

IMPLEMENTAÇÃO DE SONDAS NUMÉRICAS PARA TRATAMENTO DE DADOS ESTATÍSTICOS EM MALHA ADAPTATIVA

Rafael Romão da Silva Melo, Universidade Federal de Uberlândia, faelromelo@gmail.com

João Marcelo Vedovoto, Universidade Federal de Uberlândia, jmvedovoto@mecanica.ufu.br

Millena Martins Villar, Universidade Federal de Uberlândia, millena.villar@gmail.com

Aristeu da Silveira Neto, Universidade Federal de Uberlândia, aristeus@ufu.br

Resumo: A utilização de malha adaptativa dinâmica em simulações numéricas geram grande economia em tempo de processamento e memória utilizada em computadores. Dependendo da aplicação, como por exemplo escoamentos turbulentos, pode-se existir uma malha diferente para cada instante de tempo. Nestes casos a obtenção de dados estatísticos, como por exemplo média e desvio padrão, não é feita diretamente no volume da malha, uma vez que a malha se modifica ao longo do tempo. Este trabalho propõe a utilização de sondas numéricas constituídas por pontos lagrangianos posicionados em regiões de interesse, as quais coletam dados dos campos independente da configuração da malha. Foram feitas aplicações e os resultados obtidos nas sondas foram satisfatórios.

Palavras-chave: Sonda numérica, Simulação numérica, Malha adaptativa, Processamento estatístico

1. INTRODUÇÃO

A utilização de malha adaptativa dinâmica em simulações numéricas geram grande economia em tempo de processamento e memória utilizada em computadores. Dependendo da aplicação, como por exemplo escoamentos turbulentos, pode-se existir uma malha diferente para cada instante de tempo. A Figura (1) apresenta um exemplo apresentado em Melo et al. (2014), onde é mostrada uma malha adaptada em regiões de grande intensidade de estruturas turbilhonares.

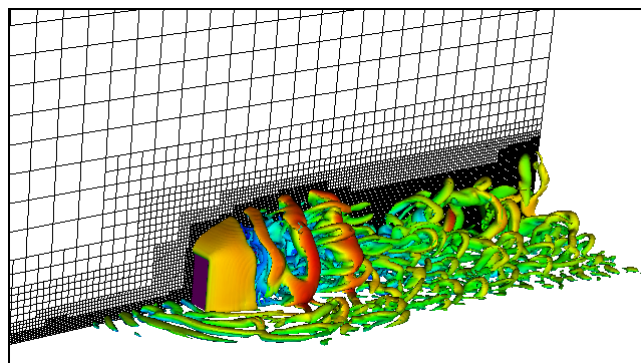


Figura 1: Escoamento turbulento sobre um cubo utilizando malha adaptativa (Melo et al., 2014).

Em casos como deste exemplo a obtenção de dados estatísticos, como por exemplo média e desvio padrão, não é feita diretamente no volume da malha, uma vez que a malha se modifica ao longo do tempo. Uma solução seria a utilização de uma malha auxiliar com refinamento em todo o domínio para armazenamento dos dados estatísticos, e a cada passo de tempo as informações são interpoladas para esta malha. A desvantagem é que dependendo do tamanho do domínio e do nível do refinamento máximo o custo de tempo de processamento e memória inviabilizariam esta ideia. Outra solução que poderia ser utilizada é o transporte dos dados estatísticos de uma malha para a próxima após o refinamento. Porém o processo de interpolação dissiparia os dados ao longo do tempo, principalmente se existe uma grande variação da malha em determinada região.

Este trabalho propõe a utilização de sondas numéricas constituídas por pontos lagrangianos posicionados em regiões de interesse, as quais coletam dados dos campos independente da configuração da malha. A implementação foi realizada no código AMR3D, código desenvolvido no MFLab/UFU, o qual utiliza malha adaptativa bloco-estruturada. Foram feitas aplicações e os resultados obtidos nas sondas foram satisfatórios.

2. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada neste trabalho.

2.1. O código AMR3D

O código utilizado para realizar as implementações e testes das sondas numéricas foi o AMR3D. A ferramenta possui varias bibliotecas para solução de problemas em engenharia voltados a mecânica dos fluídos, entre elas a solução de escoamentos a elevado número de Reynolds, situação utilizada para o teste das sondas numéricas. Com relação ao modelo de turbulência foi utilizada a simulação das grandes escalas, onde as grandes escalas são calculadas e as pequenas escalas são modeladas. Considerando a hipótese de Boussinesq, é calculada uma viscosidade efetiva, e o modelo utilizado Dinâmico proposto por Germano et al. (1991) e modificado por Lilly (1992). Este modelo permite que a turbulência seja modelada de maneira eficiente de acordo com a característica do escoamento, como por exemplo em regiões de esteira, ou então em regiões parietais, situações de escoamento totalmente diferentes.

Para resolver os sistemas lineares provenientes da discretização, o método utilizado no código AMR3D é o Multigrid (Trottenberg and Schuller, 2001). Porém como é utilizada malha com refinamento local, este método então é denominado Método Multigrid-Multinível, onde existem dois grupos de malhas, que podem ser denominados níveis virtuais e níveis físicos. Os níveis virtuais formam a malha base, e são dividido em uma quantidade N_{virt} para aplicar o ciclo do método multigrid. E os níveis físicos formam os blocos de refinamento local, e também pode ser divididos em N_{fis} níveis, sendo que o método multigrid percorre os níveis físicos também

2.2. Modelagem matemática

Neste trabalho foram resolvidas as equações de Navier-Stokes, não-conservativa. O modelo deve obedecer ao balanço de massa, apresentado na Eq. (1), na forma tensorial:

$$\frac{\partial (u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

O modelo ainda resolve uma equação do momentum para cada componente de velocidade através da Eq. (2), também na forma tensorial:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \quad (2)$$

em que p é a pressão, ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, u_i é a componente i do vetor velocidade e f_i é a componente i do termo fonte genérico.

2.3. Sondas numéricas

Nesta subseção será apresentada o algoritmo utilizado para implementação das sondas numéricas no código AMR3D. Este algoritmo segue as seguintes etapas:

1. Definição dos pontos:

A primeira etapa na criação das sondas é definir a quantidade de sondas e a posição espacial de cada uma delas. Para isso foi criado um arquivo de entrada, escrito ASCII para facilitar a interface entre usuário e código, onde é inserida a quantidade de sondas, e em seguida um ID para cada uma delas e a posição espacial (x, y, z). A seguir é apresentado um exemplo de arquivo de entrada, onde são definidas 5 sondas, com posições y e z constantes, e diferentes posições para x , dispostas de maneira equidistantes:

1	5			
2	1	0.0	0.5	0.5
3	2	0.2	0.5	0.5
4	3	0.4	0.5	0.5
5	4	0.6	0.5	0.5
6	5	0.8	0.5	0.5

2. Leitura dos pontos:

O passo seguinte é a leitura destes pontos no código AMR3D, sendo que na leitura é necessário considerar o paralelismo da ferramenta. Desta maneira o algoritmo percorre todos os processos, de número N_{proc} , e verifica quais sondas serão alocadas a quais processos. Isto é feito a partir da coordenada da sonda, a qual é comparada com as coordenadas espaciais do domínio em cada processo. Para isto percorre-se todos os processos, e em cada processo faz-se a leitura do arquivo de entrada das sondas, e para cada sonda verifica-se se a posição da mesma em cada direção está dentro das posições delimitadas pela região que é resolvida naquele processo. Se sim são

armazenadas as informações da sonda naquele processo, se não é feito o armazenamento dos dados. A seguir segue o algoritmo simplificado da leitura:

```

1 Para ii = 1 ate numeroProcessadores
2     Se(ii == processoAtual)
3         abrir("arquivoSondas.dat")
4         numeroDeSondaNoProcesso = 0
5         Para i = 1 ate numeroSondas
6             leitura: idd, xSonda, ySonda, zSonda
7             Se(xSonda >= xIniProcesso e xSonda < xFinProcesso)
8                 Se(ySonda >= yIniProcesso e ySonda < yFinProcesso)
9                     Se(zSonda >= zIniProcesso e zSonda < zFinProcesso)
10                        numSondaNoProcesso = numSondaNoProcesso + 1
11                        vetorSondasId(numSondaNoProcesso) = idd
12                        vetorSondasPosX(numSondaNoProcesso) = xSonda
13                        vetorSondasPosY(numSondaNoProcesso) = ySonda
14                        vetorSondasPosZ(numSondaNoProcesso) = zSonda
15                    fim
16                fim
17            fim
18        fim
19    fim
20 fim
    
```

3. Mapeamento das sonda na malha:

Conhecendo quais pontos estão e quais processos é necessário mapear estes pontos na malha euleriana. Para isto é feita uma varredura em todos os níveis de refinamento da malha em cada processo, partindo do nível mais grosso l_{bot} até o nível mais fino l_{top} . Dentro de cada nível l percorre todas as sondas numéricas alocadas naquele processo, e para cada sonda percorre-se todos os blocos estruturados do nível l , e então é feita a comparação da coordenada da sonda com as coordenadas do bloco analisado. Caso a sonda pertença ao bloco atual encerra-se a busca, se não a busca é continuada. A seguir segue o algoritmo simplificado do mapeamento das sondas, sendo que este algoritmo é executado por todos os processadores:

```

1 Para l = lbot ate ltop
2     Para i = 1 ate numSondaNoProcesso
3         xSonda = vetorSondasPosX(i)
4         ySonda = vetorSondasPosY(i)
5         zSonda = vetorSondasPosZ(i)
6         Para j = 1 ate numeroBlocosNoNivelL
7             Se(xSonda >= xIniBloco e xSonda < xFinBloco)
8                 Se(ySonda >= yIniBloco e ySonda < yFinBloco)
9                     Se(zSonda >= zIniBloco e zSonda < zFinBloco)
10                        indiceSonda(i) -> indiceBlocoAtual
11                    fimBusca
12                fim
13            fim
14        fim
15    fim
16 fim
17 fim
    
```

4. Interpolação dos dados:

A etapa final do algoritmo consiste em interpolar os dados da malha euleriana para o ponto da sonda, já devidamente localizado a nível de processo, nível da malha e bloco-estruturado. Para isto é utilizada uma função de interpolação:

$$\Phi_k(\vec{x}_k) = \sum_{\Omega} \phi(\vec{x}_{i,j,k}) D_{ij}(\vec{x}_{i,j,k} - \vec{x}_k) \Delta V(\vec{x}_{i,j,k}), \quad (3)$$

sendo $\Phi_k(\vec{x}_k)$ a variável interpolada para a sonda, $\phi(\vec{x}_{i,j,k})$ é a variável no domínio euleriano, por exemplo velocidade ou pressão, $\Delta V(\vec{x}_{i,j,k})$ o volume do elemento da malha euleriana, D_{ij} representa uma função de interpolação. Neste trabalho é adotada a função gaussiana, a qual possui a seguinte forma:

$$D_{ij}(\vec{x}_K) = \frac{g[(x_K - x_i)/\Delta]g[(y_K - y_j)/\Delta]g[(z_K - z_i)/\Delta]}{\Delta^3}, \quad (4)$$

$$g(r) = \begin{cases} g_1(r), & \|r\| < 1 \\ \frac{1}{2} - g_1(2 - \|r\|), & 1 < \|r\| < 2 \\ 0, & \|r\| > 2 \end{cases}, \quad (5)$$

$$g_1(r) = \frac{3 - 2\|r\| + \sqrt{1 + 4\|r\| - 4\|r\|^2}}{8}, \quad (6)$$

sendo Δ o tamanho característico da malha euleriana. Esta função mostra que quanto mais distantes estão os volumes eulerianos da sonda, menor é o valor da contribuição do valor interpolado para o valor da sonda. Uma propriedade importante desta função é que ao integrá-la em todo domínio se obtém o valor unitário (Oliveira, 2006).

A seguir serão apresentados resultados.

3. RESULTADOS

Nesta seção será apresentada uma aplicação industrial, o escoamento sobre um degrau descendente. A geometria foi baseada em uma câmara de combustão apresentada em Moreau et al. (1996).

A Figura (2) apresenta um esquema da câmara de combustão A3C (Moreau et al., 1996). Os dados geométricos são: $L = 9$ m, $h = 1$ m, $c = 1$ m, $b = 1$ m e $h_i = 0,65$ m. As condições de contorno são velocidade imposta na entrada, condição de saída de fluxo na saída, condição de não deslizamento em todas as outras paredes.

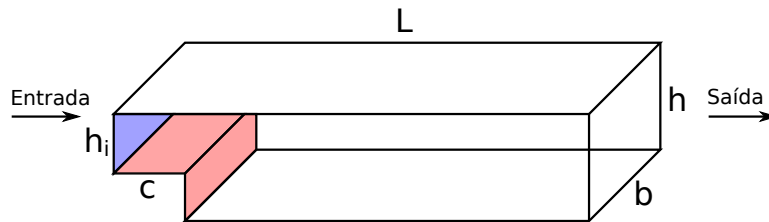


Figura 2: Esquema representativo da câmara de combustão A3C.

As propriedades do fluido foram definidas de tal maneira que o número de Reynolds fosse $Re = 48750$, assim como no experimento. Foram realizadas simulações com a modelagem da turbulência, e o modelo utilizado foi o Dinâmico de Germano Modificado (Lilly, 1992). A Figura (3) representa o domínio da câmara e a malha utilizada. São utilizados dois níveis de refinamento, sendo que a região mais refinada possui 64 volumes por metro, e a região central com malha mais grosseira possui 32 volumes por metro. Foram posicionadas 8 sondas no domínio, em $x = 2.2$ m, $z = 0.5$ m, e $y = 0.006, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$ e 0.994 m, como mostrado na figura. Cada nível apresenta a sonda em uma cor diferente.

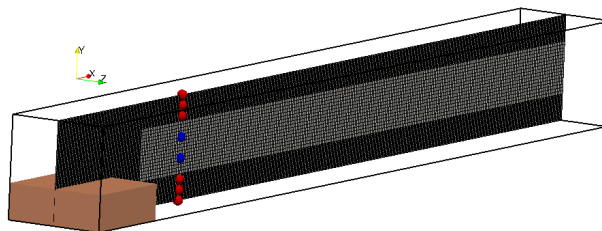


Figura 3: Domínio da câmara de combustão A3C, e malha utilizada e posição das sondas numéricas.

Foram extraídos dados velocidade na direção x para as sondas ao longo do tempo. A Figura (4) apresenta a velocidade em função do tempo para todas as sondas. Nota-se que a velocidade oscila de maneira aleatória, e não converge para um valor permanente, indicando que o escoamento é turbulento. Próximo a parede, em $y = 0.006$ m a velocidade oscila em

próximo de 0, e com o aumento da posição y a amplitude da oscilação aumenta até $y = 0.2$ m. Em $y = 0.4$ m a velocidade oscila em torno de aproximadamente 1 m/s, e com aumento da posição a amplitude da oscilação diminui, porém continua oscilando em torno de 1 m/s até atingir a posição $y = 0.9$ m. Próximo a parede superior a velocidade tende a 0 como esperado. Este conjunto de gráficos indica que aproximadamente entre $y = 0$ até $y = 0.4$ m o escoamento é desacelerado em função do degrau, enquanto que em posições acima de $y = 0.4$ m a velocidade oscila aproximadamente em torno da velocidade de entrada.

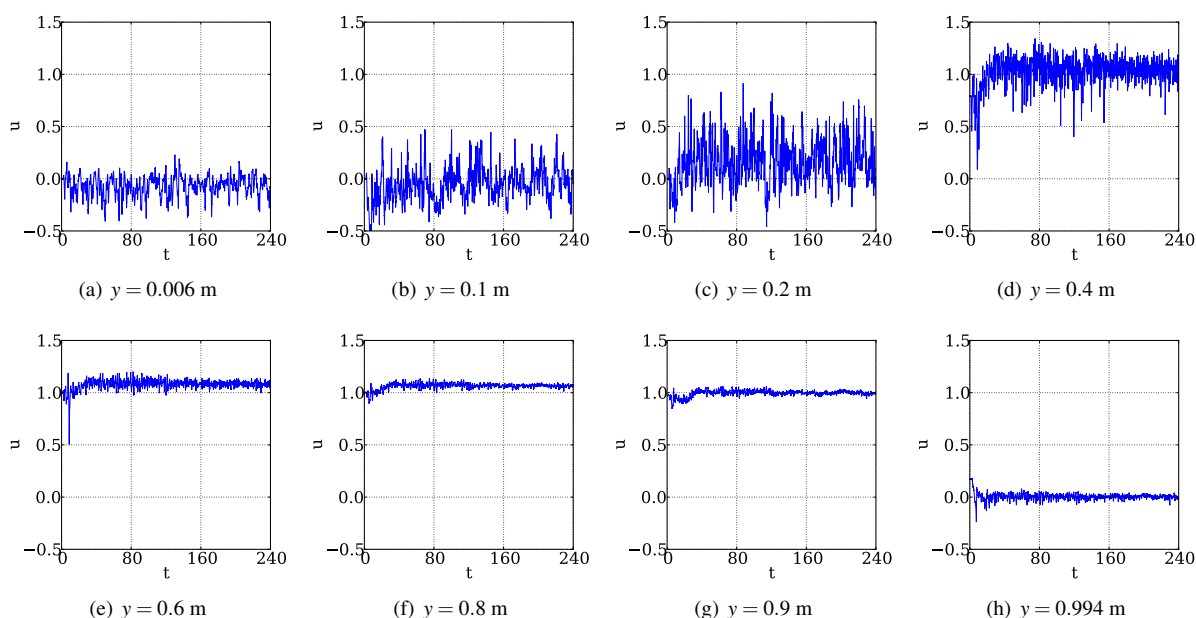


Figura 4: Velocidade na direção x ao longo do tempo t captada pelas sondas.

A partir desses dados ao longo do tempo podemos calcular a média e a flutuação da velocidade ao longo do tempo. A Tabela (1) apresenta estes resultados, e os dados obtidos ratificam o observado anteriormente, indicando uma flutuação maior da velocidade em posições próximas a parede inferior.

Tabela 1: Velocidade média e flutuação da velocidade em torno da média para cada sonda numérica.

<i>Posição y [m]</i>	<i>Velocidade Média [m/s]</i>	<i>Flutuação da Velocidade [m/s]</i>
0.006	-0.06237	0.09495
0.1	-0.01591	0.13852
0.2	0.16545	0.20124
0.4	1.03482	0.10405
0.6	1.08376	0.02831
0.8	1.06712	0.01590
0.9	0.99996	0.01590
0.994	0.00313	0.01862

Outra informação importante que podemos obter a partir dos dados das sondas numéricas é a energia em função da frequência. Para isto basta transformar o sinal da sonda que está no domínio do tempo para o domínio da frequência, utilizando a Transformada de Fourier. Em turbulência este espectro mede o quanto de energia está contida em cada frequência, ou escala da turbulência. A Figura (5) apresenta este espectro de energia para cada sonda numérica, e como esperado, para baixas frequências, ou seja, grandes escalas a quantidade de energia cinética é maior, enquanto que para grandes frequências, ou pequenas escalas, a quantidade de energia é menor. Neste tipo de escoamento a energia é transmitida predominantemente das grandes escalas para as pequenas escalas, e se este espectro de energia na escala logarítmica decai aproximadamente linearmente conforme uma reta com coeficiente angular igual a $-5/3$, significa que o escoamento é turbulento naquela região.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o algoritmo e implementação de sondas numéricas constituídas por pontos lagrangianos, as quais coletam dados dos campos independente da configuração da malha, utilizadas para simulações numéricas em

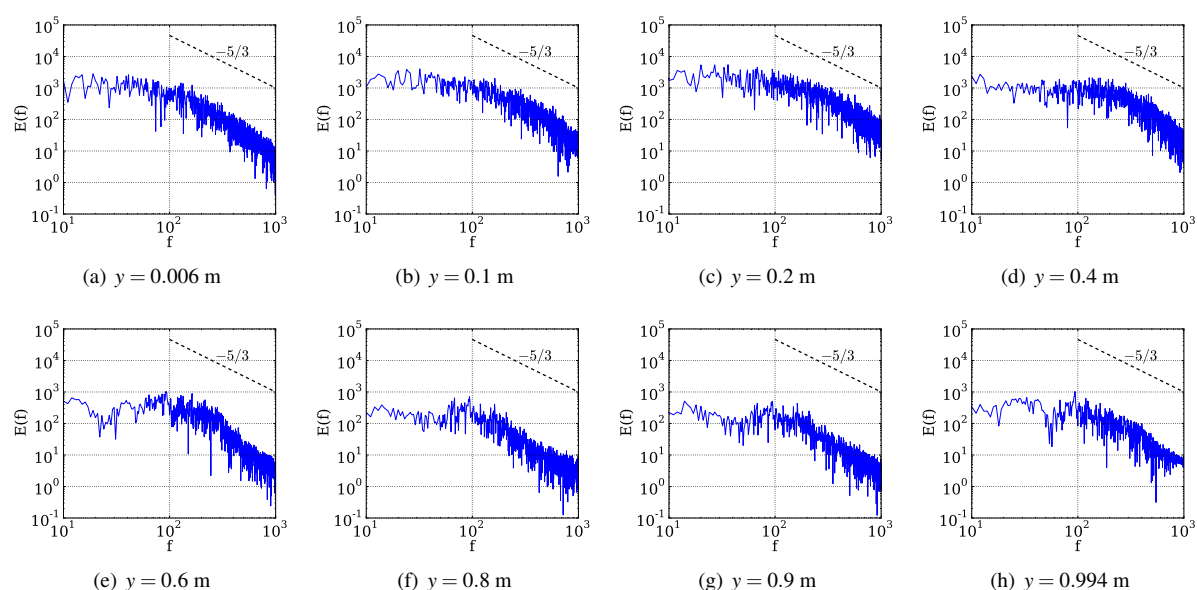


Figura 5: Energia em função da frequência para todas as sondas.

mecânica dos fluídos. A implementação foi realizada no código AMR3D, código desenvolvido no MFLab/UFU, o qual utiliza malha adaptativa bloco-estruturada. Foram feitas aplicações em um escoamento turbulento, e os resultados obtidos nas sondas foram satisfatórios, e as informações obtidas pelas sondas numéricas foram bem exploradas.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES, CNPq, FAPEMIG e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W. H. Cabot. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, (3):1760 – 1765, 1991.
- D. Lilly. A proposed modification of the germano subgrid-scale closure method. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4: 633, 1992.
- R. R. S. Melo, J. M. Vedovoto, M. M. Villar, and A. Silveira-Neto. Simulação de escoamentos turbulentos sobre geometrias complexas utilizando malha adaptativa e a metodologia da fronteira imersa. *Proceedings of the XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, 2014.
- P. Moreau, J. Labbe, F. Dupoirieux, and R. Borghi. Validation expérimentale du modèle peul et du code diamant dans le cadre de l'opération a3c. Technical report, ONERA, 1996.
- J. E. S. Oliveira. *Modelagem matemática para otimização dinâmica de corpos imersos em escoamentos turbulentos*. PhD thesis, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- C. W. O. U. Trottenberg and A. Schuller. *Multigrid*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2001.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.