

ADAPTAÇÃO TIPO H APLICADA À SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO 2D USANDO PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS EM C++

Compasso, Arthur Falbo¹, arthur_falbo@hotmail.com
Lyra, Paulo Maciel¹, prmlyra@ufpe.br
da Silva, Rogério Soares¹, rogsoares@yahoo.com.br
de Carvalho, Darlan Karlo Elisiário¹, dkarlo@uol.com.br
da Silva, Erika Oliveira¹, kikasilva28@hotmail.com

¹Universidade Federal de Pernambuco, Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n - Cid. Universitária - Recife - Brasil. CEP: 50740-530

Resumo: No presente trabalho foi desenvolvido um programa computacional para refinamento adaptativo de malhas "tipo h" 2D utilizando conceitos de programação orientada a objetos em C++. Este programa foi implementado com o gerenciador de malhas FMDB (Flexible Distributed Mesh Data Base). A adaptação de malhas tipo h é usada para se obter a nova discretização do domínio e ela trabalha no enriquecimento da malha, mas também no sentido contrário pelo reagrupamento de elementos. A determinação do reagrupamento ou enriquecimento se dá através de um indicador de erros "a posteriori". O programa computacional de adaptação, análise de erros e interpolação linear de dados foi incorporado a um programa de análise via método dos volumes finitos com formulação tipo IMPES (Implicit Pressure Explicit Saturation) para a simulação de escoamentos bifásicos em meios porosos. Um exemplo modelo de adaptação no regime transiente na solução de um escoamento bifásico é apresentado para demonstrar o funcionamento das ferramentas desenvolvidas.

Palavras-chave: adaptação de malhas, programação orientada a objeto, simulação de reservatórios, c++

1. INTRODUÇÃO

A simulação numérica de reservatórios de petróleo tem grande importância na indústria por auxiliar na otimização do processo produtivo e na previsão do seu comportamento além de possibilitar o estudo de novas estratégias de exploração de forma confiável com tempo e custo reduzido. Para a diminuição dos erros nos resultados da simulação e controle da qualidade desses resultados a adaptação de malha se apresenta como a alternativa mais efetiva.

Neste trabalho, buscou-se aplicar técnicas computacionais em problemas da engenharia atual, no caso a adaptação automática de malhas aplicada à simulação de reservatórios de petróleo. O programa de simulação usado para aplicar os procedimentos de adaptação tipo h é um programa desenvolvido em C++ por Silva (Silva, 2008), que simula o escoamento bifásico óleo-água 2D/3D em meios porosos heterogêneos e anisotrópicos com implementação paralela ou sequencial. As equações de fluxo são discretizadas pelo método de volumes finitos centrado nos vértices, com volume de controle tipo "median dual", usando uma estrutura de dados baseada em arestas (Lyra et al., 2004, Carvalho et al., 2007). A formulação empregada no simulador é a formulação IMPES (Implicit Pressure Explicit Saturation). Este simulador também faz uso do gerenciador de malhas FMDB (Flexible Distributed Mesh Database).

2. ASPECTOS COMPUTACIONAIS

A linguagem de programação C++, junto com a biblioteca STL (Standard Template Library) que possui classes templates que são utilizadas de acordo com a necessidade, permite desenvolver programas grandes e complexos de uma forma clara e objetiva através do conceito de classes, herança, polimorfismo etc. Fora isso, uma série de programas de código aberto, como o FMDB, são escritos em C ou C++, o que facilita a adoção dos mesmos ao projeto em desenvolvimento. Vale salientar que todo código em C é um código válido em C++. Adaptação em malhas estruturadas ou não-estruturadas é uma tarefa complexa para domínios em duas dimensões, e para três dimensões, o que torna imperativo o uso de um gerenciador de malhas robusto e flexível. O adaptador desenvolvido faz uso da biblioteca FMDB que gerencia malhas não-estruturadas e auxilia na subdivisão dos elementos da malha original a fim de se obter resultados mais acurados em regiões de gradientes mais acentuados. O nível de refinamento exigido é dependente de

um estimador de erros "a posteriori" por aresta baseado nos gradientes nodais da solução calculada e que satisfaz uma tolerância pré-definida.

3. PROCEDIMENTO ADAPTATIVO

3.1 Estratégia de Adaptação

O programa de adaptação em C++ está a cargo da classe "Adaptation" que faz todos os passos referentes à adaptação tipo-h, sendo a maioria utilizando ferramentas do FMDB. O algoritmo foi baseado na dissertação de Araújo (2004) e consiste dos seguintes passos:

- 1) Determinar nível de refinamento/desrefinamento para cada elemento (Análise de erros);
- 2) Limitar o desnível interelementos em uma unidade (Desnível Unitário);
- 3) Assegurar boa regularidade da malha (Regularização da malha);
- 4) Corrigir nível entre elementos "irmãos";
- 5) Efetuar refinamento/desrefinamento;
- 6) Correção de nós irregulares;
- 7) Interpolar linearmente a solução para a nova malha.

Após a adaptação da malha (passos 1 a 6), a etapa de interpolação transfere aos novos nós da malha alguma propriedade física (Saturação) que está associada a estas entidades. De posse da nova malha e solução interpolada, que será utilizada como nova solução inicial para a solução do sistema de equações lineares relativo à equação da pressão, efetua-se nova análise de erro via MVF (Método dos Volumes Finitos). Este procedimento é repetido até que a solução obtida se encontre abaixo de uma tolerância pré-estabelecida.

Formulação Numérica: O Método dos Volumes Finitos Por Arestas

O programa de análise numérica utilizado é baseado no Método dos Volumes Finitos por Arestas (MVFA) com volumes de controle centrados nos vértices (vertex centered) com volumes de controle construídos pelo método das medianas (median dual control volume) (Lyra et al., 2004; Carvalho et al. 2005; Carvalho et al., 2007). Nesta formulação, os termos elípticos, existentes na equação de difusão, são calculados em dois "loops" nas arestas da malha segundo uma variante do método proposto por Crumpton et al. (1997). Num primeiro passo são calculados os gradientes nodais os quais são utilizados em conjunto com uma aproximação de diferenças finitas ao longo das arestas da malha para aproximar os termos de difusão cruzada. No caso de meios heterogêneos, estas aproximações são realizadas domínio por domínio a fim de respeitar a descontinuidade nos gradientes entre os diferentes materiais. A equação de saturação é discretizada com uma formulação tipo "upwind" de segunda ordem tipo MUSCL (Monotonic Upstream Schem for Conservation Laws). Esta formulação tem se mostrado bastante acurada para a discretização de escoamentos em meios heterogêneos e anisotrópicos.

Análise de Erro Por Aresta

A ferramenta de análise de erros controla todo o processo adaptativo, indicando os parâmetros para a formação da nova malha adaptada, assim como também os critérios de parada do algoritmo. As funções da análise de erros são duas: Primeiramente, esta avalia a qualidade da solução. Se após a verificação da acurácia da aproximação constatar-se uma baixa resolução, i.e., abaixo daquela requerida pelo usuário, a própria estimativa de erros, através de procedimentos numéricos baseados no estudo da convergência da solução, fornece os parâmetros para a formação da nova malha (Lyra, 1994).

Inicialmente, considerando um problema unidimensional no qual a solução é aproximada através de interpolação linear (Ait-Ali-Yahia et al, 1996). O erro global ao longo de um elemento pode ser definido como

$$E_e = u - \hat{u} \tag{1}$$

Expandindo a solução numa extremidade do elemento assumindo ainda que o erro nodal seja zero, o erro pode ser escrito como

$$E_e = \frac{1}{2} x(h-x) \left. \frac{d^2 u}{dx^2} \right|_e \tag{2}$$

O erro de interpolação RMS (Root Mean Square), sobre um elemento ao longo do intervalo pode ser definido como

$$E_e^{RMS} = \frac{1}{\sqrt{120}} h^2 \left| \frac{d^2 u}{dx^2} \right|_e \quad (3)$$

Portanto, o erro de interpolação para o caso 1-D é proporcional ao produto da derivada segunda e o quadrado do comprimento característico do elemento.

Estendendo estas idéias para 2-D, as derivadas segundas são substituídas pela matriz Hessiana. Neste caso, o erro ao longo de uma aresta de um elemento pode ser estimado como

$$E_{ij}^{RMS} \approx \left| \vec{L}_{ij} \right|^2 \left| \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{ij} \quad (4)$$

Onde $\vec{L}_{ij} = \vec{x}_j - \vec{x}_i$ é o vetor que define a aresta ij.

Desta forma, podemos estimar o erro ao longo da aresta como

$$E_{ij}^{RMS} \approx \left| \frac{\nabla \hat{u}_j \cdot \left(\frac{\vec{L}_{ij}}{|\vec{L}_{ij}|} \right) - \nabla \hat{u}_i \cdot \left(\frac{\vec{L}_{ij}}{|\vec{L}_{ij}|} \right)}{|\vec{L}_{ij}|} \right| |\vec{L}_{ij}|^2 = \left| (\nabla \hat{u}_j - \nabla \hat{u}_i) \cdot \vec{L}_{ij} \right| \quad (5)$$

Onde $\nabla \hat{u}_i$ é o gradiente aproximado da solução no nó "i". É importante mencionar que estes gradientes já estão disponíveis para o módulo de análise de erros, dado que o método de volumes finitos por arestas utilizado no presente trabalho calcula esta informação naturalmente durante a discretização. Portanto, o custo de cálculo deste estimador de erros na aresta resume-se a uma subtração de vetores e um produto escalar. Tendo em vista que nosso processo adaptativo envolve a subdivisão ou o agrupamento de elementos, utilizamos os valores por arestas para definir uma estimativa de erros para o elemento, simplesmente como a média aritmética dos valores nas arestas, de modo que, podemos escrever

$$E_e^{RMS} = \frac{1}{3} \sum_{ij} E_{ij}^{RMS} = \frac{1}{3} \left(\sum_{ij} \left| (\nabla \hat{u}_j - \nabla \hat{u}_i) \cdot \vec{L}_{ij} \right| \right) \quad (6)$$

O somatório se dá sobre as três arestas do elemento triangular.

No presente trabalho, adotamos duas percentagens diferentes para os erros relativos. A primeira computa os erros de todos os elementos da malha (η_1). Visando tratar problemas com singularidades na solução, como no caso dos poços injetores e produtores, adotamos uma segunda percentagem (η_2), retirando-se dos cálculos todos os elementos que atingem dimensões abaixo de valores pré-estabelecidos (ver Lyra, 1989; Lyra, 1994; Araújo, 2004; para maiores detalhes). Se uma das duas percentagens de erro estiverem acima das tolerâncias, o programa de análise de erros deve definir os parâmetros que conduzirão à construção da malha adaptada. Como estamos utilizando malhas isotrópicas, estes parâmetros são os espaçamentos desejados para os elementos da nova malha. Desta forma, o indicador produzido para o processo de adaptação é uma distribuição de espaçamentos, para os elementos da malha adaptada, que conduzam a um erro relativo menor ou igual às tolerâncias pré-estabelecidas.

Adotando o princípio da equidistribuição de erros, e aplicando a teoria das estimativas de erros "a-priori" podemos obter os espaçamentos requeridos para a malha a cada adaptação, pela seguinte expressão

$$d_e^{m_1} = \frac{d_e^{m_0} \cdot e_m}{\|e_e^*\|^{m_0}} \quad (7)$$

sendo " e_m " o erro médio, calculado como

$$e_m = Tol_i \cdot \frac{\|\nabla \hat{u}^*\|}{\sqrt{N_e}} \quad (8)$$

onde

m_0 – malha corrente;

m_1 – malha adaptada;

$d_e^{m_0}$ – dimensão característica do elemento na malha corrente;

$d_e^{m_1}$ – dimensão característica desejada para o elemento "e" na malha adaptada;

N_e – número de elementos da malha.

Tol1 – Tol1 ou Tol2 associadas ao erro em todo o domínio e do domínio expurgando os elementos com dimensões menores que a mínima, respectivamente.

Pelo fato de adotarmos duas tolerâncias distintas a Eq. (7) que calcula as dimensões desejadas para os elementos da nova malha conduzirá a dois espaçamentos distintos para os elementos que deverão ser adaptados (ARAÚJO, 2004). Nesse caso adota-se o parâmetro mais conservador, isto é, o que conduza a uma malha a favor da segurança.

Determinação do nível de refinamento/desrefinamento

A etapa de análise de erros possui duas funções. Primeiramente, esta etapa avalia a qualidade da solução. Se após a verificação da acurácia da solução for constatado um erro acima da tolerância, o próprio módulo de estimativa de erros fornece os parâmetros para a formação da nova malha, marcando o elemento com certo nível de refinamento, onde o tamanho do elemento é estimado e se o elemento estiver maior que o estimado para um erro aceitável ele é marcado para refinamento e se estiver menor que o estimado ele será marcado para desrefinamento.

Manutenção de desnível unitário entre elementos e regularização da malha

Entende-se por desnível unitário interelementos a diferença entre os valores do nível de refinamento particular de cada elemento indicado pela análise de erro e os valores dos níveis de seus vizinhos (ARAÚJO, 2004). Esta etapa garante uma malha mais suave e torna mais simples o tratamento dos nós irregulares. Similar à regularização que possui o objetivo de garantir uma malha mais uniforme, i.e, quando um elemento triangular possui dois ou mais vizinhos com nível de refinamento superior a este elemento, ele terá seu grau de refinamento acrescentado de uma unidade.

Correção do nível entre elementos irmãos

Elementos irmãos são elementos originados da subdivisão de um mesmo elemento (pai). A etapa de correção do nível de refinamento entre elementos "irmãos" é importante durante o processo de refinamento e desrefinamento. Durante a análise de erros pode ocorrer que algumas áreas da malha sejam marcadas para agrupar, porém isto só ocorrerá se estes elementos foram originados de uma subdivisão anterior e possuem o mesmo "pai".

Casos a se corrigir:

1. Se um dos irmãos estiver com marcação positiva ou zero, os demais irmãos com marcação negativa serão alterados para nível zero.

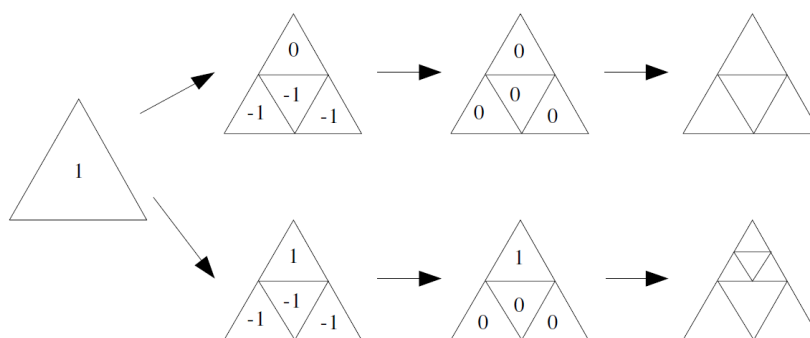


Figura 1 - Regularização e manutenção do desnível unitário.

2. Se a marcação de todos os irmãos é negativa, todos serão remarcados com o maior nível entre eles, desde que a marcação seja maior (em módulo) do que o máximo desrefinamento possível.

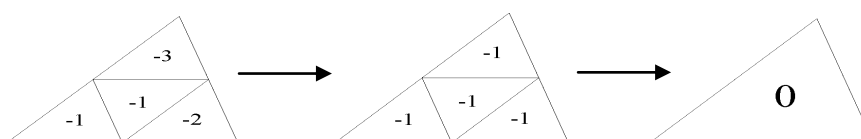


Figura 2 - Regularização e manutenção do desnível unitário.

3. Para ocorrer agrupamento de elementos estes devem ser irmãos, ou seja, os elementos são resultados de uma subdivisão anterior. E o processo de correção dos níveis entre irmãos é recursivo conforme ilustrado na figura 3.

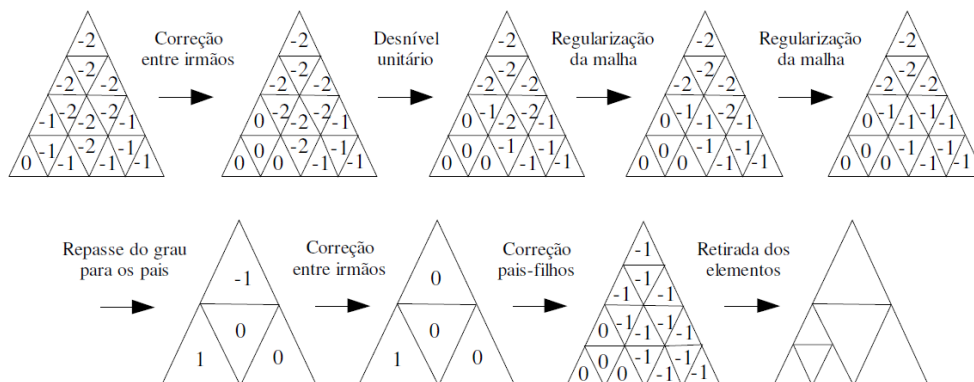


Figura 3 - Regularização e manutenção do desnível unitário.

Processo de Refinamento/Desrefinamento

O FMDB possui uma rotina para o processo de refinamento e desrefinamento de elementos. Desta forma foi apenas necessário criar uma rotina para a regularização dos elementos especiais, conforme descrito na próxima seção, ou seja, uma vez designado a subdivisão de um elemento ou o reagrupamento de elementos, o FMDB se encarrega de criar/atualizar todas as entidades da malha. Para cada elemento da malha é chamado o operador "operator()", permitindo que o usuário decida se o elemento deve ser refinado ou não ou desrefinado. Todos os procedimentos de alteração da estrutura de dados da malha ficam a cargo do FMDB.

O "CallBack" é uma função que é passada para outra função (na forma de um ponteiro para a função de CallBack), de modo que a segunda função pode chamá-la. Trata-se simplesmente da maneira de fazer a segunda função mais flexível sem precisar conter muitas outras informações. Ao passar funções callback diferentes, é possível obter um comportamento diferente (diferentes regras de comparação, uma formatação diferente, tudo diferente). É muitas vezes utilizado para o caso específico de mudanças com base em outro objeto mudar de estado, mas também é a base da gestão de eventos. Sendo utilizado sempre for necessário separar a fonte da chamada a partir do código chamado de um modo completamente dinâmico.

theMesh é um objeto do tipo pMesh, onde está toda a estrutura de dados da malha, esta é utilizada para acessar dados de cada elemento.

Uma das características interessantes é que você pode dar significado especial para os operadores, quando eles são usados com classes definidas pelo usuário. Isso é chamado de operador overloading (sobrecarga de operador). É possível implementar sobrecargas do operador fornecendo funções de membro especial em suas classes que seguem uma convenção de nomenclatura específica. Por exemplo, a sobrecarga para o operador + para a sua classe, deve se fornecer uma função-membro nomeado operador + em sua classe. Operator é uma palavra reservada do C++, neste caso operator() é utilizado para classificar elementos da malha e permite que o usuário decida se o elemento deve ser refinado ou desrefinado.

O procedimento de refino/desrefino é feito da seguinte forma:

Cada elemento da malha está com um nível de refinamento associado, a rotina refunref é chamada, onde por intermédio do CallBack, uma função do FMDB irá varrer cada elemento da malha obtendo o retorno associado ao mesmo através do operator() , 1 para refino e -1 para agrupamento.

```
class Adaptation_SplitCallbacks : public mSplitCallbacks
{
public:
    Adaptation_SplitCallbacks(mMesh *m);
    ~Adaptation_SplitCallbacks();
    int operator()(mEntity *e);
private:
    pMesh theMesh;
};
```

A classe "Adaptation_SplitCallbacks" foi criada e a classe "mSplitCallbacks" é do FMDB, como "mSplitCallbacks" está como public para "Adaptation_SplitCallbacks", o "operator()" da classe "Adaptation_SplitCallbacks" será utilizado no lugar do "operator()" da classe do FMDB, funcionando como um Callback.

Conformidade da malha, eliminação de nós irregulares (Hang Nodes)

Mesmo após todos os passos mencionados, a malha ainda não apresenta conformidade. Uma malha é dita conforme quando não ocorrem casos em que um ponto interno ao domínio divide uma aresta de um dado elemento mas não divide o elemento adjacente a esta aresta. Este é conhecido como nó irregular ou “hang node” e é encontrado nos contornos da mudança de nível de refinamento em uma malha.

A forma utilizada para a eliminação de nós irregulares consiste em subdividir o elemento que contém o nó irregular, criando uma aresta que liga o nó irregular ao seu nó oposto, conforme explicitado na figura 4.

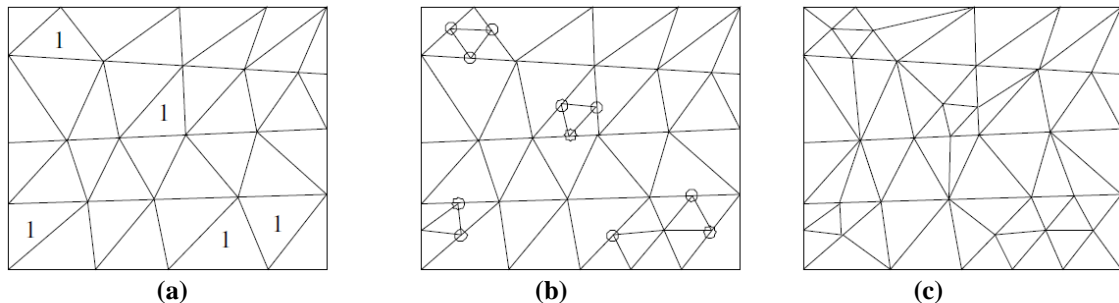


Figura 4 - Tratamento de nós irregulares: a) Malha marcada para refinamento; b) Malha refinada sem tratamento dos nós irregulares; c) Malha com o tratamento de nós irregulares.

O FMDB já possui funções para criar arestas e elementos, apenas é necessário indicar os nós como entrada e depois com outras funções do próprio FMDB indicar o elemento pai, os elementos filhos e suas vizinhanças, construindo assim todas as informações necessárias.

Interpolação Linear

Para a adaptação tipo h, existe a vantagem de que qualquer novo elemento da malha adaptada sempre será proveniente da subdivisão de outro elemento da malha anterior. Dessa forma tem-se grande eficiência no processo de interpolação de dados entre malhas, pois não precisamos de buscas na malha. As funções de interpolação para elementos finitos isoparamétricos lineares são simplificadas por se tratar de uma malha formada apenas por triângulos originados da divisão de outro triângulo em quatro, dividindo as arestas na metade, (ARAÚJO, 2004). Desta forma, a interpolação é dada através de

$$\varphi_n(r, s) = h_1(r, s) \cdot \varphi_1 + h_2(r, s) \cdot \varphi_2 + h_3(r, s) \cdot \varphi_3 \tag{9}$$

onde r e s formam o sistema de coordenadas locais (ver “Fig. 5”), a aproximação da solução proveniente da análise para o nó i e $h_i(r, s)$ são as funções de forma lineares indicadas pelas “Eq. (10)”.

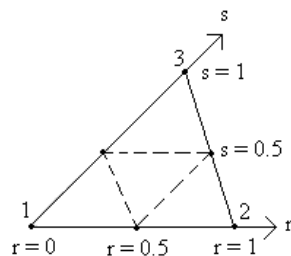


Figura 5 - Sistema de coordenadas locais para elementos triangulares.

$$\begin{aligned} h_1(r, s) &= 1 - r - s \\ h_2(r, s) &= r \\ h_3(r, s) &= s \end{aligned} \tag{10}$$

Neste trabalho adotamos uma interpolação linear utilizando-se as funções de forma dos elementos triangulares.

Algoritmo de Adaptação de Malhas no Regime Transiente

Os problemas de regime transiente envolvem a variação ao longo do tempo de grandezas físicas como saturação e pressão entre outras, isto é, a partir dos valores iniciais destas grandezas se calcula numericamente os novos valores

para sucessivos intervalos de tempo. Assim sendo, enquanto que as etapas de análise de erros e formação da nova malha adaptada, para o caso estacionário, somente são realizadas após o término da análise numérica, para problemas de natureza transiente a cada passo no tempo ou conjunto de passos no tempo uma análise de erros é realizada e o processo, a depender do erro atingido, é interrompido. Ou seja, se durante o avanço no tempo de t a $t+dt$ o erro obtido da análise for superior à tolerância pré-estabelecida constrói-se através da adaptação uma nova malha e interpola-se a solução do tempo t para a nova malha. Após a interpolação reinicia-se a simulação a partir do último instante de tempo t . A utilização da solução calculada no tempo t é importante a fim de evitar a utilização de uma solução que não satisfaz o critério de erro estabelecido, impedindo assim que o erro se acumule com o avanço no tempo e deteriore a qualidade da solução. O fluxograma da figura 6 ilustra o algoritmo implementado.

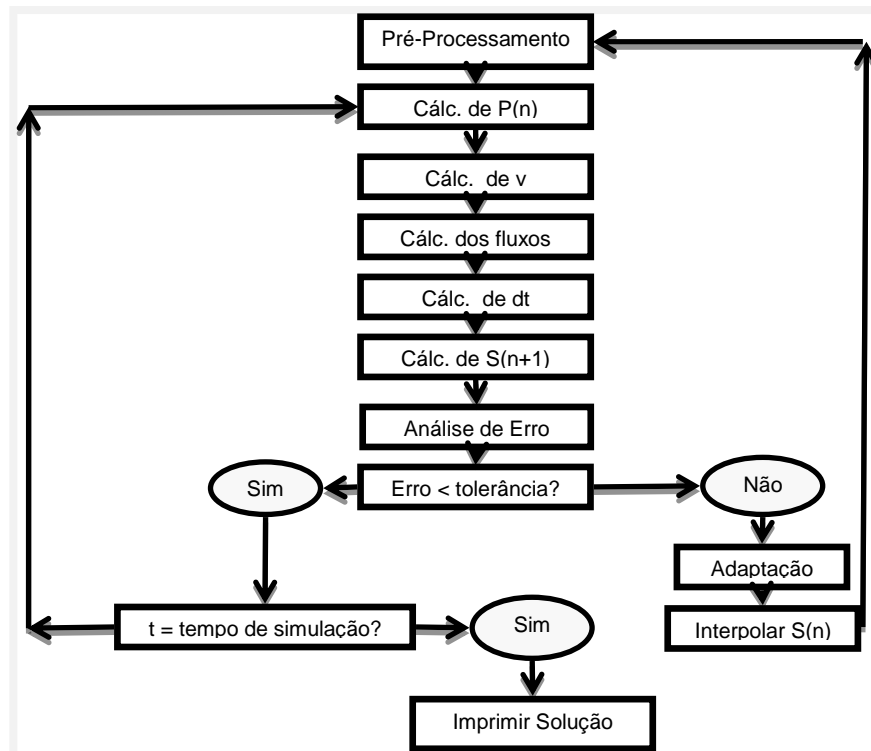


Figura 6 - Fluxograma geral da estratégia adaptativa - Regime Transiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho abordam o problema clássico da produção num reservatório tipo "five-spot" (um poço produtor e quatro poços injetores), onde por questão de simetria utilizamos um quadrante. Sendo o escoamento bifásico, demonstrando o procedimento adaptativo no regime transiente (ver figura 7 e tabela 1).

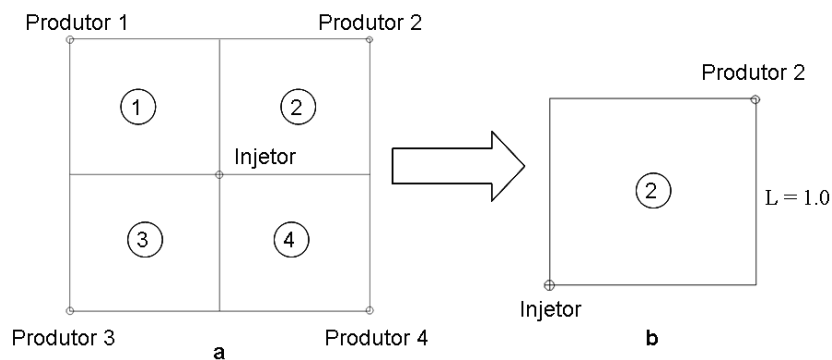


Figura 7 - Esquema de reservatório de petróleo tipo "five spot".

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no problema Five-Spot.

| | |
|---|---|
| Condições de Contorno (pressão) | $p_i = 100$ (poço injetor) $p_p = 10$ (poço produtor) Fluxo zero pela fronteira |
| Condição Inicial (saturação de água) | $S_{w_i} = 1.0$ (poço injetor) $S_w(x, t = 0) = 0$ |
| Geometria | Quadrado de lado 1.0 |
| Tensor de permeabilidade (meio homogêneo) | $K = \begin{pmatrix} 1.0 & 0 \\ 0 & 1.0 \end{pmatrix}$ |
| Porosidade | $\phi = 0.2$ |

Utilizando a análise de erro em função do gradiente de pressão, obtemos uma região mais refinada próximo ao poço produtor e injetor, conforme ilustrado na figura 8, pois poços são regiões de singularidade com gradientes tendendo ao infinito (matematicamente). Estas regiões são as que apresentam o gradiente de pressão mais elevado e por isso é necessário um maior refinamento nesta área, garantindo uma melhor discretização do fenômeno físico.

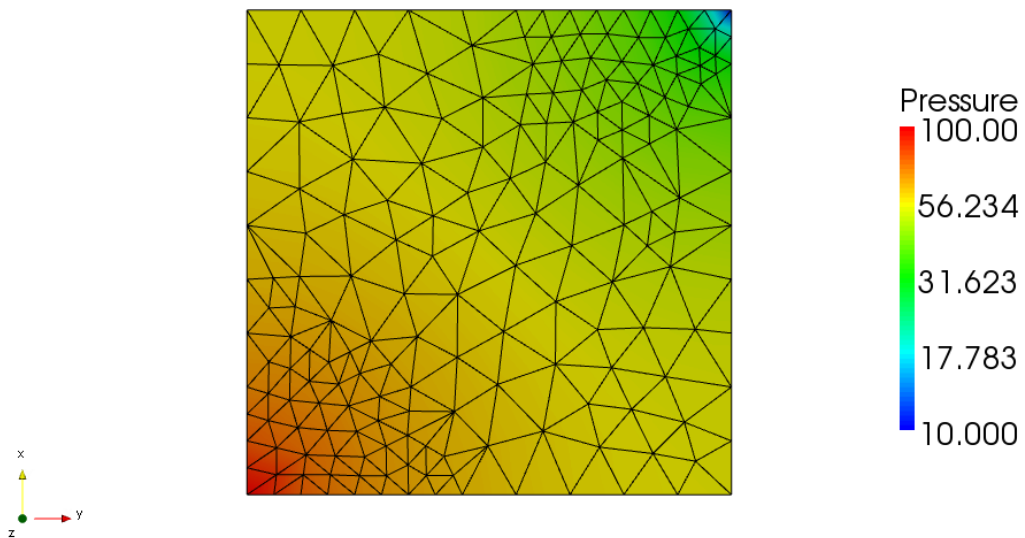


Figura 8 - Campo de Pressão de um reservatório de petróleo tipo Five-spot.

Também foi utilizado o gradiente de saturação para analisar o erro da solução no processo adaptativo transiente. Para este caso, onde foi simulado um reservatório de petróleo tipo five-spot, como resultado foi obtido o nível de refinamento desejado em cada elemento, porém o programa ainda está sendo implementado, possuindo a rotina de adaptação com limite de nível máximo de refinamento igual a 1. Desta forma apresentamos apenas resultados qualitativos ilustrando a evolução da frente de saturação em estágios distintos da evolução do problema nas fuguras 9 a 12.

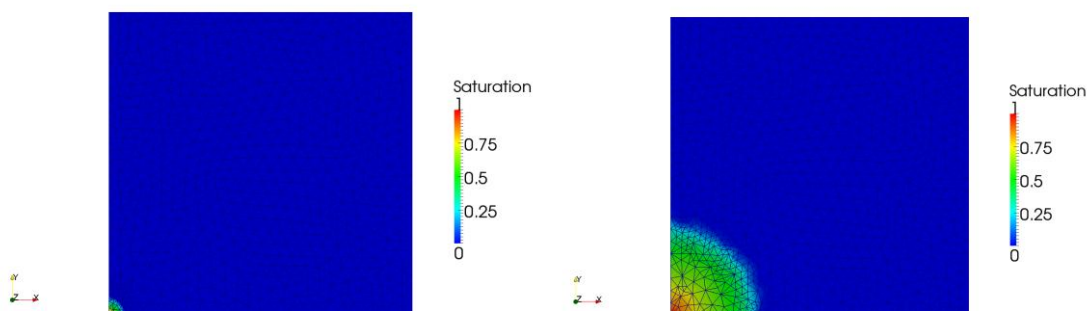


Figura 9 e 10 - Campo de saturação de um reservatório de petróleo tipo Five-spot no tempo $t=1$ e $t=15$.

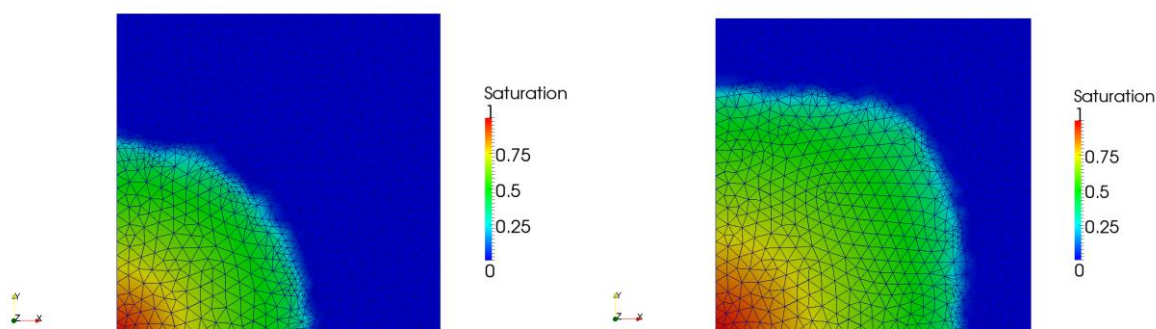


Figura 11 e 12 - Campo de Saturação de um reservatório de petróleo tipo Five-spot no tempo $t=30$ e $t=50$.

O procedimento adaptativo se mostra capaz de capturar gradientes elevados, melhorando assim a captura dos pontos críticos do campo de saturação e com isto de todo o campo de saturação. Os resultados apresentados são preliminares e serviram para verificar todos os componentes do procedimento adaptativo na análise de um problema modelo bifásico. Esperamos em breve simular casos transientes determinando níveis de refinamento "quaisquer" limitamos apenas por um máximo pela tolerância especificada ou por limitações de memória.

4. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao auxílio do grupo de pesquisa PADMEC como um todo, principalmente para o doutor Rogério Soares, orientador Paulo Roberto Maciel Lyra, à ex-aluna Erika Silva e ao Pibic junto com a Propesq pelo auxílio financeiro.

5. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F. S., 2004, Procedimentos Adaptativos na Simulação de Reservatórios de Petróleo em Volumes Finitos. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil – UFPE.
- ARAÚJO, F. S.; LYRA, P. R. M.; CARVALHO, D. K. E., 2004. Procedimentos Adaptativos Aplicados à Simulação de Reservatórios de Petróleo. CILAMCE 2004 - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004, Recife.
- CARVALHO, D. K. E., LYRA, P. R. M., WILLMERSDORF, R. B., 2005. A Node Centered Finite Volume Formulation for the Solution of Oil – Water Displacements in Non-Homogeneous Porous Media. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás Natural. Salvador, (Em CD-ROM).
- CARVALHO, D. K. E, LUNA, B. G. B., Lyra, P. R. M., WILLMERSDORF, R. B., Queiroz, J. P. S., 2007. Numerical Simulation of Oil-Water Displacements in Porous Media Using a Mesh Adaptive Finite Volume Formulation. COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília-DF.
- CRUMPTON W. G., G. ATCHISON, C. ROSE, E. SEABLOOM, S. BEAUVAIS, J. STENBACK, AND S. BREWER. 1997. Experimental determination of ecological fate and effects of agrichemicals in surface waters of the western cornbelt ecoregion of the United States. USEPA Project completion report.
- D. AIT-ALI-YAHIA; W. G. HABASHI E A .TAM, 1996. A directionally adaptive methodology using na edge-based error estimate on quadrilateral grids. Int. J. for Num. Meth. in Fluids, 23, 673-690.
- FMDB, <http://www.scorec.rpi.edu/FMDB/>.
- LIBERTY, J., Aprenda em 24 horas C++, Editora Campus.

LYRA, P. R. M., LIMA, R. C. F. de, GUIMARÃES, C. S. C., CARVALHO, D. K. E., 2004. An Edge-Based Unstructured Finite Volume Procedure for the Numerical Analysis of Heat Conduction Applications. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Engineering. Brazil, v.26, p. 160-169.

LYRA, P. R. M. ; CABRAL, JAIME J S P ; CIRILO, J. A., 1989. Procedimento auto-adaptativo versão-h do metodo dos elementos finitos aplicado ao estudo de águas subterrâneas. in: viii simposio brasileiro de recursos hidricos, 1989, foz do iguacu-pr. anais do viii simposio brasileiro de recursos hidricos. v. i. p. 530-542.

SILVA, R.S, “Simulação de Escoamento Bifásico Óleo-Água em Reservatório de Petróleo Usando Computadores Paralelos de Memória Distribuída”. Tese de Doutorado, DECIV-UFPE, 2008.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste artigo.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ADAPTATION TYPE H APPLIED TO SIMULATION OF OIL RESERVOIR 2D USING OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING IN C + +

Compasso, Arthur Falbo¹, arthur_falbo@hotmail.com
Lyra, Paulo Maciel¹, prmlyra@ufpe.br
da Silva, Rogério Soares¹, rogsoares@yahoo.com.br
de Carvalho, Darlan Karlo Elisiário¹, dkarlo@uol.com.br
da Silva, Erika Oliveira¹, kikasilva28@hotmail.com

¹Universidade Federal de Pernambuco, Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n - Cid. Universitária - Recife - Brasil. CEP: 50740-530

Abstract. *In this study we developed a computer program for adaptive mesh refinement "type h" 2D using concepts of object-oriented programming in C + +. This program was implemented with the manager meshes FMDB (Flexible Distributed Mesh Data Base). Adaptation of mesh type h is used to obtain the new discretization of the domain and it works to enrich the mesh, but in the opposite direction of a grouping of elements. The determination of family or enrichment occurs through an error indicator after the event. The computer program of adaptation, error analysis and linear interpolation of data was embedded in a program analysis via finite-volume method with the formulation type IMPES (Implicit Pressure Explicit Saturation) for the simulation of two-phase flow in porous media. A model example of adaptation in the transient solution of a two-phase flow is presented to demonstrate the operation of tools developed.*

Keywords: *adapting meshes, object-oriented programming, reservoir simulation, c + +.*