma geometria 2D. Pode-se observar o perfil de velocidades, indicado pelas diferentes cores e para o qual a escala de cores encontra-se à esquerda na figura. A escala vai de 0 a 100 m/s.

Esta simulação apresentou problemas e não há garantias da convergência dos resultados.

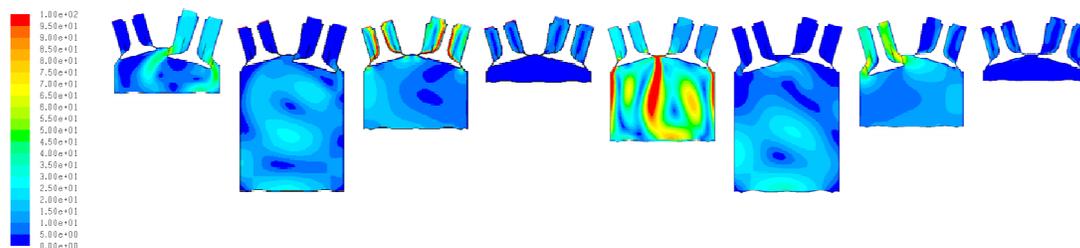


Fig. 4.1: Perfil de velocidades na geometria simulada

As figuras 4.2 e 4.3 referem-se ao escoamento de ar tridimensional, sendo que é mostrado um plano de corte para a melhor visualização dos resultados. A escala de velocidades utilizada é de 0 a 100 m/s e não há certeza da convergência dos resultados além de ter sido utilizada uma malha com poucos elementos para diminuição do tempo computacional.

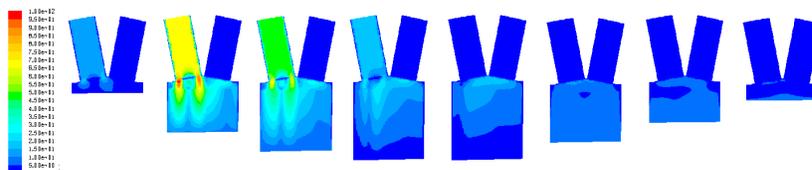


Fig. 4.2: Simulação de escoamento de ar na fase de admissão e compressão

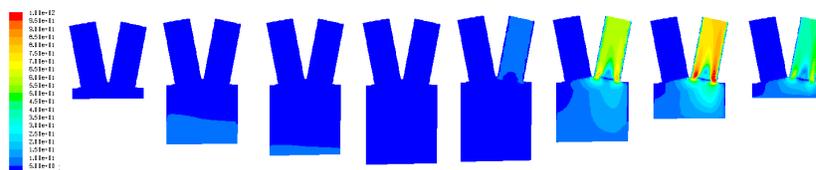


Fig. 4.3: Simulação de escoamento de ar na fase de expansão e exaustão

As figuras 4.4 e 4.5 são referentes às tentativas de simulação com combustão.

A figura 4.4 mostra a injeção de etanol em nos dois planos utilizados para visualização durante esta simulação. Apesar dos escoamentos de combustível parecerem condizentes, não houve reação. Os parâmetros necessários não foram encontrados e assim observaram-se somente os escoamentos. A escala de velocidades é de 0 a 150 m/s.

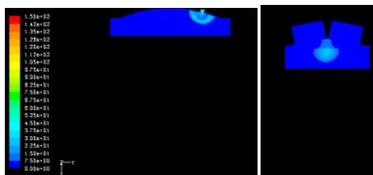


Fig. 4.4: Contorno de velocidade da injeção de etanol veja dos dois planos gerados

A figura 4.5 mostra os dois planos utilizados na simulação com etanol na fase de exaustão. Pode-se observar o perfil de velocidades na câmara de combustão e no tubo de saída da mistura, já que os dutos de admissão de ar e de combustível estão fechados nesse *crank angle*. A escala de velocidades é de 0 a 66,2 m/s.

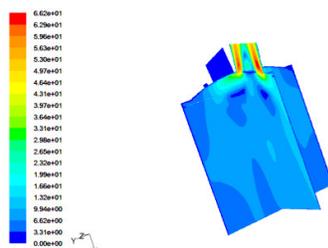


Fig. 4.5: Contorno de velocidade da exaustão visto dos dois planos gerados

5. Conclusões

Hoje em dia sabe-se a grande importância das fontes renováveis de combustível e a grande projeção que estas fontes deverão ter cada vez mais, buscando-se uma energia mais limpa.

Ferramentas como CFD tornam-se importantes no desenvolvimento de motores que possam utilizar o álcool como combustível, mesmo em motores de ignição por compressão, substituindo assim os derivados de petróleo por uma fonte de energia proveniente de biomassa.

Através de métodos como o das malhas móveis é possível simular esses motores. No entanto, neste trabalho as constantes e condições corretas para a simulação não foram encontradas e não se conseguiu fazer com que houvesse reação. Deste modo, não foi possível simular a combustão.

Apesar dos poucos resultados na parte de combustão, toda utilização das malhas móveis e simulação de escoamento de ar foram condizentes e mostraram bons resultados apesar de não poder-se garantir a convergência destes.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Bertoldi, Dalton; Simulação numérica em motores a combustão interna a gás natural. Universidade Federal de Santa Catarina- Santa Catarina, 2007.
- [2] Brambila, Jean Amadeo; Estudo experimental e simulação termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com óleo diesel e etanol / J.A. Brambila. -- ed.rev. --São Paulo, 2006.
- [3] Brunetti, F, Gracia, O.-Motores de Combustão Interna-1989.
Gray, C. & Webster, G- A Study of DME as an Alternative Fuel- Publication T.C. G.C. Canadá.
- [4] INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. Fundamentos de transmissão de calor e de massa. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2002. 5a edição 698p.
- [5] Mauro, B.R. Contani, E.A.R.-Estudo da emissão de poluentes em motor bi-combustível álcool-gasolina-EPUSP-2004.
- [6] Obert, E.F.-Motores de Combustão Interna-Editora Globo-1971.
- [7] Wylen, Van; SONNTAG; BORGNAKKE. Fundamentos da Termodinâmica. São Paulo, SP: 1998. 537p
- [8] www.ipen.br/scs/noticias/midia/2006. Acesso em junho de 2008
- [9] [www.ecowood.com.br/evento/palestras/07-08-Pedro Villalobos-Petrobrás](http://www.ecowood.com.br/evento/palestras/07-08-Pedro_Villalobos-Petrobrás). Acesso em julho de 2008
- [10] <http://www.fluentusers.com/fluent/doc/ori/pdf/ug/chp11.pdf>. Acesso em maio de 2008

6. Direitos Autorais

SIMPLIFIED MODEL OF A COMPRESSION IGNITION ENGINE OPERATING WITH ETHANOL

Delso Antonio Zanata Filho

delso.filho@gmail.com

Abstract. The preoccupation with environment is stimulating the use and development of ecological fuel, increasing the use of biomass. Brazil, through the ethanol production from sugar cane, is a world reference by using a renewable source of energy in automotive industry.

This work aims to simulate a compression ignition engine working on ethanol fuel.

Formerly the basics concepts of Otto and Diesel cycles are described.

Besides, some calculations methodology used by CFD (Computational Fluid Dynamics) codes, such as k-ε and RSM methods, are presented.

The commercial software Ansys ICEM is used in order to generate meshes. The simulations are executed making use of another software, FLUENT.

The Dynamic Layering Method is studied and applied in this report.

In addition, some results of the 2D and 3D simulations are described.

Keywords. *Simulation, combustion engine, numerical methods*