ROTEIRO DESCRITIVO DO PROJETO

Chamada de Projetos nº 03 / 2006 Protocolo (FUP) nº 9174

1. Identificação do Projeto

Chamada de Projetos nº 03 / 2006 Protocolo (FUP) nº 9174

Título do projeto: Otimização do método multigrid para problemas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD-7)

Àrea do Conhecimento: Engenharias

Instituição Proponente (Co-responsável): Universidade Federal do Paraná

Coordenador (Proponente): Carlos Henrique Marchi

Identificação e vínculo institucional do Coordenador

Professor efetivo adjunto da Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Matrícula na UFPR: 126381

Lotação: Departamento de Engenharia Mecânica

2. Equipe executora (inclusive o Coordenador):

Nome	Titulação	Especialização
Carlos Henrique Marchi	doutor	Métodos numéricos
Márcio Augusto Villela Pinto	mestre	Análise numérica
Cosmo Damião Santiago	mestre	Análise numérica
Fabiane de Oliveira	mestre	Programação matemática
Fábio Alencar Schneider	mestre	Métodos numéricos
Roberta Suero	mestre	Mecânica computacional
Luciano Kiyoshi Araki	eng.mec.	Mecânica computacional

3. Resumo (até 1 página)

O método multigrid é um dos métodos iterativos mais eficientes e gerais conhecidos hoje. Teoricamente, o tempo computacional necessário para resolver um problema de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), mesmo usando o método multigrid, pode ser reduzido de 10 a 100 vezes do atual. O objetivo principal deste projeto é desenvolver algoritmos com o método multigrid que permitam reduzir, em relação ao estado-da-arte atual, o tempo computacional necessário para obter a solução numérica de problemas de transferência de calor e mecânica dos fluidos. O projeto está dividido em oito etapas, que serão executadas em dois anos. Tipos de malha a usar: totalmente uniforme, uniforme por direção, não-uniforme e não-estruturada. Alguns parâmetros a investigar: número de incógnitas; número de iterações internas; número de malhas; razão de engrossamento e de aspecto da malha; tipo de solver; esquemas CS e FAS; com e sem FULL-MG; tipos de restrição, prolongação e relaxação; tipo de condição inicial; tolerância e critério de convergência; métodos de diferenças finitas e volumes finitos; modelos matemáticos constituídos por uma, duas e três equações diferenciais, entre eles, equações de Laplace e de Navier-Stokes bidimensionais. Resultados esperados: melhorar o desempenho do método multigrid nos problemas abordados neste projeto; ter publicado ou submetido para publicação pelo menos oito artigos em congressos e revistas; e concluir três teses de doutorado.

4. Objetivos (até ½ página)

Os objetivos deste projeto são:

1) Desenvolver algoritmos com o método multigrid que permitam reduzir, em relação ao estado-da-arte atual, o tempo computacional necessário para obter a solução numérica de problemas de transferência de calor e mecânica dos fluidos.
2) Identificar causas da degeneração do desempenho do método multigrid em relação ao seu potencial teórico, contribuindo para atingir o objetivo 1.
3) Divulgar o método multigrid no Brasil e no exterior através de artigos, site do projeto, disciplinas de pós-graduação e apostila sobre o método.
4) Fornecer tema de tese para cinco doutorandos, sendo que três deles defenderão suas teses durante a execução do projeto.
5) Melhorar a infra-estrutura computacional dos dois grupos de pesquisa, registrados no CNPq, que integram este projeto, um da UFPR e outro da UEPG.

Para atingir os objetivos 1 a 4, pelo menos os seguintes problemas deverão ser abordados: equação de Poisson unidimensional (1D); equação de Laplace bidimensional (2D); equação de advecção-difusão 1D e 2D; equação de Burgers 1D; problema termoelástico linear 2D; escoamento turbulento 1D; e equações de Navier-Stokes 2D. Os seguintes tipos de malha devem ser usados: totalmente uniforme, uniforme por direção, não-uniforme e não-estruturada. Os efeitos causados pelos seguintes parâmetros devem ser investigados: número de incógnitas ou tamanho do sistema de equações; número de iterações internas; número de malhas; razão de engrossamento e de aspecto da malha; tipo de solver; esquemas CS e FAS; com e sem FULL-MG; tipos de restrição, prolongação e relaxação; tipo de condição inicial; tolerância e critério de convergência; métodos de diferenças finitas e volumes finitos; modelos matemáticos constituídos por uma, duas e três equações diferenciais.

5. Identificação e caracterização do problema Descrever (em até 2 ½ páginas) a importância do problema e as propostas de solução, com base em literatura pertinente.

5.1 Introdução

Os problemas de engenharia podem ser resolvidos por meio de três tipos de abordagem (Tannehill et al., 1997): experimental, analítica e numérica. As soluções numéricas podem ser obtidas através de diversos métodos numéricos (Ferziger e Peric, 2001), entre eles, diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos.

A obtenção de uma solução numérica com os métodos citados pode ser dividida nas seguintes etapas:

1) definição dos dados do problema: modelo matemático, domínio de cálculo, modelo numérico etc;
2) discretização do domínio de cálculo, isto é, divisão do domínio em nós, elementos ou volumes de controle nos quais a solução numérica será obtida; o conjunto destes entes é chamado de malha;
3) aproximação das equações do modelo matemático com algum método numérico, gerando um ou vários sistemas de equações algébricas;
4) solução dos sistemas de equações com um ou vários métodos diretos ou iterativos, dependendo do problema; neste projeto, um método de solução de sistemas será abreviado por solver;
5) cálculo de outras variáveis e visualização dos resultados em listagens, tabelas ou gráficos.

O foco deste projeto é a etapa 4, acima. Em problemas de mecânica ou de dinâmica dos fluidos de interesse prático, os modelos matemáticos são não-lineares e compostos por diversas equações diferenciais. Por exemplo, a solução do escoamento tridimensional turbulento sobre um foguete ou avião envolve sete equações diferenciais e uma algébrica, se o modelo de turbulência escolhido for o k-epsilon, e as malhas empregadas têm de 25 a 100 milhões de nós (Brandt et al., 2002). Geralmente, a solução destes problemas é obtida através de métodos iterativos ou solvers, como o Gauss-Seidel, ADI, SIP, MSI e outros (Kreyszig, 1999; Ferziger e Peric, 2001). A dificuldade principal destes solvers iterativos é que a taxa de convergência deles diminui à medida que aumenta o número de nós ou incógnitas do sistema de equações.

O tempo computacional (t) necessário para obter a solução numérica de um problema pode ser expressa por

$$t = aN^b \qquad (1)$$

onde a e b são fator e expoente dependentes de cada problema, e N é o número de nós da malha. Para os solvers citados acima, tem-se $b > 1$, sendo geralmente 2 ou até 3 para satisfazer um determinado critério de convergência; nas mesmas condições, um método direto, como a eliminação de Gauss, tem $b \approx 4$. Com o método multigrid ideal, a taxa de convergência e o número de iterações se mantêm constante quando se aumenta o número de incógnitas do sistema de equações (Wesseling e Oosterlee, 2001), resultando em $b = 1$. Ou seja, o multigrid é o algoritmo mais eficiente.

O método multigrid (Wesseling, 1992) consiste no uso de malhas auxiliares mais grossas ou com menor número de nós do que aquela que se quer empregar. São usados processos chamados de restrição e prolongação para transferir informações entre as diversas malhas. Pode ser usado qualquer solver, em princípio (Tannehill et al., 1997), no processo chamado de relaxação. A seqüência com que as diversas malhas são empregadas resulta no que se chama de um ciclo multigrid; existem diversos, denominados por V, W etc. Em cada tipo de ciclo, pode-se partir da malha mais grossa, esquema FMG (Full MultiGrid), ou da mais fina, esquema padrão. Além disso, existem os esquemas CS (Correction Scheme) e FAS (Full Aproximation Scheme) que são mais indicados, respectivamente, a problemas lineares e não-lineares. Finalmente, podem ser distinguidos os métodos multigrid geométrico e algébrico, respectivamente indicados para malhas estruturadas e não-estruturadas.

5.2 Definição do problema

Wesseling e Oosterlee (2001) fizeram uma revisão dos desenvolvimentos, nos últimos 10 anos, do método multigrid geométrico em dinâmica dos fluidos computacional (CFD), mostrando o estado-da-arte para escoamentos incompressíveis e compressíveis. Segundo eles, multigrid (MG) permanece um tópico ativo de pesquisa em CFD e é um dos mais significativos desenvolvimentos em análise numérica na segunda metade do século XX. Estes autores concluem seu trabalho informando que a eficiência teórica do MG (b=1 na eq. 1) ainda não é obtida para todos os problemas relevantes de CFD. Brandt (1998) indica as principais dificuldades: linhas de corrente não alinhadas com a malha, escoamentos recirculantes, pontos de estagnação, razões de aspecto da malha grandes, camadas limite, física e geometrias complexas.

Segundo Ferziger e Peric (2001), os melhores desempenhos do método multigrid são obtidos em problemas totalmente elípticos (dominados pela difusão); e os menores, em problemas dominados pela advecção (equações de Euler). Fatores de aceleração típicos estão na faixa de 10 a 100 quando cinco níveis de malha são usados. O fator de aceleração (S) mede quantas vezes o método multigrid é mais rápido na obtenção da solução de um problema do que sem ele.

Num problema puramente difusivo, equação de Laplace bidimensional, com malha uniforme de 128x128 elementos, S = 325 (Tannehill et al., 1997). Teoricamente, este valor de S deveria se manter o mesmo em qualquer problema com esta mesma malha. Porém, num problema de escoamento bidimensional, governado pelas equações de Navier-Stokes, com malha uniforme de 128x128 elementos, S = 42 e 15, respectivamente para número de Reynolds 100 e 1000 (Ferziger e Peric, 2001). Isso mostra a deterioração do desempenho do método multigrid em problemas não-lineares e também devido ao aumento do grau de não-linearidade, associado a um maior número de Reynolds.

Além das não-linearidades associadas a escoamentos de fluidos, um outro fator que deteriora o desempenho do método multigrid são as anisotropias, que podem ter dois tipos de causas (Larsson et al., 2005): (1) a física do problema, por exemplo em condução de calor, valores de condutividade térmica muito variáveis no domínio; e (2) a geometria do domínio ou da malha, muito comum em problemas de camada limite ou com malhas não-uniformes.

Em resumo, o problema deste projeto pode ser assim definido: como atingir a eficiência teórica (*b*=1 na eq. 1) do método multigrid em problemas mais complexos de dinâmica dos fluidos computacional? Especificamente, como melhorar o desempenho do método multigrid em problemas difusivos anisotrópicos e em problemas de escoamento com altos números de Reynolds?

5.3 Importância do problema

A importância de abordar o problema em consideração neste projeto pode ser avaliada pelos seguintes pontos:

(a) O método multigrid é um dos métodos iterativos mais eficientes e gerais conhecidos hoje (Hirsch, 1988; Tannehill et al., 1997). Portanto, melhorando-o, os resultados são de larga aplicação, muito além de apenas CFD.

(b) Os algoritmos atuais usados com o multigrid podem ser bastante otimizados. Teoricamente, o tempo computacional necessário para resolver um problema de escoamento em CFD pode ser reduzido de 10 a 100 vezes (Brandt et al., 2002) do atual.

(c) A redução do tempo computacional para resolver um mesmo problema resulta na redução do custo dos projetos das empresas.

(d) O aumento da eficiência atual do método multigrid também permitiria, no mesmo tempo computacional, resolver um problema com uma malha mais fina, isto é, com maior número de nós. Isto significa obter uma solução numérica com menor erro de discretização (Roache, 1998), melhorando a qualidade e confiabilidade dos projetos das empresas.

(e) No Brasil, poucos grupos trabalham em pesquisa com o método multigrid. Além dos grupos que integram este projeto, da UFPR e UEPG, conhecemos apenas mais seis, com base no Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil, do CNPq.

5.4 Propostas de solução

O coordenador do projeto usa e pesquisa multigrid desde 1999: para avaliar erros de discretização (Silva e Marchi, 2000); orientação de dissertação de mestrado (Martins, 2002) que avaliou estimadores de erro de iteração, e outra (Moro Filho, 2004) que investigou o uso de razão de engrossamento (*r*) maior que a padrão, 2. Atualmente, o coordenador do projeto orienta três teses de doutorado sobre multigrid, e, a partir de junho, mais uma terá início; além de outra tese em andamento que usará o método multigrid.

Três membros da equipe já publicaram dois trabalhos (Pinto et al., 2005a; Pinto et al., 2005b) sobre multigrid em congressos internacionais. Atualmente, estão em preparação mais três trabalhos para congressos e um para revista científica internacional, envolvendo quatro membros da equipe. Nestes trabalhos, temos usado a estratégia de investigar os fundamentos do método multigrid em problemas extremamente simples, mas que envolvem suas dificuldades em problemas complexos. Isso nos permite entender melhor o funcionamento do multigrid e suas dificuldades, facilitando propor melhorias. Com isso, temos feito descobertas inéditas e importantes, entre elas: encontrado comportamentos sistemáticos em relação ao número de iterações internas e níveis de malha; esquema FAS é mais rápido que CS em problemas lineares; $r > 2$ é mais rápido que 2, valor quase sempre usado. Neste projeto pretendemos usar esta estratégia e juntar com outras da literatura visando atingir os objetivos propostos.

6. Metodologia Descrever (em até 3 páginas) a metodologia a ser utilizada para o desenvolvimento do projeto. No caso de procedimentos usuais da área do projeto proceder descrição resumida.

Para atingir os objetivos propostos, o projeto está estruturado em oito etapas descritas nesta seção, que totalizam dois anos. Ao final de cada etapa, pretende-se ter um ou mais códigos computacionais correspondentes a ela e um artigo a ser submetido a congresso ou revista científica para publicação.

Do ponto de vista prático, o interesse é resolver problemas multidimensionais de escoamento cujos modelos matemáticos são compostos por várias equações diferenciais, que são abordados nas etapas 6.7 e 6.8. As outras etapas são dedicadas a problemas unidimensionais e/ou com apenas uma equação diferencial; elas são consideradas importantes para isolar as causas que afetam o desempenho do método multigrid, permitindo entender melhor cada aspecto do método e, assim, otimizá-lo; além disso, algumas destas equações também têm aplicação prática.

Algumas características gerais do projeto são: (i) todos os programas computacionais que serão utilizados para investigar o desempenho do método multigrid serão implementados pela equipe deste projeto usando a linguagem de programação FORTRAN 95; (ii) será usado multigrid com ciclo V, por demandar menos tempo de computação (Hirsch, 1988); e (iii) também serão considerados nas outras etapas, quando pertinentes, os efeitos mencionados na etapa 1, abaixo.

A equipe deste projeto conta com sete membros, um doutor e seis doutorandos, com formação em engenharia e matemática, com mestrado e/ou doutorado em métodos numéricos, mecânica computacional e análise numérica, áreas envolvidas neste projeto. Estes pesquisadores trabalham em quatro instituições de ensino superior diferentes: UFPR, UEPG, Unibrasil e Unicenp. Praticamente ainda no início deste projeto, em fevereiro de 2007, mais dois membros da equipe (Schneider e Pinto) já serão doutores. O coordenador do projeto (Marchi) e Pinto deverão dedicar cerca de 10 horas por semana ao projeto; Schneider e Araki, 5 horas; Santiago, 20 horas; Suero e Oliveira, 40 horas. Nas etapas abaixo, o nome (Marchi) do coordenador do projeto é omitido porque ele atua como orientador dos demais membros da equipe.

A seguir, são descritas de forma resumida as oito etapas do projeto e o respectivo cronograma físico.

Etapa 1: Problemas isotrópicos 1D com 1 equação e malha uniforme

Nesta etapa serão considerados: problemas isotrópicos (coeficientes constantes) unidimensionais; malhas uniformes; método de diferenças finitas; solver Gauss-Seidel; dois modelos matemáticos, compostos cada um por uma única equação, e dados por

$$\frac{d^2T}{dx^2} = S(x) \qquad \text{(equação de Poisson 1D)} \qquad (1)$$

$$Pe\frac{dT}{dx} = \frac{d^2T}{dx^2} + S(x) \qquad \text{(equação de advecção-difusão 1D)} \qquad (2)$$

onde x = coordenada espacial, T = temperatura, S = termo fonte, e Pe = número de Peclet.

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados por: número de elementos da malha de 2 até a ordem de milhões; tipos diferentes de restrição, prolongação e relaxação; razões de engrossamento (*r*) 2, 3, 4 e 5; valor de Pe; número de iterações internas do solver, dos tipos fixo e dinâmico; número de níveis de malha; esquemas CS e FAS; com e sem FMG; tipo de condição inicial; tolerância e critério de convergência; e aproximações numéricas do tipo UDS e CDS, com e sem correção adiada (Ferziger e Peric, 2001).

Responsáveis: Santiago, Pinto e Oliveira.

Etapa 2: Problemas anisotrópicos 1D com 1 equação

Nesta etapa serão considerados: problemas anisotrópicos (coeficientes variáveis) unidimensionais; método de diferenças finitas; solver Gauss-Seidel; três modelos matemáticos, compostos cada um por uma única equação, e dados pela Eq. (1) e por

$$\frac{d}{dx}\left(k\frac{dT}{dx}\right) = S(x) \qquad \text{(difusão de calor 1D)} \tag{3}$$

$$Re\frac{d(u^2)}{dx} = \frac{d^2u}{dx^2} + S(x) \qquad \text{(equação de Burgers 1D)} \tag{4}$$

onde u = componente do vetor velocidade na direção x, k = condutividade térmica e Re = número de Reynolds.

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados por: anisotropia geométrica devido ao uso de malhas não-uniformes na Eq. (1) e área (A) de troca de calor variável no lugar de k na Eq. (3); anisotropia física causada por k e u variáveis, nas Eqs. (3) e (4); valor de Re.

Responsáveis: Pinto e Oliveira.

Etapa 3: Problema isotrópico 2D com 1 equação e malha uniforme

Nesta etapa serão considerados: problemas isotrópicos (coeficientes constantes) bidimensionais; malhas totalmente uniformes, ou seja, com razão de aspecto unitária; método de diferenças finitas; modelo matemático composto por uma única equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \qquad \text{(Equação de Laplace 2D)} \tag{5}$$

onde x e y = direções coordenadas.

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados pelos seguintes solvers iterativos: Gauss-Seidel, ADI e MSI; e compará-los a um solver direto (eliminação de Gauss).

Responsável: Pinto.

Etapa 4: Problema anisotrópico geométrico 2D com 1 equação

Nesta etapa serão considerados: problemas anisotrópicos (coeficientes variáveis) bidimensionais; método de diferenças finitas; um modelo matemático, composto por uma única equação, e dado pela Eq. (5).

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados pelos seguintes tipos de anisotropia geométrica: domínio quadrado com número de elementos diferentes em cada direção; domínio retangular com número de elementos iguais nas duas direções mas com o tamanho dos elementos diferentes em cada direção; domínio retangular com tamanho dos elementos iguais nas duas direções mas com o número de elementos diferentes em cada direção; razões de aspecto da malha de 2 até a ordem de 10 mil.

Responsáveis: Pinto e Oliveira.

Etapa 5: Problema anisotrópico físico 2D com 1 equação

Nesta etapa serão considerados: problema anisotrópico (coeficientes variáveis) bidimensional; malhas uniformes; método de diferenças finitas; um modelo matemático, composto por uma única equação, e dado pela equação de advecção-difusão 2D:

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + S(x,y) \tag{6}$$

onde v = componente do vetor velocidade na direção y.

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados pela magnitude e pela direção do vetor velocidade.

Responsáveis: Pinto e Oliveira.

Etapa 6: Problemas com 2 equações e malha uniforme

Nesta etapa serão considerados: escoamento quase-unidimensional de fluido incompressível; malhas uniformes; solver TDMA (Ferziger e Peric, 2001); método de volumes finitos com solução seqüencial das equações e método de acoplamento pressão-velocidade do tipo SIMPLEC (Ferziger e Peric, 2001); modelo matemático, composto por duas equações, equações de conservação da massa e da quantidade de movimento linear, dadas respectivamente por:

$$\frac{d(\rho u A)}{dx} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{d(\rho A u^2)}{dx} = \frac{d}{dx}\left(\mu A \frac{du}{dx}\right) - A\frac{dp}{dx} - S(u) \tag{8}$$

onde A = área do escoamento em cada coordenada x, p = pressão, ρ = massa específica e μ = viscosidade.

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados por um modelo matemático composto por duas equações. Também pretende-se abordar um problema termoelástico linear 2D e apenas a Eq. (8) visando evitar a questão do acoplamento pressão-velocidade.

Responsáveis: Santiago e Araki.

Etapa 7: Problema não-linear de escoamento 2D com 3 equações

Nesta etapa serão considerados: escoamento bidimensional de fluido incompressível; malhas uniformes; método de volumes finitos com solução seqüencial das equações e método de acoplamento pressão-velocidade do tipo SIMPLEC; modelo matemático, composto por três equações, equações de conservação da massa e da quantidade de movimento linear nas direções *x* e *y*, dadas respectivamente por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial (u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} = \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{10}$$

$$\frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial (v^2)}{\partial y} = \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} \tag{11}$$

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados por: um modelo matemático composto por três equações; valor de *Re*.

Responsáveis: Santiago e Araki.

Etapa 8: Problemas 2D em malhas não-estruturadas

Nesta etapa serão considerados: os problemas bidimensionais das etapas 3 a 7; malhas não-estruturadas; método de volumes finitos.

Pretende-se investigar os efeitos sobre o desempenho do método multigrid causados pelo uso de malhas não-estruturadas.

Responsáveis: Suero, Pinto e Schneider.

Cronograma

Na tabela abaixo, apresenta-se o cronograma de execução física das atividades previstas nas etapas 1 a 8, organizado em períodos trimestrais. Atualmente, as etapas 1 a 4 e 6 estão em andamento.

Início: novembro/2006. Término: outubro/2008.

Etapa	Atividade		2007				2008		
		4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º
1	Problemas isotrópicos 1D com 1 equação e malha uniforme	X	X						
2	Problemas anisotrópicos 1D com 1 equação	X	X	X	X				
3	Problema isotrópico 2D com 1 equação e malha uniforme	X	X						
4	Problema anisotrópico geométrico 2D com 1 equação	X	X	X	X				
5	Problema anisotrópico físico 2D com 1 equação					X	X	X	X
6	Problemas com 2 equações e malha uniforme	X	X	X					
7	Problema não-linear de escoamento 2D com 3 equações				X	X	X	X	X
8	Problemas 2D em malhas não-estruturadas		X	X	X	X	X	X	X

7. Infra-estrutura disponível Listar (em até ½ página) a infra-estrutura disponível na instituição co-responsável que estará envolvida no apoio à realização do projeto.

O projeto será desenvolvido principalmente no Laboratório de Experimentação Numérica (LENA), do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Paraná. A infra-estrutura disponível no LENA é suficiente para desenvolver o presente projeto de pesquisa, e é a seguinte:

- Microcomputadores Pentium III e IV
- Impressoras monocromáticas a laser
- *Softwares* Windows, Word, Wgnuplot, Notepad e Fortran
- Material de expediente: papel, disquete, CD, toner, luz, telefone etc
- Duas salas que somam 40 m^2, contendo estantes, escrivaninhas, mesas para microcomputadores e arquivos.

8. Financiamentos já obtidos para o projeto Listar (em até ½ página), no caso de projetos em andamento

Fonte Financiadora	Valor
O projeto já está em andamento desde 2003 mas ainda não obteve nenhum apoio de agências de fomento	zero

9. Resultados esperados Listar (em até 1 página) os resultados e os benefícios esperados, considerando os aspectos social, econômico, ambiental e científico quando pertinentes

Aspectos Sociais
1) Formar dois doutores no tema do projeto, difundindo a técnica multigrid. 2) Treinar cinco doutorandos no tema do projeto, que é atual e tem grande potencial para ser aplicado em tipos diferentes de problemas. 3) Aumentar a capacidade computacional dos dois grupos de pesquisa envolvidos no projeto, permitindo ampliar o escopo de suas atividades de pesquisa, ensino e extensão.
Aspectos Econômicos
1) Reduzir o custo das simulações computacionais das empresas em seus projetos. Isso será possível porque uma mesma simulação, com os mesmos dados, será executada em tempo menor que o permitido pela tecnologia multigrid atual. 2) Melhorar a qualidade e a confiabilidade dos projetos das empresas. Isso ocorrerá porque fixando-se um determinado tempo computacional para resolver um problema, com o melhoramento do método multigrid, será possível resolvê-lo com uma malha mais fina, que terá menor erro numérico.
Aspectos Ambientais
Aspectos Científicos
1) Ter publicado ou submetido para publicação pelo menos cinco artigos científicos em congressos nacionais e internacionais com os resultados deste projeto. 2) Ter publicado ou submetido para publicação pelo menos três artigos em revistas científicas internacionais com os resultados deste projeto. 3) Concluir três teses de doutorado sobre o tema deste projeto. 4) Melhorar o desempenho do método multigrid nos problemas abordados neste projeto. 5) Difundir a tecnologia do método multigrid no Brasil e no exterior através de: publicação de artigos; site do projeto com os programas-fonte implementados; disciplinas de pós-graduação; apostila sobre o método; e treinamento dos participantes deste projeto, que pertencem a quatro instituições diferentes (UFPR, UEPG, Unibrasil e Unicenp).

10. Orçamento detalhado Listar somente os itens solicitados à Fundação Araucária com justificativa resumida de sua necessidade para o projeto

Rubrica	Qtde.	Valor (R$)	Justificativa da necessidade para o projeto
Material permanente e equipamentos: microcomputador Pentium IV 3,4 GHz, 2 GB RAM, HD 80 GB, monitor 17” etc	2	7.000,00	Realizar as simulações do projeto na UFPR
Material permanente e equipamentos: microcomputador Pentium IV 3,0 GHz, 1 GB RAM, HD 80 GB, monitor 17” etc	2	5.030,00	Realizar as simulações do projeto na UEPG
Material permanente e equipamentos: impressora laser HP 2840 multifuncional e colorida	1	2.950,00	Imprimir, scannear e xerocar arquivos referentes às simulações do projeto na UFPR
Material permanente e equipamentos: impressora laser HP 2600n colorida	1	1.520,00	Imprimir arquivos referentes às simulações do projeto na UEPG
Serviços de terceiros/pessoa jurídica: artigos COMUT	vários	500,00	Adquirir artigos científicos através do sistema COMUT para atualização na literatura
Serviços de terceiros/pessoa jurídica: tradução de artigos	6	3.000,00	Traduzir artigos científicos do projeto para publicação em congressos e revistas
Total		20.000,00	

11. Aspectos éticos e de bio-segurança Em consonância com a Resolução 196/96 do Conselho Nacional de Saúde/Comissão Nacional de Ética em Pesquisa, quando couber.

Este item não se aplica ao presente projeto.

12. Referências bibliográficas Listar as principais referências bibliográficas, citadas no texto, de acordo com as normas da ABNT.

BRANDT, A. **Barriers to achieving textbook multigrid efficiency (TME) in CFD**. Hampton, VA, USA: ICASE/NASA, 1998. NASA/CR-1998-207647.

BRANDT, A.; DISKIN, B.; THOMAS, J. L. **Recent advances in achieving textbook multigrid efficiency for computational fluid dynamics simulations**. Hampton, VA, USA: ICASE/NASA, 2002. NASA/CR-2002-211656.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. ed. Berlin: Springer, 2001.

HIRSCH, C. **Numerical computation of internal and external flows**. Chichester: Wiley, 1988. v. 1.

KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. 8. ed. New York: Wiley, 1999.

LARSSON, J.; LIEN, F. S.; YEE, E. C. Conditional semicoarsening multigrid algorithm for the Poisson equation on anisotropic grids. **Journal of Computational Physics**, v. 208, p. 368-383, 2005.

MARTINS, M. A. **Estimativa de erros de iteração em dinâmica dos fluidos computacional**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002. Dissertação de mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia.

MORO FILHO, R. C. **Aplicação da técnica multigrid em transferência de calor computacional**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica.

PINTO, M. A. V.; SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H. Effect of parameters of a multigrid method on CPU time for one-dimensional problems. In: XVIII INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. **Proceedings…** Ouro Preto, 2005a, p. 1-8.

PINTO, M. A. V.; SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H. Efeito de parâmetros do método multigrid sobre o tempo de CPU para a equação de Burgers unidimensional. In: XXVI IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING. **Anais…** Guarapari, 2005b, p. 1-13.

ROACHE, P. J. **Verification and validation in computational science and engineering**, Albuquerque: Hermosa, 1998.

SILVA, A. F. C.; MARCHI, C. H. Estimativa de erros de discretização multidimensional em dinâmica dos fluidos. In: IV SIMPÓSIO MINEIRO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL. **Anais...** Uberlândia, v. 1, 2000, p. 497–504.

TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H. **Computational fluid mechanics and heat transfer**. 2. ed. Washington: Taylor & Francis, 1997.

WESSELING, P. **An introduction to multgrid methods**. New York: Wiley, 1992.

WESSELING, P.; OOSTERLEE, C. W. Geometric multigrid with applications to computational fluid dynamics. **Journal of Computation and Applied Mathematics**, v. 128, p. 311-334, 2001.

* * * * *

Local e data: Curitiba, 28 de abril de 2.006

Assinatura do Coordenador