1 Introdução

1.1 Contexto

Técnicas de perfilagem de poço são de grande utilidade para a indústria petrolífera. Os perfis de poço são medidas das propriedades físicas da formação geológica, tais como as propriedades elétricas, magnéticas e acústicas. O presente trabalho se restringirá a análise das propriedades eletromagnéticas.

Na técnica de perfilagem usual, conhecida na literatura internacional por *wireline*, os perfis de poço são obtidos pelo deslocamento ascensional, constante e uniforme de uma sonda, onde estão localizados os sensores que realizam as medidas. Uma central eletrônica conectada à sonda controla os sensores, fornecendo energia em níveis apropriados. A sonda e os equipamentos eletrônicos, juntos, formam a ferramenta de perfilagem. A ferramenta de perfilagem é suspensa por um cabo, normalmente multi-condutor, cuja parte superior é conectada a um sistema de aquisição de dados e, posteriormente, a um computador que executa o processamento dos dados. A interpretação dos perfis é realizada baseando-se no conhecimento das propriedades dos minerais e dos fluidos que compõem as rochas. Desta forma, correlações entre as medidas obtidas e as propriedades da rocha são estabelecidas para a avaliação da formação. Este procedimento é feito através da utilização de fórmulas, gráficos e programas de interpretação. A identificação das rochas ou dos fluidos dáse através de comparações dos valores de resistividade aparente obtidos na perfilagem, com valores tabelados ou determinados em testes de laboratório.

Recentemente, uma nova técnica de perfilagem de poços, conhecida por Logging-while-drilling (LWD) / Measurement-while-drilling (MWD) [1,2], tem recebido considerável atenção na comunidade científica pois é de grande utilidade no geodirecionamento de poços direcionais e/ou horizontais. A principal diferença entre a perfilagem LWD/MWD e a perfilagem convencional, descrita no parágrafo anterior, é que na perfilagem LWD/MWD as propriedades físicas das formações, os parâmetros geométricos dos poços de perfuração, além das propriedades mecânicas do processo de perfuração [1,2] são obtidas em tempo real.

Em geral, os sensores utilizados na técnica LWD/MWD estão incorporados na mesma ferramenta de perfilagem e o termo LWD é utilizado para abranger ambas medidas (LWD e MWD). Entretanto, os parâmetros medidos por estes sensores são diferentes. Os sensores LWD medem as propriedades físicas das formações, enquanto que os sensores MWD medem os parâmetros geométricos do poço e as propriedades mecânicas da perfuração do poço. As medidas LWD são realizadas durante a perfuração do poço e antes da ocorrência de efeitos indesejáveis da perfuração, tais como, invasões do fluído de perfuração, avanço desordenado da perfuração, etc. As invasões do fluído de perfuração na parede do poço ocorrem com menos freqüência do que na perfilagem usual, tendo em vista o espaço curto de tempo entre a perfuração e a aquisição de medidas. Os dados LWD são armazenados na memória e recuperados quando a ferramenta chega na superfície. Os dados MWD, por sua vez, são transmitidos através do fluído de perfuração por meio de uma onda de pressão modulada (*mud pulsing*) e monitorados em tempo real.

Em 1970, Gouilloud e Levy, através da patente americana intitulada "High frequency electromagnetic well logging methods and apparatus" [3], iniciaram os estudos teóricos dos fundamentos das ferramentas de perfilagem LWD/MWD. Entretanto, os russos, em 1972, foram os primeiros a experimentar a tecnologia. Dois anos depois, a Texaco construiu alguns protótipos que foram comercializados na Arábia Saudita [4].

Uma visão geral do projeto de uma ferramenta de perfilagem LWD/MWD em 2 MHz foi apresentada em [4], abordando a teoria básica, em conjunto com uma discussão breve sobre os fatores que afetam a resposta da ferramenta.

Até algumas décadas atrás, a única opção que os analistas de perfil de poço tinham para avaliar a resposta de uma ferramenta de perfilagem eram as técnicas analíticas (limitadas a geometrias simples) e as medidas realizadas em campo. Com o aumento das capacidades computacionais, tem crescido o volume de pesquisa na área de eletromagnetismo computacional com aplicações à Geofísica, permitindo a solução de problemas que antes eram considerados intangíveis.

Simulações numéricas rápidas e eficientes da resposta das ferramentas de perfilagem LWD em ambientes complexos (próximos da realidade) são de grande importância para a indústria petrolífera, pois além de auxiliar no processo da perfuração de um poço, eliminam custos altos na elaboração de novos protótipos e na realização de testes em campo. Entretanto, a modelagem numérica dessas ferramentas em cenários tridimensionais (3D) complexos constitui um problema desafiador. Na prática, as ferramentas de perfilagem operam em cenários onde as propriedades do meio ao redor do poço de perfuração são desconhecidas. Tais cenários podem apresentar não homogeneidades, anisotropias, leitos inclinados (*dipping beds*), zonas invadidas pelo fluído de perfuração, etc. Além das complexidades do meio, devido aos efeitos gravitacionais e às vibrações mecânicas, a ferramenta pode se deslocar durante a perfuração de um poço, de forma que o eixo da ferramenta passa a não coincidir com o eixo do poço. Este cenário é denominado de poços excêntricos (*eccentric boreholes*).

Ao longo dos anos, diferentes métodos numéricos têm sido desenvolvidos para simular a resposta eletromagnética das ferramentas de perfilagem nas vizinhanças de um poço de perfuração [5]– [28]. A modelagem numérica de ferramentas LWD/MWD propriamente dita pode ser encontrada em [4,6,14,15, 16,28]. Dentre os métodos existentes, àqueles que se baseiam na discretização direta das equações de Maxwell são mais flexíveis no tratamento de problemas envolvendo geometrias e meios complexos.

Em [14], Wang e Signorelli analisaram a resposta eletromagnética de ferramentas LWD/MWD em formações não homogêneas isotrópicas através do método das diferenças finitas no domínio da freqüência. O modelo foi desenvolvido em coordenadas cilíndricas, permitindo uma discretização mais precisa da geometria da ferramenta.

Teixeira et al. [15,16], simularam a resposta de ferramentas LWD/MWD em ambientes 3D isotrópicos utilizando o método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). O efeito da presença de leitos inclinados e de poços excêntricos na resposta da ferramenta foi estudado pelos autores. O FDTD tem a vantagem de ser uma técnica explicita e, conseqüentemente, não é afetado por problemas de mau condicionamento e de convergência. Entretanto, o FDTD requer um procedimento de integração no tempo, de forma que o tempo de processamento pode se tornar a principal desvantagem deste método em simulações de ferramentas LWD/MWD de freqüências baixas. Em [28], Teixeira e Lee estenderam a aplicação do FDTD à simulação de ferramentas LWD/MWD em formações com leitos inclinados anisotrópicos.

A grande maioria dos modelos computacionais disponíveis na literatura, por simplicidade, desconsideram a presença de anisotropia no meio, tendo em vista a dificuldade de determinar numericamente o comportamento dos campos eletromagnéticos em meios anisotrópicos e o aumento do custo computacional em comparação ao caso isotrópico. Entretanto, a presença de anisotropia elétrica nas formações geológicas tem sido considerada uma fonte significativa de erros na análise numérica da resposta dos sensores eletromagnéticos de prospecção petrolífera e, conseqüentemente, cresce o volume de pesquisa nesta área [17]– [32].

Alguns modelos 3D simplificam a complexidade do algoritmo considerando que a condutividade da formação é descrita por um tensor diagonal 3×3 , como por exemplo, a solução por equações integrais de Graciet e Shen [18] e a solução por diferenças finitas de Newmann e Alumbaugh [21]. Ao utilizar tensores diagonais para descrever a anisotropia do meio, elimina-se a possibilidade de modelar uma variedade de formações geológicas.

Formulações que descrevem a anisotropia da formação por um tensor completo foram desenvolvidas por Weidelt [29], Davydycheva e Druskin [30] e Weiss e Newmann [31, 32], todas utilizando o método de diferenças finitas como técnica numérica de solução das equações de Maxwell em coordenadas cartesianas. O método de diferenças finitas é a técnica mais utilizada na modelagem de ferramentas de perfilagem de poços, tendo em vista a flexibilidade e a simplicidade do método.

Davydycheva e Druskin [30] utilizaram um esquema de grades entrelaçadas, conhecidas por grades de Lebedev [33], onde todas as componentes de campo elétrico são amostradas em cada nó da primeira grade e todas as componentes de campo magnético são amostradas em cada nó da segunda grade. Com este arranjo, evita-se o cálculo do valor médio dos parâmetros constitutivos do meio, procedimento típico em metodologias por diferenças finitas. Mas, por outro lado, tem-se a desvantagem de aumentar os requerimentos de memória.

Weidelt [29], por sua vez, apresentou uma formulação por diferenças finitas baseada no esquema de grade entrelaçadas de Yee [34]. O valor médio da condutividade foi calculado utilizando as componentes de campo elétrico que são normais às interfaces dos materiais.

No modelo apresentado por Weiss e Newmann [31], o valor médio da condutividade foi calculado através de uma média sobre o volume da célula utilizando as componentes de campo elétrico que são tangenciais às interfaces dos materiais. Em publicação seguinte [32], os autores apresentaram uma extensão do modelo utilizando um pré-condicionador baseado na decomposição de Helmholtz para superar problemas de mau condicionamento e de convergência do sistema linear resultante da discretização das equações de Maxwell por diferenças finitas.

Em [35], Harber e Ascher aplicaram o método dos volumes finitos na solução das equações de Maxwell em regiões não-homogêneas e isotrópicas. Para resolver problemas de mau condicionamento e acelerar a convergência dos métodos iterativos utilizados na solução do sistema de equações lineares resultante da discretização das equações de Maxwell no domínio da freqüência, os autores reformularam as equações de Maxwell em termos de potenciais (vetor e escalar), aplicando uma decomposição de Helmholtz ao campo elétrico. O espaço nulo do operador rotacional foi eliminado adicionando um termo estabilizador através da aplicação do calibre de Coulomb. O sistema de coordenadas cartesianas foi utilizado no desenvolvimento do modelo. O domínio computacional foi truncado por superfícies condutoras magnéticas perfeitas.

Recentemente, cresce o número de trabalhos que utilizam potenciais como auxílio na determinação de campos eletromagnéticos, especialmente em aplicações de freqüências baixas [24, 25, 35, 36, 37]. A motivação reside em dois fatores: (i) os potenciais satisfazem o calibre de Coulomb, superando o problema da existência de modos espúrios dentre as soluções. No limite de freqüências baixas, o operador rotacional discreto possui um espaço nulo não trivial e, portanto, o sistema linear associado pode se tornar mal condicionado; (ii) as três componentes do potencial vetor e o potencial escalar são contínuas em qualquer posição do espaço, de forma que a formulação por potenciais é mais apropriada no tratamento de problemas onde as propriedades constitutivas do meio variam abruptamente.

1.2 Objetivos da tese

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de modelos computacionais para analisar a resposta eletromagnética de ferramentas de perfilagem LWD/MWD em formações geofísicas arbitrárias. Esta modelagem envolve a determinação precisa de campos eletromagnéticos em regiões tridimensionais (3D) complexas e, conseqüentemente, a solução de sistemas lineares não-hermitianos de larga escala. A modelagem numérica é realizada através da aplicação do método dos volumes finitos (FVM). Desenvolvem-se dois modelos computacionais, o primeiro válido em regiões isotrópicas e o segundo considerando a presença de anisotropias no meio. A escolha do método numérico deve-se, principalmente, a simplicidade de implementação do método e a rapidez na simulação dos resultados. As equações de Maxwell são resolvidas através de duas formulações distintas: formulação por campos e formulação por potenciais vetor e escalar. A discretização por volumes finitos utiliza um esquema de grades entrelaçadas em coordenadas cilíndricas.

A formulação por potenciais proposta nesta tese é uma extensão da metodologia apresentada em [35], válida apenas em regiões isotrópicas e desenvolvida em coordenadas cartesianas. Neste trabalho, a formulação por potenciais é desenvolvida em coordenadas cilíndricas e válida em regiões isotrópicas e anisotrópicas. Além disto, a presente formulação incorpora quatro técnicas para aumentar a eficiência computacional e a precisão do método:

- Decomposição de Helmholtz ao campo elétrico para superar problemas de mau condicionamento e convergência do sistema linear resultante da discretização das equações de Maxwell em regiões anisotrópicas onde as propriedades constitutivas variam abruptamente (situação comum em formações geológicas) e em aplicações de freqüências baixas;
- Discretização cilíndrica não uniforme para evitar erros de aproximação de escada na geometria da ferramenta de perfilagem e reduzir requerimentos de memória;
- Algoritmo por volumes finitos localmente conforme para modelar poços excêntricos, onde a interface entre a parede do poço e a formação geológica não é conforme a grade cilíndrica;
- 4. Esquema de média ponderada sobre a área da face da célula para modelar interfaces de materiais anisotrópicos na grade entrelaçada.

Cabe ressaltar que as técnicas mencionadas acima, com exceção da decomposição de Helmholtz, também são incorporadas à formulação por campos.

Devido à flexibilidade dos modelos computacionais, o simulador desenvolvido é capaz de obter a resposta eletromagnética da ferramenta LWD em ambientes tridimensionais complexos (próximos da realidade) que incluem os seguintes: (i) poços horizontais e direcionais; (ii) formações não homogêneas com invasões de fluído de perfuração; (iii) formações anisotrópicas; (iv) poços excêntricos.

Motivado pela flexibilidade dos modelos e pelos resultados numéricos obtidos em diferentes cenários tridimensionais, estende-se a metodologia para analisar a resposta de ferramentas LWD que empregam antenas inclinadas em relação ao eixo da ferramenta (*tilted-coils antennas*). Tais ferramentas podem prover dados com sensibilidade azimutal, assim como estimativas da anisotopia da formação, auxiliando o geodirecionamento de poços direcionais e horizontais [38]– [43].

Além das contribuições supracitadas, a presente tese propõe-se a comparar as formulações por campos e por potenciais vetor e escalar em termos da taxa de convergência e do tempo de processamento em cenários tridimensionais.

As principais motivações para este trabalho podem ser extraídas do contexto previamente resumido neste capítulo de introdução, que destaca a importância técnica e econômica da modelagem computacional de ferramentas de perfilagem de poços. A presente tese apresenta um caráter pioneiro em âmbito nacional e enquadra-se em uma área de pesquisa que está em constante e rápida evolução, a área de eletromagnetismo computacional, e que graças ao aumento das capacidades computacionais e ao desenvolvimento de novas técnicas numéricas, vem permitindo a modelagem e a determinação precisa de campos eletromagnéticos em regiões cada vez mais complexas. Conseqüentemente, além da aplicação abordada na tese, o arcabouço teórico e computacional desenvolvido neste trabalho poderá ser aplicado ao tratamento de diferentes problemas relevantes sob o ponto de vista científico e econômico, como por exemplo, o estudo dos efeitos biológicos de radiação eletromagnética, a investigação de reservatórios de água, a análise de falhas em estruturas, a identificação de objetos enterrados, etc.

1.3 Organização da tese

A presente tese é composta por sete capítulos e cinco apêndices, sendo esta introdução o primeiro capítulo.

No Capítulo 2 é apresentada a configuração da ferramenta LWD/MWD modelada, assim como uma descrição breve dos cenários de operação da ferramenta.

O desenvolvimento da tese propriamente dita é descrito nos Capítulos 3, 4 e 5. No Capítulo 3 desenvolve-se um modelo numérico tridimensional (3D) por volumes finitos para análise da resposta eletromagnética de ferramentas LWD/MWD em regiões isotrópicas. O domínio do problema é discretizado utilizando um esquema de grades entrelaçadas desenvolvido em coordenadas cilíndricas. As equações de Maxwell são resolvidas através de duas formulações distintas: formulação por campos e formulação por potenciais vetor e escalar. Estuda-se a resposta do sensor em vários cenários, comparando os resultados com soluções pseudo-analíticas, com o método do casamento de modos (NMM) e com o FDTD. Ao final do capítulo, comparam-se as duas formulações (campos e potenciais) em termos de precisão, taxa de convergência e tempo de processamento.

O Capítulo 4 é dedicado à implementação do método dos volumes finitos em meios anisotrópicos. O modelo anisotrópico é uma extensão direta do modelo isotrópico desenvolvido no Capítulo 3. Para modelar as interfaces de materiais anisotrópicos na grade entrelaçada, deriva-se um esquema baseado na média sobre a área da face da célula, que utiliza as componentes de campo elétrico (ou componentes do potencial vetor magnético na formulação por potenciais) que são tangenciais à interface dos materiais e, portanto, são contínuas e bem definidas.

No capítulo 5 analisa-se a resposta de ferramentas de perfilagem eletromagnética que incorporem antenas em espiras inclinadas em relação ao eixo da ferramenta em formações homogêneas e formações anisotrópicas não homogêneas com leitos inclinados. A formulação numérica é a mesma que foi desenvolvida nos Capítulos 3 e 4, diferindo apenas no cálculo do fluxo de corrente da espira transmissora através das superfícies das células e das tensões induzidas nas espiras receptoras.

O Capítulo 6 apresenta uma breve investigação das limitações do uso de PMLs na grade cilíndrica do FVM no domínio da freqüência.

As conclusões do trabalho são descritas no Capítulo 7, incluindo sugestões de trabalhos futuros complementares ou correlatos.

No Apêndice A estão listadas as publicações decorrentes do presente tese. Os Apêndices B e C apresentam, respectivamente, as expressões dos elementos da matriz do sistema do modelo isotrópico para as formulações por campos e por potenciais. As expressões dos elementos da matriz do sistema do modelo anisotrópico para as formulações por campos e por potenciais são apresentadas nos Apêndices D e E, respectivamente.