

Modelo Empírico-Estatístico de Canal para Comunicações em Minas Subterrâneas

Josua Peña Carreño, Adoniran Judson Braga, André Noll Barreto e Leonardo Aguayo

Resumo—This paper presents an empirical-statistical model for the TTE propagation channel based on measurements performed in coal mines. The model uses normalized magnetic field data to characterize the behavior of the median propagation loss as a function of depth and frequency, as well as the equivalent conductivity and its probability distribution. It also proposes a model of the median behavior of optimal operating frequency depending on depth that can be used as the initial configuration parameter in TTE communication systems.

Keywords—Mine Communications, Through-The-Earth Communications, Propagation Models, Optimum Operating Frequency.

Resumo—Este artigo apresenta um modelo empírico-estatístico de canal de propagação para sistemas TTE baseados em medidas realizadas em minas de carvão. O modelo tenta caracterizar o comportamento mediano da perda de propagação com a profundidade e frequência, assim como a condutividade equivalente e sua distribuição probabilística, a partir dos dados normalizados da atenuação do campo magnético. Também é proposto um modelo da mediana da frequência ótima de operação em função da profundidade, que pode ser usada como parâmetro inicial na configuração de sistemas de comunicação TTE.

Palavras chaves—Comunicações em Minas, Comunicações TTE, Modelos de Propagação, Frequência de Operação Ótima.

I. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos sistemas de comunicação sem fio utiliza topologias de comunicação em radiofrequência (RF) com características elétricas do meio próximas as do vácuo. Em ambientes de propagação em que o meio possua condutividade elétrica não desprezível, o uso de sinais em alta frequência se torna inviável. A comunicação através da terra (TTE - do inglês *Through The Earth*) é uma solução prática de enlace de comunicação entre ambientes subterrâneos e a superfície. Sistemas baseados em comunicação TTE são mais robustos a acidentes no interior de minas comparados a redes primárias baseadas em transmissão via cabos ou ar. A transmissão TTE é normalmente feita por indução magnética em frequências abaixo de 30 kHz, sujeita a ruídos atmosféricos e a harmônicos produzidos por equipamentos, limitando o desempenho de comunicação, especialmente no enlace de subida [1].

Em minas de carvão, a máxima profundidade em que é possível se realizar comunicação TTE depende da frequência

e da condutividade elétrica equivalente. Esta condutividade equivalente se refere a um valor fictício de condutividade calculado a partir de modelos simplificados e valores de campo medidos e é, normalmente, válida para minas, profundidades e frequências específicas. Objetiva-se neste trabalho apresentar modelos estatísticos baseados em medidas que possam ser úteis para o ajuste dos parâmetros de comunicação entre antenas coaxialmente alinhadas em minas de carvão, como o comportamento mediano da perda de propagação e o cálculo da frequência ótima.

Nos anos 70 e 80, o *Bureau of Mines* dos Estados Unidos mediu a intensidade de campo magnético para comunicação TTE para frequências entre 630 e 3030 Hz em 94 minas de carvão distribuídos em todo os Estados Unidos [2]. Usando parte desses dados (27 minas), Durkin [3] estimou a condutividade equivalente baseada no modelo de Semi-Espaço Homogêneo (SEH) [4]. Os resultados levaram à conclusão de que haveria uma condutividade equivalente decrescente em função do aumento da frequência e profundidade. Com o intuito de modelar analiticamente este comportamento, Hill e Wait então propuseram o modelo de Lâmina Fina para emular a presença de materiais condutores nas camadas superiores, como placas e canos metálicos, cabos, ou solo de alta condutividade devido à salinidade próximos à superfície [5]. Ajustando os parâmetros apropriados da lâmina condutora e do solo abaixo dela, seria possível estimar a variação do campo magnético. Muitos anos depois, Lincan [6] analisou os dados provenientes de todas as 94 minas de carvão para determinar a condutividade equivalente do subsolo baseada nos modelos de Semi-Espaço Homogêneo, de Lâmina Fina e uma combinação dos dois, chamada de modelo de fator Q, usados para prever a dependência da condutividade equivalente em relação à frequência e profundidade.

Todos os modelos mencionados acima tentam investigar o comportamento de um ambiente complexo, composto por inúmeros materiais, utilizando-se equações baseadas em 2 ou 3 camadas homogêneas apenas. Sem forçar parâmetros específicos, como valores fictícios de condutividade de camadas superiores, não há como modelos simplificados traçarem o comportamento real do canal. Lincan também propôs um modelo analítico mais elaborado e complexo que caracteriza o meio de propagação como um solo estratificado com diferentes condutividades elétricas para cada camada horizontal [7]. No entanto, devido à grande complexidade do modelo, ele foi publicado pelo autor para apenas 3 camadas.

Este estudo objetiva a caracterização empírica-estatística da atenuação do campo magnético e da condutividade elétrica equivalente em minas subterrâneas de carvão mencionadas

Josua Peña Carreño, Adoniran Judson Braga, André Noll Barreto e Leonardo Aguayo, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília - UnB, Brasília-DF, Brasil, E-mails: josua.d.pena@ieee.org, jbraga@ene.unb.br, andrebarreto@ene.unb.br, aguayo@unb.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV).

acima [2]. O modelo traz o comportamento mediano dessas medidas através de regressões, assim como suas variabilidades em função de frequência e profundidade a partir de distribuições de probabilidade. Essas análises estatísticas não são contempladas nos estudos acima. A condutividade equivalente, neste trabalho, é baseada no modelo de Semi-Espaço Homogêneo. Com isso, nenhuma suposição de alta condutividade para camadas superiores é tomada. Apesar de não mencionados neste trabalho, outros resultados de pesquisa, em vias de publicação, mostram a não efetividade do modelo de Lâmina Fina. Aqui, a condutividade equivalente calculada não serve para ser usada como parâmetro de comunicação em determinada mina, e sim para possibilitar análises que respondam o comportamento estatístico de comunicação em minas de carvão em geral. Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II traz os modelos de campo magnético usados como base neste estudo; a Seção III traz a elaboração matemática para o cálculo da perda de propagação; seguida, na Seção IV, de como os dados foram tratados. A Seção V mostra o estudo estatístico referente à condutividade equivalente; enquanto que o modelo proposto de perda de propagação e frequência ótima medianas são apresentadas na Seção VI. Por fim, breves considerações encerram este artigo na Seção VII.

II. CENÁRIO E MODELO BASE DE CAMPO MAGNÉTICO

Devido às características intrínsecas do solo, sobretudo a sua condutividade, o campo magnético decai exponencialmente com a distância percorrida através do meio material e esse decaimento pode ser expressado em função da profundidade pelicular δ (*skin depth* em inglês). Para um meio condutivo uniforme, a profundidade pelicular é a distância na qual a intensidade de uma onda plana se propagando, decai em e^{-1} do seu valor. Também, num meio condutivo a profundidade pelicular é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência. Essas frequências são, usualmente, VLF (3-30 kHz) e, em alguns casos, LF (30-300 kHz) [8].

De acordo com o modelo analítico de Semi-Espaço Homogêneo de Wait, descrito em coordenadas cilíndricas (ρ, ϕ, z) , uma pequena antena de fio em forma de laço no plano horizontal, a uma altura h_0 sobre o chão e imerso no ar, produz campo magnético \mathbf{H} a uma distância vertical h abaixo da superfície, em subsolo composto por material homogêneo de condutividade σ . O modelo também prevê configurações do tipo *uplink* e transmissão não verticais ($\rho \neq 0$) introduzindo a componente ortogonal do campo. Qualquer corrente de deslocamento é desprezada assumindo que todas as distâncias envolvidas são menores que o comprimento de onda no espaço livre. Portanto, as componentes radial $\hat{\rho}$ (horizontal) e de profundidade \hat{z} (vertical) dos campos magnéticos para *uplink* e *downlink* são dados, respectivamente, por:

$$H_{up} = \frac{m_d}{2\pi h^3} \int_0^\infty \beta(x) \{J_0(Dx)\hat{z} - J_1(Dx)\hat{\rho}\} dx, \quad (1)$$

$\delta = \frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}$ onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, σ a condutividade elétrica do solo, ω a frequência angular

$$H_{down} = \frac{m_d}{2\pi h^3} \int_0^\infty \beta(x) \{J_0(Dx)\hat{z} - J_1(Dx) \frac{(x^2 + j2\mathcal{T}^2)^{1/2}}{x} \hat{\rho}\} dx, \quad (2)$$

em que

$$\beta(x) = \frac{J_1(Ax)}{Ax/2} \frac{x^3}{(x^2 + j2\mathcal{T}^2)^{1/2} + x} e^{-Zx} e^{-(x^2 + j2\mathcal{T}^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

e $A = a/h$, $D = \rho/h$, $Z = h_0/h$, $\mathcal{T} = h/\delta$, $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$, a é o raio do *loop*, J_0 e J_1 são funções de Bessel do primeiro tipo, e o momento magnético $m_d = N_{tx} S_{tx} I_{tx}$ indica a força de transmissão de uma antena *loop* em função do número de voltas do *loop* N_{tx} , de sua área S_{tx} e da magnitude de corrente I_{tx} . A figura 1 apresenta a dita configuração.

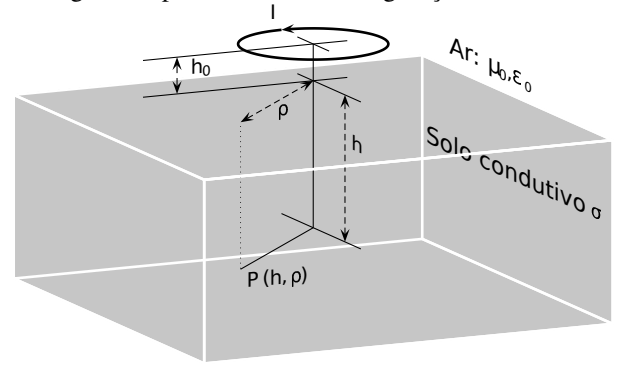


Fig. 1: Geometria usada para o cálculo do campo magnético no ponto $P(h, \rho)$ gerado por uma antena *loop* colocada a uma distância h_0 sobre o solo.

Pode se perceber que existe reciprocidade entre os dois links para o campo vertical, mas não para o campo horizontal que, na verdade, pode ser ignorada na configuração em que as antenas são coaxialmente alinhadas, isto é, quando $\rho = 0$ fazendo $J_1(Dx) = 0$.

III. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CANAL E PERDA DE PROPAGAÇÃO

Em sistemas que operam em frequências moderadamente baixas, é mais comum a utilização de tensão e corrente para parametrizar quadripolos e, conseqüentemente, parâmetros baseados em impedância são utilizados neste modelo. Para analisar o canal de propagação em frequências inferiores a 30 kHz, é útil adotar o conceito de impedância de transferência entre *loops*, que considera a corrente fasorial $I_{tx}(\omega)$ no circuito de transmissão e a tensão induzida $V_{rx}(\omega)$ na antena de recepção:

$$Z(\omega) = V_{rx}(\omega)/I_{tx}(\omega). \quad (4)$$

De acordo com a lei de Faraday, a tensão induzida por um campo magnético que passa através de um *loop* condutor fechado depende da variação temporal do fluxo magnético que entra no *loop* ortogonalmente [9]. Como resultado, a tensão induzida na antena de recepção em função do campo magnético é dada por:

$$V_{rx}(\omega) = -j\omega N_{rx} \int_S \mu \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} \quad (5)$$

$$= -j\omega \mu N_{rx} S_{rx} H \cos(\varphi),$$

em que N_{rx} e S_{rx} são o número de voltas e a área do circuito de recepção, respectivamente, e φ é o ângulo entre o vetor resultante do campo magnético e o eixo do *loop*, que é ortogonal ao seu plano. Vemos em (5) que, embora o campo seja atenuado para altas frequências, o receptor faz com que o sinal de saída também seja atenuado para baixas frequências. Expressando \mathbf{H} em coordenadas cilíndricas, a tensão induzida em função dos campos \mathbf{H}_z , na direção \hat{z} , e \mathbf{H}_ρ , na direção $\hat{\rho}$, é dada por:

$$V_{rx}(\omega) = -j\omega \mu N_{rx} S_{rx} [H_z \cos(\theta_x) \cos(\theta_y) + H_\rho \sin(\theta_x) \cos(\theta_y)], \quad (6)$$

em que θ_x e θ_y são ângulos de *tilt* referentes ao plano vertical entre as duas antenas. Para aproximações do campo que usam o modelo de semi-espaço homogêneo (SEH), a impedância de transferência $Z(\omega)$ e as funções de transferência $F_z(\omega)$ e $F_\rho(\omega)$ são dadas, respectivamente, por:

$$Z(\omega) = N_{tx} N_{rx} S_{tx} S_{rx} \left[\sqrt{G_z^{rx}} F_z(\omega) + \sqrt{G_\rho^{rx}} F_\rho(\omega) \right], \quad (7)$$

$$F_z(\omega) = -j \frac{\mu\omega}{m_d} H_z(\omega), \quad (8)$$

$$F_\rho(\omega) = -j \frac{\mu\omega}{m_d} H_\rho(\omega), \quad (9)$$

em que $G_z^{rx} = \cos^2(\theta_x) \cos^2(\theta_y)$ e $G_\rho^{rx} = \sin^2(\theta_x) \cos^2(\theta_y)$.

Considerando que as antenas de transmissão e recepção estejam coaxialmente alinhadas,

$$Z(\omega) = N_{tx} S_{tx} N_{rx} S_{rx} F_z(\omega), \quad (10)$$

e considerando o campo magnético normalizado como o campo por unidade de momento magnético,

$$H_n(\omega) = \frac{H_z(\omega)}{m_d} = \frac{H_z(\omega)}{N_{tx} S_{tx} I_{tx}(\omega)}, \quad (11)$$

a função de transferência do canal pode ser calculada mediante:

$$F_z(\omega) = -j\omega \mu H_n(\omega). \quad (12)$$

A perda de propagação na transmissão coaxial pode ser encontrada usando $L(\omega) = 1/|F_z(\omega)|^2$, o que dá, em dB:

$$L(\omega)_{dB} = -H_n(\omega)_{dB} - 20 \log \omega \mu. \quad (13)$$

O comportamento do canal tende a ser semelhante a um filtro passa-banda que, por consequência, possui uma frequência de transmissão ótima, em que a perda de propagação é mínima.

IV. MODELO DE DADOS

A forma mais prática de se estimar a condutividade elétrica em minas subterrâneas é através do uso modelos analíticos simplificados empregados em medidas de campo magnético. Dados de campo presentes em [2] são o mais completo banco do tipo que se possa encontrar na literatura até agora. Elas representam, em sua grande maioria, medidas em *downlink*, e algumas poucas em *uplink*. Como mostrado anteriormente na seção II, a medida de campo quando $\rho = 0$ (campo apenas vertical) não deve se alterar em função do sentido de transmissão. As intensidades de campo \mathbf{H} ali presentes foram usadas para construir um banco de dados de condutividade equivalente para as frequências de 630, 1050, 1950 e 3030 Hz através do modelo SEH. Os dados brutos de intensidade de campo são normalizados pelo momento magnético configurado para cada medida, como em (11) da seção III. As tabelas em [2] devem ser rearranjadas e adaptadas de forma a considerar as profundidades em metros, e o campo magnético e momento magnético em uma mesma escala, a fim de proceder a normalização.

Visto a complexidade das integrais em (1) e (2), a estimação da condutividade equivalente não pode ser obtida de forma direta e analítica. Curvas de campo servem de mapas de referência para a escolha mais adequada da condutividade equivalente. Essas curvas, ou tabelas de pesquisa, devem considerar como entrada variável, além da intensidade de campo, a profundidade e a frequência de operação. A Figura 2 mostra a estimativa da condutividade equivalente para todas as medidas, independente de frequência ou profundidade, e observa-se como esta pode variar de valor em mais de 500 vezes, mesmo sendo todas referentes à minas de carvão.

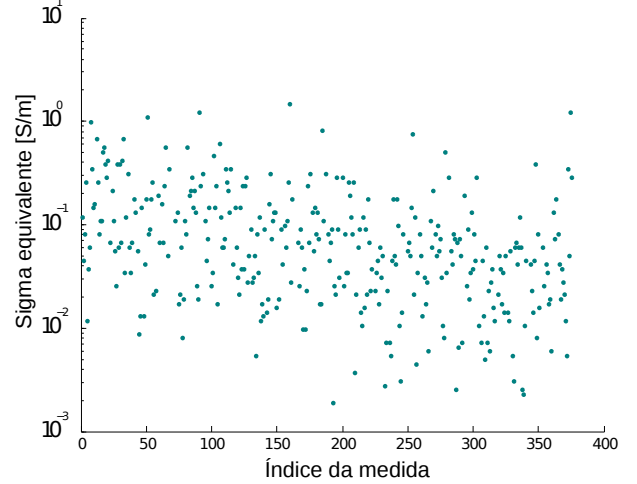


Fig. 2: Condutividades para todas as frequências e profundidades

V. MODELAGEM ESTATÍSTICA

Os modelos de condutividade equivalente em [10] e [7] são úteis para serem aplicados especificamente para determinada mina. Busca-se na modelagem proposta encontrar o comportamento estatístico da intensidade de campo e condutividade equivalente. Algumas distribuições da condutividade equivalente foram analisadas, onde os dados são separados em função da frequência e/ou profundidade ou simplesmente não são distinguidos por qualquer parâmetro.

Apesar da condutividade equivalente claramente variar em função de frequência e profundidade, visto que é calculada a partir de um modelo de duas camadas, a distribuição simplificada considerando todas as amostras pode ser útil em situações que se quer estimar a condutividade do material em si que, na prática, é independente de profundidade e frequência.

A. Estimação da condutividade elétrica considerando todas as medidas

Inicialmente, a distribuição da condutividade equivalente para todas as frequências e profundidades é estimada e, comparando-se a raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre esta e diversas distribuições analíticas, foi identificada a distribuição Log-Normal com parâmetros $\mu_{ln} = -2.87$ e $\sigma_{ln} = 1.27$ com o menor erro RMSE, na ordem de 6×10^{-3} . A Figura 3 apresenta as funções de densidade de probabilidade (PDF) analítica e o histograma das condutividades estimadas.

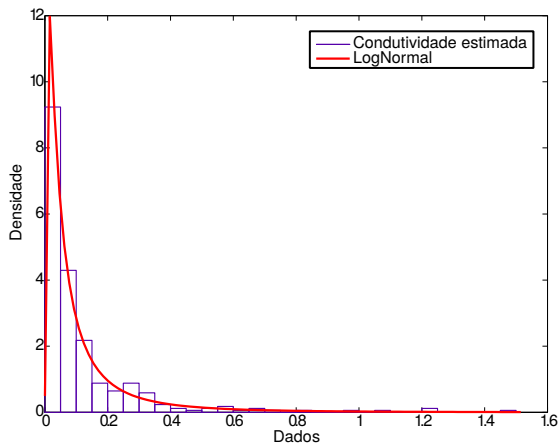


Fig. 3: PDF da condutividade equivalente para todas as frequências e profundidades e a distribuição de melhor ajuste.

Em outros estudos realizados pelos autores, em via de publicação, esta distribuição e parâmetros foram usados para configurar um modelo geométrico estocástico por meio de simulação eletromagnética. Os resultados de variação de campo neste estudo mostrou boa adequação estatística com os dados de campo medidos.

B. Estimação da condutividade elétrica equivalente em função da frequência

Considerando todas as distâncias em que o campo magnético foi medido, estimou-se a condutividade equivalente para cada frequência. A partir desta estimação foi possível inferir que a condutividade reduz quando a frequência aumenta. Tal comportamento pode ser associado a diferentes condições de campo (quase-estático, de transição, de campo distante, etc.) sofridas pelos campos com diferentes frequências em que modelos simples, como SEH não podem responder. A Figura 4 apresenta as condutividades equivalentes normalizadas para cada frequência através dos parâmetros μ_{ln} e σ_{ln} da distribuição Log-Normal.

C. Estimação da condutividade elétrica equivalente em função da profundidade da mina e da frequência

É importante também estimar a variação da condutividade em função da profundidade da mina e da frequência. Devido

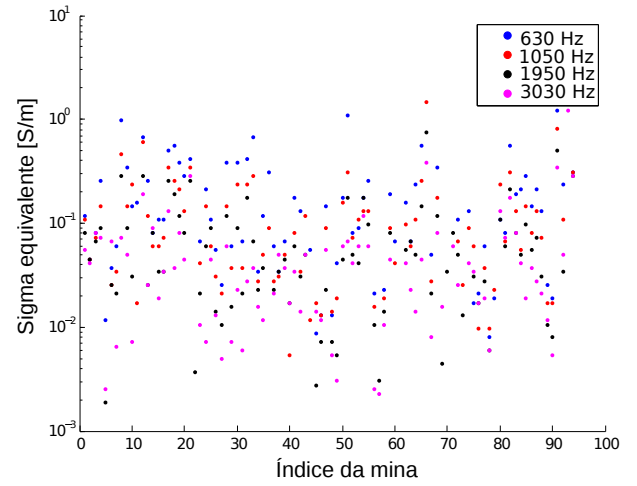


Fig. 4: Condutividades equivalentes normalizadas em frequência para todas as profundidades

à distribuição de profundidades no banco de dados, foram calculadas diferentes distribuições estatísticas para três grupos de profundidades como pode se observar nas tabelas I e II. O agrupamento de profundidades não foi uniforme devido a um número muito menor de medidas realizadas acima de 300 metros, o que nos levou a formar o terceiro grupo com uma abrangência maior de profundidades. De acordo com os resultados das tabelas, a condutividade equivalente mediana ($e^{\mu_{ln}}$) diminui à medida que a profundidade aumenta. Estas condutividades mais elevadas encontradas em profundidades mais baixas são geralmente justificadas pela presença de equipamentos e cabos metálicos e a maior salinidade do solo próxima à superfície. No entanto, resultados de simulação, em outros estudos dos autores, mostram que a dependência da condutividade equivalente em profundidade também é verdade mesmo quando não há qualquer camada superior com maior condutividade. Em condições de multi-camada, as transições através de várias camadas parecem causar mais atenuação do campo quando se está na zona quase-estática ou de transição, o que conduz a uma estimativa pessimista de condutividade aparente para medições em profundidades inferiores. Pela Tabela II não consegue-se cravar um padrão de crescimento ou diminuição da variabilidade da condutividade equivalente em função da frequência ou profundidade, podendo-se mesmo considerar, a grosso modo, que o parâmetro (σ_{ln}) é relativamente estável.

Tabela I: Parâmetro μ_{ln} da distribuição Log-Normal da condutividade equivalente.

Frequência [Hz]	D: 0 a 100 m	D: 100 a 200 m	D: 200 a 500 m
630	-1.12	-2.2042	-3.3967
1050	-1.7223	-2.7709	-3.4683
1950	-2.1317	-3.2491	-4.1733
3030	-2.699	-3.5825	-4.1933

Tabela II: Parâmetro σ_{ln} da distribuição Log-Normal da condutividade equivalente.

Frequência [Hz]	D: 0 a 100 m	D: 100 a 200 m	D: 200 a 500 m
630	0.77296	0.80186	1.0242
1050	1.0706	0.83934	0.84134
1950	0.92617	0.96328	1.0428
3030	1.2674	0.97317	1.069

VI. PERDA DE PROPAGAÇÃO MEDIANA E FREQUÊNCIA ÓTIMA MEDIANA

Em diversos modelos empíricos disponíveis na literatura, a perda de propagação mediana do canal, normalmente estimada de dados empíricos e dependente de determinado tipo de ambiente de propagação, serve de orientação para o ajuste de potência de transmissão num enlace de comunicação. A perda mediana da propagação pode ser estimada para comunicação TTE em minas de carvão para a faixa de frequência das medidas obtidas a partir dos dados de campo normalizado. Usando-se técnicas de regressão, um modelo de campo magnético mediano $H_{50}(h, f)$, em função da profundidade e frequência, é extraído dos dados. A partir da equação da mediana do campo e de (13), a equação da mediana da perda de propagação pode ser estimada via:

$$L_{50}(h, \omega)_{dB} = 20[a_1 + a_2 \log(\omega) + a_3 \log(h) + a_4 \hat{T} \log(e)], \quad (14)$$

em que, $a_1 = 10.85$, $a_2 = -1.61$, $a_3 = 2$ e $a_4 = -0.71$, $\hat{T} = h \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$ e $\bar{\sigma} = e^{-2.87} = 0.057$, apenas representa a mediana da distribuição da condutividade equivalente considerando todas as frequências e profundidades, apresentada no início da Seção V. A equação acima possui comportamento de filtro passa faixa, podendo-se buscar a frequência ótima de menor perda de propagação para transmissão a partir de (14). Derivando (14) têm-se:

$$\frac{d}{d\omega} L_{50}(h, \omega) = 20 \left[a_2 \log(e) \frac{1}{\omega} - a_4 \hat{T} \log(e) \frac{1}{2\sqrt{\omega}} \right], \quad (15)$$

e igualando-se (15) a zero, a frequência ótima mediana em função da profundidade, em Hz, pode ser calculada via:

$$f_{oti}(h) = \frac{8(a_2)^2}{2\pi(a_4)^2 h^2 \mu \bar{\sigma}}. \quad (16)$$

As curvas da Figura 5 trazem a perda de propagação mediana para 3 profundidades diferentes, indicando suas respectivas frequências ótimas medianas. Outros estudos indicam que esta frequência ótima tende a ter uma maior variabilidade para menores profundidades. Observa-se também na Figura 5 a clara diminuição da largura de banda do canal para maiores profundidades. Na prática, para grande profundidades, o interesse maior é de aumentar o ganho de transmissão, afim de combater a grande perda de propagação, pelo uso de circuitos de ressonância em detrimento da largura de banda.

VII. CONCLUSÕES

Como mostrado neste trabalho, modelos teóricos simplificados não representam bem o comportamento de propagação da onda magnética devido à estrutura mais complexa do meio. Isto é constatado observando-se a própria variação da condutividade equivalente em função da frequência e profundidade. Diferentemente do que afirmam alguns autores, a maior condutividade equivalente para pequenas profundidades não se deve ao acúmulo de material metálico ou à maior salinidade do solo na superfície, mas provavelmente ao modelo SEH ser mais otimista do que deveria em zonas de campo próximo. Quando medidas reais são usadas nesses modelos otimistas, a culpa pelo excesso de perda é colocada na condutividade.

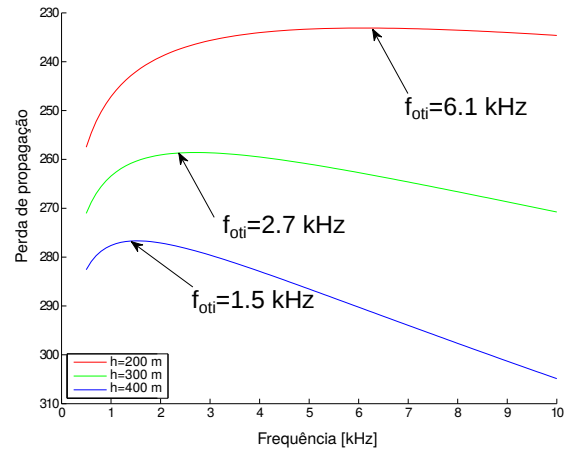


Fig. 5: Perda de propagação mediana para profundidades de 200, 300 e 400 metros

Os resultados estatísticos apresentados são úteis para o ajuste dos parâmetros de comunicação entre antenas coaxialmente alinhadas em minas de carvão, especialmente com relação ao comportamento mediano do campo (e da perda), assim como o cálculo da frequência ótima. Por fim, os resultados que mostram a distribuição da condutividade equivalente podem ajudar a encontrar os limites de funcionamento do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) pelo suporte financeiro neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. P. Carreno, "Channel modeling for through-the-earth (tte) communication systems," Master's thesis, Universidade de Brasília, Feb. 2016.
- [2] I. Arthur Little, "Detection of trapped miner electromagnetic signals above coal mines," United States Department of the interior, Bureau of Mines, Tech. Rep. JO188037, July 1980.
- [3] J. Durkin, "Apparent earth conductivity over coal mines as estimated from through-the-earth electromagnetic transmission tests," 1984. [Online]. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/ri8869.pdf>
- [4] J. R. Wait and K. Spies, "Subsurface electromagnetic fields of a circular loop of current located above ground," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 4, pp. 520–522, Jul. 1972.
- [5] W. J. Hill DA, "Theoretical noise and propagation models for through-the-earth communication," National Telecommunications & Information Admin. Institute for Telecommunication Sciences, Tech. Rep., 1982.
- [6] Y. e. a. Lincan, "Earth conductivity estimation from through-the-earth measurements of 94 coal mines using different electromagnetic models," *Appl Comput Electromagn Soc. J*, vol. 29, no. 20, pp. 755–762, October 2014.
- [7] Y. Lincan, "Measurements and modeling of the electromagnetic fields in through-the-earth (tte) wireless communications," Ph.D. dissertation, University of New Mexico, 2014.
- [8] D. Gibson, "Channel characterisation and system design for sub-surface communications," Ph.D. dissertation, University of Leeds, Feb. 2003.
- [9] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 3rd ed. Prentice Hall, 1999.
- [10] J. Durkin, "Surface vertical magnetic field produced by a finite loop buried in an earth containing a thin conducting sheet," *Radio Science*, vol. 32, no. 1, pp. 19–23, 1997.