

5 Conclusões

5.1

Resumo do trabalho

O trabalho focou na análise da propagação eletromagnética em meios dielétricos com condutividade considerável. Avaliou-se a possível comunicação a quilômetros de profundidade, e a possibilidade animadora de utilizar o próprio sinal eletromagnético como fonte de energia para dispositivos de baixo consumo posicionados nesta profundidade.

Primeiramente, este trabalho dedicou-se ao estudo teórico do meio de propagação. Foi mostrado que o meio comporta-se como um cabo coaxial, blindado em uma das extremidades e preenchido com um dielétrico não ideal. Posteriormente, a solução teórica da equação de onda através do uso de potenciais vetoriais elétricos mostrou que é possível propagar modos TEM, TE e TM no interior do poço. Além disso, foi mostrado que infinitos modos TE e TM existem e estão presentes.

Com o auxílio das expressões deduzidas para os modos TM e TEM, ficou claro que o modo TEM apresenta a menor atenuação por metro na direção de propagação, o que classificou este modo como o ideal. Como confirmação numérica, foi plotado o gráfico da figura 4.18, que confirmou o fato. Além disso, o gráfico revelou que existe uma frequência na qual os modos superiores apresentam atenuação mínima, mas, ainda assim, superior à atenuação experimentada pelo modo TEM na mesma frequência.

Ainda no capítulo 2, foi deduzido um modelo equivalente a uma linha de transmissão, para o modo TEM. Neste modelo, é possível prever a impedância de entrada para uma posição z conhecida dentro do poço. Ainda com este modelo, é possível estimar o coeficiente de reflexão de potência na interface de separação entre o meio 1 e o meio 2.

Devido à sua simplicidade, o modelo de linha de transmissão foi aplicado em grande quantidade para estudar o comportamento do poço como meio de propagação. Sempre que possível, foi feita uma comparação com simulação computacional utilizando o método FDTD e o método FIM. O objetivo era

analisar a propagação sob 2 aspectos: atenuação devido à condutividade do dielétrico no interior e variação da impedância de entrada do sistema em função das diversas composições de fluidos possíveis no interior do poço.

A ferramenta adotada para analisar sob diversas combinações de fluido é a análise estatística através de método Monte-Carlo. Com tal método, é possível estimar a distribuição de variáveis aleatórias dependentes de parâmetros aleatórios do meio. Por isso, foram definidos 11 parâmetros aleatórios, os quais modelam como a condutividade e a permissividade variam na frequência e entre amostras distintas de fluido. Além disso, a alteração dos parâmetros do meio com a temperatura também fora considerada através do uso de uma temperatura média, cujo valor é aleatório.

Através da modelagem adotada, concluiu-se que, para 95% dos casos, a constante de atenuação no modo TEM é inferior a $0,8 \cdot 10^{-4}$ Np/m, em 1MHz. Posteriormente, foi ilustrado, através de um boxplot, como varia a constante de atenuação do meio com a frequência. Como era esperado, o aumento da frequência provoca um aumento da média desta constante, bem como do seu desvio padrão, o que é indesejado. Conclui-se, então, que a redução da frequência de operação é uma necessidade.

Com estas informações em mãos, fora feito um estudo da atenuação máxima experimentada, em função da profundidade, para 95% das possibilidades de fluido. Conforme fora concluído no capítulo, facilmente existirá comunicação para profundidades de até 4000m, desde que se use receptores com sensibilidade de -89 dBm ou melhor.

Na seção seguinte, este trabalho caiu na preocupação de estudar a impedância de entrada enxergada por um transmissor postado em uma posição especificada. Esta impedância é de grande importância para o projeto de um circuito de casamento entre as antenas e os alimentadores.

Utilizando as equações para impedância de linha de transmissão, como definidas no capítulo 2, descobriu-se que a resistência de entrada a um quarto de comprimento de onda do topo é variante de 10Ω a $1,0k\Omega$, devido à grande diversidade de incertezas do problema. A conclusão foi obtida, mais uma vez, através de análise Monte-Carlo, aplicada a expressão da impedância de entrada da linha de transmissão. Além disso, fora proposto um problema de otimização, cujo alvo era minimizar a parte imaginária da impedância de entrada em comparação à parte real sua, bem como os desvios padrões das partes real e imaginária.

Foi usado, então, um algoritmo genético clássico, liberado a mexer na frequência de propagação e na posição do gerador no topo do poço. Utilizando o critério de Pareto, o problema multiobjetivo se resolve revelando 14 pares de

frequência e posição, sendo que 4 delas se destacam, com frequência próxima de 1MHz e a, aproximadamente, 25 metros do topo.

Continuando com o estudo do problema, a dedicação de uma seção ao estudo dos modos superiores de propagação tornou-se proveitosa. Foi deduzido, na seção, a atenuação de cada modo como função da frequência. A análise, então, revelou a existência de uma frequência cuja atenuação do modo superior é mínima: acima desta frequência, a atenuação cresce devido ao aumento da condutividade efetiva; abaixo, a onda aproxima-se de uma propagação evanescente e, por isso, tem grande atenuação.

Mostra-se, também, que o modo TEM é sempre menos atenuante que os modos superiores, sendo, então, o modo desejável de propagação.

Por fim, fora analisada a possibilidade de alimentação remota de dispositivos posicionados no fundo do poço. Através de simples dedução matemática, utilizando o modelo de linha de transmissão, fora visto que existem pontos especiais ao longo do poço, onde a potência recebida é máxima. Foi mostrado que esses pontos sofrem forte variação de posição com a mudança de permissividade elétrica do meio. Como alternativa, este trabalho expôs uma técnica simples: utilização de uma rede de sensores, com espaçamento calculado de modo a sempre haver algum sensor próximo a um máximo de energia.

Com auxílio de simulação pelos métodos FDTD e FIT, a equação de onda fora resolvida no domínio do tempo e no domínio da frequência. Munido dos resultados, para um tipo específico de fluido, fora feito um balanço de potência, para avaliar o nível de energia que chega ao topo do poço, vindo do sensor. Foi mostrado que, para 7000m de profundidade, chega ao receptor no topo aproximadamente 6,1mW, mais do que o suficiente para obter comunicação, assumindo transmissão de 1W. Entretanto, vale ressaltar que este valor fora determinado com base em um fluido de baixa condutividade: $1,0 \cdot 10^{-6}$ S/m, mas perfeitamente plausível.

5.2

Conclusões finais e trabalhos futuros

Os resultados deste trabalho revelaram possibilidade de comunicação há quilômetros de profundidade, sob condições aqui especificadas. Embora os modelos adotados sejam aproximados, ficou claro que a idéia de uma comunicação sem fio por poços de petróleo não é surreal. Pelo contrário: segundo o modelo sob incertezas deste trabalho, é relativamente simples obter comunicação no sentido sensor \rightarrow receptor para profundidades inferiores a 4000m, para uma ampla multiplicidade de meios de propagação.

Mesmo considerando a restrição de alimentação eletromagnética, ainda

assim é possível obter comunicação, desde que se utilize sensores de baixo consumo e fluidos de baixa condutividade.

Vale lembrar, ainda, que este trabalho não fez nenhum projeto ou síntese. O problema de síntese, entretanto, decorre do problema de análise, utilizando os resultados apresentados neste trabalho. Após definida a frequência de propagação (com base nos resultados aqui obtidos), deve-se partir para a otimização do circuito de casamento e o tipo e quantidade de antenas presente no sensor e no transmissor. O design do sensor e do transmissor representa, por si só, dois desafios de engenharia eletrônica e de telecomunicações da magnitude de teses de doutorado.

A direção óbvia, portanto, desta pesquisa é a síntese de um sistema de transmissão robusto o suficiente para operar mediante variações grandes de meios de propagação, de modo a capacitá-lo para diversos tipos de poços. Precisa-se, para isto, desenvolver um modelo, de preferência analítico, rápido de simular e que descreva, com precisão razoável, a propagação de ondas eletromagnéticas em um sistema real.

Do ponto de vista eletromagnético, deve-se levar em consideração a solução mais geral da equação de onda, com fontes e modos superiores. Deve-se considerar, também, a presença de reflexões na interface de separação entre os meios, a presença de elementos que prejudicam a propagação, como packers e ainda a existência de poços não verticais, como os poços multilaterais. Além disso, deve-se considerar que o meio é, de fato, não-homogêneo, porque a variação da temperatura interna provoca sensíveis variações na condutividade efetiva do dielétrico que o preenche.

Tudo isto deve ser considerado de modo a conseguir um modelo preciso. Pode-se partir da solução analítica para o caso simplificado, utilizar simulação computacional detalhada como controle e calibrar, então, uma função de ajuste ao modelo analítico, utilizando um aproximador, tal como redes neurais ou caos polinomial. Esta abordagem, no entanto, exige conhecimento profundo de análise funcional, sendo, assim, uma grande pesquisa por si só.

Com este modelo analítico mais preciso, as técnicas e análises colocadas aqui neste trabalho devem ser repetidas. Além disso, deve-se, então, partir para uma otimização que leve em conta as estruturas de casamento dos sensores e do receptor / transmissor. Por ser um problema sofisticado de otimização sob incertezas, que provavelmente tem discontinuidades, deve-se utilizar uma técnica de otimização com restrições capaz de lidar com algo do tipo. Dentre as técnicas, algoritmos genéticos quânticos [29] e coevolucionários se destacam e já foram utilizados com sucesso na literatura para problemas igualmente complexos [30].

Fica claro, então, que esta pesquisa abre as portas para o uso de técnicas de apoio a decisão no problema de propagação eletromagnética através de poços de petróleo. Direções futuras foram dadas e constituem um promissor ramo de pesquisa.