

# MODELO SIMPLIFICADO DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA OPERANDO COM GÁS DE BIOMASSA.

**Isabela de Almeida Soares**  
isabela.soares@gmail.com

**Guenther Carlos Krieger Filho**  
guenther@usp.br

**Resumo:** *A preocupação com o meio ambiente vem crescendo, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e combustíveis. O principal ponto de preocupação é com a diminuição do consumo de derivados de petróleo, em geral feita por combustíveis renováveis. Além disso, a busca de um maior aproveitamento energético da massa produzida, e da geração da menor quantidade de lixo possível, fez nascer o interesse pelos gases de biomassa.*

*Mudanças devem ser feitas nos equipamentos, para que haja a adaptação para os novos combustíveis desenvolvidos. Para isso, em busca da diminuição dos custos e do tempo de desenvolvimento dessas novas tecnologias, utilizam-se ferramentas computacionais.*

*No presente trabalho será feita a simulação de um motor utilizando o gás de biomassa como combustível. Uma malha com geometria da câmara de combustão simplificada, criada com o uso do software Icem e rodada no Fluent para analisar numericamente os fenômenos físicos dentro do cilindro, a distribuição de pressão, as trocas de calor, e outras características importantes da combustão na câmara.*

*Para a simulação adequada é necessário a escolha dos modelos que melhor representem o escoamento e a reação de combustão. Métodos para a representação da turbulência e da combustão são estudados nesse trabalho, além do conceito de malhas dinâmicas, que é necessário para simulação do motor.*

*Não houve sucesso na simulação devido ao grande tempo de processamento da geometria 3D não foi possível simular todos os ciclos necessários para garantir a convergência da malha gerada, além de não ter havido combustão da mistura no cilindro.*

*Palavras chave. Simulação, métodos numéricos, motores de combustão.*

## 1. Introdução

A indústria, nos dias de hoje, requer custos de desenvolvimento e projeto cada vez menores, para isso o tempo de projeto deve ser reduzido. Ferramentas computacionais são de grande importância para a redução do tempo de desenvolvimento desses novos produtos. Nesse projeto será feita a simulação em CFD de um motor de quatro tempos operando com gás de biomassa, sendo analisado numericamente o escoamento dentro do cilindro, a distribuição de pressão, transmissão de calor, e outras propriedades importantes no projeto, como material que deve ser utilizado para resistir à pressão e temperatura de operação.

Além da redução de custos, há grande importância com o desenvolvimento sustentável, e em particular, com o meio ambiente. A substituição de derivados do petróleo por combustíveis renováveis, e também o aproveitamento de tudo que for possível para reduzir a poluição ambiental. Gás de biomassa está sendo cada vez mais usado, visando não só a diminuição do volume de lixo, como também o aproveitamento energético que seria desperdiçado ao jogar, por exemplo, bagaço da cana de açúcar fora.

A pretensão do presente trabalho é fazer os estudos necessários, e em seguida a simulação em CFD de um motor quatro tempos operando com gás de biomassa, obtendo resultados para diversas propriedades do escoamento e da combustão, com a finalidade de analisar os mecanismos que afetam o desempenho do motor. Dentre essas propriedades, destacam-se a pressão e a temperatura no interior da câmara de combustão, os fluxos de massa através dos sistemas de admissão e de exaustão, as taxas de combustão e transferência de calor nas paredes do motor, bem como os campos de velocidade e de intensidade turbulenta. e em seguida a comparação dos dados obtidos com os dados experimentais medidos em um motor com dimensões e condições de operação semelhantes ao da geometria utilizada nas simulações.

Até agora não foi possível a obtenção de resultados, devido à falta de sucesso nas simulações, assim, o trabalho fica restrito somente nos estudos de casos e modelos.

## 2. Estudo para Simulação

O escoamento é modelado com o auxílio de algumas equações apresentadas nessa seção. As equações de transporte para o escoamento do caso estudado utilizam o conceito de média de Favre, por ter variâncias significativas de massa específica. O conceito de turbulência será avaliado pelo modelo  $k-\epsilon$  Standatd, onde  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $\epsilon$  é a taxa de dissipação de  $k$ .

## 2.1. Biogás de Resíduos Rurais e Urbanos

O Brasil possui grande disponibilidade de biogás oriundo de matéria orgânica, por meio da digestão anaeróbia de resíduos no meio rural, do lixo urbano nos aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgotos nos centros urbanos.

O biogás contém cerca de 60% de gás metano, 30% de gás carbônico e traços de gases sulfídricos. O gás metano é obtido por fermentação anaeróbia de esterco de curral, de palhas e de restos vegetais e lixo. O gás obtido possui em média de 2/3 de gás metano e 1/3 de gás carbônico.

A tabela 4.2. mostra a composição típica do biogás.

Tabela 2.1. Composição típica do biogás de fermentação anaeróbica

GÁS	SÍMBOLO	% NO BIOGÁS
Metano	CH <sub>4</sub>	50 a 80%
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	20 a 40%
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1 a 3%
Azoto	N <sub>2</sub>	0.5 a 3%
Sulfídrico e Outros	H <sub>2</sub> S, CO, NH <sub>3</sub> , O <sub>2</sub>	1 a 5%

Para a simulação o combustível será considerado como uma mistura de metano e ar, adequado para representar a composição da tabela 2.1.

Os motores a gás funcionam segundo os mesmos princípios dos motores Diesel e Otto, com algumas mudanças na taxa de compressão, nos sistemas de alimentação e de ignição. Motores a gás, de ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor com combustível de petróleo, pelo fato da adição de gás reduzir o volume de ar aspirado. Contudo, a menor eficiência volumétrica é, geralmente, compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas, 12:1. Isto é possível porque o poder antidetonante do gás está ligado ao número de metano, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior será a resistência à detonação.

A taxa de compressão não deve exceder a 12:1, pois a composição do biogás não é constante, e isto pode levar à detonação em alguns momentos. Já o ponto de ignição deve ser avançado, pois a velocidade de combustão do biogás é mais lenta.

## 2.2. Modelo de Turbulência

Na engenharia, todos os tipos de escoamento se tornam instáveis a partir de um número de Reynolds. Os fluxos laminares ocorrem somente a baixos números de Reynolds, quando o fluxo passa a ser instável temos escoamento turbulento, a velocidade e a pressão mudam constantemente com o tempo, gerando um estado de movimento que não se pode ser previsto totalmente previsto.

Os escoamentos laminares podem ser completamente descritos por equações, sendo casos simples, a continuidade e a equação de Navier-Stokes podem ser resolvidas, em casos mais complicados são usadas técnicas de CFD. As menores escalas de movimentos onde podemos ter turbulência são efeitos da viscosidade, que em alguns casos se torna muito importantes.

Praticamente todos os escoamentos significantes são turbulentos, por isso ferramentas capazes de analisar os efeitos da turbulência são necessárias. A natureza aleatória de um fluxo turbulento impede que todas as partículas do fluido sejam descritas, sendo utilizados valores médios e uma componente de flutuação para sua representação.

A turbulência é um estado mais interessante, pois a troca de calor, massa e momento só ocorrem efetivamente em escoamentos turbulentos. Devido à complexidade deste tipo de escoamento, pesquisadores usam ferramentas estatísticas para a análise dos mesmos. No entanto, essas médias estatísticas não permitem estudar importantes informações desses escoamentos, como as instabilidades.

Para o estudo da turbulência, pode-se partir dos trabalhos de Reynolds (estabeleceu os conceitos iniciais de escoamento turbulento). Outros pesquisadores, que aprimoraram os conceitos iniciais podem ser citados, tais como Rayleigh, Boussinesq, Prandtl e Von Karman. Com o uso das informações deixadas pelos pesquisadores mais antigos foram criados diversos modelos de turbulência.

Existem os modelos clássicos para representar a turbulência, que usam as equações de Reynolds e formam a base dos códigos comerciais de CFD. Além dos modelos clássicos, existe um tipo de modelo que resolve equações do escoamento médio e dos principais vórtices em função do tempo (Large Eddy Simulation - LES). Depois de calcular a média, desprezando as flutuações podem ser escritas as equações de movimento do escoamento. Dentro desta metodologia existe o modelo de Smagorinsky, que pode ser visto como uma combinação da média de Reynolds com os efeitos da viscosidade (necessário um modelo de viscosidade). Este modelo é aplicável para escoamentos de altos

números de Reynolds, especialmente nos casos onde o escoamento é instável, é transiente com estruturas coerentes, é flutuante com grandes regiões instáveis. O problema com esse tipo de modelo é que atualmente esses cálculos são muito pesados e, conseqüentemente de alto custo, sendo necessário um desenvolvimento computacional para mudar as perspectivas das simulações CFD.

### 2.3. Modelo k-ε Standard

O principal modelo entre os clássicos é o k-ε, que é um modelo de duas equações, baseado na viscosidade turbulenta (hipótese de Boussinesq). Apresenta duas equações de transporte, modeladas separadamente, que são resolvidas, uma para energia cinética (k) e outra para o termo de dissipação da energia cinética (ε).

Quando o número de Reynolds é alto, as equações desse modelo podem ser usadas para toda a malha, inclusive para as paredes. Em casos de baixos números de Reynolds é necessário mudar a forma de tratar as condições de contorno na parede. Para isso, o Fluent possui uma opção nos modelos de viscosidade (“Enhanced Wall Treatment”). Equação de Navier-Stokes na forma conservativa:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2.1)$$

Onde,  $p = P + p'$  e  $u_i = U_i + u_i'$ .

Ou seja, as grandezas são representadas por uma média somada com uma flutuação.

Para a equação de Reynolds utilizamos uma média da equação de Navier-Stokes, denominada RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que resulta em:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \cdot \overline{u_i' \cdot u_j'} \right] \quad (2.2)$$

### 2.4. Modelo de Combustão

O combustível gasoso entra no cilindro pré-misturado com o ar, e com uma taxa de compressão de 10:1. Entretanto, o modelo utilizado para a combustão não foi o de pré-mistura, e sim o de transporte de espécies com reação volumétrica.

Nesse modelo, quando equações de conservação das espécies químicas são resolvidas, o programa encontra a fração local em massa de cada espécie,  $Y_i$ , através da solução de uma equação de convecção-difusão da espécie i. Essa equação tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2.3)$$

Onde  $R_i$  é a taxa líquida de produção das espécies i por reação química e  $S_i$  é o termo fonte.

O fluxo de difusão das espécies, em escoamento laminar, que aumenta devido a gradientes de concentração é representado pela equação 4.42.

$$\vec{J}_i = -\rho \cdot D_{i,m} \cdot \nabla Y_i \quad (2.4)$$

Onde  $D_{i,m}$  é o coeficiente de difusão da espécie i na mistura.

Em regimes turbulentos, que envolve a maioria dos problemas de engenharia, a difusão é calculada pela seguinte expressão.

$$\vec{J}_i = -\left( \rho \cdot D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \cdot \nabla Y_i \quad (2.5)$$

Onde  $Sc_t$  é o número de Schmidt turbulento. O valor padrão de  $Sc_t$  é 0,7.

calor da mistura não queimada.

### 3. Metodologia

A geometria do problema será simplificada para um caso 3D sem movimento das válvulas de injeção e exaustão, onde utilizando o software Fluent, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia das espécies químicas podem ser resolvidas.

O modelo de turbulência a ser utilizado é o k-ε Standard, como já dito na seção anterior. A combustão será simulada com o uso do Eddy-dissipation model.

Como condições de contorno, o bloco do motor pode ser considerado isotérmico, a admissão e exaustão são admitidas como feitas em pressão constante.

A superfície do pistão se move de acordo com o ângulo de rotação do virabrequim, e para as válvulas é necessária a determinação de eventos que determinam a abertura e fechamento das válvulas nos momentos certos, e cada simulação inicia com o pistão no ponto morto superior.

Para a solução numérica utiliza-se o modelo SIMPLE para a equação do acoplamento pressão-velocidade, o Up Wind de 2a ordem para as equações de massa, quantidade de movimento e energia.

#### 3.1. Discretização de Espaço e Tempo

A equação de conservação para o transporte de uma quantidade  $\phi$  qualquer, em regime transiente, é descrita abaixo como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \phi) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \cdot \nabla_\phi) + S_\phi \quad (3.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade,  $\nabla_\phi$  é o gradiente de  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$  é o coeficiente de difusão para  $\phi$  e  $S_\phi$  é um eventual termo fonte de  $\phi$ .

Para a discretização de acordo com a metodologia de volumes finitos, a equação acima é integrada no espaço em um volume de controle, resultando na seguinte equação:

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \oint \rho\phi\vec{u} \cdot d\vec{A} = \left( \int \Gamma_\phi \nabla_\phi \cdot d\vec{A} \right) + \int_V S_\phi dV \quad (3.2)$$

Onde  $\vec{u}$  é o vetor velocidade,  $\vec{A}$  é o vetor área e  $V$  é o volume.

A equação acima representa o balanço líquido da propriedade  $\phi$  em um volume finito. Os termos do lado esquerdo representam a variação com o tempo da propriedade no volume de controle e o transporte advectivo líquido através das faces do volume de controle. Os termos do lado direito representam o transporte difusivo líquido e a geração da propriedade  $\phi$  no volume. Considerando os fluxos médios nas faces do volume finito temos a equação do transporte discretizada com a seguinte forma

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + V \sum_f^{N_f} \rho_f \phi_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_\phi (\nabla_\phi)_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (3.3)$$

onde o subíndice  $f$  representa a face do volume finito,  $\overline{\rho_f \vec{u}_f} \cdot \vec{A}_f$  é o fluxo de massa através da face e  $(\nabla_\phi)_f$  representa a magnitude do gradiente  $\nabla_\phi$  normal à face  $f$ .

Na malha utilizada para a discretização, todas as variáveis são calculadas para o centro de cada volume finito. A relação que uma variável mantém com a variável dos volumes vizinhos pode ser vista reescrevendo-se a equação na forma

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{NB} + S_u \quad (3.4)$$

Temos então um sistema de equações discretizadas, formando uma matriz que deve, então, ser resolvida para a obtenção do valor da propriedade  $\phi$  em cada volume do domínio discreto.

Como as equações governantes utilizadas no caso deste trabalho são aplicadas para regimes transientes, devemos também fazer uma discretização no espaço, com os termos das equações de conservação integrados ao longo do tempo. Esta discretização temporal, com precisão de primeira ordem pode ser escrita como:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (3.5)$$

onde a função  $F$  representa a discretização espacial, e os sobrescritos  $n$  e  $n+1$  representam o tempo atual e o próximo instante de tempo, respectivamente. Adota-se a precisão temporal de primeira ordem devido a uma limitação do código Fluent em usar esquemas de maior ordem de precisão para malhas móveis.

### 3.2. Acoplamento Pressão-Velocidade

Num problema de transporte de quantidade de movimento, a solução correta é obtida quando o campo de pressões introduzido nas equações de Navier-Stokes gera velocidades que satisfaçam a equação da conservação da massa. O método utilizado para garantir essa condição é denominado acoplamento pressão-velocidade.

Os métodos que se destacam na realização deste acoplamento são os seguintes: SIMPLE, SIMPLER e PISO. Os dois últimos fornecem melhores taxas de convergência, ou seja, menores tempos de processamento do que o SIMPLE. Em comparação feita por Jang et AL. (1986), mostrou-se que o algoritmo PISO apresentava o melhor desempenho na convergência e, assim, o menor custo computacional entre os três.

O algoritmo PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) é um procedimento desenvolvido, originalmente, para o cálculo não-iterativo de escoamentos transientes compressíveis. Este algoritmo pode ser visto como uma extensão do método SIMPLE, porém, com o uso de um passo a mais para a correção do campo de pressão. Apesar de apresentar melhor convergência, esse algoritmo não é indicado para casos com pequenos time steps.

Assim, em função dos dados da literatura, optou-se pelo uso do algoritmo SIMPLE como método para o acoplamento pressão-velocidade.

### 3.3. Malhas Dinâmicas

O motor de combustão interna apresenta movimentos prescritos para o pistão e para as válvulas de admissão e de exaustão. Estes movimentos requerem que as fronteiras da geometria, bem como a malha nela contida, se adaptem de acordo com o ângulo de manivela (ou instante de tempo) em que o motor está sendo simulado. Desta forma, o pistão pode transladar do ponto morto superior até o ponto morto inferior, levando consigo os inúmeros volumes que compõem a malha da geometria. Este comportamento, análogo às válvulas de admissão e de exaustão, exige o uso de uma metodologia de malhas móveis.

O código comercial Fluent disponibiliza três métodos diferentes para lidar com as malhas móveis. O deslocamento do pistão e das válvulas será tratado com o método de camadas dinâmicas (dynamic layering method). A sua escolha deve-se à sua facilidade de uso em malhas quadrangulares em problemas bidimensionais.

Para pequenos deslocamentos causados pelo movimento do pistão, utiliza-se o método Smoothing, para realocar os nós.

Em regiões onde é necessário refazer as malhas, devido a deslocamentos maiores, utiliza-se o método remeshing, que será mais detalhado a seguir.

#### 3.3.1. Camadas Dinâmicas (Fronteiras Móveis)

Nesta metodologia é possível adicionar ou remover camadas de células próximas à fronteira móvel baseando-se na altura da camada de células adjacentes a esta fronteira. Esta metodologia permite que seja especificada uma altura de célula ideal para cada fronteira móvel. Desta forma, a camada de células próxima a fronteira móvel (camada j) é dividida ou ligada com a camada de células adjacente a ela (camada i) de acordo com a altura  $h$  das células da camada j. A representação esquemática desta condição pode ser vista com o auxílio da Figura 4.3 a seguir:

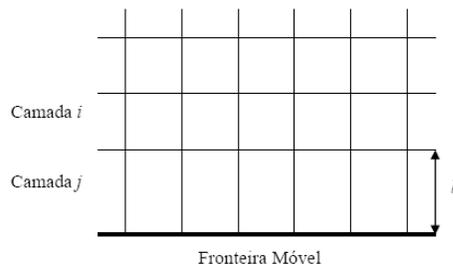


Figura 3.1 – Esquema da metodologia de malhas móveis

Se as células da camada j forem expandidas, elas terão seu crescimento limitado pela relação

$$h_{\min} > (1 + \alpha_c) \cdot h_{\text{ideal}} \quad (3.6)$$

Onde  $h_{\min}$  é a menor altura para a célula na camada j,  $h_{\text{ideal}}$  é o tamanho da célula ideal e  $\alpha_c$  é um fator de divisão.

Na compressão utiliza-se um fator de compressão  $\alpha_c$ , e o tamanho mínimo da célula é definido por

$$h_{\min} > \alpha_c \cdot h_{\text{ideal}} \quad (3.7)$$

Quando a condição apresentada na equação 5.7 é atingida, as células da camada  $j$  são ligadas as células da camada  $i$ .

### 3.3.2. Modelo In-Cylinder

Para o modelo de malha dinâmica de problema no interior de um cilindro é necessário levar em conta algumas considerações especiais:

- Como garantir uma topologia apropriada da malha para os métodos de atualização dos volumes da malha (spring-based smoothing, dynamic layering, e local remeshing)
- Como definir a movimentação e a geometria para as superfícies das válvulas e do pistão.
- Como endereçar a abertura e fechamento das válvulas de injeção e exaustão.
- Como especificar a seqüência de eventos que controlam a simulação.

#### 3.3.2.1. Topologia da Malha

Na geração da malha é necessário considerar as regiões que podem ser identificadas como móveis, deformáveis ou estacionárias, e então gerar essas regiões com o formato apropriado.

Devido à movimentação retilínea das superfícies móveis, pode-se utilizar zonas dinâmicas para representar as regiões deformadas pelas superfícies móveis. Essas regiões são as áreas sobre as superfícies das válvulas e a região acima da superfície da cabeça do pistão. Essas zonas precisam possuir malhas com células quadrilaterais e hexaédricas (como requerido pelo método dynamic layering).

Para a região da câmara de combustão, deve ser definida uma região de remeshing (células triangulares) para acomodar as posições das válvulas que mudam no curso da simulação. Nessa região, o movimento das fronteiras é propagado para os nós interiores, utilizando o método spring-based smooting. Assim, se as características da célula violar qualquer um dos critérios definidos para o remeshing, o Fluent irá automaticamente aglomerar essas células e redefinir a malha no local. Além disso, o Fluent irá refazer a malha das faces móveis nas paredes do cilindro, assim como as sliding interfaces usadas para conectar a zona da câmara com a zona acima das superfícies das válvulas.

Para as regiões de injeção e exaustão podem ser utilizadas células tanto triangulares quanto quadrilaterais, pois essas zonas não são móveis nem deformáveis.

#### 3.3.2.2. Definição da Posição Inicial

É recomendada a geração da malha com uma geometria que coincida com o ponto morto superior do pistão. Pode-se utilizar o Fluent para posicionar as válvulas e pistão numa posição que corresponda com o ângulo inicial do virabrequim.

#### 3.3.2.3. Definição dos Movimentos das Zonas da Malha Móvel

Conforme o pistão se move do PMS ao PMI é necessário expandir a região onde será refeita a malha de forma que acomode as válvulas na posição totalmente aberta. Para isso é preciso especificar a zona onde ocorrerá layering (adjacente à superfície do pistão) para mover com o pistão até uma distancia especifica do PMS. Ao chegar nessa posição especificada, o movimento dessa zona para e o pistão continua descendo até o ponto morto inferior.

O movimento das válvulas é definido com o uso de perfis que descrevem a variação da abertura da válvula com o ângulo do virabrequim, porém, para simplificação da geometria não haverá movimento das válvulas, mas sim uma superfície que é considerada aberta ou fechada por meio de eventos.

#### 3.3.2.4. Abertura e Fechamento das Válvulas

Para fazer o movimento de abertura e fechamento das válvulas, o Fluent assume que, uma vez que a topologia da malha tenha sido definida, essa topologia não mudará no decorrer da simulação. Portanto não é possível fechar completamente as válvulas, já que desta forma as células entre a válvula e a base da válvula seriam degeneradas quando as duas superfícies entrassem em contato. Para prevenir o colapso entre essas superfícies de acontecer deve ser definido um valor mínimo para o deslocamento da válvula, então o Fluent pára automaticamente a movimento da válvula quando a distancia do deslocamento for menor que o valor mínimo.

Quando a válvula alcança esse valor mínimo assume-se que a válvula está fechada.

A abertura da válvula é alcançada pelo processo inverso. Quando o valor de abertura tiver alcançado o valor mínimo definido, a válvula é considerada aberta.

O uso de uma malha 3D fez necessária uma simplificação na geometria, devido ao tempo de execução da simulação. Um das simplificações feitas foi a ausência de válvulas móveis. Assim, a abertura e o fechamento das válvulas é feita por meio de eventos que considera uma abertura de área constante para injeção e exaustão, que pode ser definida como wall (válvula fechada) ou interior (válvula aberta).

#### **3.3.2.5. Definição de Eventos**

O Fluent limita os valores de deslocamento das válvulas conforme o especificado automaticamente, porém é necessário fazer a conversão das zonas móveis (sliding interfaces) em paredes e vice-versa, quando necessário. Para essa conversão é necessária a definição de eventos específicos. Por exemplo, para a abertura da válvula de injeção, em um dado ângulo de virabrequim deve-se criar uma interface deslizante (sliding interface).

#### 4. Definição de Eventos

Inicialmente, para analisar se a malha gerada é adequada, foi feita uma simulação somente com escoamento de ar. Foi possível perceber que, apesar de um malha grosseira, o caso está convergindo rapidamente, assim sendo, aparentemente não há problemas com a malha gerada.

O escoamento convergiu no terceiro ciclo do pistão, isso pode ser notado comparando as velocidades no mesmo ângulo de virabrequim, por exemplo, com duas figuras representando o escoamento num mesmo ângulo de virabrequim.

A figura 3.2 representa um mesmo ângulo de virabrequim em ciclos diferentes para a entrada de ar no motor, com essas figuras pode-se notar que as velocidades no cilindro durante a injeção estão iguais, ou seja, o escoamento está convergido.

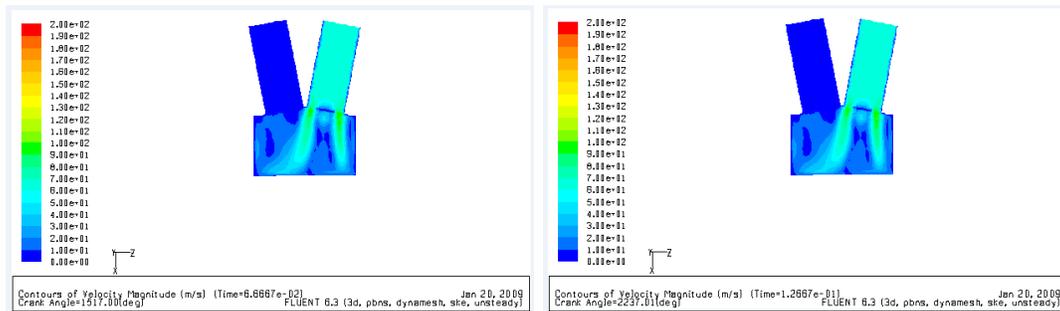


Figura 3.2. – À esquerda velocidade do escoamento no terceiro ciclo de simulação para o ângulo de 77° do virabrequim e à direita, no quarto ciclo de simulação com o mesmo ângulo do virabrequim.

No tubo de injeção as paredes possuem uma malha grosseira, por isso nota-se que a velocidade próxima à parede está inadequada. Caso não houvesse problema com o tempo de simulação, o ideal seria refinar a malha na região das paredes dos tubos.

A figura 3.3 representa um mesmo ângulo de virabrequim para dois ciclos diferentes para a saída de ar no motor, com essa figura pode-se notar que as velocidades no cilindro durante a exaustão também estão iguais, ou seja, o escoamento está convergido.

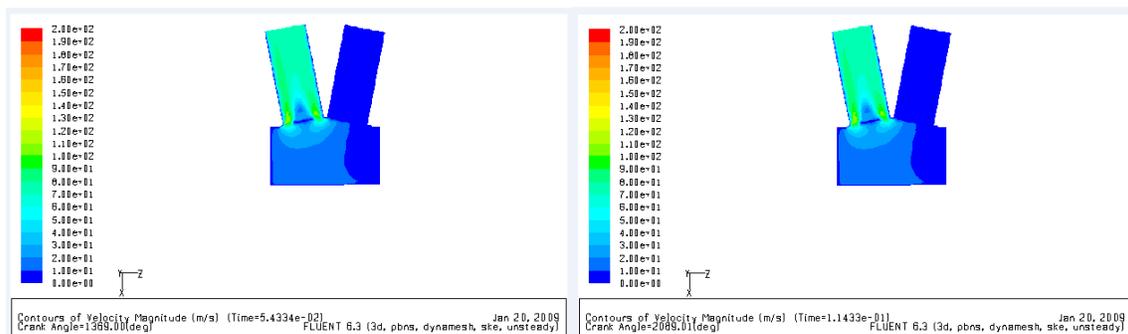


Figura 3.3 – À esquerda velocidade do escoamento no segundo ciclo de simulação para o ângulo de 649° do virabrequim e à direita, no terceiro ciclo de simulação com o mesmo ângulo do virabrequim.

O tubo de exaustão também mostra problemas com a malha na região da parede, sendo necessário refinamento da malha, que não foi feito devido ao tempo de processamento.

Depois de garantir que a malha está convergindo foi ligada a reação volumétrica, colocado o combustível (mistura de CH<sub>4</sub> e ar) e a ignição por faísca.

As constantes utilizadas nas simulações foram variadas diversas vezes, na tentativa de conseguir que a reação da mistura acontecesse, porém não se obteve êxito na combustão no interior do cilindro.

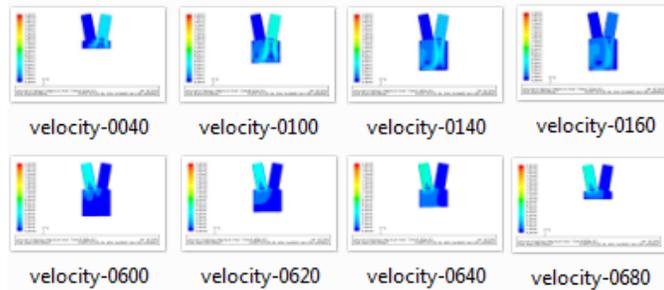


Figura 3.4 – Velocidades na injeção e compressão (velocity-“ângulo virbrequim”)

Pode-se notar, através de gráficos da pressão no interior do cilindro, que não temos combustão. Na figura 6.6 tem-se a pressão no interior do cilindro, que não passa de 400 kPa, enquanto um motor enquanto motores passam de 10 MPa.

A temperatura do cilindro no fim da compressão

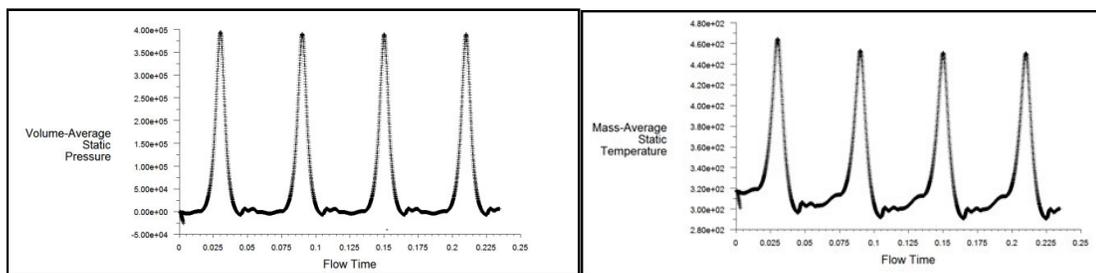


Figura 3.5 – Pressão e temperatura no cilindro (Pa) x tempo (s)

## 5. Conclusões

Atualmente, a dinâmica dos fluidos computacional vem crescendo nas indústrias e centros de desenvolvimento de novos projetos. Com o grande interesse de fazer a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, e utilizando-se da ferramenta CFD pode-se obter resultados que representem adequadamente as condições de operação da câmara de combustão, e as características dentro do cilindro, como distribuição de pressão e temperatura, escoamento, transferência de calor nas paredes, entre outras propriedades importantes.

Existem métodos específicos para a simulação em CFD de motores, assim como método in-cylinder e malhas móveis, para auxiliar na resolução do problema de forma adequada.

Além da incerteza na convergência da simulação, causada pelo grande tempo de processamento, não houve êxito na obtenção da combustão no interior do cilindro. Para que a reação aconteça, é necessário encontrar parâmetros adequados para a simulação e rodar mais ciclos do pistão para assegurar que esteja convergindo.

A taxa de compressão utilizada está adequada (10:1).

O problema também pode ser causado por condições de contorno utilizadas, ou pela fração mássica de combustível-ar utilizada.

Com os valores corretos das constantes utilizadas na simulação seria possível analisar o comportamento do motor operando com gás de biomassa, e estudar as curvas de operação para então poder validar ou não o modelo utilizado na simulação.

## 6. Referências

- Versteeg H.K., Malalasekera W. Introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method; Longman, 1995.
- Bertold, Dalton e Deschemps, César J. ; “Numerical simulation of internal combustion engines”; Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina - SC.
- Westbrook, C. K., Mizobuchi, Y., Poinot, T. J, Smith, P. J., Warnatz, J; Computational combustion. Proceedings of the Combustion Institute; Artigo técnico 2005.
- Brambila, Jean Amadeo; Estudo experimental e simulação termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com óleo diesel e etanol; Tese de mestrado 2006, EPUSP.

## SIMPLIFIED MODEL OF AN SPARK-IGNITION ENGINE OPERATING WITH BIOMASS GAS FUEL

**Isabela de Almeida Soares**

isabela.soares@gmail.com

**Guenther Carlos Krieger Filho**

[guenther@usp.br](mailto:guenther@usp.br)

**Abstract.** The increasing concern about the environment has been stimulating the development of new technologies and fuels. The main interest is set in decreasing the oil consumption by renewable fuels.

Another aim is with the good use of the production, and the generation of minor quantities of waste, that caused a raise in the interest in biomass fuels.

This development demand changes in equipments in order to get adapted with different fuels. In search of lower costs and time for the development of new equipments technologies, computational tools are used.

The present work intends to make a simulation of an internal combustion engine operating with biomass gas as fuel. A simplified geometry will represent the combustion chamber, in order to generate a grid, making use of the software Icem, and then making use of another software (Fluent) to examine the physical phenomena associated to the fluid flow.

Some results are provided, such as pressure and temperatures in the in-cylinder, mass rates at intake and exhaust systems, combustion rate and heat transfer rate to cylinder walls, besides velocity, turbulence intensity and temperature fields.

Methods for representation of turbulence phenomena and combustion are studied so that a proper model will be used in the simulation and good results can be obtained.

There was no success in the simulation, due to the processing time of the 3D geometry. To ensure the convergence of the simulation many cycles are necessary, besides, there was no burning of the mixture inside the cylinder.

*Keywords.* Simulation, numerical methods, internal combustion engine.