

Comunicações em Minas Subterrâneas

Lucas Sousa e Silva, Sávio Oliveira de Almeida Neves, Josua Peña Carreño, Leonardo Aguayo, André Noll Barreto, Adoniran Judson Braga, Luis Guilherme Uzeda Garcia

Resumo—Este artigo apresenta uma visão geral sobre comunicações em minas subterrâneas, abordando modelos de propagação e ruído, modos de transmissão (*Through-The-Wire*, *Through-The-Air* e *Through-The-Earth*), e, resumidamente, algumas tecnologias e protocolos utilizados. Este trabalho tem como objetivo trazer um resumo sobre o cenário atual, podendo ser utilizado como ponto de partida para estudos futuros na área.

Palavras-Chave—Comunicações em Minas, *Through-The-Earth Communications*, Modelos de Propagação, Modelos de Ruído.

Abstract—This article presents an overview of underground mine communications, addressing issues like propagation and noise model, transmission modes (*Through-The-Wire*, *Through-The-Air* and *Through-The-Earth*), as well as a summary of some employed technologies and protocols. This work aims to bring an overview of the current technology scenario and can be used as a starting point for future studies in the area.

Keywords—Mine Communications, *Through-The-Earth Communications*, Propagation Models, Noise Models.

I. INTRODUÇÃO

A comunicação com e entre operários que trabalham em espaços confinados sempre foi tema de vital importância para a indústria da mineração, devido a que através de sistemas de comunicação pode se manter contato em tempo real com todos os membros das equipes e transferir informações de apoio durante casos de emergência. Mais recentemente, com a crescente automação na mineração, também é importante se garantir a comunicação entre os diferentes equipamentos e a superfície. Existem vários sistemas de comunicação disponíveis em minas subterrâneas do mundo, sendo que, sistemas baseados em cabos coaxiais ou fibra ótica são os mais utilizados. Porém estes não são eficientes em casos de desastre, podendo sofrer quebras e isolar os operários [1], como em explosões, incêndios, inundações e soterramentos, além de serem pouco flexíveis em ambientes cuja topologia muda o tempo todo.

A grande maioria dos sistemas de comunicação sem fio utiliza topologias de comunicação em radiofrequência (RF) baseadas em antenas radiantes, campo distante e meio de transmissão com características elétricas próximas as do vácuo. No caso em que rochas, solo, água e outros materiais de condutividade elétrica não desprezível se tornam o meio de

propagação entre as pontas de comunicação, a alta taxa de atenuação de ondas eletromagnéticas em altas frequências não permite o uso desses sistemas acima citados [2].

Comunicações através da terra ou TTE, do inglês, *Through-the-earth*, consistem no uso de ondas eletromagnéticas para estabelecer um enlace entre a superfície e a mina subterrânea utilizando a terra como meio de propagação. A transmissão é normalmente feita por indução magnética em frequências abaixo de 30 kHz, sujeitas a ruídos atmosféricos e a harmônicos produzidos por equipamentos, limitando o desempenho de comunicação, especialmente no enlace de subida [2].

Uma regulamentação do congresso americano exigindo um sistema de comunicação de emergência em minas subterrâneas de carvão que opere em caso de acidentes, chamada lei *Mine Improvement and New Emergency Response Act (MINER Act)*, impulsionou a pesquisa e o desenvolvimento das comunicações TTE. Segundo a lei, este sistema deve ser sem fio, bidirecional, prover comunicação entre a superfície e o subterrâneo da mina e ser capaz de rastrear as pessoas presas no subterrâneo [3].

Pode-se também utilizar comunicações subterrâneas diferentes do TTE sendo essas cabeadas (TTW, *Through-the-wire*) e/ou sem fio (TTA, *Through-the-air*). Entre as possíveis aplicações, pode-se citar: automação das máquinas presentes na mineração; acionamento de explosivos; comunicação entre mineiros por dados ou de voz; monitoramento da mina por vídeo; monitoramento do estado dos mineiros; detecção de níveis elevados de gases danosos aos mineiros, o monitoramento e coordenação em tempo real da frota e pessoal.

Neste trabalho apresentamos alguns conceitos sobre comunicações em minas, motivados pela grande importância da indústria da mineração no Brasil e sua rápida evolução tecnológica, aliada à pequena produção científica desta área no país. Este trabalho traz uma visão geral sobre estudos, modelos e equipamentos em torno de comunicações subterrâneas. Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II traz conceitos preliminares do meio de propagação; a Seção III resume o estado da arte de comunicações TTW, TTA e TTE quanto ao uso, técnicas e equipamentos; enquanto que modelo de propagação, modelo de ruído e parâmetros para comunicação TTE são descritos na Seção IV. Por fim, breves considerações encerram este artigo na Seção V.

II. CONDIÇÕES PARA A COMUNICAÇÃO EM MINAS SUBTERRÂNEAS

Uma mina pode ser definida como uma massa individual de substância mineral ou fóssil, em lavra, esteja ela na superfície terrestre ou no interior da terra e que tenha um valor econômico [4]. Geralmente, minas subterrâneas são muito

Lucas Sousa e Silva (lucassilva@aluno.unb.br), Sávio Oliveira de Almeida Neves (savio.oneves@aluno.unb.br), Josua Peña Carreño (josua.d.pena@ieee.org) e Adoniran Judson Braga (jbraga@ene.unb.br), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília - UnB, Brasília-DF; André Noll Barreto (andrebarreto@ene.unb.br), Depto. de Eng. Elétrica, UnB, e INDTE; Leonardo Aguayo (aguayo@unb.br), Faculdade do Gama, UnB, Brasília-DF, Luis Guilherme Uzeda Garcia (luis.uzeda@itv.org), Instituto Tecnológico Vale (ITV), Belo Horizonte - MG. Este trabalho foi financiado pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV)

úmidas, com umidade relativa do ar podendo chegar a 90% ou mais. Água corrosiva, poeira, gases explosivos e tóxicos, como dióxido de carbono e metano, são substâncias que podem afetar não só o bem estar de operários, mas também a vida útil e regulação de equipamentos, incluindo os de comunicação.

Esse cenário guarda algumas semelhanças com as aplicações da construção civil, como túneis e metrô, mas com condições mais hostis. Porém, uma característica particular de minas subterrâneas é a sua expansão em função da retirada de minério e estéril. A expansão do espaço de cobertura pode levar à necessidade do aumento da infraestrutura de telecomunicações [5]. Isto é especialmente verdade em comunicações TTA, que tem o ar da mina como meio de propagação. Outro aspecto da mina que também influencia as comunicações TTA é a sua forma e tipo de acesso. Escavações que formem minas abertas sustentadas por pilares trazem condições de propagação de ondas diferentes daquelas minas em túnel que tendem a criar um efeito de guia de onda com baixo índice de perda de propagação.

Com respeito às características elétricas do meio, minas diferem uma das outras não apenas pelo mineral explorado, mas também pela proporção deste mineral em relação a outros materiais, como os que compõem o capeamento (*overburden*) que separa a superfície do corpo útil de minério. A variação da condutividade elétrica do meio, em função desta proporção, influencia bastante a perda de propagação no canal, e pode definir o tipo de equipamento e configurações escolhidas para o funcionamento de sistemas de comunicação TTE. Para comunicações em rádio-frequência dentro das minas, como em TTA e, em alguns casos, em TTW, a condutividade das paredes da mina pode influenciar os coeficientes de reflexão e difração e, por consequência, a dispersão temporal do canal de propagação.

III. USO, TÉCNICAS E EQUIPAMENTOS

Há três principais categorias de comunicação em minas que se destacam: TTW, TTA e TTE, discutidas a seguir.

A. TTW: através do cabo

Sistemas de comunicação TTW usam meios guiados [5] tanto para comunicação dentro da mina quanto entre superfície e mina. Um dos mais antigos instrumentos para comunicação em minas é o telefone de magneto [6], baseado em linha cabeada para comunicação de voz. Um gerador de magneto composto por ímãs é acionado manualmente por uma alavanca produzindo tensão alternada de 100 V entre 15 e 20 Hz, que após sua transmissão pelo cabo aciona os sinos dos outros telefones conectados. Estabelecida a conexão, baterias são usadas para garantir a alimentação dos equipamentos de comunicação de voz.

Fibras ópticas permitem altas taxas de transmissão de dados a grandes distâncias dentro da mina podendo chegar até 70 km sem necessidade de regeneração do sinal. Por ser uma ferramenta de grande capacidade, é utilizada para monitoramento em tempo real das diversas atividades da mina como sistema contra incêndio, sistemas automáticos entre outros [7].

Por sua vez, o *leaky feeder* é um cabo irradiante híbrido entre a transmissão por cabo (TTW) e a transmissão pelo

ar (TTA). Utiliza um cabo coaxial fendido para transmitir e receber a informação dentro do túnel. Este cabo, em vez de ter uma malha protetora, possui uma camada de cobre com perfurações que atuam como um arranjo de antenas de abertura. Devido à perda ao longo do cabo, é necessário ter amplificadores regularmente espaçados tipicamente entre 350 e 500 m de distância. Os cabos fendidos funcionam em ambas as direções de comunicação, usualmente nas bandas VHF e UHF [8].

B. TTA: Através do ar

Para comunicação dentro da mina, sistemas sem fio (TTA) se tornam mais vantajosos que TTW pela facilidade de instalação e adaptação à expansão da mina. Nos dias de hoje, os sistemas de comunicação TTA em minas são, em sua maioria, adaptações de um ou vários sistemas de comunicação sem fio para curto alcance como Zigbee, WiFi, RFID, etc. [9]. Visto que os equipamentos de rádio utilizados não trazem novidades em relação aos dispositivos RF usados em outras aplicações, esta seção se foca nas propostas de protocolos de redes para comunicação TTA encontradas na literatura.

Considerando a disposição dos nós e a falta de infraestrutura em minas, muitos trabalhos indicam a utilização de redes *ad hoc*. Um dos fatores investigados é o desempenho de protocolos, principalmente aqueles de controle de acesso ao meio ou de roteamento. Na área dos protocolos de controle de acesso ao meio, pode-se citar [10], o qual realiza uma análise de desempenho do protocolo MINECOM, baseado em TDMA-TDD (*time division multiple access - time division duplexing*).

Percebe-se que muitos trabalhos partem do pressuposto da utilização de padrões ou tecnologias que especifiquem os protocolos de camadas inferiores, como por exemplo o IEEE 802.15.4 ou alguma vertente do IEEE 802.11. Com relação a protocolos de roteamento, Jing [11] desenvolve um protocolo híbrido de roteamento para nós móveis baseados no protocolo GEAR (*geographical and energy aware routing*). Neste protocolo, os nós móveis possuem sua comunicação restrita a apenas alguns nós em função da distância e direção de movimento entre eles. Ao se realizar essas restrições, consegue-se aumentar o tempo de vida desses nós móveis.

Em [12]–[14], análises do desempenho dos protocolos DSDV (*destination-sequenced distance-vector*) e AODV (*ad hoc on-demand distance vector*) são feitas, levando em consideração a taxa de perda de pacotes, o atraso fim a fim e a vazão em transmissões de vídeo, enquanto que [15] realiza o estudo da utilização do protocolo OLSR (*optimized link state routing*) e do padrão IEEE 802.11n para prover a transmissão de vídeo e voz em minas. Bons resultados de vazão, latência e *jitter* da rede são encontrados.

Já em [16], há o desenvolvimento de um protocolo de roteamento *multi-hop* que utiliza um algoritmo recursivo entre os nós vizinhos para possibilitar a seleção de um caminho que possua uma menor quantidade de saltos, levando em consideração a métrica RSSI (*received signal strength indicator*). Para verificar o protocolo, testes foram realizados utilizando o transmissor MG2455 da *Radio Pulse*. Jiang [17] desenvolve um protocolo de roteamento que leva em consideração a disposição dos túneis em minas, em que há um

túnel principal e alguns ramos. Considerando a disposição dos nós e a formação de *clusters* entre eles nesses túneis-ramos, o autor sugere uma forma de realocamento de nós para cada *cluster* a fim de equilibrar a rede.

Zheng [18] descreve a disposição de redes de sensores subterrâneas, assim como as dificuldades existentes no canal sem fio subterrâneo e, por fim, explicita os obstáculos e áreas de pesquisas para as camadas de rede, considerando também um desenvolvimento *cross-layered* como um possível mitigador dos desafios encontrados em redes subterrâneas.

C. TTE: Através da terra

Nos anos que seguiram o *MINER Act*, o NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) apoiou o desenvolvimento de uma série de tecnologias de comunicação e rastreamento em minas subterrâneas [3]. Cinco protótipos foram desenvolvidos por cinco empresas: *Alertek*, *E-Spectrum Technologies*, *Lockheed Martin*, *Stolar* e *Ultra Electronics*. Quatro protótipos baseiam-se na detecção de campos magnéticos utilizando antenas *loop* e uma na detecção de campos elétricos.

Os sistemas TTE desenvolvidos se mostraram capazes de prover comunicação unidirecional e, em alguns casos, bidirecional, de voz e texto em até 300 m (voz) e 600 m (texto) de profundidade, aproximadamente. Para transmitir voz, os protótipos utilizaram frequências de 3150 Hz a 4820 Hz. Alguns protótipos possuíam também um modo de localização baseado em triangulação, em que apenas um tom é transmitido no enlace de subida. Utilizando receptores dispostos na superfície é possível localizar a posição do transmissor por meio do tratamento do sinal recebido.

Utilizou-se em alguns protótipos modulação analógica SSB (*single side band*), e em outros modulação digital PSK (*phase shift keying*) e/ou FSK (*frequency shift keying*). Além disso, em alguns protótipos, técnicas de cancelamento de ruído foram testadas [3]. Algumas empresas conseguiram transformar seus projetos em produtos comerciais [19].

O *Flex Alert*, fabricado pela canadense *Mini-Radio Systems*, é um sistema de comunicação unidirecional entre galerias subterrâneas e a superfície, utilizado para dar suporte na evacuação de operários em caso de emergência. Utiliza um campo magnético a baixa frequência que transporta informação a um receptor posicionado no capacete dos mineiros. É composto por uma antena tipo *loop* de 10 a 120 m de comprimento posicionada estrategicamente sobre a mina. Quando há alguma emergência, um sinal é emitido da superfície para todos os mineiros fazendo a lâmpada do capacete piscar sinalizando a evacuação [7].

O *Dispositivo Pessoal de Emergência (PED)* da australiana *MineSite Technology* é um sistema de comunicação unidirecional que permite a transmissão de mensagens de texto específicas às pessoas que se encontram no interior da mina sem uso de cabos. Mesmo fornecendo comunicação só superfície-mina, pode ser utilizado um cabo irradiante (*leaky feeder*) para completar a comunicação no link de subida [7]. O sistema também é usado para detonação remota de explosivos e controle remoto de equipamentos.

Após seus testes em conjunto com a NIOSH, a *Lockheed Martin* comercializa a *MagneLink MCS*, que é um sistema

TTE autossuficiente e bidirecional que oferece suporte a voz, texto e localização baseado em ondas magnéticas de baixa frequência. Testes a 500 metros de profundidade validaram as aplicações de voz e texto, em que uma antena de 130 metros de comprimento e outra com múltiplas voltas foram usadas na superfície e na mina, respectivamente.

A canadense *Vital Alert* [20] desenvolveu recentemente o sistema digital *Canary* de rádio TTE bidirecional para comunicação de dados e voz. O receptor da *Canary* é implementado em rádio definido por software, sendo facilmente reconfigurável para operar entre frequências de 300 Hz a 9 kHz. O dispositivo permite modulação adaptativa com taxas que variam de 9 bps a 1 kbps.

Em se tratando de processamento de sinais, [2] sugere o uso de modulação MSK (*minimum shift keying*). O autor também sugere técnicas de combate ao ruído atmosférico e de códigos corretores de erros, para conferir maior robustez ao sistema. O autor afirma melhorar a razão sinal-ruído (RSR) de 10 a 30 dB após a caracterização do ruído utilizando múltiplas antenas ortogonais e a aplicação de técnicas como cancelamento adaptativo de ruído, detecção por máxima verossimilhança e realimentação de decisão. A falta de estudos mais recentes em processamento de sinais para comunicação TTE pode indicar que ainda exista um ganho de desempenho a ser alcançado via tratamento de sinais em investigações futuras.

IV. PROPAGAÇÃO EM COMUNICAÇÃO TTE

O modo de transmissão TTE mais promissor é ilustrado na Figura 1, onde antenas *loop* na superfície e no subsolo trocam informação via indução magnética. As dimensões e massa de cada uma das antenas, corrente de excitação e frequência de operação definem a qualidade e alcance de transmissão, e podem variar de acordo com o objetivo do sistema, profundidade e características do solo [21].

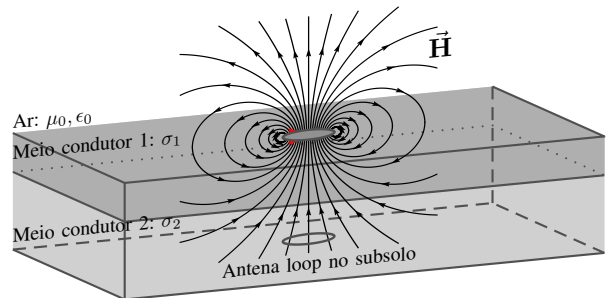


Fig. 1: Representação esquemática de sistema de comunicação TTE, operando em *downlink*. As dimensões típicas das antenas são da ordem de dezenas de metros.

Devido às propriedades intrínsecas do solo, a penetração de ondas de rádio em meio condutor obedece à equação de difusão $\nabla^2 H = \mu\sigma\partial H/\partial t$, em vez da equação de onda $\nabla^2 H = \mu\varepsilon(\partial^2 H)/(\partial t^2)$ com o campo decaindo exponencialmente em função da distância percorrida, frequência de operação e condutividade elétrica do meio. O grau de decaimento é frequentemente associado à função da profundidade pelicular $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$, que representa a distância na qual a intensidade de uma onda plana reduz a $1/e$ de seu valor. Ou seja, a taxa de decaimento em função da distância x é expressa

por $e^{-x/\delta}$. Portanto, a profundidade pelicular é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência, o que justifica o uso de frequências baixas, usualmente abaixo de 30kHz, para comunicação TTE. Essas observações são verdadeiras para meio bom condutor. [22] considera um bom condutor todo material que satisfaça $\sigma/(\varepsilon\omega) \gg 1$.

Para irradiar ondas eletromagnéticas em frequências tão baixas, as antenas deveriam ser quilométricas para entrarem em ressonância. Em comunicação TTE, a transferência de potência reativa via indução magnética (ou elétrica) corresponde à quase totalidade da potência transmitida. A propagação em meio condutor ou dielétrico também altera algumas propriedades básicas da onda, como a velocidade de propagação v_{rocha} e o comprimento de onda λ_{rocha} . Em um bom condutor, a contribuição da permissividade real pode ser desprezada e o comprimento de onda que atravessa as rochas da mina pode ser escrito como $\lambda_{rocha} = 2\pi\delta$, o que em comunicação TTE operando a 10 kHz com $\sigma = 10^{-3}\text{S/m}$ pode reduzir em 30 vezes o comprimento de onda em relação ao ar. Desta forma, afirmar que comunicação TTE sempre ocorre em campo próximo pode não ser correto.

A. Zonas de Campo

Classicamente, as zonas de campo para transmissão no vácuo ou no ar são divididas em *campo próximo reativo*, *campo próximo radiante*, *zona de transição* e *campo distante* [23]. Nas duas primeiras zonas, o campo é resultado da interferência de ondas de diversos pontos da antena, como se fossem vários pequenos dipolos contribuindo na formação do campo. Em campo distante, onde os campos elétrico e magnético estão em fase e possuem uma relação fixa entre si, a antena de transmissão é vista como um ponto radiante e seu campo pode ser visto como uma frente de onda plana. Na zona de transição, ambos os comportamentos podem ser observados. Em um meio condutor, Gibson [22] propôs uma subdivisão diferente para as zonas de campo.

Em regiões muito próximas à antena de transmissão, o campo possui uma natureza *quase-estática* seguindo leis da estática como a atenuação pelo inverso do cubo da distância, apesar da variação no tempo. A partir do chamado *campo próximo*, onde, assim como em quase-estático, inexistia irradiação, o meio condutor começa a contribuir em atenuação de campo. Na zona de *campo distante*, apesar das perdas devidas ao meio, o campo obedece à lei de atenuação com inverso linear da distância. Campo distante, no caso, não quer dizer que a radiação parte da antena diretamente, e sim pela indução de correntes parasitas [24] no meio condutivo provocada pelo campo magnético da antena, as quais geram novos campos. Por fim, a zona de transição é uma região arbitrária entre os campos próximo e distante.

A Tabela I traz as zonas de campo e suas condições para dois tipos de meio. Um sistema operando no espaço livre a 10 kHz ($\lambda_0=30$ km) com separação entre antenas de 300 m se encontra em campo próximo reativo ($\frac{\lambda_0}{2\pi} \approx 4775$ m), enquanto que em meio condutor com $\sigma = 10^{-3}\text{S/m}$ e $\mu = \mu_0$, $\frac{\lambda_{rocha}}{2\pi} = \delta \approx 160$ m < 300 m. Ou seja, trata-se de zona de transição e está mais próximo do campo distante do que do campo próximo.

Modelo	Tipo de aproximação	Condições
Vácuo	Campo próximo reativo	$r < \frac{\lambda_0}{2\pi}$
	Campo próximo radiante	$\frac{\lambda_0}{2\pi} < r < \lambda_0$
	Zona de transição	$\lambda_0 < r < 2\lambda_0$
	Campo distante	$r > 2\lambda_0$ ou $2D^2/\lambda_0$
Meio condutivo	Quase estático	$r < \frac{\lambda_{rocha}}{2\pi}$
	Campo próximo	$r^2 < (\frac{\lambda_{rocha}}{2\pi})^2$
	Zona de transição	$r \approx \frac{\lambda_{rocha}}{2\pi}$
	Campo distante	$r \gg \frac{\lambda_{rocha}}{2\pi}$

TABELA I: Zonas de campo no vácuo e em meio condutor

B. Modelo de Campo Magnético H

O momento magnético de uma antena *loop* indica a eficiência de transmissão indutiva em função das características do transmissor como o número de voltas do *loop*, a corrente RMS nos filamentos da antena de transmissão e a área do *loop*. O aumento de momento magnético tem por custo o aumento da potência dissipada em calor nos filamentos da antena. A aproximação mais simples para o campo magnético variante no tempo gerado por uma antena *loop* se faz considerando o vácuo como meio homogêneo infinito ignorando qualquer condição de contorno [25]. O modelo traz as componentes vertical e horizontal do campo magnético sendo usadas, na maioria das vezes, em comunicação coaxial e coplanar entre dois *loops*, respectivamente, e que dependem do momento magnético, distância e frequência. A adaptação para um meio infinito condutivo (MIC) para ambos os enlaces de subida e descida é feita modificando-se apenas o número de onda em função da distância pelicular δ . Wait formulou expressões analíticas do campo magnético de antenas circulares com corrente uniforme distinguindo os meios superfície e subterrâneo, nos chamados modelos de semi-espaço homogêneo (SEH), para os enlaces de subida [26] e de descida [27]. Nestes modelos existe reciprocidade entre os dois enlaces apenas para o campo vertical, e não o horizontal, diferentemente do modelo MIC. Durkin [28] sugere que exista na interface entre a terra e o ar uma barreira de transposição que possa ser modelada por uma fina camada de condutividade ainda maior que aquela do semi-espaço homogêneo abaixo dela. Chamamos este modelo de semi-espaço homogêneo com superfície condutora, em que a espessura da camada de interface e sua condutividade são parâmetros de entrada.

C. Modelo de Ruído

O estudo dos tipos de ruído é crucial para dimensionamento de sistemas de comunicação TTE, especialmente o atmosférico e o ruído oriundo da ação humana. Por conseguinte, análise do enlace de um sistema de comunicação TTE requer um modelo de ruído aditivo mais completo que o gaussiano branco.

O ruído atmosférico nas bandas LF e VLF (*low frequency* e *very low frequency*) consiste na superposição de uma componente gaussiana e uma componente de picos impulsivos [29]. A componente impulsiva é gerada por descargas atmosféricas “próximas” do receptor, em que “próximo” engloba distâncias da ordem de megametros (Mm) na banda VLF, e vai até centenas de quilômetros na banda LF [29]. Já a componente gaussiana do ruído é proveniente da soma do ruído gerado por descargas atmosféricas distantes do receptor e por outras fontes

de ruído. O ruído atmosférico tem sua intensidade variando com a localidade, estação do ano e hora do dia, e seu espectro é plano nas bandas de frequência de interesse.

O modelo de ruído atmosférico proposto por Field-Lewinstein é matematicamente simples, facilmente implementado em simulações e produz resultados coerentes com medições práticas para diversas condições de ruído [30], [29]. Este modelo representa o ruído LF em banda estreita como um fasor aleatório cuja envoltória é a soma de uma variável aleatória (v.a.) com distribuição de Rayleigh e uma com distribuição de Weibull (*Power* - Rayleigh). A v.a. de Rayleigh representa a componente gaussiana do ruído enquanto que a de Weibull representa o ruído impulsivo [30].

Além do ruído atmosférico, observam-se também interferências eletromagnéticas geradas pelo homem. O ruído antrópico é geralmente proveniente das componentes harmônicas das linhas de transmissão de potência e é mais forte em baixas frequências. Observa-se que o ruído atmosférico é dominante entre 10 a 30 kHz, enquanto que o ruído antrópico é dominante em 1 kHz. As harmônicas de 60 Hz geradas pelas linhas de potência não são sinais determinísticos e seus espectros não são impulsos localizados em uma única frequência. Elas ocupam uma certa banda centrada em uma das harmônicas, como se as harmônicas estivessem sendo moduladas por um sinal aleatório. Além disso as harmônicas das linhas de potência são observadas mesmo quando o receptor está a 1 km de distância da linha de transmissão mais próxima [29].

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi realizada uma revisão sobre comunicações em minas subterrâneas, com o intuito de fundamentar a pesquisa na área, e em particular *Through-The-Earth Communications*. Está em andamento a implementação de um simulador de enlace e de protocolos para comunicações TTE, a fim de possibilitar o desenvolvimento de um protótipo para automação de equipamentos e comunicação de emergência.

REFERÊNCIAS

- [1] T. D. Barkand, N. W. Damiano, and W. Shumaker, "Through-the-earth, two-way, mine emergency, voice communication systems," in *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, vol. 2. IEEE, 2006, pp. 955–958.
- [2] F. H. Raab and I. R. Joughin, "Signal processing for through-the-earth radio communication," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 12, pp. 2995–3003, 1995.
- [3] M. R. Yenchek, G. T. Homce, N. W. Damiano, and J. R. Srednicki, "Niosh-sponsored research in through-the-earth communications for mines: a status report," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 5, pp. 1700–1707, 2012.
- [4] D. N. de Produção Mineral, "Código de mineração - capítulo i das disposições preliminares," <http://www.dnmp-pe.gov.br/Legisla/cm.01.htm>, acessado 22 de Abril de 2015.
- [5] S. Yarkan, S. Güzelgöz, H. Arslan, and R. Murphy, "Underground mine communications: A survey," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 11, no. 3, pp. 125–142, rd 2009.
- [6] A. M. T. (UNDERGROUND), "Magnet mine telephones," <http://www.britishtelephones.com/atm/atmtel6.htm>, 10 2012, acessado 22 de Abril de 2015.
- [7] L. Bandyopadhyay, S. Chaulya, and P. Mishra, "Wireless communication in underground mines," *RFID-Based Sens. Netw*, 2010.
- [8] N. I. for Occupational Safety and Health, "Tutorial on wireless communication and electronic tracking part 1: Technology overview," <http://www.msha.gov/techsupp/PEDLocating/WirelessCommandTrack2009.pdf>, 4 2010, acessado 22 de Abril de 2015.
- [9] A. Patri, A. Nayak, and S. Jayanthu, "Wireless communication systems for underground mines—a critical appraisal," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 4, no. 7, pp. 3149–3153, 2013.
- [10] Z. J. Yin and K.-S. Chung, "Multiple access protocol for an underground mobile communication system," in *Global Telecommunications Conference, 1998. GLOBECOM 1998. The Bridge to Global Integration. IEEE*, vol. 4, 1998, pp. 2217–2222 vol.4.
- [11] G. Jing and W. Qianping, "Application of hybrid routing protocol for mine wsn," in *Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), 2010 International Conference on*, vol. 3, July 2010, pp. 353–355.
- [12] B. Chetan, P. Deshpande, B. Gireesh Hegde, S. Srinivas, and G. Narendra Kumar, "Analysis of DSDV & AODV for disaster management system in coal mines," in *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011 7th International Conference on*, Sept 2011, pp. 1–4.
- [13] S. Lei, X. Zhao, Z. Wenyan, and C. Xicheng, "Model of ad hoc networks for rescuing in mine," in *Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCCTC), 2010 Second International Conference on*, vol. 1, April 2010, pp. 210–213.
- [14] D. Wu, R. Li, and L. Bao, "A holistic routing protocol design in underground wireless sensor networks," in *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2008. MSN 2008. The 4th International Conference on*, Dec 2008, pp. 187–194.
- [15] Y. Sun and X. Liu, "Wireless multi-hop ad hoc networks based on olsr for underground coal mine," in *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2010 International Conference on*, Oct 2010, pp. 1–6.
- [16] C. Wenqi and X. Zhao, "Multi-hop routing for wireless network in underground mines," in *Wearable Computing Systems (APWCS), 2010 Asia-Pacific Conference on*, April 2010, pp. 337–340.
- [17] H. Jiang, J. Peng, and W. Peng, "Nonuniform clustering routing protocol for tunnel wireless sensor network in underground mine," in *Wireless Communications Signal Processing, 2009. WCSP 2009. International Conference on*, Nov 2009, pp. 1–5.
- [18] Z. Zheng and S. Hu, "Research challenges involving cross-layered communication protocol design for underground WSNS," in *Anti-counterfeiting, Security and Identification, 2008. ASID 2008. 2nd International Conference on*, Aug 2008, pp. 120–123.
- [19] G. S. et al., "To the rescue!" *World Coal*, 12 2010.
- [20] E. News, "New through earth communication system for coal mining," *Endeavour Magazine*, 11 2014.
- [21] A. Forooshani, S. Bashir, D. Michelson, and S. Noghianian, "A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 4, pp. 1524–1545, Fourth 2013.
- [22] D. Gibson, "Channel characterisation and system design for sub-surface communications," Ph.D. dissertation, School of Electronic and Electrical Engineering, 2 2003.
- [23] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. John Wiley and Sons, 2005.
- [24] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 3rd ed. Prentice Hall, 1999.
- [25] D. B. Starkey, "Electromagnetic transmission and detection at deep depths," *Sandia Laboratories Report SLL-73-5278*, 1973.
- [26] J. R. Wait, "Electromagnetic induction technique for locating a buried source," *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 2, pp. 95–98, April 1971.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] F. H. Raab, "Noise model for low-frequency through-the-earth communication," *Radio Science*, vol. 45, no. 6, 2010.
- [30] E. Field and M. Lewinstein, "Amplitude-probability distribution model for vlf/elf atmospheric noise," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 83–87, Jan 1978.