



Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Departamento de Informática

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Multi-resolução para a Visualização de Reservatórios  
Naturais de Petróleo**

Aluno: Antonio Carlos Pereira de Azambuja

azambuja@tecgraf.puc-rio.br

Orientadores: Prof. Marcelo Gattass gattass@tecgraf.puc-rio.br

Prof. Waldemar Celes celes@tecgraf.puc-rio.br

Rio de Janeiro, Maio de 2002.



**Antonio Carlos Pereira de Azambuja**

**Multi-resolução para a Visualização de  
Reservatórios Naturais de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio.

Orientadores: Marcelo Gattass e Waldemar Celes Filho

Rio de Janeiro  
Maio de 2002

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Antonio Carlos Pereira de Azambuja**

Graduou-se em Informática na UFSM (Universidade Federal de Santa Maria - RS) em 1998. Desde então, vem participando de cursos na área de Computação de Gráfica, no IMPA (Instituto de Matemática Pura e Aplicada) e na PUC-Rio. Desde 1999, trabalha em desenvolvimento de sistemas no TeCGraf (Laboratório de Computação Gráfica da PUC-Rio), ocupando inicialmente o cargo de pesquisador júnior e, posteriormente, de analista. Durante esse período, participou do desenvolvimento dos sistemas SIGMA (Sistema Integrado de Gestão de Meio Ambiente) e PósSim (Pós-visualizador da Simulação de Reservatórios Naturais de Petróleo), ambos em parceria com a Petrobras (Companhia de Petróleo do Brasil).

#### Ficha Catalográfica

Azambuja, Antonio Carlos Pereira de

Multi-resolução para a Visualização de Reservatórios Naturais de Petróleo \ Antonio Carlos Pereira de Azambuja; orientadores: Marcelo Gattass e Waldemar Celes. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Informática, 2002.

vii., 137 f.: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Dissertações. 2. Multi-resolução. 3. Visualização Científica. 4. Reservatórios naturais de petróleo. 5. Simulação do fluxo de fluido em meios porosos. 6. Descarte. I. Gattass, Marcelo. II. Celes, Waldemar. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.



**Antonio Carlos Pereira de Azambuja**

**Multi-resolução para a Visualização de  
Reservatórios Naturais de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio.

Orientadores: Marcelo Gattass e Waldemar Celes Filho

Rio de Janeiro  
Maio de 2002

Para meus pais, Tércio e Suzara, pelo  
apoio constante e para Juliana,  
meu amor.

## Agradecimentos

A Marcelo Gattass pela confiança depositada desde a minha chegada no Rio de Janeiro, pela importantíssima ajuda em momentos críticos e decisivos da minha entrada no Mestrado e pela valiosa orientação, principalmente durante a confecção do texto final desta dissertação.

A Waldemar Celes Filho pela orientação técnica impecável, pela supervisão constante, sutil e motivadora de todo o processo de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho, sem as quais a qualidade dos resultados estaria comprometida.

A Paulo Cezar Carvalho e Leo Schneider por terem indicado a mim os possíveis caminhos a serem seguidos durante essa etapa de Mestrado, participando, assim, decisivamente desse processo.

A Banca examinadora desta dissertação pela correções, dicas e sugestões que, muitas vezes, foram feitas na etapa de desenvolvimento do trabalho.

A Carolina Alfaro pelas dicas de linguagem e pela paciência e eficiência dispensadas na correção ortográfica e sintática do texto.

A todos os meus professores de Graduação e Mestrado e meus colegas do TeCGraf pelo inestimável conhecimento passado durante os últimos anos.

A CAPES, Petrobras e PUC pelo estímulo e apoio financeiro oferecidos, direta ou indiretamente, sem os quais este trabalho não se realizaria.

Aos meus pais, Tércio e Suzara, pelo amor infinito, carinho acolhedor, atenção tranquilizante e apoio incondicional a mim direcionados durante toda a vida.

A Juliana, meu amor, pela cumplicidade, carinho, afeto, amizade, segurança, pelos momentos de diversão, pelos sorrisos e choros, pela devoção mútua, pela paz interior que o nosso convívio possibilita e por tudo que isso representa.

A minhas irmãs, Melissa e Carolina, pela cumplicidade natural que temos em tudo que fazemos e pelo prazer que é poder constatar isso.

A minha segunda família, Telmo, Ida, Bianca, Geórgia, Christian, Eduardo, Letícia, Luiz Rodolfo, João Pedro, José Luiz e Antonio Pedro, pelos momentos maravilhosos compartilhados, pelo amor, pelo carinho e pelo apoio infindável.

A meus amigos de estudo e trabalho pelos felizes e valiosos momentos convívios. A meus distantes amigos “de sempre” pela torcida que fizeram para o meu sucesso e pelo companheirismo fraterno.

Ao universo e suas possibilidades.

## Resumo

Atualmente, as malhas de simulação do fluxo em reservatórios naturais de petróleo (RNPs) são modelos compostos por centenas de milhares de células hexaédricas, cada uma podendo ser decomposta em 12 triângulos, de modo que a visualização interativa dessas malhas, através das estações gráficas atuais, ainda não é factível. À medida que os computadores e as placas gráficas aumentam sua capacidade de processamento, as malhas de simulação também crescem. A solução para esse tipo de problema passa, normalmente, por técnicas de aceleração, dentre as quais está a multi-resolução (MR). Ocorre, entretanto, que os modelos de multi-resolução atualmente conhecidos não são aplicáveis às malhas de simulação de RNPs, devido aos requisitos específicos da área, tais como a preservação do modelo de células hexaédricas e a descontinuidade entre células. Na realidade, as técnicas de multi-resolução tendem a focar a Visualização Realista, enquanto o problema de RNPs é de Visualização Científica, para a qual ainda não existem soluções genéricas.

Esta dissertação propõe um modelo de MR específico para o problema de visualização das malhas de simulação em RNPs, no qual a partição descontínua do espaço, a semântica baseada em células hexaédricas e as características de visualização do problema são pontos considerados. O modelo proposto permite uma construção eficiente da estrutura de MR, a partir da qual, em tempo real, são extraídas malhas adaptativas dependentes: (a) do erro geométrico da aproximação, (b) da câmera e (c) do número desejado de polígonos na malha. Além disso, o modelo permite a utilização conjunta de outra técnica de aceleração, o descarte, possibilitando o descarte hierárquico de regiões da malha que estão fora do volume de visão. O modelo proposto foi implementado em um sistema que permitiu uma extensa bateria de testes, cujos resultados permitiram traçar algumas conclusões e recomendações.

## Palavras-chave

Técnicas de aceleração; multi-resolução; descarte; malhas de simulação; simulação; reservatórios naturais de petróleo; visualização científica.

## **Abstract**

Current flow-simulation meshes of natural oil reservoirs (NOR) are composed of hundreds of thousands of hexahedral cells. The visualization of the geometry of these cells superimposed with color attributes to represent properties and flow results requires the rendering of an unstructured mesh of millions of triangles. Current graphics hardware does not allow for an interactive visualization of such meshes. As computers and graphics boards increase their processing capacity, simulation meshes also grow and the solution to the rendering problem usually includes acceleration techniques, one of which is multi-resolution (MR). However, currently known MR models are not applicable to NOR simulation meshes due to this field's specific requirements, such as the preservation of the hexahedral-cell model and discontinuities among cells. In fact, MR techniques tend to focus on Realistic Visualization, while the NOR problem is one of Scientific Visualization, for which generic solutions still do not exist.

The present work proposes a specific MR model for the visualization problem concerning NOR simulation meshes, in which discontinuous space partition, hexahedral-cell-based semantics and the problem's visualization characteristics are taken into account. The proposed model allows an efficient construction of a MR structure, from which, in real time, adaptive meshes can be extracted that depend on: (a) the geometric error approximation, (b) the view, and (c) the polygon budget. This model can also be used combined with another acceleration technique, frustum culling, which allows for the hierarchical elimination of regions in the mesh that are out of the view volume. The proposed model was implemented in a system on which extensive testing was performed, providing results that allowed us to draw some conclusions and recommendations.

## **Keywords**

Acceleration techniques, multi-resolution, frustum culling, simulation meshes, simulation, natural oil reservoir, scientific visualization.



## Sumário

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>5</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>7</b>
<b>Sumário .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>13</b>
<b>Lista de Gráficos.....</b>	<b>14</b>
<b>Lista de Conjuntos de Gráficos .....</b>	<b>16</b>
<b>1      Introdução.....</b>	<b>17</b>
1.1    Objetivos .....	21
1.2    Organização do Texto .....	21
<b>2      Modelos de Multi-resolução .....</b>	<b>22</b>
2.1    Multi-resolução .....	23
2.2    Modelos de Multi-resolução Hierárquicos.....	26
2.3    Modelos de Multi-resolução Reticulares .....	30
<b>3      Reservatórios Naturais de Petróleo e Requisitos de Visualização.....</b>	<b>34</b>
3.1    Reservatório Natural de Petróleo .....	34
3.2    Dados da Simulação.....	36
3.2.1    Malhas de Simulação .....	36
3.2.2    Propriedades Escalares.....	50
3.3    Requisitos de Visualização .....	51
<b>4      Algoritmo de Multi-resolução Proposto para RNPs .....</b>	<b>54</b>
4.1    Hierarquia de Células Hexaédricas .....	54
4.1.1    Colapso de Células.....	55
4.1.2    Algoritmo Guloso para Construção do Espaço de Modelos.....	57
4.1.3    Hierarquia .....	62
4.2    Características da Operação de Colapso .....	63
4.2.1    Geometria e Valor de Propriedade.....	64
4.2.2    Erros Geométrico e de Propriedade .....	66
4.2.3    Tratamento de Múltiplas Propriedades .....	67
4.2.4    Propriedade de Ordenação Parcial .....	68
4.3    Propriedades de Extração.....	70
<b>5      Extração de Modelos.....</b>	<b>72</b>

5.1	Extração Dependente do Erro Geométrico .....	72
5.2	Extração Dependente da Câmera .....	74
5.2.1	Descarte.....	75
5.2.2	Cálculo do Erro Projetado.....	76
5.2.3	Algoritmo de Extração .....	76
5.3	Extração Dependente do Número de Polígonos .....	77
5.4	Dependência do Erro de Propriedade .....	79
<b>6</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>80</b>
6.1	Considerações Iniciais .....	81
6.2	Pré-processamento .....	84
6.2.1	Análise do Tempo de Pré-processamento.....	84
6.2.2	Consumo de Memória.....	88
6.3	Extração de Malhas.....	93
6.3.1	Erro Geométrico nas Aproximações.....	93
6.3.2	Erro Projetado e Redução de Complexidade .....	98
6.3.3	Taxas de Interatividade .....	110
6.4	Características de Visualização.....	121
6.4.1	Propriedades Escalares.....	123
6.4.2	Visualização da Grade (Wireframe) .....	126
6.4.3	Separação entre Camadas e Escala em Z.....	128
<b>7</b>	<b>Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>131</b>
7.1	Recomendações.....	132
7.2	Trabalhos Futuros .....	133
<b>8</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>136</b>

## Lista de figuras

Figura 1.1- Transformações locais tipicamente aplicadas a superfícies <i>2-manifold</i> .	18
Figura 1.2 - Em (a), o algoritmo de <i>vertex clustering</i> (imagem retirada de [Gar99]). Em (b), um exemplo de operação que permite a geração de superfícies <i>non-manifold</i> .	19
Figura 1.3 - Visualização de RNPs.	20
Figura 2.1 – Superfície paramétrica.	23
Figura 2.2 – Esquema de decomposição do domínio.	25
Figura 2.3 - Padrão de refinamento conhecido como triangulação quaternária.	27
Figura 2.4 - Árvore que representa o processo de refinamento.	27
Figura 2.5 – Corte transversal na árvore.	28
Figura 2.6 - Aberturas geradas por vértices T, em destaque.	29
Figura 2.7 - Transformação de decomposição aplicada a um domínio.	30
Figura 2.8 - Dependências entre domínios.	31
Figura 2.9 – Operações locais.	32
Figura 2.10 – Modelo Reticular.	33
Figura 3.1 - Acumulações de hidrocarbonetos: (a) estrutura do tipo anticlinal e (b) estrutura do tipo falha (Robison et al., 1980).	35
Figura 3.2 – Representação paramétrica das malhas de simulação do fluxo de fluidos em reservatórios.	37
Figura 3.3 - Topologia de uma célula.	37
Figura 3.4 - Grafo de adjacência.	38
Figura 3.5 - Discretizações dos eixos $x$ e $y$ .	40
Figura 3.6 – Produto cartesiano das discretizações dos eixos $x$ e $y$ .	40
Figura 3.7 - Malha de referência que reconstrói o suporte $U$ .	41
Figura 3.8 – Informações fornecidas por ZTOPO e ZBASE para as células $\langle 7, 6, 0 \rangle$ , $\langle 7, 6, 1 \rangle$ , $\langle 7, 6, 2 \rangle$ e $\langle 7, 6, 3 \rangle$ .	41
Figura 3.9 – Geometria de uma célula <i>block-centered</i> .	42
Figura 3.10 – Em (a), vista superior de uma camada. Em (b), vista lateral das células mostra que células indexadas por $\langle i, j, * \rangle$ possuem faces no mesmo plano.	43
Figura 3.11 – Restrições das faces potenciais de contato.	43
Figura 3.12 - Exemplo de uma malha do tipo block-centered (obs.: o eixo está deslocado).	44

Figura 3.13 - Degraus e falhas em uma camada. ....	45
Figura 3.14 – Existência de fluxo entre células. ....	46
Figura 3.15 - Malha de referência que reconstrói o suporte $U'$ . ....	47
Figura 3.16 - Indexação das células da malha de referência. ....	47
Figura 3.17 - Retas que passam pelos vértices da malha de referência. ....	48
Figura 3.18 - Geração da célula $\langle 0, 2, 0 \rangle$ . ....	48
Figura 3.19 - Comparação entre os dois tipos de malhas. ....	49
Figura 3.20 - Exemplo de uma malha do tipo <i>corner-point</i> . ....	49
Figura 3.21 – Paleta de cores. ....	53
Figura 3.22 – Característica de visualização 1. ....	53
Figura 4.1 - Operação incremental de colapso. ....	56
Figura 4.2 - Versão bidimensional da operação de colapso. ....	56
Figura 4.3 – Histórico. ....	57
Figura 4.4 - Máquina de estado que representa o algoritmo guloso. ....	58
Figura 4.5 – Vizinhança. ....	59
Figura 4.6 - Algoritmo incremental. ....	61
Figura 4.7 - Estrutura da hierarquia de células. ....	62
Figura 4.8 - Construção da hierarquia a cada iteração do algoritmo. ....	63
Figura 4.9 - Padrões para o cálculo da macro-célula baseado na vizinha do espaço paramétrico. ....	65
Figura 4.10 - Distâncias consideradas no cálculo do erro geométrico. ....	67
Figura 4.11 - Exemplo unidimensional: colapsos de arestas. ....	69
Figura 4.12 – Corte na árvore. ....	71
Figura 4.13 – Sub-árvore associada ao corte $M_i$ . ....	71
Figura 5.1 - Deformação da projeção perspectiva. ....	74
Figura 5.2 – Redução do erro em função da profundidade. ....	76
Figura 6.1 – Malha $I_{bc}$ . ....	83
Figura 6.2- Esquema da implementação do grafo de adjacência. ....	90
Figura 6.3 - Degradação da malha $A_{bc}$ . ....	95
Figura 6.4 - Degradação da malha $F_{cp}$ . ....	96
Figura 6.5 – Aberturas e interseções criadas nas aproximações geradas pelo MMR proposto neste trabalho. ....	97
Figura 6.6 – Similaridade de aparência. ....	99
Figura 6.7 – Caminho $B1$ da malha $F_{cp}$ . ....	102

Figura 6.8 – Caminho B2.....	102
Figura 6.9 – Caminho B3. ....	103
Figura 6.10 – Ampliação máxima.....	104
Figura 6.11 – Rastreio. ....	120
Figura 6.12 – Rastreio em volumes. ....	120
Figura 6.13 – PosSim (Visualizador 3D de reservatórios). ....	122
Figura 6.14 – Visualização da grade.....	126
Figura 6.15 – Comparação visual entre os resultados obtidos com a estrutura <i>octree</i> e a hierarquia de células.....	127
Figura 7.1 – Transição ( <i>geomorphing</i> ) por interpolação linear. ....	134
Figura 7.2 – Atributos de cores por vértices de célula.....	134

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Plataformas de <i>hardware</i> .....	81
Tabela 2 - Dados relativos às malhas de simulação.....	82
Tabela 3 – Tempos de execução do algoritmo de pré-processamento anotados nas plataformas de <i>hardware</i> I e II, em segundos.....	86
Tabela 4 - Estruturas utilizadas e seus respectivos consumos de memória. ....	89
Tabela 5 - Consumo de memória durante a construção do algoritmo. ....	90
Tabela 6 – Valores aproximados, em MB, relativos ao consumo de memória estimado e ao consumo de memória realmente gasto durante a execução do programa medidos através do gerenciador de memória do Windows 2000. ....	92
Tabela 7 – Valores aproximados, em MB, relativos ao consumo real de memória, juntamente com a medida comparativa do custo adicional. ....	93
Tabela 8 – Caminhos. ....	101
Tabela 9 - Relatório com as complexidades alcançadas nos piores casos, levando em consideração todos os caminhos percorridos. ....	110
Tabela 10 - Relatório com as complexidades alcançadas nos piores casos, levando em consideração apenas os valores no ponto A dos caminhos B1 e B2.....	110
Tabela 11 – Resultados, em quadros por segundo (qps), obtidos na malha B_cp sob a plataforma IV.....	114
Tabela 12 – Resultados, em quadros por segundo (qps), obtidos na malha F_cp sob a plataforma IV.....	114
Tabela 13 – Relatório das taxas de interatividade (B_cp). ....	115
Tabela 14 – Relatório das taxas de interatividade (plat. III).....	118
Tabela 15 – Relatório das taxas de interatividade (F_cp).....	118

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Pré-processamento (plat. I). Resultados da fase de pré-processamento adquiridos na plataforma I. A curva “Inicial” representa as tomadas de tempo da primeira fase do algoritmo. As demais curvas representam, para cada caso de teste, o comportamento da segunda fase do algoritmo. ....	86
Gráfico 2 – Pré-processamento (plat. II). Resultados de pré-processamento adquiridos na plataforma II. O gráfico é similar ao Gráfico 1.....	87
Gráfico 3 – Erro geométrico nas aproximações. Resultados obtidos pelo algoritmo de extração dependente do erro geométrico submetido a consecutivas parametrizações de erro. Os erros geométricos estão normalizados entre 0% e 20% das diagonais das caixas envolventes dos reservatórios.....	94
Gráfico 4 – Número de células desenhadas a cada quadro ao longo do caminho L1 na malha B_cp. ....	112
Gráfico 5 – Quadros por segundo ao longo do caminho L1 na malha B_cp. A média da curva “sem MMR” foi de 12,4 qps. ....	112
Gráfico 6 - Número de células desenhadas a cada quadro ao longo do caminho L1 na malha F_cp.....	113
Gráfico 7 - Quadros por segundo ao longo do caminho L1 na malha F_cp. A média da curva “sem MMR” foi de 2,4 qps. ....	113
Gráfico 8 - Quadros por segundo ao longo do caminho L1 na malha F_cp sob a plataforma III. A média da curva “sem MMR” foi de 3,39 qps. ....	115
Gráfico 9 - Comparação entre as taxas de quadros por segundo obtidas sem o uso de MR e com diferentes resoluções de tela: 1000x800 e 100x80 <i>pixels</i> . A curva 1000x800 apresentou um média de 4,24 qps e a curva 100x80 de 5,7 qps. ....	116
Gráfico 10 – Taxas de quadros por segundo obtidas no caminho L1 da malha B_cp sob a plataforma III e resolução de tela de 100x80. As curvas podem ser comparadas às dos gráficos anteriores.....	117
Gráfico 11 – Taxas de quadros por segundo no caminho L1 da malha F_cp utilizando a plataforma III e resolução de tela de 100x80.....	118
Gráfico 12 – Redução de complexidade nas aproximações em função do erro máximo de propriedade permitido. Os dados foram obtidos a partir do algoritmo de	

extração dependente do erro de propriedade. Os parâmetros de erro utilizados foram 0,05, 0,1, 0,15 e 0,2. ....	125
Gráfico 13 – Erro geométrico nas aproximações utilizando a segunda hierarquia de células hexaédricas.....	130



## **Lista de Conjuntos de Gráficos**

Conjunto de Gráficos 1 – Variação do número de células nas aproximações ao longo dos quadros (B1).....	105
Conjunto de Gráficos 2 - Variação do número de células nas aproximações ao longo dos quadros (B2).....	106
Conjunto de Gráficos 3 - Variação do número de células nas aproximações ao longo dos quadros (B3).....	107
Conjunto de Gráficos 4 – Variação do número de células nas aproximações ao longo dos quadros (L1).....	108