

**PROJETO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
DO LNCC/MCT
EM**

***MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO
SISTEMA CARDIOVASCULAR HUMANO***

**Laboratório Nacional de Computação Científica
LNCC/MCT
Petrópolis, Setembro, 2004**

Índice

1.Introdução e Motivação	4
2.Antecedentes.....	9
3.Objetivos.....	10
4.Resultados e Impactos Esperados.....	11
5.Riscos e Dificuldades.....	12
6.Metas.....	12
6.1. Estudo e comportamento do sangue e dos vasos.....	12
6.2. Modelos Unidimensionais	13
6.3. Segmentação de Imagens Medicas	14
6.4. Modelos Tridimensionais e seu acoplamento ao Modelo 1D	14
6.5. Resolução por Métodos de Elementos Finitos Estabilizados.....	15
6.6. Problemas Inversos e Caracterização de Propriedades.....	15
6.7. Alto desempenho.....	16
6.8. Códigos de elementos finitos.....	16
6.9. Desenvolvimento de Software na área de Visualização Científica	16
6.10. Análise de casos.....	17
6.11. Divulgação de Resultados.....	18
6.12. Formação de Recursos Humanos.....	18
6.13. Transferência do Conhecimento e Desenvolvimentos	19
6.14. Construção de um Banco de Dados.....	19
7.Equipe.....	19
7.1 Pesquisadores Principais.....	19
7.2 Professor Visitante.....	20
7.3 Alunos de Doutorado do LNCC.....	20
7.4 Técnicos.....	20
7.5 Alunos de Iniciação Científica (IC).....	21
7.6 Pesquisadores Colaboradores.....	21
7.6.1 Pesquisadores de Instituições do Estado de Rio de Janeiro.....	21
7.6.2 Pesquisadores de Instituições do País	21
7.6.3 Pesquisadores de Instituições do exterior	22
8.Referências Bibliográficas.....	22
8.1. Publicações e Conferências do Prof. R. A. Feijóo e membros da equipe relacionadas com os temas do Projeto	22
11.1 Referências Bibliográficas em Modelagem do Sistema Cardiovascular	27
11.2 Referências Bibliográficas em Visualização e Processamento (segmentação) de Dados em Hemodinâmica Computacional.....	33

Palavras Chaves: Hemodinâmica do Sistema Cardiovascular Humano, Planejamento Cirúrgico, Segmentação e Reconstrução de Imagens Médicas, Modelos 1D e 3D, Formulações Variacionais, Mecânica dos Sólidos, Mecânica dos Fluidos, Equações de Navier-Stokes, Fluidos Newtonianos, Fluidos Não-Newtonianos, Acoplamento Fluido Estrutura, Análise de Sensibilidade à Mudança de Forma e Topologia, Problemas Inversos na Caracterização de Propriedades de Tecidos Vivos, Formas e Topologia, Elementos Finitos, Geração Automática de Malhas de Elementos Finitos, Adaptatividade, Computação de Alto Desempenho, Visualização Científica, Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais.

1. Introdução e Motivação

Nestes últimos anos, pesquisadores das áreas de engenharia, biologia e medicina começaram a introduzir ferramentas computacionais preditivas dentro da prática da medicina. O atual grau de desenvolvimento alcançado pelas técnicas de modelagem computacional, conjuntamente com o rápido crescimento da performance de cálculo dos computadores, tem permitido o estudo, desenvolvimento e solução de modelos computacionais altamente sofisticados capazes de antecipar, com aceitável grau de precisão, os resultados de importantes procedimentos médicos.

A modelagem e a simulação computacional, aliadas à visualização gráfica e à realidade virtual, permitem fornecer imagens tridimensionais de alta resolução representando os fenômenos que estão acontecendo em determinada parte do organismo

de um dado paciente. Esta nova tecnologia está contribuindo no planejamento terapêutico e cirúrgico das mais variadas doenças vasculares, no desenvolvimento de modelos (e sua simulação computacional) para a dinâmica do sistema cardiovascular permitindo ainda a modelagem da absorção, difusão e cinética do transporte bioquímico nos tecidos da parede arterial, no treinamento e aprimoramento de cirurgias (incluindo cirurgias à distância), no desenvolvimento de métodos não invasivos de análise empregando modelos e simuladores computacionais que utilizam reconstrução tridimensional de imagens médicas obtidas por tomografia computadorizada, de ressonância magnética ou por outros meios. Com estas técnicas é possível ainda caracterizar em vivo e de maneira não destrutiva (ou invasiva) as propriedades dos materiais biológicos necessários para a modelagem computacional e detecção de tumores.

Em particular, as doenças cardiovasculares, são e continuarão a ser a principal causa de morte na população mundial (Figs. 1 e 2), incluindo os países em desenvolvimento como o Brasil (Fig. 3) e no Rio de Janeiro (Tabela I).

Vemos, na Fig.1, que a cardiopatia isquêmica e a doença cerebrovascular continuarão a ser as principais causas de morte no mundo representando em conjunto, 35 % das mortes nos países desenvolvidos e 25 % nos países em desenvolvimento. No entanto devido a maior população dos países em desenvolvimento, o número de mortes por estas doenças será quase três vezes maior nos países em desenvolvimento do que nos desenvolvidos.

Ao estudarmos os dados contidos na Fig.2, vemos que a cardiopatia isquêmica e as doenças cérebro vasculares em conjunto representam a principal causa de incapacitação projetadas para 2020. Ambas representam o mesmo processo: aterosclerose, envolvendo a árvore vascular de dois importantes órgãos do corpo humano: o cérebro e o coração. A aterosclerose é um processo sistêmico e quando presente em uma determinada parte do sistema vascular, com grande probabilidade estará envolvendo outras áreas.

Vemos, na Fig. 3, a mudança de causas de mortalidade que ocorreu no Brasil, com a crescente importância das DCV (doenças cardiovasculares) que passarão a representar 40% do total de óbitos no País. A importância social das DCV é corroborada ainda por representarem, a principal causa de aposentadorias, a segunda causa de internações e a principal causa de gastos com estas internações.

Além destes dados, podemos adicionar outros, tais como, os de procedimentos cardíacos de alta complexidade. No Estado do Rio de Janeiro, no período janeiro - novembro de 2001 foram realizados 4629 destes procedimentos (cirurgias cardíacas e vasculares, exames hemodinâmicos, implantes de marcapasso), atestando a importância social destas doenças.

Estas graves conseqüências individuais e sociais das doenças cardiovasculares, assim como o reconhecimento de que a aterosclerose esta intimamente relacionada a fatores hemodinâmicos, têm motivado o uso crescente das técnicas anteriormente mencionadas (modelagem e simulação computacional) para o melhor entendimento da hemodinâmica do sistema cardiovascular.

A partir dos trabalhos pioneiros de Euler e de Young sobre propagação de ondas em artérias, se inicia o desenvolvimento de modelos unidimensionais para o sistema arterial humano. Na atualidade, estes modelos alcançaram um grau de sofisticação elevado permitindo o estudo das alterações da dinâmica arterial para diversas alterações

patológicas (aterosclerose, estenose, aneurismas, etc.) contribuindo assim, na diagnose, tratamento e acompanhamento evolutivo destas doenças.

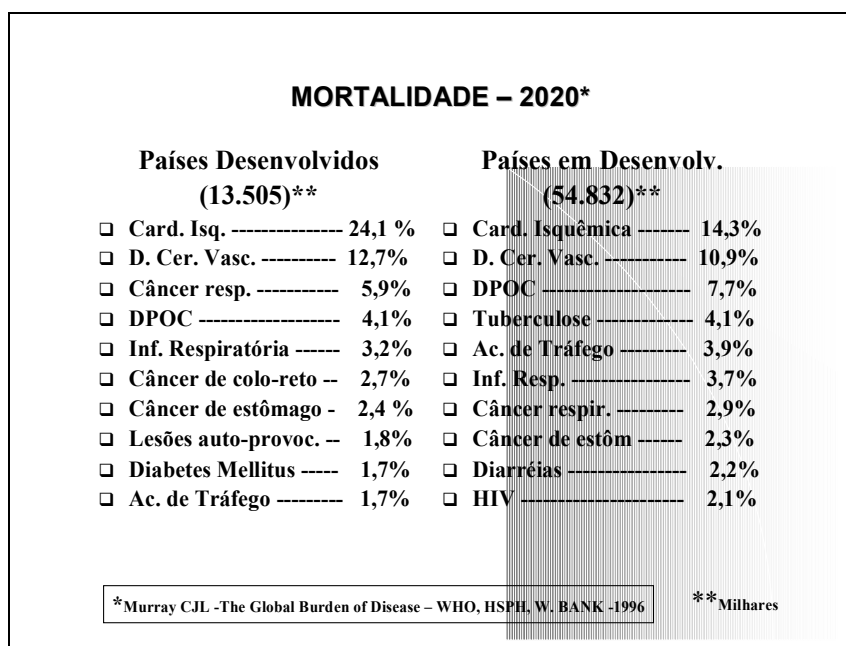


Fig 1 – Principais causas de morte da população mundial em países desenvolvidos e em desenvolvimento, projetadas para 2020.

Nesta última década, os avanços na mecânica dos fluidos, na modelagem (incluindo a interação entre as diferentes escalas existentes no problema: a aorta tem diâmetro de aproximadamente 3 cm. e nas arteríolas o diâmetro é de aproximadamente 2 μm), na simulação computacional, na visualização científica, conjuntamente com o fantástico melhoramento da performance dos computadores, têm permitido o desenvolvimento de sofisticados modelos capazes de revolucionar a pesquisa do sistema cardiovascular humano.

Por sua vez, a pesquisa clínica tem mostrado que diversos fatores associados com a hemodinâmica tais como: regiões de separação, reversão do fluxo, tensões cisalhantes oscilantes ou de baixo valor absoluto, tempo de residência das partículas em suspensão no sangue, entre outros, estão relacionados com a gênese e desenvolvimento de diversas doenças vasculares (aneurismas, estenoses). Assim, a disponibilidade de modelos computacionais precisos será indispensável para um melhor entendimento do funcionamento do sistema cardiovascular em condições normais ou alteradas pelo remodelamento vascular ou por intervenções cirúrgicas.

Anos de Vida Ajustados com Incapacitação (DALYs)

1990

- (01) Infecção Respiratória
- (02) Diarréias
- (03) Doenças Peri-natais
- (04) Depressão Unipolar

2020

- (01) Cardiopatia Isquêmica
- (02) Depressão Unipolar
- (03) Acidente de Tráfego
- (04) Doença Cérebro Vascular

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| (05) Cardiopatia Isquêmica | (05) DPOC |
| (06) Doença Cérebro Vascular | (06) Infecção Respiratória |
| (07) Tuberculose | (07) Tuberculose |
| (08) Sarampo | (08) Guerra |
| (09) Acidente de Tráfego | (09) Diarréias |
| (10) Anomalias Congênitas | (10) HIV |

*Murray CJL -The Global Burden of Disease – WHO, HSPH, W. BANK -1996

Fig. 2 - Principais causas de Incapacitação na população Mundial – Mudanças esperadas entre 1990 e 2020.

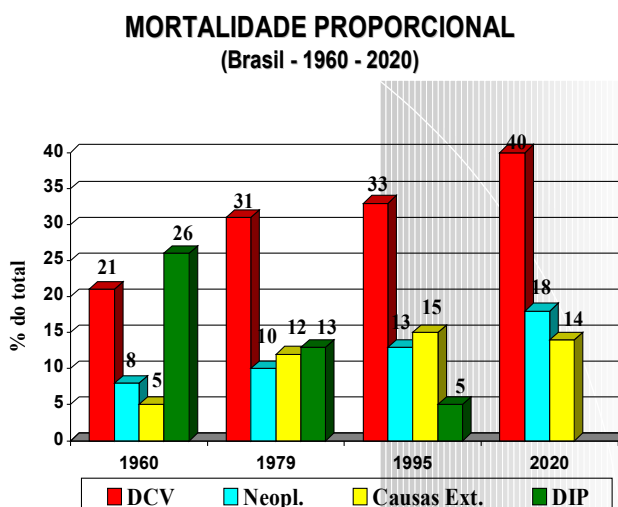


Fig 3 – Causas de Mortalidade Proporcional no Brasil, 1960-1995 e projetadas para 2020

Tabela I - Mortalidade Proporcional – Estado do Rio de Janeiro – 1998¹

Grupo 1 – maiores problemas de saúde [CID-10]	1998 n°	1998 (%)
066-072 doenças do aparelho circulatório	34.251	29,70%
032-052 neoplasias	14.298	12,40%
073-077 doenças do aparelho respiratório	12.698	11,01%
Subtotal	61.247	53,11%

Grupo 2 – outros problemas de largo alcance [CID-10]	1998 n°	1998 (%)
103-112 causas externas de morbidade e mortalidade	15.822	13,72%
100-102 sintomas, sinais e achados anormais clínicos e	12.635	10,95%

¹ Fonte: os dados desta tabela foram coletados na base de dados do DATASUS

laboratoriais		
Subtotal	28.457	24,67%

Grupo 3 – doenças de médio impacto	1998 n°	1998 (%)
055-057 doenças endócrinas, nutricionais e metabólicas	6.510	5,64%
060-063 doenças do sistema nervoso	1.116	0,97%
058-059 transtornos mentais e comportamentais	392	0,34%
Subtotal	8.018	6,95%

	1998 n°	1998 (%)
Subtotal dos Grupos 1 a 3	97.722	84,73%

Grupo 4 – outras doenças geradoras de mortalidade [CID-10]	1998 n°	1998 (%)
001-031 algumas doenças infecciosas e parasitárias	5.725	4,96 %
078-082 doenças do aparelho digestivo	4.552	3,95%
092-096 algumas afecções originadas no período perinatal	3.396	2,94%
085-087 doenças do aparelho geniturinário	1.856	1,61%
097-099 malformação congênita, deformações e anomalias cromossômicas	850	0,74%
053-054 doenças do sangue e org hemat e alguns trans imunit	539	0,47%
083 doenças da pele e tecido subcutâneo	254	0,22%
084 doenças do sistema osteomusc e tecido conjuntivo	227	0,20%
088-091 gravidez, parto e puerpério	204	0,18%
065 doenças do ouvido e da apófise mastóide	10	–
064 doenças dos olhos e anexos	1	–
Subtotal	17.614	15,27%

Total de óbitos analisados em 1998	115.336
---	----------------

Esta tecnologia emergente de *modelos computacionais-software-hardware* permite construir modelos cardiovasculares para um paciente específico e ainda realizar análises precisas e altamente sofisticadas que incorporam modelos reológicos sanguíneos e equações constitutivas para os vasos. Por outro lado, as modernas técnicas de visualização científica e de reconstrução tridimensional de imagens permitem tanto a visualização das quantidades físicas associadas ao fluxo sanguíneo como a reconstrução precisa dos vasos.

Entretanto, os benefícios que a modelagem computacional pode proporcionar à medicina vascular estão condicionados à superação de algumas barreiras. A **primeira** está associada à necessidade de desenvolver modelos computacionais com a complexidade requerida pelos aspectos hemodinâmicos das partes clinicamente mais relevantes do sistema cardiovascular. A **segunda** esta associada à necessidade de desenvolver (a partir de informações extraídas de tomografias computadorizadas, de ressonância magnética, e outros meios) ferramentas computacionais que permitam a caracterização das propriedades mecânicas e reconstrução da geometria de maneira a incorporar as características anatômicas e de fluxo sanguíneo próprias de cada paciente.

A **terceira** barreira está associada à dificuldade de introduzir as condições de contorno em modelos altamente sofisticados. Por exemplo, a determinação das equações de acoplamento no modelo 1D-3D de maneira a eliminar a propagação de ondas espúrias, a determinação dos coeficientes adequados para os terminais tipo *windkessel* que permitem modelar a parte do leito arterial não incluído na análise ou suas substituições por leitos arteriais construídos via métodos de otimização. A **quarta**, a aproximação por elementos finitos destes modelos requer tanto a solução de sistemas de equações não-lineares da ordem de milhões de equações em cada intervalo de tempo como o estabelecimento de estimadores de erro que permitam a análise adaptativa do problema. Finalmente, o volume de dados extraídos na solução destes modelos requer o desenvolvimento de eficientes ferramentas de armazenamento e consulta a esta base de dados assim como, visualização e tratamento da informação capazes de fornecer em tempo real representações gráficas de alta resolução e fácil interpretação do comportamento das variáveis físicas com interesse clínico ou cirúrgico relevante.

2. Antecedentes

O enorme desenvolvimento científico-tecnológico alcançado nestas últimas décadas, aliado ao rápido desenvolvimento dos computadores, permite que problemas altamente complexos de grande relevância sócio-econômica possam ser modelados e simulados computacionalmente empregando modelos sofisticados capazes de representar o comportamento real com alto grau de precisão.

A elaboração destes modelos e suas respectivas simulações computacionais requerem equipes multidisciplinares altamente competentes em diversas áreas do conhecimento humano. Assim, por exemplo, a simulação computacional do sistema cardiovascular humano requer a participação de especialistas em áreas tais como medicina, biologia, química, mecânica do contínuo, mecânica dos sólidos e fluidos, formulações e métodos variacionais, métodos aproximados (por exemplo o MEF) e suas implementações em computadores de alto desempenho computacional, análise numérica e métodos de estabilização, métodos adaptativos, processamento de imagens médicas para segmentação ou extração de estruturas de interesse (geometria das artérias) e geração automática de dados e visualização dos resultados entre outras.

Desde 1999 e sob a coordenação do Prof. Raúl A. Feijóo, grupos de excelência de pesquisadores do País (UFRJ, UERJ, UNICAMP, UFSC) e do exterior (particularmente Argentina: Centro Atômico Bariloche, Universidad Nacional de Mar del Plata e Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires) têm se associando ao LNCC com o intuito de aglutinar conhecimento e competência para tratar convenientemente dos problemas relevantes associados com a Modelagem e Simulação Computacional do Sistema Cardiovascular Humano.

Os resultados alcançados tiveram o reconhecimento da comunidade científica e médica tanto no nível nacional como internacional. Isto pode ser medido pelo convite para organizar (e realizar) mini simpósios dentro de congressos internacionais, pelas conferências convidadas apresentadas em congressos, pelos trabalhos publicados em revistas e congressos assim como, pelos convênios de cooperação em P&D entre o LNCC e Faculdades de Medicina do Estado de Rio de Janeiro:

- Organização de mini simpósios

- *Workshop on Computational Hemodynamic Simulation of the Human Cardiovascular System*, realizado no LNCC, Petrópolis, 22-26 de Maio, 2000.
- *Os Desafios da Informática na Área Biológica*, 52 Reunião Anual da SBPC, 12 de Julho, Brasília, 2000.
- *Hemodynamics of the Cardiovascular System and its Computational Simulation*. Mini Simpósio realizado dentro do ECCOMAS 2000 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 11-14 de setembro, 2000. Barcelona, Espanha.
- *Modelagem Matemática em Fisiologia*, Mini Simpósio realizado durante o XXI Congresso da Associação Latino Americana de Ciências Fisiológicas e XXXVIII Congresso da Sociedade Brasileira de Fisiologia, realizado em Águas de Lindóia, SP, Brasil, de 22/25 de agosto de 2003.
- *Blood Flow*, Mini Simpósio realizado durante o LNCC Meeting on Computational Modeling, Petrópolis, R.J., 9-13 de Agosto, 2004.
- Convênios estabelecendo programas de cooperação e intercâmbio na área do sistema cardiovascular humano e sua simulação computacional, com vistas a enriquecer o modelo computacional que vem sendo desenvolvido no LNCC, bem como, integrar esforços no desenvolvimento de temas de pesquisa na área:
 - Hospital Universitário Clementino Fraga Filho da UFRJ, Serviço de Cardiologia.
 - Faculdade de Medicina da Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Departamentos de Clínica Médica, Cirurgia Geral e Radiologia.
 - Faculdade de Medicina de Petrópolis.
- Conferências e trabalhos em revistas e congressos:
 - Ver referências bibliográficas na Seção 11.

3. Objetivos

O objetivo do presente projeto é o desenvolvimento de modelos complexos e ferramentas computacionais necessárias para a simulação computacional do sistema cardiovascular humano. Num prazo de 2 (dois) anos estas inovações científico – tecnológicas serão transferidas para a comunidade médica do País contribuindo para uma melhor compreensão do funcionamento do sistema cardiovascular humano, auxiliando na prevenção, diagnose, terapia e reabilitação das mais diversas patologias ou disfunções cardiovasculares. Estas novas ferramentas permitirão ao cardiologista (clínico ou cirurgião), atuando em colaboração com especialistas em modelagem e simulação computacional, dispor de melhores condições para diagnosticar a presença de doenças cardiovasculares e de estabelecer a melhor terapia (clínica ou cirúrgica) para sua solução.

Espera-se também, que a simulação computacional das condições hemodinâmicas em um paciente específico, em muito contribua ao estabelecimento de novos e mais adequados tratamentos para o melhoramento das condições de vida do paciente.

Por outro lado, na medida em que este grupo de pesquisadores (e outros que venham a se incorporar) tenham o apoio solicitado, suas atividades de pesquisa, desenvolvimento e formação de recursos humanos poderão ser incentivadas, com a conseqüente otimização dos recursos, minimização da relação custo-benefício e maximização da produção técnico-científica.

Para alcançar os objetivos anteriores, as seguintes áreas do conhecimento estão envolvidas na execução do projeto:

- 1) Elementos de fisiologia humana e anatomia. Particularmente o que se refere a: biomecânica, bioquímica e sistema cardiovascular humano;
- 2) Modelagem. Em particular: comportamento sanguíneo, comportamento dos tecidos que compõem a parede arterial, transporte biomecânico e interação mecânica e bioquímica com a parede arterial, fluido dinâmico e interação fluido-estrutura entre outras;
- 3) Simulação computacional. Em particular, empregando o método dos elementos finitos o desenvolvimento de simuladores 1D e 3D e seus respectivos acoplamentos, incorporação de efeitos multi-escala e técnicas de processamento de alto desempenho computacional;
- 4) Dados médicos e processamento de imagens incluindo segmentação, geração automática de malhas de elementos finitos e construção de cenários para planejamento cirúrgico;
- 5) Visualização científica dos dados gerados;
- 6) Validação do sistema desenvolvido na análise de casos reais.

4. Resultados e Impactos Esperados

A partir dos protótipos **já desenvolvidos**, o presente projeto alcançará num prazo de 2 anos os seguintes resultados:

- Desenvolvimento e teste de um programa computacional para que imagens médicas adquiridas em tomografias, ressonâncias magnética, e outros meios, possam ser processadas para que as estruturas de interesse sejam extraídas (ou segmentadas) e posteriormente visualizadas, auxiliando não somente a reconstrução 3D do distrito arterial em estudo, mas também contribuindo para o diagnóstico de doenças e o planejamento de procedimentos tais como cirurgias e radioterapias.
- Desenvolvimento e teste de um programa computacional para construir e/ou editar sistemas arteriais para posterior uso por parte dos programas de simulação computacional;
- Desenvolvimento de um programa para simulação computacional do sistema arterial humano (uni e tridimensional) capaz de proporcionar, com suficiente grau de precisão, informações sobre a dinâmica do sistema cardiovascular. Em particular, velocidade de propagação e perfis das ondas de pressão, assim como aspectos relacionados com o fluxo sanguíneo, incluindo velocidades, pressão, tensões nas paredes dos vasos, zonas de recirculação, tempos de permanência dos elementos em suspensão; permitindo ainda a modelagem da absorção, difusão e cinética do transporte bioquímico nos tecidos da parede arterial.
- Desenvolvimento de um programa para auxiliar a escolha da melhor técnica cirúrgica (planejamento cirúrgico) com ênfase em anastomoses vasculares, implantes e transplantes;
- Desenvolvimento de conhecimentos da influencia dos fatores hemodinâmicos na prevenção e promoção de saúde em doenças cardiovasculares.

Outros resultados na área da pesquisa são:

- orientação de alunos de doutorado e de pós-doutorado;

- publicações em revistas científicas de renome; organização e participação em eventos científicos na área.

O **impacto esperado** se deverá principalmente aos efeitos que esta nova tecnologia poderá trazer na área médica principalmente:

- no planejamento terapêutico e cirúrgico das mais variadas doenças vasculares, no treinamento e aprimoramento de cirurgias (incluindo cirurgias à distância);
- no desenvolvimento de métodos não invasivos de análise empregando simuladores computacionais que utilizam reconstrução tridimensional de imagens médicas obtidas por tomografia computadorizada, de ressonância magnética ou por outros meios;
- na caracterização em vivo e de maneira não destrutiva ou invasiva das propriedades dos tecidos biológicos e suas aplicações na modelagem cardiovascular e detecção de tumores entre outras;
- a ferramenta de reconstrução e visualização tridimensional de imagens médicas poderá ser empregada nos hospitais públicos onde os equipamentos ainda não tenham incorporado esta tecnologia;
- sua importância no contexto hospitalar como atestado pelos convênios já celebrados pelo LNCC e o Serviço de Cardiologia do Hospital Universitário Clementino Gama Filho da UFRJ e por o LNCC e as Faculdades de Medicina da UFRJ e de Petrópolis;
- materialização da primeira “*Rede Cooperativa de P&D na área de diagnóstico, tratamento, prognóstico de doença vascular e de planejamento cirúrgico de pacientes com doenças cardiovasculares auxiliados por modelos e simuladores computacionais do sistema cardiovascular*” reunindo pesquisadores das instituições de P&D interessados nos resultados do projeto.

5. Riscos e Dificuldades

Desde 1999 a equipe vem trabalhando no desenvolvimento de modelos para a simulação computacional do sistema arterial humano. Alguns modelos unidimensionais já foram desenvolvidos e um modelo tridimensional está já em funcionamento. Os algoritmos de segmentação e de visualização requerem ainda maior grau de desenvolvimento. Algo similar acontece com os algoritmos de geração de malhas de elementos finitos.

Embora existam dificuldades a serem vencidas, os resultados já obtidos até o presente momento e a qualificação da equipe de trabalho permitem assegurar o êxito na realização do presente projeto.

6. Metas

A seguir, faremos uma descrição resumida das metas que são relevantes para este projeto apresentando inclusive resultados já obtidos.

6.1. Estudo e comportamento do sangue e dos vasos

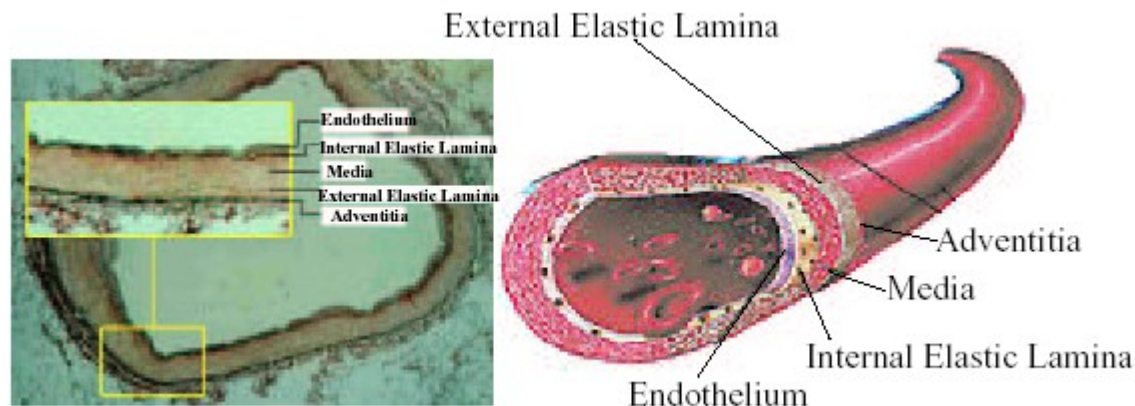


Figura 4. A estrutura das paredes arteriais.

O sangue pode ser modelado com um fluido não-Newtoniano, não-homogêneo composto de células mergulhadas em um plasma de tipo fluido Newtoniano. Algo similar ocorre com as paredes dos vasos sanguíneos. Na maioria das artérias tem se observado durante o ciclo cardíaco, variações nos diâmetros da ordem de 5-10%. Por outro lado, vasos enfermos apresentam maior rigidez reduzindo assim os movimentos de suas paredes. Desta maneira, as equações constitutivas das paredes dos vasos sanguíneos podem ser vistas como correspondente a um material rígido (nenhuma deformação é permitida não existindo acoplamento hemodinâmico com a deformação dos vasos) ou estas paredes podem ser modeladas empregando comportamento do tipo hiperelástico, ou viscoelástico ou, ainda, poro-elástico. Outro aspecto a ser considerado na modelagem do comportamento mecânico das paredes arteriais esta relacionado com a variação da proporção de elastina, músculo liso e colágeno presente em cada distrito do sistema arterial.

6.2. Modelos Unidimensionais

Vessel Type	Radius (cm)	Number	Area (cm ²)	Wall thickness (cm)
Aorta	1.25	1	4.5	0.2
Arteries	0.2	159	20	0.1
Arterioles	1.5×10^{-3}	5.7×10^7	400	2×10^{-3}
Capillaries	3×10^{-4}	1.6×10^{10}	4500	1×10^{-4}
Venules	1×10^{-3}	1.3×10^9	4000	2×10^{-4}
Veins	0.25	200	40	0.05
Vena cava	1.5	1	18	0.15

Tabela 2. Relações entre tamanho da artéria, número de artérias, área da seção transversal e espessura da parede.

Tendo em vista as diferentes escalas presentes no modelo, o sistema é aproximado por um sistema unidimensional (Modelo 1D) como indicado na Figura 5. Outro aspecto importante a ser incorporado na modelagem unidimensional do sistema cardiovascular está relacionado com os terminais. O modelo já desenvolvido incorpora terminais tipo

windkessel. Entretanto empregando técnicas de otimização é possível incorporar terminais constituídos por uma árvore arterial. Este tipo de terminal permite modelar com maior grau de precisão o comportamento da propagação das ondas de pressão e velocidade.

A Figura 5 apresenta o perfil da onda de pressão nos diferentes distritos da aorta obtido com o modelo 1D já desenvolvido pela equipe. Na Figura 6 apresentamos a visualização da propagação das ondas de pressão num distrito do Modelo 1D.

6.3. Segmentação de Imagens Medicas

Após o desenvolvimento do Modelo 1D e a partir de imagens medicas de um paciente específico, é necessária a obtenção da geometria 3D do distrito arterial em estudo. A Figura 7 apresenta a imagem medica e a Figura 8 a reconstrução da artéria carótida em estudo.

Empregando o sistema de visualização em desenvolvimento dentro do projeto é possível a visualização do interior das artérias. A Figura 9 apresenta a visualização do interior da artéria carótida apresentada na figura anterior.

Figura 5. Modelo 1D do Sistema Arterial. Morfologia das ondas de pressão obtida com o Modelo 1D já desenvolvido.

Figura 6. Protótipo desenvolvido para visualização da propagação de ondas no sistema arterial.

Figura 7. Imagem medica.

Figura 8. Reconstrução e visualização da carótida via o sistema desenvolvido.

Figura 9. Interior da artéria carótida.

6.4. Modelos Tridimensionais e seu acoplamento ao Modelo 1D

O desenvolvimento de modelos tridimensionais, baseados na reconstrução de imagens medica de um paciente específico, que permitam caracterizar com maior precisão o comportamento local do fluxo sanguíneo será realizado no projeto. Em particular, o acoplamento entre o fluxo sanguíneo e a deformação das paredes dos vasos será incorporado empregando uma formulação *ALE - Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation*. A deformação das paredes dos vasos será num primeiro momento modelado empregando formulação de membranas e, posteriormente, serão incluídos

comportamentos de cascas. A geometria destes domínios será obtida de dados provenientes de imagens médicas (CT, IMR, entre outras).

A Figura 10 apresenta esquematicamente este acoplamento entre os Modelos 1D e 3D respectivamente.

6.5. Resolução por Métodos de Elementos Finitos Estabilizados

Os métodos de elementos finitos estabilizados, introduzidos por Hughes e Brooks, tem obtido grande sucesso em razão de terem melhorado a estabilidade do método de Galerkin preservando sua consistência. Tal estratégia quando aplicada as equações de Navier-Stokes incompressíveis se destina a resolver duas limitações do método de Galerkin: as oscilações parasitas presentes na solução do problema advectivo dominante (alto número de Reynolds) devido ao caráter advectivo-difusivo das equações de Navier-Stokes e a limitação imposta pela condição inf-sup na escolha dos espaços de interpolação para a pressão e a velocidade. Neste projeto pretendemos incluir os métodos de elementos finitos estabilizados propostos por membros da equipe de trabalho para escoamentos transientes incompressíveis, a saber:

- equações de Navier-Stokes tridimensionais satisfazendo as novas leis de parede,
- modelos sanguíneos 1D,
- extensão aos modelos não Newtonianos.

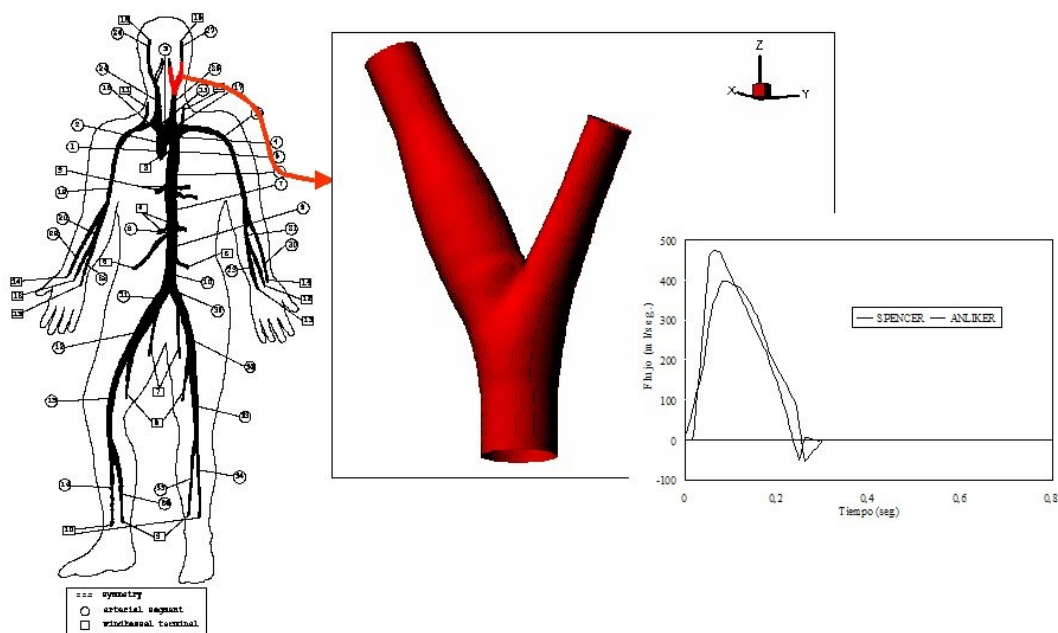


Figura 10. Modelo acoplado 1D-3D

6.6. Problemas Inversos e Caracterização de Propriedades

A determinação das propriedades mecânicas de tecidos vivos é uma tarefa de difícil realização. É assim de vital importância o desenvolvimento de métodos não invasivos para determinar estas propriedades. Uma técnica que se apresenta promissora e onde

pesquisadores da equipe têm obtido bons resultados, consiste no emprego da Análise de Sensibilidade e suas aplicações em problemas inversos e de caracterização de propriedades e formas via Gradiente Topológico. Com estes modelos é possível estudar variacionalmente a sensibilidade da resposta a mudanças nestes parâmetros. Empregando técnicas de otimização e de Análise de Sensibilidade, é possível caracterizar parâmetros constitutivos e geométricos mediante a minimização de uma função custo que leva em conta a diferença entre as medidas realizadas em determinadas partes do sistema arterial e a resposta do modelo. Com o aprimoramento destas técnicas poderemos prever valores adequados para as características geométricas e de material de diversas partes do sistema arterial humano. É importante resaltar que estas técnicas podem ser empregadas com êxito na detecção de tumores.

6.7. Alto desempenho

A análise dos modelos tridimensionais requer em geral a solução de sistemas de equações não-lineares de grande porte (da ordem de $10^6 - 10^7$ equações). Assim, é necessário o emprego de métodos de resolução de alto desempenho computacional. Em particular, nossa instituição (LNCC-Laboratório Nacional de Computação Científica do MCT) é um CENAPAD (Centro de Processamento de Alto Desempenho) assim como é o Coordenador do SINAPAD (Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho). Contamos assim com um parque computacional adequado para a solução destes grandes sistemas de equações. Por outro lado, o desenvolvimento de algoritmos multigrid, decomposição de domínios e suas implementações em computadores de alto desempenho embora de baixo custo (PC) já foram obtidos pelos pesquisadores participantes no projeto. Algo similar já foi feito na área de geração automática de malhas de elementos finitos, processamento das imagens médica e visualização científica.

6.8. Códigos de elementos finitos

A partir dos protótipos já desenvolvidos, o projeto tem por objetivo o desenvolvimento das ferramentas computacionais a serem empregadas pelas equipes médicas e necessárias à simulação computacional dos modelos acima descritos. Estas ferramentas permitirão resolver as equações de Navier-Stokes em problemas transitórios e geometrias tridimensionais arbitrárias empregando diferentes técnicas de estabilização assim como permitindo o acoplamento fluido estrutura (deformação das artérias). Também serão desenvolvidas as ferramentas computacionais necessárias para o cálculo das sensibilidades e gradientes topológicos e suas aplicações na solução de problemas inversos. Este desenvolvimento será feito dentro do padrão ACDPOOP – Ambiente Computacional para Desenvolvimento de Programas baseado em técnicas de Programação Orientada por Objetos – já desenvolvido pelo Prof. Feijóo e colaboradores.

6.9. Desenvolvimento de Software na área de Visualização Científica

Os seguintes softwares vêm sendo desenvolvidos no âmbito do projeto:

- Vis: Biblioteca de Classes desenvolvida em C++/ Vtk-Visualization Toolkit;
- SciVis: Voltado para a visualização de dados numéricos em dinâmica de fluidos computacional. Desenvolvido em C++/VisualC++ a partir do Vis;

Aspecto importante é a portabilidade do SciVis. É fundamental que este possa ser utilizado tanto em ambiente Windows quanto Linux. Assim, uma outra meta deste projeto, é portar para Linux o SciVis, uma vez que este aplicativo foi desenvolvido, em

sua versão original, para Windows. Para esta finalidade, será utilizada a biblioteca wxWindows, a qual se constitui em uma interface de programação útil para o desenvolvimento de interfaces gráficas portáteis para mais de uma plataforma (<http://www.wxwindows.org/>).

6.10. Análise de casos

Com os modelos e ferramentas a serem desenvolvidas a partir dos protótipos já disponíveis no projeto, serão analisados sistemas arteriais normais e apresentando diversas patologias. A comparação dos resultados para estas duas situações pretende mostrar a potencialidade destes modelos na diagnose, tratamento e planejamento cirúrgico de doenças cardiovasculares. Estas ferramentas computacionais serão disponibilizadas para os serviços de cardiologia do Hospital Universitário da UFRJ, UERJ e da Faculdade de Medicina de Petrópolis (com os quais o LNCC mantém um convenio de cooperação científica) procurando com isto verificar o grau de confiabilidade do sistema proposto no presente projeto.

As Figuras 11 - 14 apresentam alguns resultados obtidos com os protótipos já desenvolvidos.

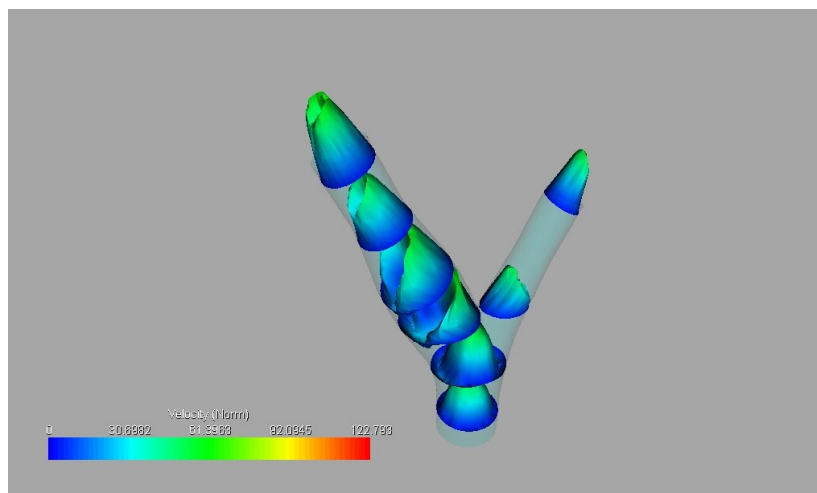


Figura 11. Perfil da velocidade nas diferentes seções da carótida analisada como um Modelo 1D-3D acoplado (ver Figura 10)

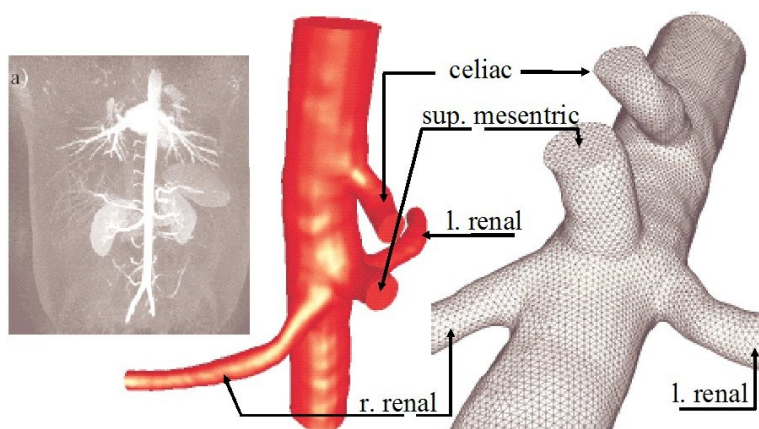


Figura 12. Reconstrução de imagem médica, geração da malha de elementos finitos e visualização.

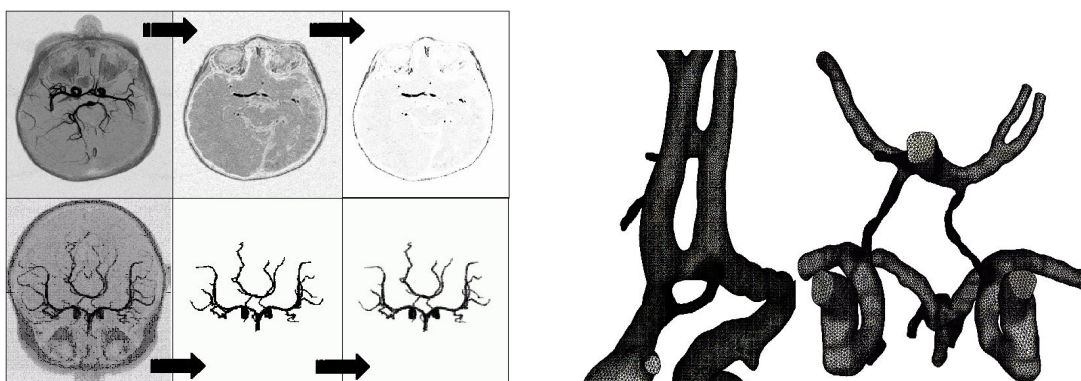


Figura 13. Imagem médica, reconstrução do sistema arterial, geração de malha de elementos finitos e visualização.

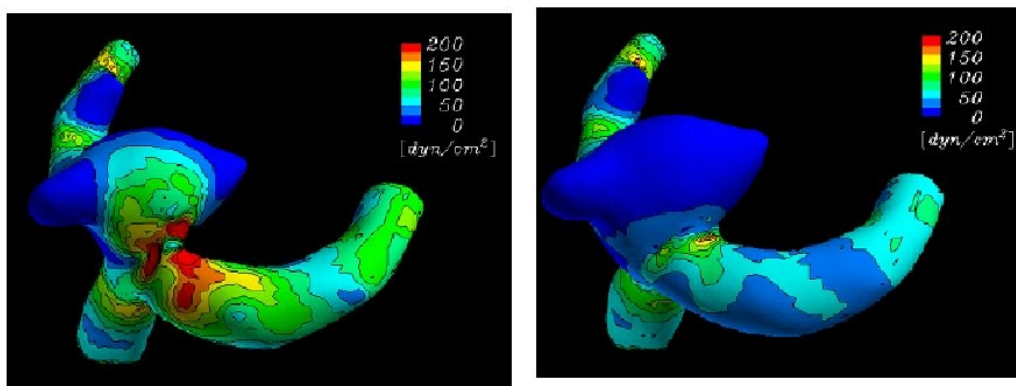


Figura 14. Aneurisma cerebral. Comparação das tensões cisalhantes para modelo rígido e deformável da parede arterial.

6.11. Divulgação de Resultados

Os resultados obtidos no desenvolvimento deste projeto serão também transferidos à comunidade científica e tecnológica através da participação e apresentação de trabalhos técnico-científicos em eventos e congressos nacionais e internacionais e publicação de trabalhos em revistas com corpos editoriais nacionais e internacionais. Além disso, páginas na Internet serão produzidas para divulgar os resultados do projeto.

6.12. Formação de Recursos Humanos

Serão orientados e ou co-orientados alunos de IC, mestrado, doutorado e pós-doutorado nas áreas envolvidas pelo presente projeto tanto no LNCC como em outras instituições do País e do exterior. Particularmente em instituições tais como: COPPE/UFRJ, IME, Centro Atômico Bariloche (Argentina), Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Argentina), Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina), Serviço de Cardiologia do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho da UFRJ,

Departamento de Clínica Médica e Cirurgia Geral da Faculdade de Medicina da UFRJ e da Faculdade de Medicina de Petrópolis.

6.13. Transferência do Conhecimento e Desenvolvimentos

Pretende-se transferir os resultados e ferramentas computacionais desenvolvidos neste projeto estabelecendo-se convênios com outros hospitais e centros médicos públicos e privados. Ao final do projeto pretende-se organizar o *International Workshop on Modelling and Computational Simulation of the Human Cardiovascular System* para o qual serão convidados especialistas na área do país e do exterior e durante o qual serão apresentados os resultados obtidos com o projeto.

6.14. Construção de um Banco de Dados

Durante o desenvolvimento do projeto será gerado um banco de dados que permitirá organizar e atualizar todo material bibliográfico disponível e gerado durante o desenvolvimento do projeto, incluindo endereços de páginas Internet com informações sobre o tema, características geométricas dos vasos, propriedades mecânicas dos tecidos que integram as paredes dos vasos nos diversos distritos do sistema arterial, equações constitutivas mais apropriadas, propriedades e comportamento do sangue incluindo equações constitutivas mais empregadas, informação dos casos estudados, etc. Desta maneira, não somente as ferramentas computacionais a serem desenvolvidas no projeto poderão acessar facilmente estes bancos de dados (independentemente do lugar geográfico onde estas ferramentas tenham sido instaladas), mas também as instituições de P&D, associações ou indivíduos interessados nestas informações poderão fazê-lo. Com isto, os resultados obtidos no projeto poderão ser aproveitados por toda a comunidade técnico-científica do País.

7. Equipe

7.1 Pesquisadores Principais

- **Prof. Raul Feijóo:** Coordenador do Projeto, Pesquisador Titular do LNCC. Bolsa de Produtividade em Pesquisa Nível 1A do CNPq. Ordem Nacional do Mérito Científico na Classe Comendador, outorgado pelo Presidente da República, Decreto de 21 de Julho de 2000. Suas áreas de atuação são: Hemodinâmica do Sistema Cardiovascular Humano, Teoria Linear e Não-Linear de Cascas e suas Aplicações em Engenharia e bioengenharia; Otimização na Análise Estrutural e na Análise Inelástica de Sólidos. Análise de Sensibilidade via Formulações Variacionais e suas aplicações na Otimização de Forma, Otimização Topológica, Mecânica da Fratura e problemas inversos e suas aplicações na caracterização de propriedades; Mecânica do Contínuo, com ênfase em Elasticidade, Termoelasticidade, Elasto-Plasticidade e Elasto-Viscoplasticidade; Problemas Unilaterais em Mecânica: Elastoplasticidade, Contato Elasto-Plástico com Atrito via programação matemática; Métodos e Princípios Variacionais em Mecânica do Contínuo; Análise Numérica; Fundamentos Matemáticos e Aplicações do Método dos Elementos Finitos em Engenharia; Estimadores de erro baseados em resíduo e métodos de captura de discontinuidade. Desenvolvimento de Software Técnico-Científico e Visualização Científica.
- **Prof. Edgardo O. Taroco.** Pesquisador Titular do LNCC. Bolsa de Produtividade em Pesquisa Nível 1B do CNPq. Titulação: D.Sc. Áreas de atuação: Mecânica dos

sólidos; Teoria de placas e cascas; Análise de Sensibilidade via Formulações Variacionais e suas aplicações na Otimização de Forma, Otimização Topológica, Mecânica da Fratura e problemas inversos e suas aplicações na caracterização de propriedades geométricas e de material.

- **Prof. Frédéric Valentin:** Pesquisador Adjunto do LNCC. Titulação: D.Sc. Áreas de atuação: Modelos matemáticos, Mecânica dos fluidos, Análise numérica de método dos elementos finitos, Análise assintótica, Algoritmos de resolução numérica.
- **Prof. Gilson Giraldi:** Pesquisador Adjunto no LNCC. Titulação: D.Sc. Áreas de atuação: Segmentação de Imagens: Modelos Deformáveis (*Snakes*), Método de filtragem não-linear (Difusão Não-Linear); Visualização de Dados: Visualização de Fluidos – Visualização de Campos vetoriais dependentes do tempo; Volume Rendering: Aplicações da Equação de Transporte de Boltzmann para rendering direto de campos escalares 3D.
- **Prof. Jauvane C. de Oliveira.** Pesquisador Adjunto do LNCC. Titulação: D.Sc. Áreas de atuação: Realidade Virtual e Sistemas Colaborativos.
- **Prof. Antonio André Novotny.** Pesquisador Adjunto do LNCC. Titulação: D.Sc. Áreas de atuação: Análise de Sensibilidade via Formulações Variacionais e suas aplicações na Otimização de Forma, Otimização Topológica, Mecânica da Fratura e problemas inversos e suas aplicações na caracterização de propriedades geométricas e de material, Desenvolvimento de software.

7.2 Professor Visitante

- **Eduardo de Souza Neto.** Titulação: Ph.D. Áreas de atuação: Mecânica dos sólidos; Teoria de placas e cascas; Formulações Variacionais e suas aplicações na Mecânica não Linear e Comportamento não Linear dos Materiais (plasticidade, fluência, etc.), Elementos Finitos e suas Aplicações em problemas Multi-escala, Mecânica da Fratura, Desenvolvimento de Software.

7.3 Alunos de Doutorado do LNCC

- **Ignácio Larrabide.** Tema de tese: Modelagem e Simulação Computacional do Sistema Cardiovascular Humano.
- **Pablo J. Blanco.** Tema de tese: Modelagem e Simulação Computacional do Sistema Cardiovascular Humano empregando técnicas de multi escala.
- **Rodrigo L. Silva.** Tema de Tese: Realidade Virtual e Segmentação de Imagens Médicas.
- **Outros alunos** da Pós Graduação em Modelagem Computacional serão convidados a participar no projeto.

7.4 Técnicos

- **Antonio Salgado (Programador):** Área de Atuação: Desenvolvimento de aplicativos em elementos finitos e de visualização científica.
- **Izar Valentim (Programadora):** Área de Atuação: Desenvolvimento de banco de Dados.
- **Débora Carius (Programadora):** Área de atuação: Desenvolvimento e implantação do banco de dados e paginas WEB.
- **Gustavo Berrondo (Programador):** Área de atuação: Desenvolvimento e implantação do banco de dados e paginas WEB.

7.5 Alunos de Iniciação Científica (IC)

- **Rodrigo Veiga:** Área de Atuação: Segmentação de Imagens Médicas. Instituição de Origem: Universidade Católica de Petrópolis (UCP).
- **Dúlio Matos Leite de Carvalho (Aluno IC):** Área de Atuação: Transmissão Progressiva de Dados e Processamento de Imagens. Instituição de Origem: Instituto Militar de Engenharia (Rio de Janeiro).

7.6 Pesquisadores Colaboradores

Caso o projeto seja aprovado, os seguintes profissionais na área da medicina e engenharia serão convidados a participar do projeto como pesquisadores colaboradores.

7.6.1 Pesquisadores de Instituições do Estado de Rio de Janeiro

- **Serviço de Cardiologia do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho – HU/UFRJ, Departamento de Clínica Médica e de Cirurgia Geral da Faculdade de Medicina da UFRJ**
 - **Luiz Augusto Feijó.** Chefe de Clínica do Serviço de Cardiologia, Hospital Universitário-UFRJ. Presidente do departamento de valvulopatias da Sociedade de Cardiologia do Estado do Rio de Janeiro. Pós-graduação em cardiologia pela Universidade de Londres, Inglaterra em 1987. Mestrado em Cardiologia, UFRJ em 1989. Doutorado em Cardiologia (propagação de ondas no sistema arterial),UFRJ em 2001.
 - **Luiz Felipe da Silva** - Professor Adjunto, cirurgião vascular, Chefe do Departamento de Cirurgia Geral da Faculdade de Medicina da UFRJ.
 - **Nelson Albuquerque de Souza e Silva.** Professor Titular de Cardiologia do Departamento de Clínica Médica, doutor em Cardiologia pela UFRJ desde 1981 e Master of Sciences in Medicine pela Mayo Graduate School of Medicine da Universidade de Minnesota, USA. O professor Nelson é o Coordenador do Programa de Pós-graduação em Clínica Médica, Área de Pesquisa Clínica e Professor do Programa de Pós-graduação em Cardiologia O Professor Nelson é atualmente Assessor de Doenças Crônicas da Secretaria de Estado de Saúde do Rio de Janeiro e Coordenador Geral do Sistema Rio-Cor do Ministério da Saúde e da Secretaria de Estado de Saúde do Rio de Janeiro o que garantirá a extensão do projeto para as unidades de saúde do Estado do Rio de Janeiro e seus Serviços de Doenças Cardiovasculares. O professor Nelson é também Fellow do American College of Cardiology e do American College of Physicians.
 - **Oswaldo Luiz Pizzi.** Cardiologista e professor da disciplina de Clínica Médica da Faculdade de Medicina de Petrópolis.

7.6.2 Pesquisadores de Instituições do País

- **Universidade Federal de Santa Catarina**
 - **Prof. Eduardo Fancello.** Pesquisador Associado. D. Sc., Análise de tensões em componentes, Análise de sensibilidade, Otimização Estrutural, Método dos Elementos Finitos, Métodos Multigrid, Métodos Adaptativos, Desenvolvimento de software.

7.6.3 Pesquisadores de Instituições do exterior

- **Marcelo Javier Vénere.** Pesquisador Titular do Instituto de Sistemas de Tandil (ISISTAN - Jefe División Imágenes Neutrográficas), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires e do Centro Atómico Bariloche, Bariloche, Argentina. Titulação: D. Sc. Áreas de atuação: Mecânica dos Fluidos Computacionais; Geração automática de malhas de elementos finitos; Segmentação e recuperação de imagens médicas; Visualização Científica.
- **Santiago Urquiza.** Pesquisador Associado do Dpto. de Mecánica & Lab. Bioingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina. Titulação: D. Sc. Áreas de atuação: Mecânica dos Fluidos Computacionais; Modelos unidimensionais e tridimensionais do sistema arterial humano.
- **Claudio Padra.** Pesquisador Adjunto da División de Mecánica Computacional do Centro Atómico Bariloche, Argentina. Titulação: Dr. em Matemática. Áreas de atuação: Estimadores de erro *a posteriori*, Métodos adaptativos, Análise de sensibilidade, Interação fluido-estrutura.
- **Enzo Alberto Dari.** Pesquisador Adjunto da División de Mecánica Computacional do Centro Atómico Bariloche, Argentina. Titulação: D. Sc.. Áreas de atuação: Alto desempenho e processamento distribuído, Geração automática de malhas, Visualização, Métodos adaptativos, Desenvolvimento de software.
- **Gustavo C. Buscaglia.** Pesquisador Titular da División de Mecánica Computacional do Centro Atómico Bariloche, Argentina. Titulação: D. Sc.. Áreas de atuação: Análise de sensibilidade, Mecânica dos Fluidos Computacional.
- **Fernando Basombrio.** Pesquisador Titular da División de Mecánica Computacional do Centro Atómico Bariloche, Argentina. Titulação: D. Sc.. Áreas de atuação: Mecânica dos Fluidos Computacional, Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos e suas aplicações na modelagem hemodinâmica.

8. Referências Bibliográficas

8.1. Publicações e Conferências do Prof. R. A. Feijóo e membros da equipe relacionadas com os temas do Projeto

1. R. C. Almeida, R. A. Feijóo, A. C. N. R. Galeão, C. Padra, R. S. Silva, Adaptive Finite Element Computational Fluid Dynamics Using an Anisotropic Error Estimator, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 182, 379 - 400, 2000.
2. F. G. Basombrio, E. A. Dari, G. C. Buscaglia, R. A. Feijóo. Numerical experiments in complex hemodynamic flows. *XI ENIEF*, Bariloche, Argentina, Novembro, 2000.
3. F.G. Basombrio, E. A. Dari, G. C. Buscaglia, R. A. Feijóo, Numerical experiment in complex haemodynamic flows. Non-Newtonian Effects, *International Journal of Computational Fluid Dynamic*, Vol: 16, No: 4, Pág: 231--246, 2002.
4. M. L. Bittencourt, C. Douglas, R. A. Feijóo, Linear Non-Nested Multigrid Method, *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, Vol: 17, No: 4, Pág: 313-331, 2001.
5. M. L. Bittencourt, R. A. Feijóo. Métodos Multigrid Aplicados a Problemas Elásticos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*,

- Eds. E. Oñate, J. Henrich e O. C. Zienkiewicz, Vol. 14, 1, 3-23, 1998.
6. M. L. Bittencourt, R. A. Feijóo. Multigrid Methods Applied to the h, p and hp Version of the Finite Element Method". *ECCOMAS 2000 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Espanha, 11-14 de setembro, 2000. Publicado no CD-ROM deste evento.
 7. M. L. Bittencourt, R. A. Feijóo, A. C. Salgado Guimarães. Elementos Finitos Orientado por Objeto, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Discña en Ingenieria*, vol 15 (3), pp 343-356, 1999.
 8. M. L. Bittencourt, R. A. Feijóo, C.A.Silva. Object-oriented Programming Applied to the Development of the Structural Analysis and Optimization Software; *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*; 23; 3; 2001.
 9. [Dari et al (2000)] E. A. Dari, M. I. Cantero, R. A. Feijóo. Computational arterial flow modeling using a parallel Navier-Stokes solver". "Invited Contributed Paper" no *Invited Session on Hemodynamics of the Cardiovascular System and its Computational Simulation*. Atividade programada dentro do *ECCOMAS 2000 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Espanha, 11-14 de setembro, 2000. Publicado no CD-ROM deste evento. Tech. Report 09/2000. Web Site: <http://www.lncc.br/proj-pesq/rpesq.html>.
 10. R. A. Feijóo, Anisotropic error estimator in fluid mechanics. *Workshop "Optimisation de Forme"*, Université Paul Sabatier, Toulouse, França, 15 de Outubro de 1998.
 11. [Feijóo et al (1999)] R.A. Feijóo, M. J. Vénere, E. A. Dari and L. Bevilacqua, "El Centro de Modelos Complejos y sus Actividades en el Area de la Hemodinámica del Sistema Cardiovascular Humano y su Simulación Computacional", Tech. Report 27/99. Web Sites: <http://www.lncc.br/proj-pesq/relpesq-99.html>, <http://146.134.8.133/cmc/Projeto/index.html>. Tambem apresentado como "Conferencia Convidada" no *Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM-99*, 6-10 de Setembro, 1999, Mendoza, Argentina.
 12. R. A. Feijóo. Hemodynamics of the Cardiovascular System, *UNICAMP*, Campinas, julho de 1999.
 13. R. A. Feijóo. Computational Modeling and Simulation of the Human Cardiovascular System, *III Italian-Latin American Conference on Applied and Industrial Mathematics (ITLA)*, Nov. 3-5, 1999, Petrópolis, RJ.
 14. R. A. Feijóo. Hemodynamics of the Human Cardiovascular System and its Computational Simulation. *Escola de Verão: Métodos Computacionais em Biologia*, Janeiro 31 - Fevereiro 11, 2000, Petrópolis, RJ.
 15. R. A. Feijóo. Computational Simulation of the Human Cardiovascular System. *52 Reunião da SBPC*, Brasília, Julho, 2000, Brasil.
 16. R. A. Feijóo. Computational Modeling of the Human Arterial System, *GRANTE*, UFSC, 17 de Setembro de 2001.
 17. R. A. Feijóo. Computational Modeling of the Human Arterial System. Geometry reconstruction from medical images, Fluid/Solid Interaction and 1D/3D Computational Simulations, *XXIV CNMAC*, UNI-BH, Belo Horizonte, 10-13 de Setembro de 2001.
 18. R. A. Feijóo. The Human Cardiovascular System, 1D - 3D Computational Simulations, *1er. Simpósio Brasileiro de Biologia Matemática e Computacional*, IMPA, Rio de Janeiro, 2 - 4 de Abril, 2001.

19. R. A. Feijóo. Introduction to the Computational Modeling of the Human Cardiovascular System, *Segunda Escola de Verão em Métodos Computacionais em Biologia*, 22 de Janeiro - 2 de Fevereiro, LNCC, 2001.
20. R. A. Feijóo. Computational Modeling of the Human Arterial System, II Congresso da Sociedade de Hipertensão do Estado de Rio de Janeiro, Hotel Sofitel, 19-04-2002, 20-04-2002, CD-II Congresso da Sociedade de Hipertensão do Estado de Rio de Janeiro.
21. R. A. Feijóo. A Predictive Model for Diagnosis and Surgical Planning of the Human Arterial System, *Escola de Verão, Curso Avançado A12*, 22 de Janeiro, 2003, Petrópolis, LNCC. Também apresentada no *Workshop em Biomatemática*, 23 de Janeiro, Rio de Janeiro, IMPA.
22. R. A. Feijóo, A. A. Novotny, C. Padra, E. Taroco. Derivada Topológica via Análise de Sensibilidade à Mudança de Forma na Otimização Topológica, *Revista Int. de Mét. Num. para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol: 18, No: 4, Pág: 499-519, 2002.
23. R. A. Feijóo, A. Novotny, C. Padra, E. Taroco. The topological-Shape Sensitivity Analysis and its Applications in Optimal Design, *MECOM 2002:VII Arg. Cong. in Comp. Mech., I South American Cong. Comp. Mech. and III Brazilian Cong Comp. Mech.*, Santa Fe - Parana, Argentina, 28-10-2002, 30-10-2002, Vol: CD.
24. R. A. Feijóo, A. Novotny, C. Padra, E. Taroco. The topological Derivative for the Poisson's Problem, a ser publicado no *Math. Models Methods Appl. Sci.*
25. R. A. Feijóo, A. Novotny, C. Padra, E. Taroco. The topological-Shape Sensitivity Method and its Applications in 2D Elasticity, a ser publicado no *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*.
26. R. A. Feijóo, C. Padra, R. Saliba, E. Taroco, M. J. Vénere, Shape sensitivity analysis for energy release rate evaluation and its application to the study of three-dimensional cracked bodies, *Comp. Methods in Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 188, 4, pp 649-664, Aug-2000.
27. R. A. Feijóo, C. Padra, F. Quintana, An anisotropic error estimator for compressible flow problems, *Mecánica Computacional*, Vol. 19, pp 373-378, 2000.
28. R. A. Feijóo, C. Padra, F. Quintana, An anisotropic a posteriori error estimator for Computational Fluid Dynamic, *Journal of Computational Fluid Dynamic*, Vol: 16, No: 4, Pág: 297-304, 2002.
29. [Giraldi-Oliveira (1999)] G. A. Giraldi and A. F. Oliveira, "Convexity Analysis of Snake Models Based on Hamiltonian Formulation". Relatório Técnico: <http://www.cos.ufrj.br/relatorios/reltec99/>, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dep. Eng. Sistemas e Computação, 1999.
30. [Giraldi at al. (2000)] G. A. Giraldi, E. Strauss, and A. A. F. Oliveira, "A Boundary Extraction Method Based on Dual-T-Snakes and Dynamic Programming", Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2000), Hilton Head Island, South Carolina, U.S.A, June 13-15, (2000).
31. [Giraldi-Oliveira (2000)] G. A. Giraldi and E. Strauss and A. F. Oliveira, "An Initialization Method for Active Contour Models", Proceedings of the 2000 International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'2000), 2000.

32. [Giraldi (2000)] G.A. Giraldi, “T-Snakes Duais e Inicialização de Modelos Deformáveis”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro, 2000.
33. [Giraldi-Strauss (2000)] G. A. Giraldi, E. Strauss and A. F. Oliveira, “A Boundary Extraction Approach Based on Multi-resolution Methods and the T-Snakes Framework”, International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision (SIBGRAPI'2000), 2000.
34. [Giraldi at al. (2001)] G. Giraldi, E. Strauss, A. Apolinario, A. F. Oliveira, “An Initialization Method for Deformable Models”, 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2001), 2001.
35. [Giraldi(4) at al. (2001)] G. A. Giraldi, R. A. Feijóo, R. Farias. “Parallel Volume Rendering”: New Methodologies and Applications”, RITA (Revista de Informática Teórica e Aplicada), Instituto de Informática da UFRGS, Edição Especial (Computação Gráfica e Processamento de Imagens), Vol. 8, No. 2, 89-108, Outubro, 2001.
36. [Giraldi(5) at al. (2001)] Gilson A. Giraldi, N. Vasconcelos, Edilberto Strauss, Antonio A.F. Oliveira ”Dual and Topologically Adaptable Snakes and Initialization of Deformable Models”. Tech. Report 25/2001. Web Site: <http://www.lncc.br/proj-pesq/relpesq-01.html>
37. [Giraldi(2) at al.(2001)] G. Giraldi, W. Herrera, N. Vasconcelos, E. Strauss, A. F. Oliveira, “Dual and Topologically Adaptable Snakes and Initialization of Deformable Models”, International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'2001), Monte Carlo Resort, Las Vegas, Nevada, USA, June 25-28, 2001.
38. [Giraldi(3) at al. (2001)] G. Giraldi, E. Strauss, A. F. Oliveira, “Improving the Original Dual-T-Snakes Model”, XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI'2001), 2001.
39. [Giraldi(6) at al. (2002)] E. Strauss, W. Jiménez, G. Giraldi, R. Silva, A. Oliveira. “A Semi-Automatic Surface Reconstruction Framework Based on T-Surface and Isosurface Extraction Methods”. In: International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision (SIBGRAPI'2002).
40. [Giraldi(7) at al. (2002)] G. A. Giraldi, E. Strauss, A. A. F. Oliveira, “Dual-T-Snakes Model for Medical Imaging Segmentation”. Pattern Recognition Letters, Vol. 24, No. 7, 2003.
41. [Giraldi(8) at al. (2002)] E. Strauss, W. Jiménez, G. Giraldi, R. Silva and A. Oliveira, “A Surface Extraction Approach Based on Multi-Resolution Methods and T-Surfaces Framework”, International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'2002), Monte Carlo Resort, Las Vegas, Nevada, USA, June 24-27, 2002. Este trabalho foi selecionado para ser um capítulo do livro: *Advances in Geometric Modeling*, John Wiley, Editor: M. Sarfraz, to appear in April 2003.
42. [Giraldi-Jauvane (2003)] G. Giraldi and J. Oliveira and B. Schulze and R. Silva, “Distributed Visualization of Fluids using Grid”, *Proc. Of the International Middleware Conference (MGC)*, Rio de Janeiro, June, 2003.
43. [Giraldi-Oliveira (2003)] G. Giraldi and A.A.F. Oliveira, “Invariant Snakes and Initialization of Deformable Models”, Accepted to the Special Issue on Deformable Models, of the International Journal of Image and Graphics (IJIG), 2003.

44. [Giraldi et al. (2003)] E. Strauss, W. Jiménez, G. Giraldi, R. Silva, A. Oliveira, "T-Surfaces Framework for Offsets Generation and Semi-Automatic Surface Reconstruction", Pre-Accepted to the Computer Vision and Image Understanding (CVIU) Journal, 2003.
45. A. Novotny, E. Taroco, C. Padra, R. A. Feijóo, Análise de Sensibilidade en Optimizaçãõ Topol\u00f3gica, *Mec\u00e1nica Computacional*, 19, pp 379-385, 2000.
46. A. Novotny, R. A. Feij\u00f3o, C. Padra, E. Taroco. Topological Sensitivity Analysis, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol: 192, P\u00e1g: 803--829, 2003.
47. A. Novotny, R. A. Feij\u00f3o, C. Padra, E. Taroco. Topological Optimization via Shape Sensitivity Analysis Applied to 2D Elasticity", VCCM 2002 - V World Congress on Computational Mechanics, Vienna University of Technology, 07-07-2002, 12-07-2002, Proceedings of the V World Congress on Computational Mechanics, Vol: CD.
48. S. A. Urquiza, M. J. V\u00e9nere, F. M. Clara, R. A. Feij\u00f3o. Finite Element (One-dimensional) H\u00e4modynamic model of the Human Arterial System. "Invited Contributed Paper" no *Invited Session on Hemodynamics of the Cardiovascular System and its Computational Simulation*. Atividade programada dentro do *ECCOMAS 2000 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Espanha, 11-14 de setembro, 2000. Publicado no CD-ROM deste evento.
49. R. Saliba, E. Taroco, C. Padra, R. A. Feij\u00f3o, M. J. V\u00e9nere, Adaptividad en Fractomec\u00e1nica Tridimensional, *Mec\u00e1nica Computacional*, 19, pp 181-187, 2000.
50. R. Saliba, M. J. V\u00e9nere, R. A. Feij\u00f3o e E. Taroco . An\u00e1lisis de Sensibilidad al Cambio de Forma y la Integridad de Componentes Mec\u00e1nicos. Trabajo Invitado, *Anales de la Conferencia Internacional sobre Evaluaci\u00f3n de Integridad y Extensi\u00f3n de Vida de Equipos Industriales (IEV-98)*, Montevideo, mayo 1998, pp. 116-125.
51. R. Saliba, M. J. V\u00e9nere, C. Padra, E. Taroco and R. A. Feij\u00f3o. Shape Sensitivity Analysis and Energy Release Rate of Planar Cracks Embedded in Three Dimensional Bodies. *Contributed Paper, 4th World Congress on Computational Mechanics*, Buenos Aires, June 29 – July 2, 1998.
52. E. Taroco, R. A. Feij\u00f3o. Shape sensitivity analysis of elastic shells with cracks, a ser publicado no *International Journal of Structural Optimization*.
53. E. Taroco, R. A. Feij\u00f3o. Shape Sensitivity Analysis in Twisted Cracked Bars, *17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology - SMIRT 17*, Praga, Republica Checa, 2002.
54. E. Taroco, R. A. Feij\u00f3o. Shape Sensitivity Analysis of Plates and Shells, *7th Conference on Shell Structures Theory and Applications*, Gdansk University of Technology, Gdansk, Polonia, 09-10-2002, 11-10-2002, Proceedings of the 7th Conference on Shell Structures Theory and Applications, Vol: CD.
55. S. A. Urquiza, A. L. Reutemann, M. J. V\u00e9nere, R. A. Feij\u00f3o. Acoplamiento de Modelos unidimensionales y multidimensionales para la resoluci\u00f3n de problemas hemodin\u00e1micos. ENIEF 2001, XII Congress on Numerical Methods and Their Applications, AMCA, C\u00f3rdoba, 2002.
56. S. A. Urquiza, M. J. V\u00e9nere, F. M. Clara, R. A. Feij\u00f3o. Finite Element One-Dimensional Hemodynamic Model for the Human Arterial System, en: O\u00f1ate, Bugada, Suarez, edt. Proc. ECCOMAS 2000, European Congress on Computational

Methods in Applied Sciences and Engineering, Artes Gráficas Torres S. A., Barcelona, 2000.

57. S. A. Urquiza, P. J. Blanco, M. J. Vénere, R. A. Feijóo. Multidimensional Modelling for the Carotid Artery Blood Flow, Relatorios de P&D do LNCC/MCT, N. 08/2004.
58. M. J. Vénere, R. A. Feijóo. Automatic Mesh Generation Starting from Medical Images. *Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM-99*, 6-10 de Setembro, 1999, Mendoza, Argentina.
59. M. J. Vénere, R. A. Feijóo, A. C. Salgado Guimaraes. Finite Element Mesh Generation for 3-D Digital Images". "Invited Contributed Paper" no *Invited Session on Hemodynamics of the Cardiovascular System and its Computational Simulation*. Atividade programada dentro do *ECCOMAS 2000 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Espanha, 11-14 de setembro, 2000. Publicado no CD-ROM deste evento.

11.1 Referências Bibliográficas em Modelagem do Sistema Cardiovascular

60. R. A. Adams, S. A. Evans, F. Kooshesh, J. G. Jones. The Effects of temperature in Filtration of Dilute Blood Through 3 mm and 5 mm filters. *Biorheology*, V. 32, no. 6, 643-653, 1995.
61. R. L. Armentano, E. Cabrera Fischer. *Biomecânica arterial*, Akadia ed. Bs. As., 1994.
62. R. L. Armentano , A. Simon , J. Levenson , N. P. Chau , J. L. Megnien , R. Pichel. Mechanical pressure versus intrinsic effects of Hypertension on large arteries in humans hypertension. *Hipertension*, 18, 5, 657-64, 1991.
63. R. L. Armentano, J. L. Megnien, A. Simon , F. Bellenfant, J. Barra, J. Levenson. Effects of hypertension on visco-elastic properties of common carotid and femoral arteries in man. *Hipertension*, 26, 48-54, 1995.
64. K. M. Arthurs; L. C. Moore; C. S. Peskin; E. B. Pitman e H. E. Layton. Modeling arteriolar flow and mass transport using the immersed boundary method. *J. Comp. Phys.*, 147, 402-440, 1998.
65. P. Avolio. Multi-branched model of the human arterial system. *Med. & Biol. Eng. \& Comput.*, 18, 709-718, 1980.
66. J. Behr. S. M. Choi, S. Groszkopf, H. Hong, S. A. Nam, Y. Peng, A. Hildebrand, M. H. Kim, G. Sakas. Modelling, visualization and interaction techniques for diagnosis and treatment planning in cardiology. *Computers and Graphics*, 24, 5, 741-753, 2000.
67. D. H. Bergel. *Cardiovascular Fluid Dynamics*, Vol. 1 e 2, Academia Press, N.Y., 1972.
68. A. C. Burton. *Physiology and Biophysics of the Circulation* Year Book Medical Publisher, 1965.
69. K. Campbell, M. Zeglen, T. Kagehiro, H. Rigas. A pulsatile cardiovascular comuter model for teaching heart-blood vessel interaction. *The Phisiology Teacher*, 25, 155-162, 1982.
70. A. Caro, T. J. Pedley; R. C. Schroter, W. A. Seed. *The Mechanics of the Circulation*. Oxford University Press. 1978.
71. N. Casson. A Flow Equation for Pigment-Oil suspensions of the Printing Ink type. *Rheology of Disperse Systems*, C. C. Mill ed. Pergamon Press, 1959.

72. S. Chien, S. Usami, H. Taylor, J. S. Liniberg, M. Gregerson. Effect of hematocrit and plasma proteins on human blood rheology at low shear rates, *J. Appl. Physiol.*, V. 21, 81, 1966.
73. G. R. Cokelet, E. W. Merrill, E. R. Gilliland, H. Shin, R. E. Wells. *Trans. Soc. Rheol.*, 7, 303-317, 1963.
74. G. R. Cokelet. *Biomechanics: Its Foundation and Objectives*, Y. C. Fung, N. Perrone, M. Anliker (ed.), Prentice-Hall, 63-103, 1972.
75. M. M. Cross. Rheology of Non Newtonian Fluids: A New Flow Equation for Pseudoplastic Systems. *Journal of Colloid Science*, 20, 417-437, 1965.
76. R. S. Cotran; V. Kumar; S. L. Robbins. *Robbins Pathologic Basis of Disease*, W. B. Saunders Company, 4th Edition, 1989.
77. P. Davies; A. Remuzzi; E. Gordon; C. Devey; M. Gimbrone. Turbulent fluid shear stress induces vascular endothelial cell turnover in vitro. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2114-2117, 83, 1986.
78. B.A. Deswysen. Parameter Estimation of a Simple Model of the Left Ventricle and of the Systemic Vascular Bed, with Particular Attention to the Physical Meaning of Left Ventricular Parameters. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol 24, 1, 1977.
79. L. Euler. Principia pro motu sanguinis per arterias determinato. *Opera Postuma Mathematica et Physica*, vol. 2, ediderunt P. H. Fuss et N. Fuss, Petropoli, 1862. Publicado novamente pela Nendelen Liechtenstein Kraus, 814-823, 1969.
80. R. Fahraeus, T. Lindqvist. *Am. J. Physiol.*, 96, 562-568, 1931.
81. L. Formaggia e F. Nobile. A stability analysis for the Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation with finite elements. *East-West Journal Num. Math.*, 7, 105-132, 1999.
82. L. Formaggia; F. Nobile; A. Quarteroni e A. Veneziani. Multiscale modelling of the circulatory system: a preliminary analysis. *Comp. Vis. Science*, 2, 75-83, 1999.
83. L. Formaggia; F. Nobile; A. Quarteroni; A. Veneziani e P. Zunino. Advances on numerical modeling of blood flow problems. *ECCOMAS 2000 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, Espanha, 11-14 de Setembro, 2000.
84. O. Frank. Die Grundform des arteriellen pulses. *Zeitschrift für Biologie*, 37, 483-529, 1899.
85. Y. C. Fung. *Biomechanics. Mechanical Properties of Living Tissues*. Springer-Verlag, N.Y., 1981.
86. Y. C. Fung. *Biodynamics Circulation*. Springer Verlag, 1984.
87. Y. C. Fung. *Biomechanics, Motion, Flow, Stress and Growth*. Springer Verlag, 1990.
88. Galileo Galilei. Discorsi e Dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove Scienze, Attenenti alla Mecanica i Movimenti Locali. Elzevir. Traducido ao ingles por H. Crew e A. de Salvio com o titulo *Dialogues Concerning Two New Sciences*. MacMillan, London, 1914. Reeditado por Dover Publications, N.Y., 1960.
89. R. H. Gallagher, B. R. Simon, P. C. Johnson, J. F. Gross (eds). *Finite Element in Biomechanics*. John Wiley, 1982.
90. H. A. González Rojas. Aportación al estudio del flujo arterial coronariano mediante técnicas de simulación numérica. Tese de doutorado, Programa de Doctorado, Ingeniería Biomédica, Univ. Politécnica de Cataluña, 1998.

91. A. Gourlay, K. C. Lun, G. Liya. Virtual reality and telemedicine for home health care. *Computers and Graphics*, 24, 5, 695-699, 2000.
92. H. Gray. *Anatomia*, Editora Guanabara, 1988.
93. M. E. Gurtin. *An Introduction to Continuum Mechanics*. Mathematics in Science and Engineering, Academic Press, New York, 1981.
94. C. Guyton. *Tratado de Fisiologia Médica*, Guanabara - Koogan, Oitava edição, 1992.
95. S. Hales. *Statistical Essays. II. Haemostatiks.*(1733). Innays and Manby, London, Reprinted by Hafner, New York.
96. R. F. Haynes, A. C. Burton. Role of the non-Newtonian Behaviour of blood in hemodynamics. *Am. J. Physiol.*, 197, 943, 1959.
97. X. He; D. N. Ku. Pulsatile flow in the human left coronary artery bifurcation: Average conditions. *J. Biomech. Eng.*, 74-82, 118, 1996.
98. A. Hildebrand, M. H. Kim, G. Sakas. Special Issue Advanced and Dynamic Medical Visualization. *Computers and Graphics*, 24, 5, 657-659, 2000.
99. J. R. Hughes, J. Lubliner. On the One-dimensional theory of blood flow in the large vessels. *Mathematical Biosciences*, 18, 161-170, 1973.
100. L. R. John, W. L. Capper. An inverse transmission line model of the lower limb arterial. *Computer Simulations in Biomedicine, Computational Mechanics Publications, Proceedings of the BIOMED 95*, 1995.
101. M. Karlsson. Modelling and simulation of the human arterial tree -a combined lumped- parameter and transmission line element approach. *Computer simulations in biomedicine*, pp. 11-18, Editores: H. Power e R. T. Hart, Computational Mechanics Publications, Boston, 1995.
102. M. Kjaernes; A. D. Svindland; L. Walloe, S. O. Wille. Localization of Early Atherosclerotic Lesions in an Arterial Bifurcation in Humans. *Acta. Path. Scand. Sect. A.*, 35-40, 89, 1981.
103. A. J. Korteweg. Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Rohren. *Ann. der Physik. u. Chemie*, 5(3), 525-542, 1878.
104. S. Kuhnappel, H. K. Cakmak, H. Maasz. Endoscopy surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation. *Computers and Graphics*, 24, 5, 671-682, 2000.
105. J. M. Lambert. *Fluid Flow in Nonrigid Tube*, Ph. D. Tesis, Purdue University, Lafayette, 1965.
106. M. Levesque; D. Liepsch; S. Moravec; R. Nerem. Correlation of endothelial cell shape and wall shear stress in a stenosed dog aorta. *Arteriosclerosis*, 220-229, 6, 1986.
107. M. Levesque; E. Sprague; R. Nerem. Vascular endothelial cell proliferation in culture and the influence of flow. *Biomaterials*, 702-707, 11, 1990.
108. J. K. Li. *Arterial System Dynamics*, New York University Press, New York, 1987.
109. A. Mayo e C. S. Peskin. An implicit numerical method for fluid dynamics problems with the immersed elastic boundaries. *Contemporary Mathematics*, 141, 261-277, 1993.
110. A. Mc Donald. *Blood Flow in Arteries*. Williams and Wilkins, 1960 (2da. edição 1974).

- 111.D. M. McQueen e C. S. Pesquin. A three-dimensional method for blood flow in the heart: (II) Contractile Fibers. *J. Comp. Phys.*, 82, 2, 289-297, 1989.
- 112.W. Merrill, E. R. Gilliland, G. R. Cokelet, H. Shin, A. Britten, R. E. Wells. *Biophysics J.*, 3, 199-213, 1963.
- 113.W. Merrill, W. G. Margetts, G. R. Cokelet, A. Britten, E. Salzman, R. Pennell, M. Melin. Influence of Plasma Proteins on the Rheology of Human Blood. *Proceedings of the Forth Int. Congr. On Rheology*, A. L. Copley ed., Wiley-Interscience, NY, 601-611, 1965.
- 114.J. T. Merz. *A History of European Thought in the Nineteenth Century*. Dover Publications, N.Y., 1965.
- 115.S. Middleman. *Transport Phenomena in the Cardiovascular System*. Wiley, 1972.
- 116.T. B. Moody, D.W. Barclay, R. J. Tait. A Boundary Value Problem for Fluid-Filled Viscoelastic Tubes. *Mathematical Modelling*, 4, 195-207, 1983.
- 117.T. B. Moody, D. W. Barclay, S. E. Greenwald. *Impulse Propagation in Liquid Filled Distensible Tubes: Theory and Experiment for Intermediate to Long Wavelengths*. *Acta Mechanica*, 59, 47-58, 1986.
- 118.I. Moens. *Die Pulskwive*. Brill, Leiden, Netherlands, 1878.
- 119.M. S. Olufsen. Structured tree outflow condition for blood flow in larger systemic arteries. *Am. J. Physiol.* 276 (*Heart Circ. Physiol* 45), H257–H268, 1999.
- 120.M. F. O'Rourke. *Arterial Function in Health and Disease*. Churchill Livingstone, New York, 1982.
- 121.J. Park, S. Park. Strain analysis and visualization: left ventricle of heart. *Computers and Graphics*, 24, 5, 701-714, 2000.
- 122.K. H. Parker, C. J. H. Jones. Forward and Backward Running Waves in Arteries: Analysis Using the Method of Characteristics. *J. Biomechanics Engineering*, Vol 112, 322-326, 1990.
- 123.T. J. Pedley. *The Fluid Mechanics of Large Blood Vessels*. Cambridge University Press, 1980.
- 124.K. Perktold, M. Resch, R. O. Peter. Three-dimensional numerical analysis of pulsatile flow and wall sheare stress in the carotid artery bifurcation. *J. Biomech.* 24(6), 409-420, 1991.
- 125.K. Perktold, R. O. Peter, M. Resch, G. Langs. Pulsatile non-Newtonian flow in three-dimensional carotid bifurcation models: a numerical study of flow phenomena under different bifurcation angles. *J. Biomedical Engrg.*, 13, 507-515, 1991.
- 126.S. Pesquin e D. M McQueen. A three-dimensional computational method for blood flow in the heart: (I) Immersed elastic fibers in a viscous incompressible fluid. *J. Comp. Phys.*, 81, 372-405, 1989.
- 127.S. Pesquin e D. M McQueen. Fluid dynamics of the heart and its valves. Chapter 14. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. Editores: H. G. Othmer, F. R. Adler, M. A. Lewis e J. C. Dallon, 1996.
- 128.A. Porenta, D. F. Young, T. R. Rogge. A finite element model of flow in arteries including taper, branches, and obstructions. *J. Biomech. Engng.* 108, 161-167, 1986.
- 129.A. Quarteroni; M. Tuveri; A. Veneziani. Computational Vascular Fluid Dynamics: Problems, Models and Methods. *Comp.Vis. Science*, 163-197, 2, 2000.

- 130.A.Quarteroni, A. Veneziani, P. Zunino. Domain decomposition techniques in the study of transport and absorption phenomena of blood solutes. *ECCOMAS 2000*, Barcelona, Espanha, Setembro, 2000.
- 131.A. Quarteroni, A. Veneziani, P. Zunino. Modelling of solute dynamics in the vascular system. *Internal Report EPFL-DMA - Analysis and Numerical Analysis*, 12.99.
- 132.D. Quemada. Rheology of Concentrated Disperse Systems and Minimum Energy Dissipation Principle. I: Viscosity-Concentration Relation. *Rheol. Acta*, 16, 82-94, 1977.
- 133.D. Quemada. Rheology of Concentrated Disperse Systems and Minimum Energy Dissipation Principle. II: A Model for Shear Viscosity in Steady flows. *Rheol. Acta*, 17, 632-642, 1978.
- 134.D. Quemada. A Rheological Model for Studying the Hematocrit Dependence of Red Cell-Red Cell and Red Cell-Protein Interactions in Blood. *Biorheology*, 18, 501-506, 1981.
- 135.W. Sisko. The Flow of Lubricating Greases. *Ind. Eng. Chem.*, 50, 1789-1792, 1958.
- 136.J.K. Raines, M.F. Jaffrin, A. H. Shapiro. A Computer Simulation of Arterial Dynamics in the Human Leg. *J.Biomechanics Engineering*, Vol 7, 77-91, 1974.
- 137.A. Rappitsch e K. Perktold. Pulsatile albumin transport in large arteries: a numerical simulation study. *Journal of Biomechanical Engineering*, 118, 511-519, 1996.
- 138.J. R. T. C. Roelandt. Three-dimensional echocardiography: the future today. *Computers and Graphics*, 24, 5, 715-729, 2000.
- 139.F. Rooz, D.F. Young, T. R. Rogge. A finite-element simulation of pulsatile flow in flexible obstructed tubes. *J. Biomech. Engng.*, 104, 119-124, 1982.
- 140.R. Ross; J. A. Glomset. The patogenesis of atherosclerosis. *N. Eng. J. Med.*, 295-369, 420, 1976.
- 141.R. Ross. The patogenesis of atherosclerosis: An update. *N. Eng. J. Med.*, 314, 488, 1986.
- 142.R. Rushmer. *Cardiovascular Dynamics*. Saunders, 1970.
- 143.R. P. Sawatzky, T. B. Moodie. Aspects of wave propagation in haemodynamics: A Survey. *Utilitas Mathematica*, 33, 65-121, 1988.
- 144.C. J. Singer. *A Short History of Scientific Ideas to 1900*. Oxford Univ. Press, N.Y., 1959.
- 145.G. W. Schmid-Schoenbein , Y. C. Fung , B. Zweifach. Vascular endothelium-leucocyte interaction: Sticking shear force in venules. *Circulation Res.*, 36, 173-184, 1975
- 146.G. W. Schmid-Schoenbein, R. Skalak, S. Usami, S. Chien. Cell distribution in capillary networks. *Microvascular Res.*, 19, 18-44, 1980.
- 147.G.W. Schmid-Schoenbein, S. Usami, R. Skalak, S. Chien. The interaction of leucocyte and erythrocytes in capillary and postcapillary vessels. *Microvascular Res.*, 19, 45-70, 1980
- 148.M. F. Snyder, V. C. Rideout, R.J. Hillestad. Computer Modeling of the Human Systemic Arterial Tree. *J. Biomechanics Engineering*, Vol 1, 341-353, 1968.
- 149.C. Sprague; B. Steinbach; R. Nerem; C. Schwatz. Influence of laminar steady-state fluid imposed wall shear stress on the binding, internalization and degradation of low-density lipoproteins by cultured arterial endothelium. *Circulation*, 648-656, 76, 1987.

- 150.A. Steinman, C. Ross Ethier, X. Zhang, S. R. Karpik. The effect of flow waveform on anastomotic wall shear stress patterns. *ASME Adv. Bioengrg*, 173-176, 1995.
- 151.N. Stergiopulos; D. F. Young e T. R. Rogge. Computer smulation of arterial flow with applications to arterial and aortic stenoses. *J. Biomechanics*, 25, 12, 1477-1488, 1992.
- 152.T. K. Sud, R. S. Srinivasan, J. B. Charles, M. W. Bungo. Mathematical modelling of flow distribution in the human cardiovascular system. *Med \& Biol. Eng. \& Comput.*, 30, 311-316, 1992.
- 153.A. Taylor. A computational framework for investigating hemodynamic factors in vascular adaptation and disease. PhD thesis, Stanford University, 1996.
- 154.A. Taylor, T. J. R. Hughes, C. K. Zarins. Finite element modeling of blood flow in arteries. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 158, 155-196, 1998.
- 155.A. Taylor, T. J. R. Hughes, C. K. Zarins. Finite element modeling of three-dimensional pulsatile flow in abdominal aorta: relevance to atherosclerosis. *Annales of Biomedical Engineering*, 975-987, 26, 1998.
- 156.A. Taylor, G. Engel, T. J. R. Hughes. Finite element simulation of pulsatile flow through distensible blood vessels. *4th. World Congress on Computational Mechanics*, Buenos Aires, 1998.
- 157.F. Todhunter, K. Pearson. *A history of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials from Galilei to Lord Kelvin*. Dover Publications, N.Y., 1960.
- 158.S. Urquiza. A fully nonlinear characteristic-finite element model for pulse wave propagation in the human arterial system. *Computer Simulations in Biomedicine*, Computational Mechanics Publications, Boston, 1995.
- 159.T. Wan, B. Steele, S. A. Spicer, S. Strohsband, G. R. Feijóo, T. J.R. Hughes, C. A. Taylor. A one-dimensional finite element method for simulation-based medical planning for cardiovascular disease. A ser publicado no *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2001.
- 160.T. Wang e J. F. Stoltz. Characterization of Pathological Bloods with a New Rheological Relationship. *Clinical Hemorheology*, 14, 237-244, 1994.
- 161.N. Westerhof , F. Bosman, C. J. De vries, A. Noordergraaf. Analog studies of the human systemic arterial tree. *J. biomechanics*, 2, 121-143, 1969,
- 162.N. Westerhof, A. Noordergraf. Arterial viscoelasticity: a generalised model. *J. Biomech.*, 3, 337, 1970.
- 163.R. L. Whitmore, *Rheology of the Circulation*, Pergamon Press, NY., 1968.
- 164.R. L. Whitmore. *Proceedings of the I-National Conference on Rheology*, pp. 43-45, Melbourne, 1979.
- 165.J. R. Womersley. Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube - I: The linear approximation for long waves. *Phil. Mag.*, 46, 199-221, 1955.
- 166.J. R. Womersley. Method for the calculation of velocity, rate of flow, and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known. *J. Physiol.*, 127, 553-563, 1955.
- 167.J. R. Womersley. Oscillatory flows in arteries: the constrained elastic tube as a model of arterial flow and pulse transmissions. *Phys. Med. Biol.*, 2, 178-187, 1957.
- 168.J. R. Womersley. Oscillatory flows in arteries. II: The reflection of the pulse wave at junctions and rigid inserts in the arterial system. *Phys. Med. Biol.*, 2, 313-323, 1957.
- 169.A. Yamada. *Strength of Biological Materials*. Williams and Wilkins, 1970.

- 170.T. Yamaguchi. Computational mechanics simulation for clinical cardiovascular medicine. ECCOMAS 2000, 11-14 de Setembro, Barcelona, Espanha, 2000.
- 171.T. Young. Hydraulic investigations subservient to an intended Croonian lecture on the motion of the blood. Phil. Trans. Roy. Soc. 98, 164-186, 1808.
- 172.T. Young. On the functions of the heart and arteries. Phil. Trans. Roy. Soc. , 1-31, 1809.
- 173.H. Zeng, J. J. Bauer, S. K. Mun. Modeling and mapping of prostate cancer. Computers and Graphics, 24, 5, 683-694, 2000.

11.2 Referências Bibliográficas em Visualização e Processamento (segmentação) de Dados em Hemodinâmica Computacional

- 174.[Adams-Bischof (1994)] A. Adams and L. Bischof, “Seeded Region Growing”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intel., Vol. 16, No. 6, June 1994.
- 175.[Banks-Singer (1995)] D.C. Banks, B.A. Singer, “A Predictor-Corrector Technique for Visualizing Unsteady Flow”, IEEE Trans. on Visualization and Comp. Graphics, Vol. 1, No. 2, June(1995).
- 176.[Battlke et al.(1996)] H. Battlke, D. Stalling, H. Hege, “Fast Line Integral Convolution for Arbitrary Surfaces in 3D”. Tech. Report (SC-96-59.ps) of Konrad-Zuze-Zentrum für Informationstechnik Berlin, December 1996.
- 177.[Behr et. al. (2000)] "Modelling, visualization and interaction techniques for diagnosis and treatment planning in cardiology, Computers and Graphics, 24, 5, 741-753, 2000.
- 178.[Cabral-Leedom(1993)] B. Cabral, L. Leedom, “Imaging Vector Fields using Line Integral Convolution”, Proceedings SIGGRAPH '93, Anaheim, California, August(1993), 263--272.
- 179.[Cameron et al. (1995)] “Modular Visualization Environments: Past, Present, and Future”, Computer Graphics, May 1995(Special Issue).
- 180.[Carneiro et al. (1996)] B. P. Carneiro, C. T. Silva and A. E. Kaufman, “Tetra-Cubes: An algorithm to generate 3D isosurfaces based upon tetrahedra”, International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision (SIBGRAPI'96), 1996.
- 181.[Cebral-Löhner (1999)] J. Cebral and R. Löhner, “From Medical Images to CFD Meshes”, Proc. 8th Int. Meshing Roundtable, South Lake Tahoe, October (1999).
- 182.[Chapra-Canale(1988)] C. Chapra and R.P. Canale. “Numerical Methods for Engineers.” MacGraw-Hill International Editions, 1988.
- 183.[Chiang et al. (1998)] Y.-J. Chiang, C. Silva, and W. J. Schroeder. Interactive out-of-core isosurface extraction. In IEEE Visualization, pages 67–174, 1998.
- 184.[Cohen (1991)] Cohen, L.D., “On Active Contour Models and Balloons”, CVGIP, Vol. 53, No. 2, March 1991, pp. 211-218.
- 185.[Dari et al. (2000)] E. A. Dari, M. I. Cantero and R. A. Feijóo, “Computational arterial flow modeling using a parallel Navier-Stokes solver”. Trabalho convidado no European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (CCOMAS 2000), Barcelona, Espanha, 11-14 de Setembro, 2000. Tech. Report 09/2000. Web Site: <http://www.lncc.br/proj-pesq/rpesq.html>
- 186.[Desbrun-Gascuel (1998)] M. Desbrun and M. Cani-Gascuel. Active implicit surface for animation. In Graphics Interface, 1998.

- 187.[Ducan-Ayache (2000)] S. Ducan and N. Ayache, “Medical Image Analysis: Progress over Two Decades and the Challenges Ahead”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 22, No. 1 , pp. 85-106, January 2000.
- 188.[Farias (2001)] Yi-Jen Chiang, R. Farias, C. Silva, and Bin Wei, “A Unified Infrastructure for Parallel Out-Of-Core Isosurface and Volume Rendering of Unstructured Grids”, submetido ao PVG01 - IEEE 2001 Symposium on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics, Outubro 22-23, 2001.
- 189.[Feijóo at al (1999)] R.A. Feijóo, M.J. Vénere, E.A. Dari and L. Bevilacqua, “El Centro de Modelos Complejos y sus Actividades en el Area de la Hemodinámica del Sistema Cardiovascular Humano y su Simulación Computacional”, Tech. Report 27/99. Web Sites: <http://www.lncc.br/proj-pesq/relpesq-99.html>, <http://146.134.8.133/cmc/Projeto/index.html>.
- 190.[Forsberg at al. (2000)] A. Forsberg, M. Kirby, D. Laidlaw, G. Karniadakis, A. van Dam and J. Elion, Brown University, “Immersive Virtual Reality for Visualizing Flow Through an Artery”, Proc. IEEE Visualization 2000, Salt Lake City, Utah, USA.
- 191.[Forssel-Cohen(1995)] L. Forssell, S. D. Cohen, “Using Line Integral Convolution for Flow Visualization: Curvilinear Grids, Variable-Speed Animation, and Unsteady Flows”, IEEE Trans. on Visualization and Comp. Graphics Numerical 1, NO.2, June(1995).
- 192.[Foster-Metaxas (1997)] Nick Foster and Dimitris Metaxas, “Modeling the Motion of a Hot, Turbulent Gas”. In Computer Graphics, pages 181–188, ACM SIGGRAPH, 1997.
- 193.[Giraldi-Jauvane (2003)] G. Giraldi and J. Oliveira and B. Schulze and R. Silva, “Distributed Visualization of Fluids using Grid”, Proc. Of the International Middleware Conference (MGC), Rio de Janeiro, June, 2003.
- 194.[Giraldi-Oliveira (2003)] G. Giraldi and A.A.F. Oliveira, “Invariant Snakes and Initialization of Deformable Models”, Accepted to the Special Issue on Deformable Models, of the International Journal of Image and Graphics (IJIG), 2003.
- 195.[Giraldi at al. (2003)] E. Strauss, W. Jiménez, G. Giraldi, R. Silva, A. Oliveira, “T-Surfaces Framework for Offsets Generation and Semi-Automatic Surface Reconstruction”, Pre-Accepted to the Computer Vision and Image Understanding (CVIU) Journal, 2003.
- 196.[Giraldi(6) at al. (2002)] E. Strauss, W. Jiménez, G. Giraldi, R. Silva, A. Oliveira. “A Semi-Automatic Surface Reconstruction Framework Based on T-Surface and Isosurface Extraction Methods”. In: International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision (SIBGRAPI'2002).
- 197.[Giraldi(7) at al. (2002)] G. A. Giraldi, E. Strauss, A. A. F. Oliveira, “Dual-T-Snakes Model for Medical Imaging Segmentation”. Pattern Recognition Letters, Vol. 24, No. 7, 2003.
- 198.[Giraldi(8) at al. (2002)] E. Strauss, W. Jiménez, G. Giraldi, R. Silva and A. Oliveira, “A Surface Extraction Approach Based on Multi-Resolution Methods and T-Surfaces Framework”, International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'2002), Monte Carlo Resort, Las Vegas, Nevada, USA, June 24-27, 2002. Este trabalho foi selecionado para ser um capítulo do livro: Advances in Geometric Modeling, John Wiley, Editor: M. Sarfraz, to appear in April 2003.

- 199.[Giraldi et al. (2001)] G. Giraldi, E. Strauss, A. Apolinario, A. F. Oliveira, “An Initialization Method for Deformable Models”, 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2001), 2001.
- 200.[Giraldi(2) et al.(2001)] G. Giraldi, W. Herrera, N. Vasconcelos, E. Strauss, A. F. Oliveira, “Dual and Topologically Adaptable Snakes and Initialization of Deformable Models”, International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'2001), Monte Carlo Resort, Las Vegas, Nevada, USA, June 25-28, 2001.
- 201.[Giraldi(3) et al. (2001)] G. Giraldi, E. Strauss, A. F. Oliveira, “Improving the Original Dual-T-Snakes Model”, XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI'2001), 2001.
- 202.[Giraldi(4) et al. (2001)] G. A. Giraldi, R. A. Feijóo, R. Farias. “Parallel Volume Rendering”: New Methodologies and Applications”, RITA (Revista de Informática Teórica e Aplicada), Instituto de Informática da UFRGS, Edição Especial (Computação Gráfica e Processamento de Imagens), Vol. 8, No. 2, Outubro, 2001.
- 203.[Giraldi(5) et al. (2001)] Gilson A. Giraldi, N. Vasconcelos, Edilberto Strauss, Antonio A.F. Oliveira ”Dual and Topologically Adaptable Snakes and Initialization of Deformable Models”. Tech. Report 25/2001. Web Site: <http://www.lncc.br/proj-pesq/relpesq-01.html>.
- 204.[Giraldi et al. (2000)] G. A. Giraldi, E. Strauss, and A. A. F. Oliveira, “A Boundary Extraction Method Based on Dual-T-Snakes and Dynamic Programming”, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2000), Hilton Head Island, South Carolina, U.S.A, June 13-15, (2000).
- 205.[Giraldi-Oliveira (2000)] G. A. Giraldi and E. Strauss and A. F. Oliveira, “An Initialization Method for Active Contour Models”, Proceedings of the 2000 International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'2000), 2000.
- 206.[Giraldi (2000)] G.A. Giraldi, “T-Snakes Duais e Inicialização de Modelos Deformáveis”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro, 2000.
- 207.[Giraldi-Strauss (2000)] G. A. Giraldi, E. Strauss and A. F. Oliveira, “A Boundary Extraction Approach Based on Multi-resolution Methods and the T-Snakes Framework”, International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision (SIBGRAPI'2000), 2000.
- 208.[Golub-Loan(1985)] G. H. Golub and C. F. Van Loan, Matrix Computations, The Joans Hopokins University Press, 1985.
- 209.[Gunn (1997)] S. R. Gunn and M. S. Nixon, “A Robust Snake Implementation; A Dual Active Contour”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 19. No. 1, pp. 63-68, January 1997.
- 210.[Hamann et al.(1995)] B. Hamann, D. Wu and R. J. Moorhead II, “On Particle Path Generation Based on Quadrilinear Interpolation and Bernstein-Bézier Polynomials”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1 (3), September 1995.
- 211.[Giraldi-Oliveira (1999)] G. A. Giraldi and A. F. Oliveira, “Convexity Analysis of Snake Models Based on Hamiltonian Formulation”. Relatório Técnico: <http://www.cos.ufrj.br/relatorios/reltec99/>, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dep. Eng. Sistemas e Computação, 1999.

- 212.[Helman-Hesselink(1991)] James L. Helman and Lambertus Hesselink, "Visualizing Vector Field Topology in Fluid Flows", IEEE Computer Graphics & Applications, May 1990.
- 213.[Herlin at al. (1995)] I. Herlin, I. Cohen, and S. Bouzidi, "Detection and Tracking of Vortices on Oceanographic Images", SCIA95.
- 214.[Hesselink at al. (1997)] L. Hesselink, Y. Levy and Y. Lavin, "The Topology of Symmetric, Second-Order 3D Tensor Fields", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3 (1), January-March 1997.
- 215.[Hesselink at al. (1997)] L. Hesselink, Y. Levy and Y. Lavin, "The Topology of Symmetric, Second-Order 3D Tensor Fields", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3 (1), January-March 1997.
- 216.[Hirsch(1988)] C. Hirsch, "Numerical Computation of Internal and External Flows: Fundamentals of Numerical Discretization", Vol. 1, John Wiley & Sons, 1988.
- 217.[Interrante-Grosch(1997)] V. Interrante and C. Grosch, "Strategies for Effectively Visualizing a 3D Flow Using Volume Line Integral Convolution", Proceedings of Visualization 97. Também disponível em Tech. Report no Web Site: <http://www.icas.edu/~interran/3Dflow.html>.
- 218.[Jain (1989)] A.K. Jain. Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice Hall Information and Sciences Series, 1989.
- 219.[Kass at al. (1988)] M. Kass and A. Witkin and D. Terzopoulos, "Snakes: Active Contour Models", International Journal of Computer Vision, International Journal of Computer Vision, Vol. 1, No. 4, pp. 321-331, 1988.
- 220.[Klemp (1978)] J.B. Klemp and R.B. Wilhelmson, "The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics", J. Atmos. Sci., Vol. 35, p. 1070 – 1096, 1978.
- 221.[Krueger(1991)] W. Krueger, "The application of transport theory to visualization of 3-D scalar data fields", Computers in Physics, 5 (4), July/August 1991.
- 222.[Kuhnappel, et. al. (2000)] "Endoscopy surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation", Computers and Graphics, 24, 5, 671-682, 2000
- 223.[Lorensen-Cline (1987)] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface construction Algorithm", Computer Graphics, Vol 21, No. 4, July 1987.
- 224.[Max (1995)] N. Max, "Optical Models for Direct Volume Rendering", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1 (2), 99-108, June 1995.
- 225.[Malladi at al. (1995)] R. Malladi, J. A. Sethian and B. C. Vemuri, "Shape Modeling with Front Propagation: A Level Set Approach", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 17, No. 2, pp. 158-175, 1995.
226. [McInerney-Terzopoulos (1999)] T. McInerney and D. Terzopoulos, "Topology Adaptive Deformable Surfaces for Medical Image Volume Segmentation", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol. 18, No. 10, pp. 840-850, October 1999.
- 227.[Metaxas (1996)] D. Metaxas. Physics-Based Deformable Models: Applications to Computer Vision, Graphics and Medical Imaging. Kluwer, Boston, MA, 1996.
- 228.[Noordmans at al. (2000)] H. J. Noordmans, H. T. M. Van der Voort, and A. W. M. Smeulders. "Spectral Volume Rendering", IEEE Trans. on Vis. and Comp. Graphics. Vol. 6, No. 3, July-September (2000).

- 229.[Oliveira et al. (2002)] In Book “Virtual Reality Technologies for Future Telecommunications Systems”, Chapter 7. Edited by A. Pakstas and R. Komiya, John Wiley & Sons, LTD (2002).
- 230.[Osher-Sethian (1988)] S. Osher and J. A. Sethian, Fronts Propagation with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, Journal of Computational Physics, Vol. 79, pp. 12-49, 1988.
- 231.[Premoze et al. (2003)] S. Premoze, T. Tasdizen, J. Bigler, A. Lefohn and R. Whitaker, “Particle-Based Simulation of Fluids”, EUROGRAPHICS, Volume 22, Number 3, 2003.
- 232.[Rosenblum et al.(1994)] Scientific Visualization: Advances and Challenges, edited by L. Rosenblum et al., Academic Press(1994).
- 233.[Samtaney et al.(1994)] R. Samtaney, D. Silver, N. Zabusky, J. Cao, “Visualizing Features and Tracking their Evolution”, IEEE Computer 27, NO. 7, pp. 20-27, July 1994.
- 234.[Sapiro(1997)] Guillermo Sapiro, “Color Snakes”, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 68 (2), November 1997.
- 235.[Schroeder et al. (1998)] W. Schroeder, K. Martin and B. Lorensen, The Visualization Toolkit, 2nd Edition, Prentice Hall.
- 236.[Sethian (1996)] J. A. Sethian, “Level Set Methods: Evolving Interfaces in Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision and Materials Sciences”, Cambridge University Press, 1996.
- 237.[Shen et al.(1996)] Han-Wei Shen, C. R. Johnson and Kwan-Liu Ma, “Visualizing Vector Fields Using Line Integral Convolution and Dye Advection”, ICASE Tech. Report: <http://www.icas.edu/>.
- 238.[Stam (1999)] Jos Stam, “Stable Fluids”, In SIGGRAPH 99 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pp. 121-128, August 1999.
- 239.[Stora et al. (1999)] Dan Stora, Pierre-Olivier Agliati, Marie-Paule Cani, F. Neyret and Jean-Dominique Gascuel, “Animating Lava Flows”, Graphics Interface (GI'99) Proceedings, pp. 203-210, June, 1999.
- 240.[Thalmann-Thalmann (1991)] New Trends in Animation and Visualization, John Wiley & Sons, 1991.
- 241.[Ueng, et al. (1997)] Shyh-Kuang Ueng, K. Sikorski and Kwan Liu Ma, “Out-Of-Core Streamline Visualization on Large Unstructured Meshes”, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Vol. 3, No. 4, December 1997. ICASE Tech. Report No. 97-22, April 1997(http://www.icas.edu/~kma/kma_pubs.html).
- 242.[van Wijk (2002)] Jarke J. van Wijk, “Image based flow visualization”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 21, No. 3, pp. 745—754, 2002.
- 243.[Visible Human (1996)] [Visible Human (1996)] “The Second Visible Human Project Conference Proceedings”, October 1 & 2, 1998. Web Site: http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.
- 244.[Witting (1999)] Patrick Witting, “Computational Fluid Dynamics in a Traditional Animation Environment”, Siggraph, 1999.
- 245.[Xu-Prince (1998)] C. Xu and J. Prince, ”Snakes, Shapes, and Gradient Vector Flow” . IEEE Trans. on Image Processing, 359-369, March, 1998.
- 246.[Zeng et. al. (2000)] "Modeling and mapping of prostate cancer", Computers and Graphics, 24, 5, 683-694, 2000

- 247.[Zhu-Yuille (1996)] S. C. Zhu and A. Yuille, "Region Competition: Unifying Snakes, Region Growing, and Bayes/MDL for Multibang Image Segmentation", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 18, No. 9, pp. 804-900, September 1996.

Petrópolis, R.J., Setembro, 2004.
Prof. Raúl A. Feijóo
LNCC/MCT