



Alexandre Ashade Lassance Cunha

**Análise da propagação eletromagnética através
de poços de petróleo com auxílio de técnicas
de apoio à decisão**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador : Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Co-Orientador: Prof. José Ricardo Bergmann

Rio de Janeiro
Junho de 2011



Alexandre Ashade Lassance Cunha

**Análise da propagação eletromagnética através
de poços de petróleo com auxílio de técnicas
de apoio à decisão**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. José Ricardo Bergmann

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Guilherme Penello Temporão

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Jose Luiz Arias Vidal

Petrobras/Cenpes

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico

Rio de Janeiro, 20 de Junho de 2011

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

Alexandre Ashade Lassance Cunha

Graduou-se em Engenharia Elétrica com Ênfase em Telecomunicações e Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Trabalhou na Rede Globo de Televisão como Engenheiro Projetista de Sistemas de TV. Participou do desenvolvimento do sistema OCTOPUS junto ao Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada da PUC-Rio, hoje em funcionamento na PETROBRAS. Participou do desenvolvimento do sistema de previsão de carga e faturamento da LIGHT, hoje em funcionamento na empresa. Participou do Rio Oil & Gas 2010, como congressista. Lecionou cálculo como monitor na PUC-Rio. cursou Mestrado em Métodos de Apoio à Decisão no departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Cunha, Alexandre Ashade Lassance

Análise da propagação eletromagnética através de poços de petróleo com auxílio de técnicas de apoio à decisão / Alexandre Ashade Lassance Cunha; orientador: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco; co-orientador: José Ricardo Bergmann.

71 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Eletromagnetismo. 3. Técnicas de Apoio à Decisão. 4. Poço de Petróleo. 5. Algoritmo Genético. 6. Monte Carlo. 7. Telemetria sem fio. 8. Sensores. I. Aurélio Cavalcanti Pacheco, Marco. II. Bergmann, José Ricardo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Dedico à minha irmã, pai e mãe.

Agradecimentos

Agradeço aos meus colegas cuja ponderosa ajuda de extremo préstimo foi.

Resumo

Cunha, Alexandre Ashade Lassance; Aurélio Cavalcanti Pacheco, Marco; Bergmann, José Ricardo. **Análise da propagação eletromagnética através de poços de petróleo com auxílio de técnicas de apoio à decisão**. Rio de Janeiro, 2011. 71p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Análise da propagação eletromagnética através de poços de petróleo com auxílio de técnicas de apoio a decisão estuda a viabilidade de telemetria sem fio de fundo de poço. A dificuldade são as perdas por propagação, definindo, assim, a direção de pesquisa deste trabalho. Essa dificuldade surge devido a grande diversidade de fluidos utilizados no interior do poço, com características condutoras, tornando extremamente difícil a previsão do comportamento de propagação. O trabalho foca, então, no problema de atenuação do sinal no fluido, analisando suas causas com uso de eletromagnetismo e Monte Carlo. Primeiramente, são definidos modelos de propagação analíticos. É mostrada presença de frequências em que ocorre propagação em modo TEM e desenvolve-se, então, um modelo análogo ao de uma linha de transmissão, permitindo, assim, a utilização da teoria de circuitos elétricos. Com este modelo, estima-se a impedância de entrada do sistema, revelando que esta varia entre 10Ω e $1,0k\Omega$ a uma profundidade igual a $\lambda/4$. Além disso, com o auxílio de simulações Monte-Carlo, estuda-se a influência da permissividade e da condutividade do meio na atenuação e na impedância de entrada do sistema, concluindo que existe uma probabilidade de 95% de que a constante de atenuação seja inferior a $0,8 \cdot 10^{-4}$ Np/m em 1MHz. Posteriormente, utiliza-se algoritmo genético clássico para propor um problema de design para o posicionamento de um gerador no poço, com ótimo em torno de 29,7m de profundidade e 1MHz. Finalmente, fora analisada a possibilidade de alimentação remota, revelando que fluidos com condutividade de $1,0 \cdot 10^{-6}$ S/m permitem alimentação em profundidades elevadas.

Palavras-chave

Eletromagnetismo; técnicas de apoio à decisão; poço de petróleo; algoritmo genético; monte carlo; telemetria sem fio; sensores.

Abstract

Cunha, Alexandre Ashade Lassance; Aurélio Cavalcanti Pacheco, Marco (Advisor); Bergmann, José Ricardo. **Analysis of electromagnetic propagation through oil wells with the aid of decision support techniques**. Rio de Janeiro, 2011. 71p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Analysis of electromagnetic propagation through oil wells with the aid of decision support techniques studies the viability of wireless downhole telemetry. The difficulty is the propagation losses, thereby defining the direction of this research work. This difficulty arises because of the wide variety of fluids used in the well, with conductive features, making it extremely difficult to predict the behavior of propagation. The paper focuses then on the problem of signal attenuation in the fluid, analyzing their causes with the use of electromagnetism and Monte Carlo. First, propagation models are defined analytically. It is shown that the presence of frequencies in TEM mode propagation occurs and develops, then a model analogous to a transmission line, thus allowing the use of electrical circuit theory. With this model, we estimate the input impedance of the system, revealing which ranges from 10Ω and $1.0k\Omega$ to a depth equal to $\lambda/4$. Furthermore, with the aid of Monte-Carlo simulations, we study the influence of permittivity and conductivity of the medium in the attenuation and input impedance of the system, concluding that there is a probability of 95 % of the attenuation constant is less than $0.8 \cdot 10^{-4}$ Np / m at 1MHz. Later, we use classical genetic algorithm to propose a design problem for the positioning of a generator at the well, with excellent about 29, 7m deep and 1 MHz. Finally, the possibility was considered remote power, revealing that fluids with a conductivity of $1.0 \cdot 10^{-6}$ S / m at depths allow high power.

Keywords

Electromagnetism; support decision techniques; oil well; genetic algorithm; monte carlo; wireless telemetry; sensors.

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Telemetria sem fio de fundo de poço	13
1.2	Organização do trabalho	15
2	Modelagem Eletromagnética do Problema	16
2.1	Introdução	16
2.2	<i>Equações de Maxwell</i>	16
2.3	A equação de onda e suas soluções	19
2.4	Análise do problema para ondas harmônicas no tempo	20
2.5	Modelagem como linha de transmissão com perdas	24
2.6	Modelagem através de simulação computacional	26
3	Técnicas de Apoio à Decisão	30
3.1	Algoritmos Genéticos	30
3.2	Métodos Monte Carlo	32
4	Estudo de caso e resultados	34
4.1	Definição do problema utilizado como estudo de caso	34
4.2	Análise Monte-Carlo da propagação eletromagnética em função do fluido compositor do meio.	39
4.3	Análise estatística da atenuação e sua influência na potência de transmissão mínima.	43
4.4	Análise da impedância de entrada do sistema coaxial.	50
4.5	Análise do comportamento de modos superiores de propagação.	55
4.6	Análise da possibilidade de alimentação através de energia eletromagnética.	57
5	Conclusões	63
5.1	Resumo do trabalho	63
5.2	Conclusões finais e trabalhos futuros	65
A	Significados e definições dos símbolos utilizados	71
A.1	Símbolos básicos	71
A.2	Conjuntos	71
A.3	Operadores básicos	71

Lista de figuras

2.1	Modelo físico do poço adotado para simulação.	28
4.1	Variação da resistividade com a frequência, para 19 composições químicas de fluido [1].	35
4.2	Variação da permissividade elétrica relativa com a frequência de propagação.	36
4.3	Variação da permissividade relativa com a temperatura. [1]	38
4.4	Variação da permissividade relativa com a temperatura. [1]	38
4.5	Gráfico da probabilidade acumulada da condutividade efetiva na frequência de 1MHz, comparando com uma distribuição normal. Nota-se que, para 95% dos casos, a condutividade é inferior a $0,8 \cdot 10^{-4}$ S/m a 1MHz. Valores negativos devem ser ignorados.	40
4.6	Histograma da condutividade efetiva na frequência de 1MHz, comparando com uma distribuição normal.	41
4.7	Box plot mostrando como a frequência de propagação influencia na condutividade. Note que o aumento da frequência aumenta o desvio padrão da condutividade, bem como seu valor médio.	42
4.8	Gráfico da probabilidade acumulada da permissividade relativa na frequência de 1MHz, comparando com uma distribuição normal. Nota-se que, para 95% dos casos, a permissividade é inferior a 11,5 S/m a 1MHz.	43
4.9	Histograma da permissividade relativa real na frequência de 1MHz, comparando com uma distribuição normal. Note que a permissividade relativa apresenta características de distribuição uniforme fortes na faixa de 3 a 12.	44
4.10	Histograma da permissividade relativa real na frequência de 100MHz, comparando com uma distribuição normal. Note que a permissividade relativa apresenta características de distribuição uniforme fortes na faixa de 5 a 13.	45
4.11	Box plot mostrando como a frequência de propagação influencia na permissividade relativa. Note que o aumento da frequência não aumenta o desvio padrão da permissividade, mas desloca seu valor médio.	46
4.12	Box plot mostrando como a frequência de propagação influencia na constante de atenuação. Valores que aparecem no gráfico como outliers são oriundos de combinações fortemente improváveis das variáveis aleatórias do problema, provavelmente fisicamente não realizáveis e, sendo assim, devem ser desprezadas.	47
4.13	Box plot mostrando como a frequência de propagação influencia na constante de fase.	48
4.14	Gráfico da probabilidade acumulada da constante de atenuação na frequência de 1MHz, comparando com uma distribuição normal. Nota-se que, para 95% dos casos, a constante de atenuação é inferior a $3,0 \cdot 10^{-3}$ Np/m a 1MHz.	49

- 4.15 Gráfico da probabilidade acumulada do comprimento de onda na frequência de 1MHz, comparando com uma distribuição normal. Nota-se que, para 95% dos casos, o comprimento de onda é inferior a 170m a 1MHz. 50
- 4.16 Gráfico da probabilidade acumulada da resistência de entrada na frequência de 1MHz, a uma distância de 32,5m do topo do poço, comparando com uma distribuição log-normal. Nota-se que a resistência de entrada varia entre 10Ω e $1,0k\Omega$ para 90% dos casos. 52
- 4.17 Gráfico da probabilidade acumulada da reatância de entrada na frequência de 1MHz, a uma distância de 32,5m do topo do poço, comparando com uma distribuição normal. Nota-se que a resistência de entrada varia entre $-1,5k\Omega$ e $1,5k\Omega$ para 90% dos casos. 53
- 4.18 Atenuação experimentada pelo modo $TM_{0,0}$, supondo $\sigma_s = 10^{-6}$ S/m e $\epsilon'' = 10^{-13}$ F/m. Repare a presença de uma frequência de corte, a qual delimita uma transição forte entre altas e baixas constantes de atenuação. 57
- 4.19 Boxplot mostrando a posição de 11 primeiros máximos de potência, na frequência de 1MHz. 59

Lista de tabelas

2.1	Descrição da notação dos campos.	17
2.2	Definições dos parâmetros constituintes dos meios 1 e 2.	21
4.1	Valores típicos extraídos para as amostras da figura 4.1.	35
4.2	Valores típicos extraídos para as amostras da figura 4.2.	36
4.3	Exemplo de variação de condutividade efetiva em S/m com a temperatura, dada aqui em graus Celsius, para três distintas amostras de fluido.	37
4.4	Exemplo de variação de permissividade relativa, com a temperatura. Todos os dados foram extraídos a 10MHz.	37
4.5	Modelos típicos da variação com a temperatura.	39
4.6	Distribuições de probabilidade adotadas para cada um dos parâmetros relevantes.	40
4.7	Atenuação experimentada em 1MHz. Os valores representam o limite superior da atenuação para 95% dos casos.	44
4.8	Exemplo de sensibilidade típica de equipamentos de recepção em função da taxa de transmissão, supondo uma probabilidade de erro de bits (TEB) igual a 10^{-5} ou 0,001%. [2]	46
4.9	Potência mínima necessária no transmissor, assumindo margem de 10dB, limiar de recepção de -89dBm , relação sinal ruído maior do que 65dB, taxa de transmissão inferior a 1kBit/s e banda igual a 1kHz.	49
4.10	Parâmetros utilizados pelo GA. Note que a distância está sendo medida em decímetros e com o uso de números interiores.	54
4.11	Resultado da otimização: conjunto de pareto ótimo para o problema.	54
4.12	Valores de $\beta_\rho^{(1)}$ assumindo $2a = 0,1\text{m}$ e $2b = 0,2\text{m}$. A ordem da função de Bessel é dada pela variável m , na horizontal. Para uma dada coluna, n representa a ordem ou ordenamento do zero. Vale lembrar que existem infinitos zeros.	56
4.13	Espaçamento entre os sensores da rede de sensores. Note que, com esta distribuição, sempre haverá algum sensor cuja posição está próxima a um máximo.	60
4.14	Potência presente na seção transversal onde o sensor está posicionado. As simulações foram conduzidas em 1MHz, num meio de condutividade efetiva igual a $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ S/m}$ e $\epsilon'_R = 5$. As colunas "Tempo" e "Frequência" indicam os resultados das simulações no domínio do tempo e no domínio da frequência.	61
4.15	Potência disponível no receptor, após ser recebida e reenviada pelo sensor.	62

*A mente que se abre a uma nova idéia jamais
voltará ao seu tamanho original.*

Albert Einstein