

VANTAGENS OPERACIONAIS DO OFDM: ANÁLISE MATEMÁTICA E GRÁFICA COM SOFTWARE COMPUTACIONAL

DAVID JUSTO SANTOS

Pós-Graduado em Gestão de Sistemas Táticos de Comando e Controle

RESUMO: ESTE ARTIGO ESTÁ INSERIDO NO CONTEXTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA E VISA APRESENTAR AS VANTAGENS OPERACIONAIS E DE SEGURANÇA DO USO DA TÉCNICA DE MODULAÇÃO OFDM. O PROPÓSITO DA PESQUISA É FOMENTAR A UTILIZAÇÃO DE TAL TECNOLOGIA PELO EXÉRCITO BRASILEIRO, DIANTE DA EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS. PARA ISSO, FORAM UTILIZADOS, COMO METODOLOGIA, REVISÕES LITERÁRIAS DE LIVROS, ARTIGOS CIENTÍFICOS E PUBLICAÇÕES DE REVISTAS CIENTÍFICAS SOBRE AS IMPLEMENTAÇÕES DO OFDM E SEUS AVANÇOS NA REALIDADE DE COMUNICAÇÃO DIGITAL, TENDO SIDO FEITA A CONFERÊNCIA DAS VANTAGENS DESSA MODULAÇÃO, COM BASE NA ANÁLISE COMPUTACIONAL E GRÁFICA, UTILIZANDO-SE O SOFTWARE MATLAB. BUSCOU-SE, COMO RESULTADO, CONCILIAR AS VANTAGENS DE UTILIZAÇÃO DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA, INTRÍNSECO AO OFDM, JUNTO À CONFIABILIDADE E ROBUSTEZ NECESSÁRIAS A UMA COMUNICAÇÃO MILITAR PARA O APRIMORAMENTO DAS COMUNICAÇÕES QUANDO DO USO DESTA FERRAMENTA. POR FIM, CONCLUI-SE SOBRE A VANTAGEM DO EMPREGO OPERACIONAL, NO EXÉRCITO BRASILEIRO, DOS EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÕES DE DADOS QUE EMPREGAM A REFERIDA TECNOLOGIA.

PALAVRAS-CHAVE: MULTIPLEXAÇÃO OFDM. ANÁLISE COMPUTACIONAL. EFICIÊNCIA ESPECTRAL.

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da ciência e tecnologia envolvida nas comunicações digitais, e o aumento na quantidade de informação a ser transmitida (FRENZEL, 2015) em operações diversas do Exército Brasileiro e das Forças Auxiliares, tais como imagens e vídeos, faz-se necessária a análise das melhores formas de aproveitar o espectro de frequências à disposição e encaminhar a maior quantidade possível de informação.

A técnica abordada neste artigo é a OFDM, sistema consolidado e econômico de utilização do canal de comunicação que trabalha em conjunto com as modulações QAM e PSK na transmissão de sinais em W-LAN padrão IEEE 802.11a. (ROCHOL, 2012) (HAYKIN, 2009)

O avanço tecnológico de comunicação de dados permitiu, no Sistema Rádio Digital Troncaizado (SRDT) do Exército Brasileiro, por exemplo, a comunicação com o uso de sistemas de multiplexação e acesso de canais TDMA e FDMA permitindo um melhor uso da banda UHF de 800MHz. Tal banda permite a comunicação simultânea de diversos dispositivos, empregando-se apenas uma repetidora.

A relevância da pesquisa está ligada às vantagens de segurança frente à sistemas TDM, bem como à solução de problemas operacionais, enfrentados quando do uso de sistemas de multiplexação FDM, tais como: desvanecimento de canal, aproveitamento da banda de comunicação e robustez de sincronia de comunicação.

Buscou-se verificar se a utilização de um equipamento que utilize OFDM garante uma operação satisfatória quando em implementação real, analisando seu comportamento quando submetido a variações de ruído e resistência a falhas.

Vale esclarecer que as tecnologias TDMA e FDMA, citadas, são implementações de engenharia dadas pelos conceitos de TDM e FDM respectivamente. (ROCHOL, 2012) (L. PINTO, 2004)

O objetivo geral é apontar os problemas operacionais no uso do sistema de multiplexação FDM, apresentando as soluções contidas no OFDM, testando o processo de multiplexação e estimando um canal de comunicação via software Matlab e, com base nessa análise computacional, fomentar ou não a especificação de equipamentos com tal pro-



priedade, para as aquisições feitas pelo Exército Brasileiro.

Os objetivos específicos são: demonstrar e simular graficamente o funcionamento das multiplexações FDM e OFDM, mostrando sua vantagem operacional e robustez de segurança em comparação com o TDM; e construir um script computacional no Matlab capaz de estimar taxas de erros de bits quando utilizando o sistema OFDM, comparando-o com o modelo ideal.

O limite da pesquisa está centrado na análise do OFDM e seu comportamento em radiocomunicação quanto à transmissão em modulações digitais, aproveitamento da largura de banda e resistência à falhas operacionais.

1 METODOLOGIA

O método do trabalho propõe a otimização de sistemas de comunicação, fomentando o uso de equipamentos que utilizem a multiplexação OFDM, através de análise bibliográfica e computacional, para melhor aproveitamento do canal de comunicação e para melhor aplicação operacional.

A pesquisa foi desenvolvida nos meses de março e abril do ano de 2019, tendo a análise gráfica sido realizada na etapa final do processo, no mês de maio.

O objetivo do estudo está centrado na evolução das comunicações e na necessidade de transmitir grande quantidade de informação em tempo real para as mais diversas atividades de comunicação pelo EB.

É importante destacar a necessidade de aprimoramento das técnicas de transmissão com a finalidade de atender às exigências crescentes de guerra cibernética e comunicações nas operações militares, com otimização do espectro de frequência pertinente à atividade militar, tarefa para a qual o sistema de multiplexação OFDM se apresenta como opção.

1.1 REVISÃO DE LITERATURA

Para desenvolvimento do artigo foi necessária a revisão literária sobre artigos e livros descrevendo o funcionamento do OFDM e literaturas de comunicação de dados.

Para análise de resultados foi utilizado o software matemático MATLAB.

Para o desenvolvimento dos algoritmos de simulação foi necessária a revisão avançada de conceitos de Geração de Sinais, Transformada de Fourier, Convolução de Sinais Digitais, Transformada Inversa de Fourier, Processamento de Sinais e Comunicação de Dados.

1.2 MULTIPLEXAÇÃO

Segundo ROCHOL (2012), a multiplexação é o processo que ocorre em consonância com a etapa de modulação, permitindo transmitir, simultaneamente, sinais diferentes na banda de frequência, separando as informações em canais de comunicação diferentes, aumentando assim a capacidade de informação a ser transmitida, como exemplo ressalta-se a necessidade de em muitos casos haver a transmissão concomitante de voz, dados e vídeos em uma comunicação digital de informação. (ABDOLI e MA J, 2015).

As técnicas de multiplexação mais comuns, em tradução literal, são a FDM, multiplexação por divisão de frequências, TDM, multiplexação por divisão de tempo e CDM, multiplexação por divisão de códigos. (ABDOLI e MA J, 2015)

Os avanços da tecnologia de comunicação trouxeram consigo a necessidade de melhor utilização da banda de comunicação de dados e a multiplexação OFDM tem se mostrado muito eficiente para este, de acordo com CORRÊA (2009), estando presente no desenvolvimento de dispositivos e tecnologias de W-LAN, segundo ARTHUR (2007), à qual a radiocomunicação está inserida.

O objetivo, todavia, é apresentar e



descrever as técnicas em discussão e apresentar as vantagens operacionais e de segurança que a técnica OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais), apresenta em comparação com as outras técnicas. Todavia, a técnica OFDM é uma evolução da técnica FDM e não caberá uma discussão quanto ao seu funcionamento em comparação com as técnicas TDM e CDM uma vez que suas implementações, funcionamento e problemáticas são diferentes.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 MULTIPLEXAÇÃO FDM

De acordo com ROCHOL (2012), a técnica de multiplexação FDM divide a banda da frequência, BW, utilizada para modular a informação, frequência portadora, em frações que compartilham essa largura de banda de modo a enviar as informações por subportadoras, N. (HAYKIN, 2009). A banda é dividida de acordo com cada canal de informação a ser transmitida que no caso do canal de voz há uma ocupação de aproximadamente 4kHz, por exemplo. (HAYKIN, 2009)

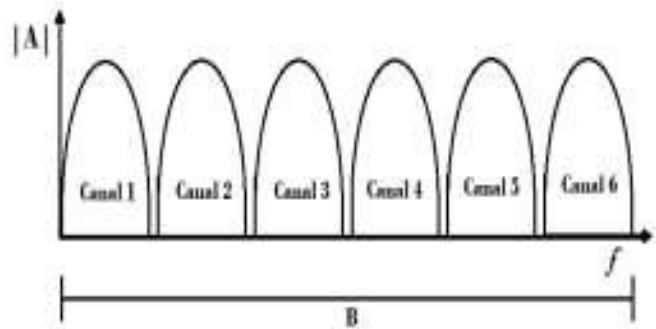
Dividindo a banda da frequência, BW, em vários canais de transmissão, Bs, sendo que estas novas bandas de frequência alimentarão diferentes circuitos de modulação com uma onda portadora para cada estágio. As frequências de subportadora são dimensionadas conforme o canal que se deseja trabalhar e costumam ser igualmente espaçadas entre si. (L. PINTO, 2004) (ABDOLI E MA J, 2015)

$$B_s = BW/N$$

O espectro resultante do sistema FDM é ilustrado nas figuras 1 e 2.

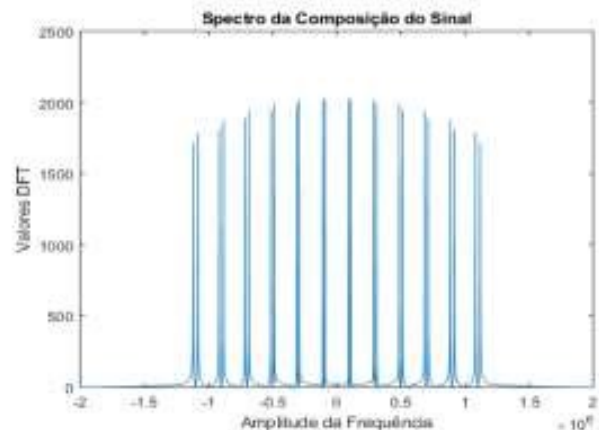
A multiplexação FDM além de otimizar a utilização da banda de frequência, possui vantagem sobre o sistema TDM quanto à segurança e robustez nas operações, pois não necessita de um sistema muito sofisticado de sincronização de canais quanto ao sistema TDM. (MINN, ZENG e BHARGAVA, 2015)

Figura 1 Espectro do Sinal FDMilus



Fonte: (HAYKIN, 2009)

Figura 2 Espectro do Sinal FDM Simulado



Fonte: Matlab/Autor

As desvantagens do uso do sistema FDM devem-se basicamente à restrição da duração dos símbolos enviados, uma vez que o aumento da duração do símbolo, R_s , diminuiria o tempo de símbolo, τ , pois a ocupação de banda se mantém nesse caso. (HAYKIN, 2009)

$$R_s = 1/\tau[\text{baud}]$$

Outra desvantagem no uso do FDM deve-se ao aumento da probabilidade de interferência intersimbólica (ISI) e interferência intercanal (ICI), devido ao multipercurso dos diversos canais. (HAYKIN, 2009) (L. PINTO, 2004)

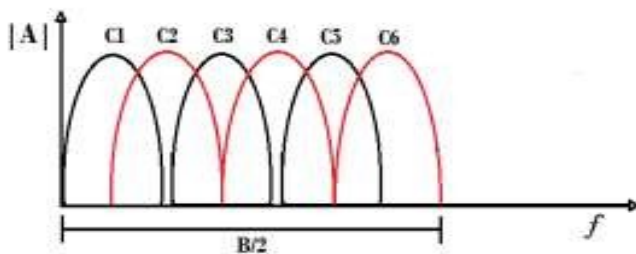
2.2 MULTIPLEXAÇÃO OFDM

A técnica de modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) é uma evolução da técnica de modulação FDM, tendo seu conceito proposto em 1968 e patenteado em 1970, segundo L. PINTO (2004), e implementação possível apenas a partir dos anos 2000 dada a evolução dos sistemas eletrônicos e de telecomunicações. (HAYKIN, 2009).



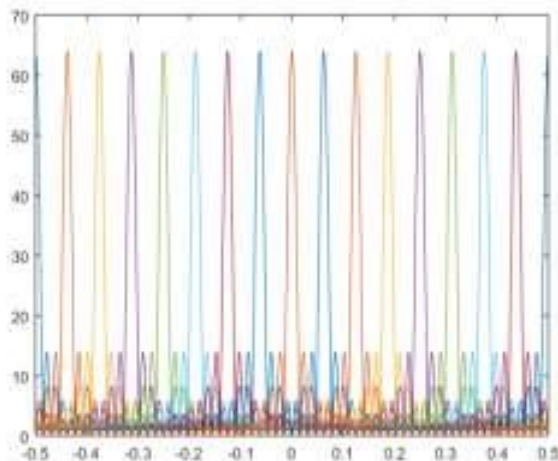
A multiplexação OFDM funciona separando os canais de transmissão em subportadoras, vide figura 3, como no FDM, de acordo com ROCHOL (2012) alterando, contudo, a banda utilizada para o mesmo fim pela metade aproximadamente, segundo MINN, ZENG E BHARGAVA (2015) e IEEE (1999), uma vez que os canais estão ortogonais entre si, ou seja, não se faz necessário um ciclo de 180° para iniciar um novo canal, mas sim um ciclo de 90° , daí sua conceituação como ortogonal-FDM, comprovado pelo teste computacional da figura 4. (ROCHOL, 2012)

Figura 3 Espectro do Sinal OFDM ilustrativo



Fonte: (ABDOLI E MA J, 2015)

Figura 4 Espectro do Sinal OFDM Simulado



Fonte: Matlab/Autor

O sistema OFDM mantém as vantagens operacionais do FDM em relação à multiplexação TDM e o serviço de sincronização de modem. Todavia o sistema possui, igualmente ao FDM, problemas com ICI e ISI. (ABDOLI e MA J, 2015)

Para o problema de ISI, o OFDM possui a vantagem de reduzir a largura de banda em operação e com isso aumentar o tempo de

símbolo. Todavia, uma solução para o problema de ICI, tanto para o circuito FDM quanto ao OFDM é a utilização de um intervalo de guarda, τ_g , que garante um espaçamento entre os canais na recepção e é dimensionado de acordo com a largura do canal. (ROCHOL, 2012) (HAYKIN, 2009).

Como relatado anteriormente o canal de comunicação, meio, impõe diversas perdas ao sistema tais como ruídos aditivos, ISI e ICI.

Contudo, uma dificuldade importante a ser enfrentada é o desvanecimento do canal, cujo o uso de subportadoras auxilia no enfrentamento, principalmente no que tange comunicações de rádio, cujo o canal de comunicação é o espaço livre que pode impor perdas significativas ao sistema comprometendo a recepção. ROCHOL (2012). O desvanecimento refere-se as atenuações sofridas no sinal transmitido pelo canal móvel, sendo ocasionado principalmente pelos vários obstáculos e variações naturais que o sinal percorre até chegar ao seu destino.

Assim sendo, o método proposto propõe demonstrar que, apesar de não haver controle sobre o canal, o uso de subportadoras garante uma comunicação eficiente se comparado a um sistema sem multiplexação.

Com o fim de comparar os métodos de multiplexação apresentados na metodologia foi utilizado o software matemático MATLAB, que realiza teste e análise matemática e gráfica de sinais, simulando uma transmissão de dados aleatórios e sua recuperação através de cálculos matriciais sucessivos e programados.

O OFDM possui aplicabilidade em sistemas diversos garantindo um uso mais eficiente da banda na comunicação de dados no que vale ressaltar sua evolução nos sistemas descritos no quadro 1.

Quadro 1 Aplicações do OFDM

Rádiodifusão de Áudio Digital	DAB
Rádiodifusão de Vídeo Digital	DVB
W-LAN Standart	IEEE 802.11A
Linha de Assinante Digital Assimétrica	ADSL

Fonte: (HAYKIN, 2009)

2.3 METODOLOGIA

Para analisar e comparar a eficiência do método OFDM, foi utilizado como método de análise de dados o software de programação Matlab e foram realizadas comparações de Taxa de erro de bit, BER, por Variação da Relação Sinal Ruído, SNR, para as variações da modulação QAM 16, 32, 64, 128 e 256, com e sem a etapa de multiplexação OFDM.

2.4 ANÁLISE

A eficiência do sistema foi verificada através de testes matemáticos comparando as curvas de BERxSNR com a modulação QAM, considerando maior transmissão de dados, robustez e segurança do sistema quando comparado ao uso da modulação PSK. (ROCHOL, 2012)

Variando a taxa de bits por símbolo, alterando o diagrama de constelação de 16 (4 bits), até 256 (8 bits) chaveamentos por ciclo, num total de transmissão de 10.000 (dez mil) bits gerados aleatoriamente, pode ser analisado e comparado o comportamento do sistema OFDM para um modelo ideal passando por um canal AWGN (Ruído).

A simulação sobre o modelo teórico ideal pode ser realizada no Matlab, mediante a ferramenta Bertool, sem a etapa de multiplexação OFDM.

A taxa de erro de bits (BER) é a relação de número de bits errados por número de bits transmitidos. (ROCHOL, 2012) (HAYKIN, 2009).

BER = (Nº de bits errados/Nº de bits transmitidos)

Já a relação Sinal Ruído (SNR) (ROCHOL, 2012) (HAYKIN, 2009), pode ser expressa pela seguinte fórmula:

SNR por bit ou Eb/No = Sinal/Ruído

Ou seja, quando aumentamos a relação sinal ruído temos mais presença de sinal em relação ao ruído e assim teremos uma tendência menor de erros de bit já que a SNR reduz para a casa de 10^{-6} , erro de 1 bit a cada 1.000.000 (1 milhão) de bits transmitidos.

Os testes realizados com o software Matlab demonstram que o sistema OFDM possui uma operação de comunicação aceitável para uma modulação 16QAM ou 32QAM, o que daria uma transmissão de 64 bits/ciclo ou 160 bits/ciclo, respectivamente, sendo o ciclo dado pelo período, T, da frequência de trabalho. (IEEE, 1999)

Pode ser observado, portanto, que considerando um sistema ideal, utilizando toda banda do canal, quando comparado ao sistema OFDM, demonstra que apesar da complexidade da multiplexação e considerando todo ruído percebido em um sistema de radiocomunicação convencional, ficou constatado que o sistema é aceitável dada as vantagens operacionais de largura de banda e transmissão de informação que ele oferece quando comparado ao sistema convencional, além da robustez contra o desvanecimento seletivo do canal.

CONCLUSÃO

Conforme apresentado e experimentado com o software MATLAB, a técnica OFDM, ao realizar uma multiplexação de origem serial em diversas subportadoras ortogonais moduladas individualmente com QAM, demonstrou eficiência e robustez ao ser percebida na recepção com taxas de erros aceitáveis para sistemas QAM 16 e 32, que são modulações complexas para radiocomunicação e com taxas muito além do necessário em comunicações com este fim.

Somada à simulada eficácia da multi-



plexação, existe a melhor ocupação da banda de transmissão, permitindo o uso de mais canais de comunicação e uma melhor resposta contra desvanecimento seletivo do canal.

Na prática, o OFDM oferece vantagens no uso do canal, tais como: a otimização sobre utilização da banda, maior capacidade de transmissão de dados e maior número de canais de comunicação.

Assim sendo, é aconselhável que em especificações de equipamentos rádio ou de enlace de dados em comunicações operacionais do Exército Brasileiro, as empresas fornecedoras sejam orientadas a oferecerem dispositivos com tal tecnologia, permitindo assim um uso mais amplo do espectro de comunicação. Todavia, faz-se necessário observar que este recurso é válido para comunicações de dados em banda UHF com sinal digital.

THE OPERATIONAL ADVANTAGES OF THE OFDM SYSTEM: MATHEMATICAL AND GRAPHIC ANALYSIS WITH COMPUTATIONAL SOFTWARE

ABSTRACT. THIS ARTICLE IS INSERTED IN THE CONTEXT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY AND AIMS TO PRESENT THE OPERATIONAL AND SAFETY ADVANTAGES OF THE USE OF OFDM MODULATION. THE PURPOSE OF THE RESEARCH IS TO FOSTER THE USE OF SUCH TECHNOLOGY BY THE BRAZILIAN ARMY, GIVEN THE EVOLUTION OF COMMUNICATION TECHNOLOGIES DATA. AS A METHODOLOGY, LITERATURE REVIEWS OF BOOKS, SCIENTIFIC ARTICLES AND PUBLICATIONS OF SCIENTIFIC JOURNALS ON THE IMPLEMENTATIONS OF SUCH TECHNOLOGY AND ITS ADVANCES IN THE REALITY OF DIGITAL COMMUNICATION, HAVING THE CONFERENCE OF SUCH FACILITIES, BASED ON A COMPUTATIONAL AND GRAPHIC ANALYSIS OF THE MULTIPLEXING SYSTEM IN QUESTION, USING MATLAB COMPUTATIONAL SOFTWARE. AS A RESULT, IT SEEKS TO RECONCILE THE ADVANTAGES OF USING THE FREQUENCY SPECTRUM INTRINSIC TO OFDM, TOGETHER WITH THE RELIABILITY AND ROBUSTNESS REQUIRED FOR MILITARY COMMUNICATION TO IMPROVE COMMUNICATIONS WHEN USING THIS TOOL. FINALLY, TO CONCLUDE WHETHER THE SPECIFICATION OF DATA COMMUNICATION MATERIALS USING SUCH TECHNOLOGY IS ADVANTAGEOUS IN THE OPERATIONAL USE OF THE BRAZILIAN ARMY.

KEYWORDS: OFDM MULTIPLEXING. COMPUTATIONAL ANALYSIS. SPECTRAL RESPONSIBLE.

REFERÊNCIAS

- [1] Frenzel Jr., **Louis E. Eletronic Communication Systems**. 4th ed. McGrawHill Education. 2015.
- [2] (ROCHOL, 2012) Rochol, Juergen. **Comunicação de Dados**. Edição 01. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- [3] (HAYKIN, 2009) HAYKIN, S. **Communication Systems**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [4] Corrêa, Willian Câmara. **Estudos de sistemas OFDM para Comunicações Ópticas**. São Carlos: USP, 2012. 115f. Dissertação de Mestrado – Mestre em Ciências – Programa de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [5] Arthur, Rangel. **Novas Propostas para otimização de receptores de TV Digital baseados em OFDM em ambientes de Redes de frequência única regionais**. Campinas: Unicamp, 2007. 184f. Tese de Doutorado, Programa de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [6] David, Rodrigo Pereira. **Técnica de Estimação de Canal Utilizando Símbolos Pilotos em Sistemas OFDM**. Rio de Janeiro: PUC, 2007. 132f. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- [7] L. Pinto, Ernesto; P. de Albuquerque, Cláudio. **A Técnica de Transmissão OFDM**. 2004. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tc/cs/27.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- [8] Abdoli J., Jia M. e Ma J., **Filtered OFDM: A New Waveform for Future Wireless Systems**, 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Stockholm, 2015, pg. 66-70.
- [9] Minn, H.; Zeng, M.; Bhargava, V.K., **On timing offset estimation for OFDM systems**, Communications Letters, IEEE, vol.4, no.7, pp.242,244, julho de 2000
- [10] Schmidl, T.M.; Cox, D.C., **Robust frequency and timing synchronization for OFDM**, Communications, IEEE Transaciones on, vol.45, no.12, pp.1613,1621, dezembro de 1997.



[11] IEEE Std 802.11a, Parte 11: **Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**, 1999.

O autor é bacharel em Ciências Militares pela Academia de Bombeiros Militar de Minas Gerais (ABMMG), Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo, (UFES). É pós-graduado em Eletrônica e Eletromecânica pela Universidade Cândido Mendes. Atualmente, exerce a função de Chefe da Seção de Manutenção Eletroeletrônica no Corpo de Bombeiros Militar do Espírito Santo (CBMES) e pode ser contatado pelo e-mail david.santos@bombeiros.es.gov.br

