

PROJETO DE PESQUISA

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS NUMÉRICOS NÃO
ESTRUTURADOS PARA MODELAGEM SÍSMICA**

Programa: Rede Temática de Geofísica Aplicada

EQUIPE DE PESQUISADORES

Carlos Friedrich Loeffler Neto, D.Sc., DEM/PPGEM/UFES

Antônio Manoel Ferreira Frasson, D. Sc., DEL/UFES

Julio Tomas Aguije Chacaltana, D.Sc., DEA,PPGEA/UFES

José Antonio Fontes Santiago, D.Sc.,PEC/COPPE/UFRJ

William Jerônimo dos Santos, D.Sc, UFRRJ

I – IDENTIFICAÇÃO

O projeto DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS NUMÉRICOS NÃO ESTRUTURADOS PARA MODELAGEM SÍSMICA é uma proposta de pesquisa técnico-científica resultante de termo de cooperação celebrado entre a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), principal executante da pesquisa, e a Petróleo Brasileiro SA (PETROBRAS), com a intermediação da Fundação Espírito Santense de Tecnologia (FEST). O projeto inclui também a participação de professores de outras Universidades Federais, especificamente a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), mantendo assim uma parceria técnico-científica de vários anos com professores dessas instituições. Participam ainda desta pesquisa alunos de mestrado e de iniciação científica, realizando atividades de teor complementar. Para estes visa-se, sobretudo, sua formação através da transmissão assistida de conhecimentos referentes à solução de problemas de engenharia que envolvem significativo nível de dificuldade e interesse tecnológico internacional.

II – INTRODUÇÃO

A matriz de produção de óleo e gás combustível requer continuamente o desenvolvimento de tecnologias que permitam a otimização de todos os componentes de sua cadeia, desde a prospecção até o processamento. No que tange à prospecção, particularmente, há necessidade de metodologias cada vez mais eficientes, que garantam precisão de resultados com custos reduzidos.

Neste contexto, modelos matemáticos e numéricos pertinentes à Mecânica Computacional, inicialmente aplicados para análise e solução de projetos de estruturas, máquinas e equipamentos, se tornaram ferramentas importantes em diversas outras áreas do conhecimento, incluindo o setor de prospecção de petróleo. Assim, utilizando uma modelação matemática adequada, é possível prever do ponto de vista teórico a resposta sísmica do meio heterogêneo, desde que se conheçam os vários parâmetros físicos associados às camadas geológicas e, em particular, à velocidade de propagação de ondas.

Em termos de modelagem matemática, o emprego do método sísmico de reflexão continua a ser o mais utilizado na indústria do petróleo, pela sua relativa eficiência e baixo custo. Baseada na reflexão de ondas sísmicas, esse método é bastante similar aos procedimentos de sonar, usados na navegação, onde as distâncias são determinadas pela reflexão do som.

Os modelos gerados pelos principais métodos numéricos são passíveis de constantes aprimoramentos, ajustando-se às necessidades crescentes intrínsecas ao progresso em todas as áreas do conhecimento, incluindo particularmente os problemas de geofísica. Assim, aprimoramentos relacionados à precisão, ao custo computacional, a funcionalidade na entrada de dados e a readaptividade da malha de pontos discretos, entre outros fatores, são fundamentais para que se possa descrever, cada vez mais precisamente, as feições geológicas do interior

da subsuperfície da Terra, a partir de dados colhidos na superfície, com o auxílio de técnicas experimentais.

O presente projeto visa exatamente o desenvolvimento dessas principais ferramentas numéricas - o Método dos Elementos Finitos, o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos de Contorno - tendo como foco os problemas de propagação de ondas relacionados à sismica de reflexão.

III - OBJETIVO

Aplicar os principais métodos discretos ao modelo matemático da propagação de ondas acústicas, nos domínios do tempo e da frequência, visando particularmente desenvolver formulações numéricas que permitam o emprego de malhas não estruturadas, ou seja, usando pontos de discretização do domínio que não obedecem uma regra de formação e não precisam estar necessariamente com um mesmo espaçamento entre eles. Deste modo, pode-se aumentar o refinamento em determinadas porções do domínio para melhor comportar as variações de propriedades físicas do meio, otimizando as demandas computacionais (memória e cálculo) com a acurácia da solução de acordo com o modelo em análise.

IV – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desenvolvimento de diferentes estratégias numéricas mais eficazes na simulação de problemas governados pelas Equações de Helmholtz e pela Equação Acústica da Onda, equações de uso corrente na análise sísmica, considerando-se meios homogêneos e heterogêneos em duas dimensões. Estas estratégias envolvem algoritmos de avanço no tempo, esquemas de interpolação radial e polinomial e técnicas de ponderação de funções. Isto se aplica as vertentes dos métodos Petrov-Galerkin (MLPG), dos Volumes Finitos (MVF) e dos Elementos de Contorno (MECID).

No que tange ao Método das Soluções Fundamentais (MSF), aproveitando as características vantajosas quanto a simplicidade na entrada de dados, será examinada a sua adequabilidade na modelagem da regularização de coordenadas de receptores, situados em um nível abaixo dos receptores originais em pontos próximos à superfície livre do mar.

V - JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de uma gama de modelos numérico com tais características é importante para se lidar com problemas de grande porte em propagação de ondas 2D e 3D. Modelos que formam os alicerces para diversas metodologias de grande interesse na Geofísica, como por exemplo, a modelagem, iluminação, imageamento e regularização de dados sísmicos, bem como a inversão do campo de ondas completo, ou seja, problemas nos quais a propagação do campo de ondas encontra-se no seu cerne.

Os métodos dos Elementos Finitos (MEF), o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Volumes Finitos (MVF) estão entre as principais técnicas numéricas da atualidade e

podem ser aplicadas ao problema da sísmica de reflexão. Algumas técnicas numéricas menos conhecidas também podem ser empregadas para a regularização de dados sísmicos, como por exemplo, o Método das Soluções Fundamentais (MSF). Contudo, tendo em vista a ampliação da quantidade de dados necessária às simulações da sísmica de reflexão, comumente exigidos por refinados modelos tridimensionais, algumas dificuldades operacionais precisam ser adequadamente resolvidas. Uma delas consiste da questão da conectividade entre elementos ou células nos métodos que envolvem a discretização do domínio.

De fato, a geração de malhas para representar configurações geométricas complicadas em três dimensões sempre foi um sério problema nos métodos numéricos que discretizam o domínio, mas não um impedimento. Isto porque o domínio é composto por elementos ou volumes que se conectam entre si e a variável de interesse é aproximada localmente em seu interior através de funções de interpolação ou pelo balanço dos fluxos que ocorrem através da superfície que envolve o volume. No caso de algum elemento ser distorcido, sua aproximação tem qualidade ruim e os resultados globais podem apresentar baixa precisão. A aplicação de técnicas adaptativas para redefinição das malhas e consequente eliminação dessas distorções encontra algumas dificuldades operacionais diante da conectividade existente entre os elementos ou volumes.

Nos métodos sem malha não se usam elementos para delimitar e gerenciar o posicionamento e a conectividade dos graus de liberdade definidos pela discretização. As funções que aproximam o campo demarcam uma região de influência e para tanto são utilizadas funções de base radial ou funções obtidas através do método dos mínimos quadrados móveis, ambos com suporte compacto local. Assim, os nós de cada região de influência podem ser distribuídos arbitrariamente, numa formação regular ou aleatória; caso seja necessária uma melhor representação do domínio do problema, mais pontos podem ser acrescentados sem dificuldades; e as regiões de influência podem e devem sobrepor-se às demais.

Assim, discretiza-se o domínio de interesse através de um conjunto de nós, posicionados sem que exista explicitamente uma malha estruturada de elementos, de modo que essa abordagem é totalmente diferente dos métodos tradicionais com malha, onde as funções de interpolação são baseadas a priori no tipo de elemento conexo utilizado. Outro aspecto interessante é que a grande maioria dos métodos assim construídos, usualmente chamadas de *meshless*, é inspirada nas formulações dos tradicionais métodos com malha.

Justifica-se a presente pesquisa por trazer benefícios significativos à área de modelagem sísmica, por envolver métodos de reconhecido potencial na engenharia em geral, seja por fornecer ferramentas de maior precisão e operacionalidade, como também por gerar um processamento computacional significativamente mais atraente na solução das equações diferenciais parciais de grande aplicação na indústria. O fato de que as técnicas empregadas não serem convencionais, particularmente com relação aos diversos métodos sem malha baseados nos Métodos Locais Petrov-Galerkin, abre a possibilidade que algumas alternativas se mostrarem mais atraentes do que outras nos diversos ângulos possíveis de análise, ou seja, em termos de robustez, operacionalidade e estabilidade.

Justiificas-se este projeto de pesquisa também pelo prisma acadêmico, já que o manuseio e o desenvolvimento destas técnicas com o auxílio de alunos contribui efetivamente para a formação desses, mostrando as aplicações na engenharia de modelos matemáticos e apresentando as dificuldades envolvidas na elaboração dos códigos computacionais e na interpretação e validação dos resultados.

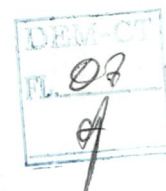
IV- DETALHAMENTO TEÓRICO

O procedimento supradescrito direciona-se aos métodos de domínio em geral, mas no caso do Método dos Elementos Finitos (MEF), o desenvolvimento de tais técnicas encontra-se bem avançado, mas existem diversas alternativas disponíveis, cujas avaliações de desempenho comparativo ainda não foram devidamente realizadas.

Neste projeto de pesquisa propõe-se o desenvolvimento e a implementação computacional no MEF de técnicas numéricas discretas não-convencionais que empregam estratégias de modelagem não-estruturadas e aproximações locais empregando funções obtidas através do método dos mínimos quadrados móveis e funções de base radial, compactas e plenas. Especificamente, no contexto do MEF, serão implementadas as variantes das técnicas sem malha chamadas Métodos Locais Petrov-Galerkin (MLPG). Atualmente existem seis variantes do referido método, baseadas em formulações de elementos finitos e elementos de contorno. Basicamente se distinguem pela mudança das funções de interpolações usadas nestes métodos tradicionais para aquelas obtidas através do método dos mínimos quadrados móveis e pelo emprego de diferentes funções de ponderações.

O Método das Soluções Fundamentais (MSF) é um método cuja formulação possui inerentemente o conceito meshless, pois que apenas pontos base ou fontes são aplicados no entorno do domínio. Sobre o contorno é inserida uma série de pontos de colocação nos quais são prescritas as condições de contorno. Não requer, portanto, uma discretização explícita. Aproveitando tais características vantajosas, aplicar-se-á o MSF na modelagem da regularização de coordenadas de receptores, situados em um nível abaixo dos receptores originais. Esta técnica atuará através de combinações lineares das soluções fundamentais e fontes virtuais aplicados em pontos exteriores, igualando aos valores das pressões em pontos próximos à superfície livre do mar. A solução fundamental é obtida para o mesmo problema, porém no domínio infinito.

O Método dos Elementos de Contorno (MSV) não é propriamente uma técnica meshless, mas devido ao fato de reduzir em uma a dimensão do problema, os problemas de conectividade com os elementos são enormemente reduzidos. As vantagens do MEF quanto a entrada reduzida de dados tem-se ampliado atualmente pelo transporte fácil dos dados de desenho diretamente para a elaboração da malha. Neste projeto, usar-se-á a formulação com Integração Direta (MECID), que permite a obtenção de soluções aproximadas mais simples para os casos em que esteja envolvida a inércia do sistema, como os problemas governados pela Equação de Helmholtz e pela Equação da Propagação da Onda Acústica. Seu acoplamento com a técnica de superposição de domínios permite representar heterogeneidades físicas.



O Método dos Volumes Finitos (MVF) tem ganho crescente aceitação em problemas outros além da dos pertinente a Mecânica dos Fluidos, devido a robustez e precisão de resultados. Considerando o estado atual da arte e o período de realização desta pesquisa, este projeto não contempla a geração de uma formulação do MVF meshless; busca-se apenas gerar um modelo do MVF não-estruturado, com esquema de interpolação no interior dos volumes finitos triangulares para uso de funções de ordem superior e uso de esquema iterativo, baseado no balanço de fluxo entre cada intervalo no avanço do tempo, que permita usar incrementos de integração maiores e reduzir o custo computacional da análise dinâmica.

V - RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que este projeto resulte no desenvolvimento de diferentes estratégias numéricas que sejam mais eficazes na simulação de problemas governados pelas Equações de Helmholtz e pela Equação Acústica da Onda, considerando-se meios homogêneos e heterogêneos em duas dimensões. A aferição da melhoria de desempenho dos métodos e na qualidade de seus resultados se baseará na execução de diversos problemas teste e na avaliação comparativa dos resultados obtidos, seja entre os métodos aqui utilizados, seja pelo emprego de soluções disponíveis na literatura. Isto se aplica as vertentes dos métodos Petrov-Galerkin (MLPG), dos Volumes Finitos (MVF) e dos Elementos de Contorno (MECID).

Desenvolvimento de indicativos para avaliação de potencialidades dos métodos, pois a análise dos resultados gerados pelos diferentes métodos numéricos aqui investigados, quando simulado o mesmo problema físico, permitirá a geração de soluções de referência confiáveis. Assim, será mais consistente o balizamento da qualidade das soluções numéricas no que tange à precisão, convergência da solução com o refinamento da malha do esquema numérico, custo computacional e operacionalidade.

Naturalmente, em todas as aplicações desenvolvidas no âmbito deste projeto, esperam-se resultados com precisão, convergência com o refinamento da discretização e desempenho computacional satisfatório para todas as técnicas, nos diversos problemas testes a serem empreendidos.

VI - PRODUTOS ESPERADOS

Relatórios técnicos descrevendo as técnicas e formulações desenvolvidas, além de roteiros de uso dos programas computacionais em linguagem FORTRAN, para cada um dos métodos empregados. Internamente os códigos serão documentados e acompanhados de manuais de instrução de entrada de dados. Problemas-teste simplificados serão disponibilizados como o produto final para orientar futuros usuários. Os seguintes programas serão desenvolvidos:

- Programa Computacional 2D em Linguagem FORTRAN para realização de simulação numérica, no domínio da frequência, de propagação de ondas acústicas bidimensionais em meios homogêneos e heterogêneos, considerando fontes pontuais geradoras usando



as várias alternativas do Método sem Malha Local Petrov-Garlerkin (MLPG) empregando as formulações fracas.

- Programa Computacional 3D em Linguagem FORTRAN para realização de simulação numérica, no domínio da frequência, da propagação de ondas acústicas bidimensionais em meio homogêneo semi-plano, usando o Método das Soluções Fundamentais (MSF) para a regularização de coordenadas de receptores em um nível abaixo dos receptores originais.
- Programa Computacional 2D em Linguagem FORTRAN para realização de simulação numérica, no domínio do tempo e da frequência, da propagação de ondas acústicas bidimensionais pelo Método dos Volumes Finitos Não-estruturados (MVF), com ênfase no aprimoramento do esquema de interpolação no interior dos volumes finitos triangulares, buscando usar funções de ordem superior. Implementação de um esquema iterativo, baseado no balanço de fluxo entre cada intervalo no avanço do tempo, que permita usar incrementos de integração maiores e reduzir o custo computacional da análise dinâmica.
- Programa Computacional 2D em Linguagem FORTRAN para realização de simulação numérica, no domínio do tempo e da frequência, em problemas bidimensionais, usando a técnica de do Método dos Elementos de Contorno com integração direta por funções radiais (MECID) acoplada a técnica de superposição de domínios.

Além destes produtos, artigos técnicos em revistas científicas indexadas serão preparados conforme a obtenção de resultados, nas diversas linhas de pesquisa que compõem o presente projeto, além de teses e dissertações de mestrado.

VII – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

O projeto será desenvolvido durante dois anos contínuos e será dividido em etapas, conforme exposto a seguir.

Abordagem numérica via MEF e MSF

Responsáveis: Professores José Antonio Fontes Santiago e William Jenônimo dos Santos

1. Modelagem numérica da regularização de dados sísmicos baseado no Método das Soluções Fundamentais (MSF)

- 1.1. Desenvolvimento do programa computacional em linguagem Fortran: 7 meses
- 1.2. Simulações numéricas em problemas-teste: 3 meses
- 1.3. Aplicação aos dados sísmicos fornecidos pela PETROBRAS: 4 meses
- 1.4. Relatório: 6 meses
 - 1.4.1. Descrição do problema e da formulação do método

1.4.2. Redação e análise dos resultados gerais da aplicação e as conclusões finais

2. Modelagem numérica da propagação de ondas acústicas bidimensionais em meios homogêneos e heterogêneos, no domínio da frequência

- 2.1. Estudo da formulação do Método sem Malha Local Petrov-Galerkin (MLPG) selecionando as duas alternativas mais usadas do método: 2 meses
 - 2.1.1. Escolha das funções peso e bases para a função de aproximação;
 - 2.1.2. Definição do Esquema de Integração numérica;
 - 2.1.3. Estratégia mais adequado para a imposição das condições de contorno;
- 2.2. Desenvolvimento do programa computacional em linguagem Fortran: 10 meses
- 2.3. Aplicações numéricas: 5 meses
- 2.4. Relatório: 6 meses
 - 2.4.1. Descrição do problema e da formulação do método;
 - 2.4.2. Redação e análise dos resultados das aplicações e as conclusões parciais;

Cronograma do Projeto para 2 anos																							
Itens	Primeiro ano												Segundo ano										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.1																							
1.2																							
1.3																							
1.4																							
2.1																							
2.2																							
2.3																							
2.4																							

Abordagem numérica via MEC

Responsável: Professor Carlos Friedrich Loeffler

3. Modelagem numérica de Problemas de Laplace setorialmente heterogêneos com entalhes e inclusões irregulares usando a técnica da superposição de domínios (MSD)

- 3.1. Estudo da Formulação Matemática e Desenvolvimento do programa computacional do MEC em linguagem Fortran: 3 meses
- 3.2. Estudo da Formulação Matemática e Desenvolvimento do programa computacional do MEF em linguagem Fortran: 3 meses
- 3.3. Testes numéricos comparativos entre métodos: 3 meses
- 3.4. Relatório: 1 mês

DEPT. 10
A

4. Modelagem numérica de Problemas de Helmholtz setorialmente heterogêneos usando a técnica da integração direta com funções radiais (MECID) e o método da superposição de domínios (MSD)

- 4.1. Estudo do Acoplamento da Técnica de Integração Direta e desenvolvimento do programa computacional em linguagem Fortran: 9 meses
- 4.2. Testes numéricos: 3 meses
- 4.3. Relatório: 2 meses

5. Modelagem numérica da propagação de ondas acústicas bidimensionais em meios homogêneos usando a técnica da integração direta com funções radiais (MECID)

- 5.1. Desenvolvimento do modelo computacional espacial: 3 meses
- 5.2. Desenvolvimento e Testes dos Esquemas de Avanço no Tempo: 3 meses
- 5.3. Aplicações numéricas: 4 meses
- 5.4. Relatório: 2 meses

Cronograma do Projeto para 2 anos																								
	Primeiro ano												Segundo ano											
Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3.1	█	█	█																					
3.2				█	█	█																		
3.3							█	█	█															
3.4										█														
4.1											█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
4.2													█	█	█	█					█	█	█	█
4.3																							█	█
5.1											█	█	█	█										
5.2														█	█	█	█							
5.3																	█	█	█	█				
5.4																						█	█	

Abordagem numérica via MFV

Responsável: Professores Julio Tomás Aquije Chacaltana e Antônio Manoel Ferreira Frasson

6. Modelagem numérica da propagação de ondas acústicas bidimensionais em meios homogêneos e heterogêneos, no domínio do tempo usando a técnica dos Volumes Finitos em Malhas não-estruturada – Parte 1 : Esquemas de avanço no tempo.

- 6.1. Desenvolvimento do programa computacional usando esquema explícito: 2 meses.
- 6.2. Desenvolvimento do programa computacional usando esquema completamente implícito: 3 meses.



- 6.2.1. Implementação do Balanço do Fluxo como critério de convergência do processo iterativo;
- 6.3. Desenvolvimento do programa computacional usando esquema semi-implícito: 3 meses.
 - 6.3.1. Implementação do Balanço do Fluxo como critério de convergência do processo iterativo;
- 6.4. Aplicações numéricas elaboradas: 4 meses.
- 6.5. Relatório: 2 meses.

- 7. **Modelagem numérica da propagação de ondas acústicas bidimensionais em meios homogêneos e heterogêneos, no domínio do tempo usando a técnica dos Volumes Finitos em Malhas não-estruturada – Parte 2 : Técnicas de interpolação.**
 - 7.1. Desenvolvimento de programas de interpolação usando *kernels* radiais: 3 meses
 - 7.2. Desenvolvimento de programas de interpolação usando polinômios: 3 meses
 - 7.3. Desenvolvimento de programas de interpolação usando *kernels* radiais e polinômios: 3 meses
 - 7.4. Aplicações numéricas: 3 meses
 - 7.5. Relatório: 2 meses

Cronograma do Projeto para 2 anos																								
Item	Primeiro ano												Segundo ano											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6.1	█	█																						
6.2			█	█	█	█																		
6.3						█	█	█																
6.4							█	█	█	█	█													
6.5										█	█	█												
7.1													█	█	█									
7.2															█	█	█							
7.3																		█	█	█	█			
7.4																					█	█	█	
7.5																							█	█

VIII – CARGA HORÁRIA DA EQUIPE EXECUTORA

Nome	Titulação	Área de Especialização	Instituição	Horas Semanais	Número de meses
Carlos Friedrich Loeffler Neto	D.Sc.(1988) M.Sc.(1983) Eng.(1980)	Mecânica dos Sólidos/Métodos Numéricos/ Elementos de Contorno	UFES/PPGEM Depto. Eng. Mecânica	20 Horas Semanais	24 meses

DFV
12
9

Julio Tomás Aquiye Chacaltana	D.Sc.(1997) M.Sc.(1993) Eng.(1986)	Mecânica dos Fluidos/Métodos Numéricos/ Volumes Finitos e Diferenças Finitas	UFES/PPGEA Depto. Eng. Ambiental	10 Horas Semanais	24 meses
Antônio Manoel Ferreira Frasson	D.Sc.(2002) M.Sc.(1991) Eng.(1984)	Electromagnetismo Aplicado/Métodos Numéricos/Elementos Finitos e Diferenças Finitas	UFES/DEL	10 Horas Semanais	24 meses
José Antonio Fontes Santiago	D.Sc.(1991) M.Sc.(1987) Eng.(1982)	Mecânica dos Sólidos/ Métodos Numéricos/ Elementos Finitos/MSF	COPPE/UFRJ	20 Horas Semanais	24 meses
Wiliam Jeronimo dos Santos	D.Sc.(2015) M.Sc.(2011) Eng.(2007)	Mecânica dos Sólidos/ Métodos Numéricos/ Elementos Finitos/MSF	UFRRJ	10 Horas Semanais	24 meses