

Transmissão de Dados por ondas Ultrassônicas em Barra Metálica Usando Multiplexação OFDM

Wagner S. Zanco^{1,2}, Patrícia S. Bastos¹, Rodrigo S. Mello¹, Tadeu N. Ferreira¹, Vinícius N. H. Silva^{1,2}, Andrés P. López Barbero^{1,2}.

Resumo — Este artigo apresenta os resultados experimentais de transmissão de ondas ultrassônicas por uma barra cilíndrica de aço inox 304 de 1 m de comprimento, utilizando multiplexação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). O sinal OFDM, modulado em amplitude, excita a barra através de transdutores piezoelétricos com frequência de operação de 500 kHz e largura de banda 150 kHz. Usando modulação em quadratura e equalização *zero forcing*, obteve-se uma taxa máxima de transmissão de 240 kbps, para uma taxa de erro de 10^{-3} . O multiplexador e o demultiplexador OFDM, o modulador e o demodulador em Amplitude foram implementados em MATLAB.

Palavras-Chave— *Sistemas de Telecomunicações, Multiplexação OFDM, Ondas Ultrassônicas, Barra Metálica Cilíndrica.*

Abstract – This paper presents the experimental results of ultrasonic wave transmission by a 1 m long 304 stainless steel cylindrical bar using *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). The OFDM signal, modulated in amplitude, excites the bar through piezoelectric transducers with 500 kHz operating frequency and 150 kHz bandwidth. Using quadrature modulation and zero forcing equalization, a maximum transmission rate of 240 kbps was obtained for an error rate of 10^{-3} . The multiplexer and OFDM demultiplexer, the modulator and the amplitude demodulator were implemented in MATLAB.

Keywords— *Telecommunication Systems, Multiplexing OFDM, ultrasonic waves, Cylindrical Metal Bar.*

I. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

A transmissão de dados por ondas ultrassônicas tem sido objeto de estudo em várias aplicações como, por exemplo, em paredes metálicas [1-8] e em comunicações subaquáticas [9]. Sua aplicação pode ser justificada em ambientes onde o uso de outras formas de transmissão de dados não devem ser utilizadas, seja por questões de segurança do sistema físico ou por inviabilidade técnica, como, por exemplo, em caso de monitoramento de tubulação de gás ou de ambientes com risco de explosão [3].

Uma aplicação no setor de energia elétrica, envolvendo a transmissão de dados por ondas ultrassônica de grandezas físicas utilizando as linhas de transmissão, foi proposta para o edital da chamada Pública de P&D ANEEL – ELETROSUL 01/2015, sob o título “Desenvolvimento de Tecnologia para Transmitir Grandezas Físicas utilizando Estruturas de Linhas de Transmissão como Meio de Comunicação”. A proposta previa o desenvolvimento de uma técnica inovadora para auxiliar na manutenção das linhas de transmissão utilizando as

estruturas de linhas, cabos para-raios e torres, como meio de transmissão de informações referente ao próprio estado operativo do sistema monitorado [10].

Em caso de monitoramento em tempo real de uma linha de transmissão, a maior parte das grandezas a serem transmitidas requer uma baixa taxa de amostragem (dezenas de amostras por segundo) sendo a vibração, a deformação, a temperatura, a velocidade e a direção dos ventos, pressão atmosférica e a umidade, alguns dos parâmetros a serem monitorados [11]. Os dados coletados precisam ser transmitidos para centros de controle para fins de monitoramento, controle e supervisão do sistema. Nesse caso, pode-se dizer que dada a intensidade dos campos eletromagnéticos presentes em todos os componentes do sistema de transmissão e de distribuição da energia elétrica, os sistemas de comunicação que não utilizam a onda eletromagnética como modo de transmissão de dados obtêm vantagem em virtude de sua imunidade inerente. Sob este aspecto, a comunicação por ondas ultrassônicas se faz relevante [10].

Como etapa preliminar da prova de conceito, foi montada uma configuração experimental, na qual os dados foram transmitidos por uma barra cilíndrica de aço inoxidável [12]. A Seção II apresenta a caracterização dos transdutores piezoelétricos utilizados na conversão do sinal elétrico em ondas acústicas e vice versa. A caracterização do conjunto formado pela barra cilíndrica e pelos transdutores piezoelétricos é apresentada na Seção III, justificando o uso da multiplexação OFDM no experimento [13]. A Seção IV apresenta o diagrama em blocos da configuração utilizada na obtenção dos resultados. Na Seção V são apresentados os resultados experimentais da prova de conceito aqui proposta. A Seção VI apresenta a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros para a consequente continuação desta pesquisa.

II. CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS

Os transdutores piezoelétricos utilizados na configuração montada para a obtenção dos resultados apresentados neste artigo convertem os sinais elétricos provenientes do conversor Digital/Analógico (D/A) para sinais ultrassônicos, os quais se propagam pela barra metálica. Também é função desses transdutores converter os sinais ultrassônicos captados no final da barra em sinais elétricos, os quais são enviados para o conversor Analógico/Digital (A/D). Os transdutores piezoelétricos utilizados no experimento foram fabricados pela empresa americana Olimpus NTD INC, modelo *harisonic18-*

¹ Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp), Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica e Telecomunicações – PPGEET, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói-RJ, Brasil.

² PPGIO - Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada – CEFET/RJ & UFF.

E-mails: wagnerzanco38@gmail.com, pablo@telecom.uff.br.

0018-s, de 500 kHz. Para a caracterização da resposta em frequência dos transdutores piezoelétricos, configurou-se uma montagem *back-to-back*, conforme mostra Figura 1.

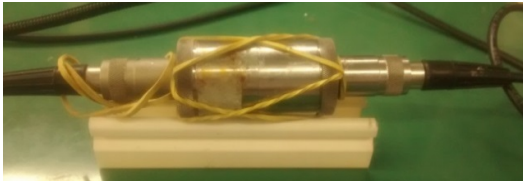


Fig. 1: Conexão *back-to-back* dos transdutores piezoelétricos.

A caracterização dos transdutores piezoelétricos foi obtida aplicando-se um pulso *chirp* do tipo MLF (Modulação Linear de Frequência), com duração de 100µs, com frequência variando entre 100 kHz e 1 MHz. A equação do pulso *chirp* pode ser expressa como mostrada em (1), em que t é o tempo, T é a largura do pulso e $\Phi(t)$ é a fase [14].

$$X(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\Phi(t)} \quad (1)$$

A Figura 2a mostra o resposta temporal do pulso *chirp* e a Figura 2b mostra o seu espectro de frequência, sendo a faixa de frequência escolhida para o pulso *chirp* uma função da largura de banda dos transdutores piezoelétricos. O comprimento do pulso *chirp*, de 100µs, foi escolhido de forma que, ao ser dectado no final da barra, não sofre interferência das múltiplas reflexões que ocorrem nas suas extremidades.

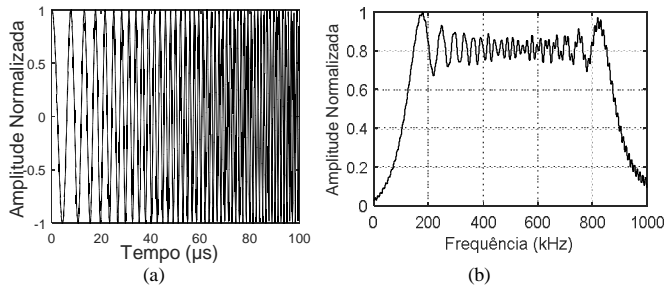


Fig. 2: Pulso *chirp* utilizado para a caracterização dos transdutores piezoelétricos: (a) sinal no domínio do tempo; (b) sinal no domínio da frequência.

As características do pulso *chirp* MLF foram definidas em função dos transdutores piezoelétricos, que foram projetados para a frequência de operação nominal de 500 kHz e uma largura de banda de 150 kHz. As Figuras 3a e 3b mostram, respectivamente, a resposta dos transdutores piezoelétricos ao pulso *chirp*, no tempo e na frequência.

A Figura 3a mostra o gráfico de amplitude normalizada da resposta dos transdutores piezoelétricos ao pulso *chirp* em função do tempo. A parte do gráfico onde observamos a maior amplitude está relacionada à frequência de ressonância dos transdutores piezoelétricos. À medida que a frequência do pulso *chirp* se aproxima de 500 kHz, a amplitude do sinal

aumenta de intensidade. À medida que a frequência do pulso *chirp* se afasta de 500 kHz a amplitude decresce. O tempo de duração da resposta dos transdutores piezoelétricos ao pulso *chirp* mostra que não houve dispersão significativa ao ponto de um pulso *chirp* interferir no pulso seguinte, o qual foi gerado 4 ms depois (período de repetição). A Figura 3b apresenta a resposta em frequência dos transdutores piezoelétricos envolvidos na transmissão.

Podemos observar que a melhor resposta em frequência foi obtida em torno de 500 kHz, que é a frequência de operação dos transdutores.

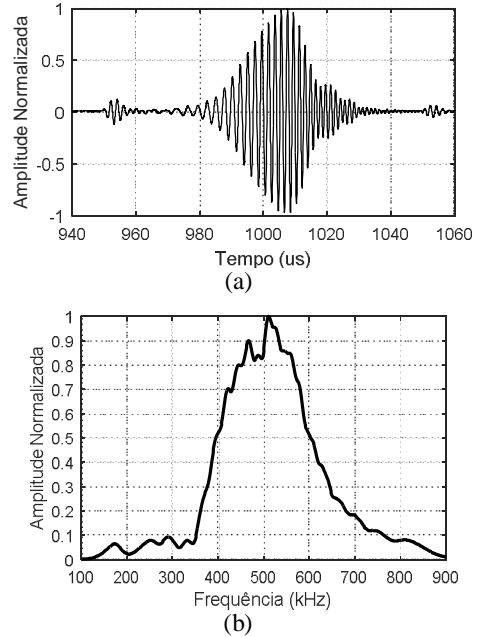


Fig.3: Resposta dos transdutores piezoelétricos ao pulso *chirp*: (a) no domínio do tempo; (b) no domínio da frequência.

III. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL

A segunda fase do experimento consistiu em caracterizar o meio de transmissão, o qual é composto pelos transdutores piezoelétricos e pela barra cilíndrica metálica, conjunto doravante chamado de **canal**. A Figura 4 mostra a resposta temporal do canal ao pulso *chirp*, definido em (1).

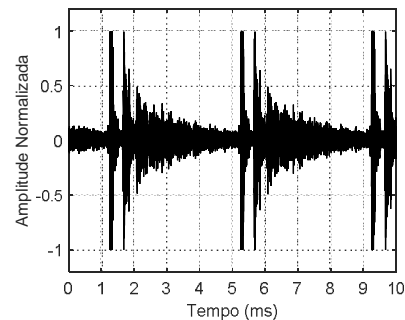


Fig.4: Resposta do canal a três pulsos *chirp* sequenciais, no domínio do tempo.

Na Figura 4 pode-se ver três pulsos *chirp* adquiridos pelo conversor A/D, após eles terem se propagado pelo canal. Pode-se observar a repetição do conjunto de oscilações referentes à resposta ao pulso *chirp* a cada 4 ms: o primeiro conjunto de oscilações começando em 1,25 ms, depois em 5,25 ms e o último conjunto de oscilações começando em 9,25 ms.

Na transmissão do sinal ultrassônico na barra cilíndrica metálica, uma parte do sinal que chega à extremidade da barra é refletida e se propaga em sentido contrário. Enquanto houver energia sendo transmitida, o sinal vai se propagando e ecoando de uma extremidade à outra da barra. A Figura 5 mostra apenas um dos pulsos *chirp* adquiridos.

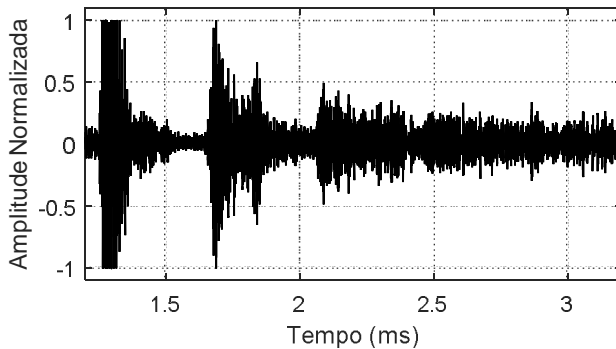


Fig. 5: Resposta do canal a um pulso *chirp*.

Podemos ver na Figura 5, onde aparece a resposta temporal a apenas um pulso *chirp*, três blocos de oscilações relevantes. O primeiro bloco de oscilações, compreendido entre 1,2 ms e 1,5 ms, é o pulso *chirp* aplicado no canal, o qual se propagou de uma extremidade à outra da barra. O segundo bloco de oscilações, compreendido entre 1,6 ms e 2 ms, é a reverberação do primeiro pulso *chirp*, refletido nas extremidades da barra, o qual chegou à extremidade de saída após pouco menos de 400 μ s. O terceiro bloco de oscilações, que está compreendido entre 2 ms e 2,4 ms, é a segunda reverberação do pulso *chirp* aplicado no canal. O tempo decorrido entre as reverberações é justificado observando-se a velocidade de propagação ultrassônica em uma barra cilíndrica de aço inoxidável austenítico, que é de 5.740 m/s [15]. Em uma barra de 1,0 m de comprimento, o tempo de propagação é de 183 μ s. Logo, o tempo de propagação de ida e volta é de $2 \times 183 \mu\text{s} = 366 \mu\text{s}$. Este é o tempo decorrido entre o primeiro, o segundo e o terceiro bloco de oscilações.

Para cada pulso transmitido ocorrem pelo menos duas reverberações, ou seja, o sinal ecoa dentro da barra, atenuando-se em função da distância percorrida. Além disso, o sinal reverberado possui um comprimento temporal maior que o pulso original, em virtude dos múltiplos percursos no interior da barra metálica, que é a dispersão intermodal. A dispersão medida no primeiro bloco de oscilações foi de 20 μ s, ou seja, o bloco teve um comprimento de 120 μ s. No segundo bloco de oscilações a dispersão foi de 160 μ s. O terceiro bloco de oscilação teve a sua duração indefinida em função dos resultados experimentais observados.

A figura 6 mostra o gráfico, em dB (decibel), tanto da resposta em frequência dos transdutores piezoelétricos em configuração *back-to-back*, quanto da resposta em frequência do canal (transdutores piezoelétricos e barra). A análise do gráfico da Figura 6 mostra que a melhor resposta em frequência dos transdutores piezoelétricos foi obtida em 511 kHz e sua largura de banda, obtida a partir da análise espectral do sinal recebido, é de 150 kHz (430 a 580 kHz). A melhor resposta em frequência do canal, o qual inclui a barra cilíndrica metálica, foi obtida em 470 kHz, tendo outros picos em 490, 530 e 560 kHz. Assim, conclui-se que a inclusão da barra cilíndrica metálica na composição do canal alterou a sua resposta em frequência, se comparada com a resposta em frequência do canal formado apenas pelos transdutores piezoelétricos. Isso trará consequências quando o sinal multiplexado em OFDM se propagar pela barra, uma vez que a resposta em frequência não é linear ao longo da banda, a qual é compartilhada pelas subportadoras.

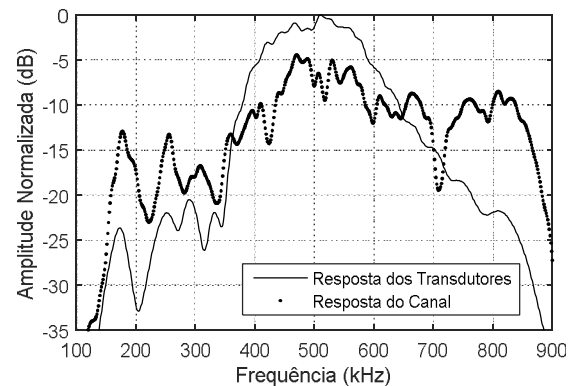


Fig. 6: Resposta em frequência dos transdutores piezoelétricos (em *back-to-back*) e do canal, em dB.

IV. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O diagrama em blocos da configuração montada para os experimentos realizados para a geração de resultados deste artigo pode ser visto na Figura 7. Um gerador de sequência pseudoaleatória gera a sequência randômica dos bits que serão transmitidos. Os bits são paralelizados e convertidos em pontos da constelação QAM.

Após ser efetuada a simetria Hermetiana e a IFFT, que resulta na multiplexação OFDM, o símbolo OFDM é serializado e, na sequência, é inserido o prefixo cíclico, que ajuda a mitigar os efeitos da dispersão do canal [16]. O sinal OFDM em banda base é então interpolado e modulado em Modulação em Amplitude com Banda Lateral Única (AM-SSB). A escolha do sistema de modulação AM-SSB se deu por conta da menor largura de banda utilizada na modulação, se comparada com os outros sistemas de modulação em amplitude. A interpolação é necessária para adequar a frequência de amostragem do sinal OFDM em banda base para a frequência de amostragem da portadora AM-SSB (560 kHz).

Depois de modulado, o sinal a ser transmitido passa por um conversor D/A, que excita o transdutor piezoelétrico, o qual transforma o sinal elétrico modulado AM-SSB em ondas

ultrassônicas e as transfere para a barra, que se propagam longitudinalmente até a outra extremidade. Um transdutor piezoelétrico conectado na extremidade oposta da barra converte as ondas ultrassônicas em variações de tensão elétrica. O sinal elétrico recebido é enviado para o conversor A/D, que faz uma super amostragem, com resolução cinco vezes maior que a do conversor D/A. O sinal adquirido pelo conversor A/D passa por um bloco de decimação, que tem o objetivo de retirar a super-amostragem obtida pelo conversor A/D. em seguida o sinal passa por um bloco responsável pela correlação, que tem como objetivo resgatar o *frame* de dados transmitido do sinal adquirido pelo conversor A/D.

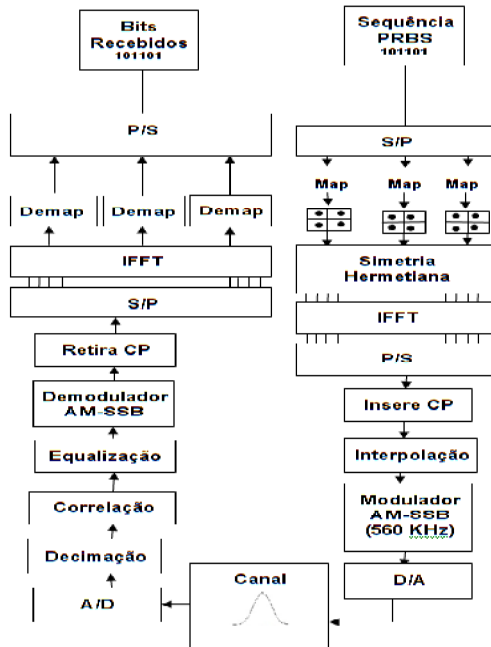


Fig. 7: Diagrama de blocos de transmissão e recepção.

Na sequência, o sinal é equalizado com a técnica *zero forcing*, cuja função é regenerar o sinal devido à perda de potência sofrida no meio de transmissão [17], mitigando os efeitos da não linearidade do canal em função da frequência. A equalização também minimiza problemas de distorção sofrida pelo sinal ao longo do canal.



Fig. 8: Configuração para as medições.

Após a equalização, o sinal passa pelo demodulador AM-SSB, que fornece na sua saída o sinal multiplexado em OFDM, em banda base. Depois de retirado o prefixo cíclico, o sinal é novamente paralelizado e passa por uma FFT, que tem

como objetivo efetuar a demultiplexação OFDM. O sinal resultante é então demapeado e serializado, recompondo o sinal de informação que foi transmitido. A Figura 8 mostra a configuração utilizada para as medições realizadas neste experimento.

Pode-se ver na figura 8 a barra cilíndrica de aço inoxidável austenítico 304 e os transdutores piezoelétricos conectados nas suas extremidades. Pode ser visto também na Figura 8 o gerador de funções arbitrárias utilizado como conversor D/A, o osciloscópio utilizado como conversor A/D e o analisador de espectro utilizado para a obtenção da resposta em frequência dos transdutores piezoelétricos, da barra e do sistema como um todo.

V. RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nas transmissões pelo canal. Nela são apresentados os resultados das diferentes configurações utilizadas nas transmissões. As configurações que apresentaram as melhores taxas de transmissão foi 4-QAM, 64 subportadoras e largura de banda de 100 kHz e 8-QAM, 40 subportadoras e largura de banda de 100 kHz. As taxas de transmissão obtidas nessas configurações foram de 240 kbps e 225 kbps, respectivamente. A eficiência espectral obtida foi de 2,4 b/s/Hz e 2,25 b/s/Hz. Com um *Bit Error Rate* (BER) na ordem de 10^{-3} e 10^{-4} , essas configurações se enquadram nos parâmetros exigidos para a transmissão de dados de telemetria.

Tabela I. Configurações utilizadas na transmissão

QAM	Subportadoras	Taxa de Transmissão (kbps)	Banda OFDM (kHz)	Eficiência Espectral (bits/s/Hz)	BER Medido
4	60	200 kbps	100	2,00	1,60E-04
4	64	240 kbps	100	2,40	1,00E-03
4	128	460 kbps	200	2,30	1,00E-02
8	40	225 kbps	100	2,25	3,30E-04
8	60	300 kbps	100	3,00	1,80E-02
16	10	80 kbps	20	4,00	1,00E-02
16	12	90 kbps	40	2,25	1,20E-02
16	19	155 kbps	40	3,88	3,05E-02

A largura de banda do canal é de 120 kHz (450 a 570 kHz), considerando-se como critério de corte o decaimento de 3 dB de potência. Isso limita a largura da banda base do sinal OFDM que será transmitido. A Tabela 1 mostra que foram efetuadas transmissões com diversas larguras de banda, especificamente, de 20 kHz a 200 kHz, ultrapassando a largura de banda especificada para o canal. Isso foi feito devido a necessidade de realizar transmissões com a maior banda OFDM possível, a fim de fornecer a maior taxa de transmissão, usando como referência um BER da ordem de 10^{-3} . Teste mostraram que larguras de banda maiores que 200 kHz comprometeram a equalização do sinal recebido e, conseqüentemente, impossibilitaram a recomposição do sinal.

As maiores taxas de eficiência espectral, 2,4 b/s/Hz e 2,25 b/s/Hz, foram alcançadas com as mesmas configurações em que se obteve as maiores taxas de transferência. Lembramos

que a melhoria da eficiência espectral não foi objeto de estudo deste artigo, ficando a mesma a cargo de estudos futuros.

A Figura 9a e 9b mostram as constelações das configurações que obtiveram a maior taxa de transferência no canal, para um BER menor que 10^{-3} .

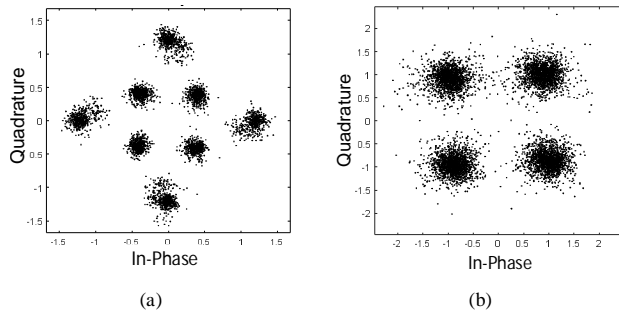


Fig. 9: Constelação com as melhores taxas de transmissão: (a) taxa de 225 kbps, (b) taxa de transmissão de 240 kbps.

A Figura 10 mostra a BER apresentada por cada subportadora na configuração 16 QAM, 10 subportadoras, largura de banda do sinal OFDM de 40 kHz. A Figura mostra também a relação da BER com a resposta em frequência do canal, representada pela atenuação do sinal propagado em função da frequência. Pode-se observar que quanto maior a atenuação do canal em uma dada frequência, maior a BER da subportadora transmitida naquela frequência. Este resultado é importante para trabalhos futuros, servindo como base para a implementação de algoritmos adaptativos para otimização da taxa de transferência.

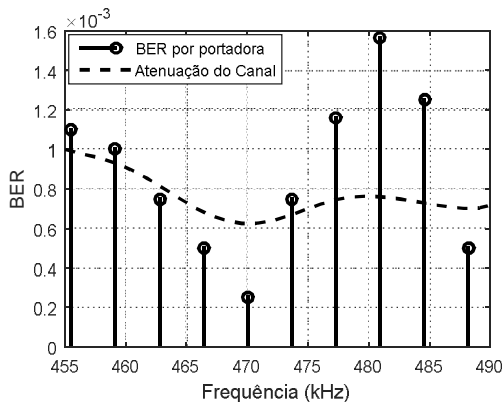


Fig.10: Relação entre a BER das subportadoras transmitidas em função da resposta em frequência do canal.

VI. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste experimento mostraram que é possível transmitir dados em uma barra metálica cilíndrica utilizando a multiplexação OFDM. A taxa máxima obtida, de 240 kbits/s, é suficiente para a transmissão de informações de monitoramento, até mesmo para sinais de voz. A melhoria da eficiência espectral é um parâmetro que precisa ser investigado em estudos futuros, embora para o canal utilizado no experimento, cuja aplicação não envolve o compartilhamento do meio de transmissão, uma eficiência

espectral de 2,4 bits/s/Hz atende aos requisitos do estudo proposto. A melhoria da eficiência espectral pode ser investigada, analisando-se outras técnicas de equalização, além do desenvolvimento de algoritmos de *bit-loading*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às intuições ELETROSUL/ANEEL, CNPQ/INERGE (Instituto Nacional de Energia Elétrica), Processo 305307/2015-0 e FAPERJ pelo apoio financeiro parcial a este trabalho. Os autores agradecem à CAPES/DS pelas bolsas concedidas aos alunos de pós-graduação dos programas PPGIO e PPGEET, e ao apoio institucional da UFF e do CEFET-RJ.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. ASHDOWN *et al.* "High-Rate Ultrasonic Communication Through Metallic Barriers Using MIMO-OFDM Techniques". IEEE, 2013.
- [2] M. BIELINSKI *et al.* "Application of Adaptive OFDM Bit Loading For High Data Rate Through-Metal Communication". IEEE, 2011.
- [3] S. CHAKRABORTY *et al.* "Low-rate Ultrasonic Communication Axially along a Cylindrical Pipe". IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2014.
- [4] C.T. GINDHART, "Development of a System for Ultrasonic Communication Across Cylindrical Metal Walls". Dissertação de Mestrado – Drexel University, Filadélfia: 2014.
- [5] S. TAISUKI *et al.* "A Transceiver Architecture for Ultrasonic OFDM With Adaptive Doppler Compensation". Japão: 2015.
- [6] DANDEKAR *et al.* Ultrasonic Communication For High-Data Rate Through- Metal Applications. Drexel University, Filadélfia: 2016.
- [7] T. J. LAWRY *et al.* "A High-Performance Ultrasonic System For the Simultaneous Transmission of Data and Power Through Solid Metal Barriers". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 60, no. 1, January 2013.
- [8] K. WANUGA *et al.* "High-Data-Rate Ultrasonic Through-Metal Communication". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 59, no. 9, 2012.
- [9] S. TAISUKI *et al.* "A Transceiver Architecture for Ultrasonic OFDM With Adaptive Doppler Compensation". Japão: 2015.
- [10] W. S. ZANCO, "Desenvolvimento de Tecnologia de Comunicação Por Ultrassom Para Transmissão, Via OFDM, de Grandezas Elétricas e Mecânicas em Cabo Para-Raios de Linhas de Transmissão". Qualificação do Doutorado – Rio de Janeiro: UFF, 2017.
- [11] W. M. KOELLER, "Verificação Estrutural de Torre Ltee Sob Ação de Vento". Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.
- [12] CARBÓ, H. M. "Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações." AcelorMital. São Paulo, 2008.
- [13] NETO L. A. "Étude Des Potentialités Des Techniques De Modulation Multiporteuse Pour Les Futurs Réseaux D'accès Optique Wdm Et Tdm Pon". Tese de Doutorado – França: Université de Limoges, 2012.
- [14] A. W. DOERRY, Generating nonlinear FM chirp waveforms for radar. Report SAND2006-5856, Sandia National Laboratories, New Mexico. 2006.
- [15] "Thickness Gage Tutorial: Ultrasonic Velocities in Common Materials"; Olympus IMS. Disponível em www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities. Acesso em 02/05/2018.
- [16] L. A. NETO, "Transmissão De Sinais OFDM Através de Fibras Ópticas Poliméricas (Pofs) Utilizando LEDs de Iluminação". Dissertação de Mestrado – Rio de Janeiro: UFF, 2009.
- [17] F. C. VILAR, "Implementation of Zero Forcing and MMSE Equalization Techniques in OFDM". Dissertação de Mestrado - Fortaleza: Universidade de Fortaleza, 2014.