



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO

Diego Mello Costa Senese

**SIMULAÇÃO DE REDE EDGE COM LOW ALTITUDE PLATFORMS
DENTRO DO CONTEXTO DE CENÁRIOS DE DESASTRE**

Santo André – SP
2020

Diego Mello Costa Senese

SIMULAÇÃO DE REDE EDGE COM LOW ALTITUDE PLATFORMS
DENTRO DO CONTEXTO DE CENÁRIOS DE DESASTRE

Monografia apresentada à banca examinadora do curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Bellezoni Loiola

Santo André – SP
2020

RESUMO

O objetivo deste trabalho é pesquisar as referências de recuperação das comunicações móveis usando plataformas de baixa altitude (LAPs, do inglês Low Altitude Platforms) e simular um modelo de canal para verificar a possibilidade de reestabelecimento da comunicação móvel através do LAP. A BER obtida neste estudo, de aproximadamente 10^{-4} para o BPSK e uma flutuação entre 10^{-2} e 10^{-3} para toda o intervalo de SNRs para 4-QAM e 16-QAM, indica que a transmissão simulada no modelo de canal usado permite a recuperação das comunicações no ambiente destruído, mas não é suficiente para prover uma comunicação de qualidade e impulsionar alguns casos de uso elaborados pelo surgimento do 5G no mundo. Entretanto, é incentivada a continuidade dos estudos deste tema, principalmente no quesito de processamento de sinais, pois são muitos os pontos positivos na superação deste desafio.

INTRODUÇÃO

Vivemos em uma época que avanços tecnológicos extraordinários estão sendo realizados em diversas áreas de conhecimento. Avanços esses que trazem mais facilidade, mais saúde, velocidade, segurança e/ou capacidade; e isso serve para qualquer evolução que pensemos neste exato momento. Tomemos como exemplo a nova geração da arquitetura de telecomunicações, o 5G. Considerada por muitos como a tecnologia disruptiva da década, o 5G irá permitir que uma série de novas aplicações nasçam se beneficiando da altíssima taxa de transferência, baixa latência, criptografia de ponta a ponta e muito mais. Irá permitir, ainda, que conceitos já existentes e bastante estudados, como a Internet das Coisas, se consolidem e atinjam todo o potencial esperado.

Com toda a tecnologia que presenciamos atualmente, podemos viver em um mundo mais saudável e seguro, porém essa não é a realidade de um enorme número de pessoas que sofrem com desastres causados por diversos motivos: naturais, criminais, negligência, guerras ou falta de políticas públicas. Em um desastre, entra em ação um sistema que trabalha em conjunto para analisar o estado de destruição, resgatar vítimas e minimizar perdas. Esse sistema está atrelado a todo um contexto que diz respeito ao local e gravidade da tragédia, infraestrutura da cidade e repasse de verba para políticas de amparo.

Em uma destruição de grande escala, esse sistema é formado por policiais, bombeiros, paramédicos do pronto atendimento hospitalar e outras entidades que atuam em uma situação de emergência. Visto que são muitos profissionais envolvidos em uma circunstância de muita tensão, é muito importante que haja uma correta troca de informações entre unidades centrais e de campo. Para possibilitar certa agilidade na tomada de decisões, é essencial uma comunicação móvel de qualidade e que atenda às necessidades de todos os atores deste sistema (JARWAN, SABBAH, *et al.*, 2019).

No contexto de desastres naturais, infelizmente são muitos os exemplos que devastaram cidades deixando milhares de pessoas desabrigadas. Além disso, a infraestrutura que é construída ao longo de anos para oferecer os serviços mais básicos para essas populações é totalmente ou parcialmente destruída. Um caso chocante é o do furacão Dorian, classificado como categoria 5 na escala Saffir-

Simpson, que causou terríveis estragos em Bahamas, no Caribe. Bogdan-Martin (2019), diretor da União Internacional de Telecomunicações (ITU), relata que torres celulares viraram apenas pedaços de metal e a comunicação, inclusive com agências governamentais, era impossível. A saída neste caso foi a distribuição de telefones por satélite como equipamentos críticos de comunicação e celulares para a população depois que as estações rádio base (ERBs) foram parcialmente restauradas.

Tamanha calamidade demanda um planejamento prévio e ações efetivas. Por isto, a motivação deste trabalho é o desejo de unir os avanços tecnológicos no campo das telecomunicações com todo um sistema de recuperação de acidentes de grandes proporções, tendo o objetivo de restaurar a comunicação móvel de autoridades, serviços de emergência e auxiliar na busca de vítimas.

Sabendo que desenvolver uma solução para prevenção de alguma catástrofe depende de que tipo de desastre estamos lidando, proponho um sistema de implantação pontual de rede móvel em um cenário de desastre em grande escala. Em outras palavras, disponibilizar cobertura em uma área geográfica destruída por meio de plataformas de baixa altitude para permitir que: linhas de emergência consigam comunicação de qualidade; sobreviventes tenham acesso à rede para pedidos de socorro e compartilhamento de localização; e prevenir que a rede atual, caso ainda exista, não sofra com congestionamentos.

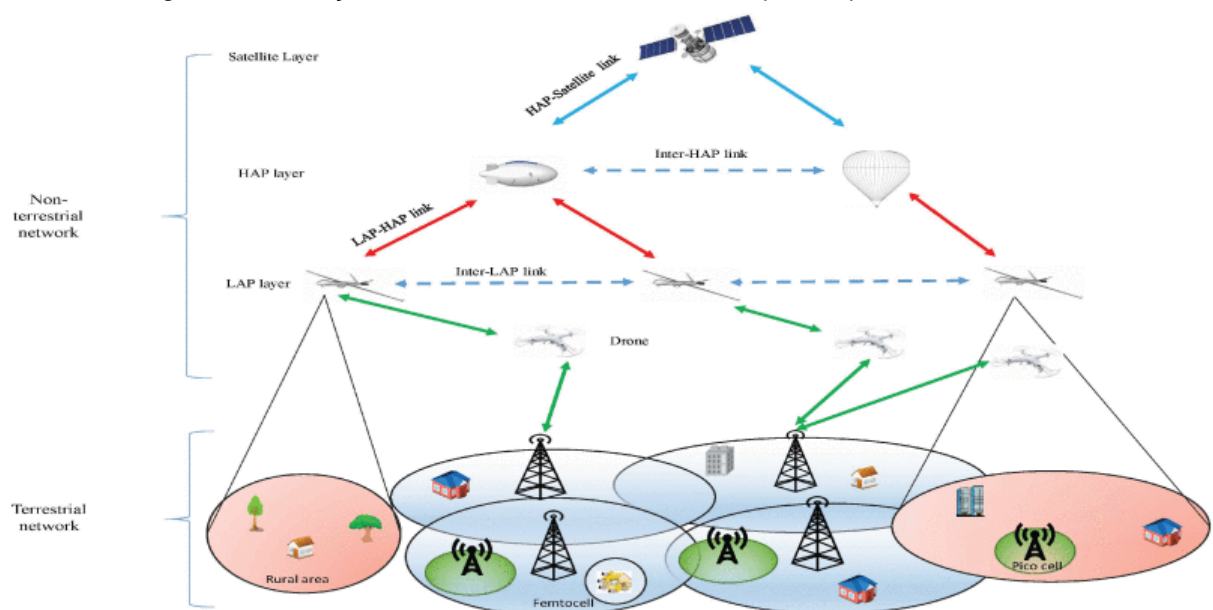
O escopo deste trabalho é, portanto, simular um modelo de canal com características similares a uma rede 2.5G (EDGE) para testar a viabilidade de uma implementação de LAP atuando como uma ERB para que seja possível restaurar as comunicações móveis da região geográfica destruída. Esta simulação será realizada com parâmetros considerados moderados com o objetivo de obter resultados médios de uma transmissão deste tipo.

CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Redes móveis aplicadas em cenários de desastre são estudadas há anos e a ideia principal deste trabalho não é nova, porém cada variação traz uma contribuição diferente a este campo de estudo. Ao ler sobre este tópico, impossível não se remeter ao famoso Loon: balões estratosféricos da Google capazes de fornecer acesso à Internet a locais remotos. Tal tecnologia pode reduzir custos com infraestrutura terrestre e prover comunicação em desastres naturais ou em crises humanitárias (KATIKALA, 2014).

LAP é um termo genérico usado para descrever plataformas aéreas de baixa altitude capazes de servir como estrutura para oferecer comunicação sem fio. Na literatura, não parece haver uma definição exata de qual altitude em relação ao solo classifica um veículo aéreo como LAP ou HAP (High Altitude Platform – Plataforma de Alta Altitude), mas isto é por causa da grande variedade de plataformas com diferentes características que influenciam na altitude, tempo de permanência no ar, necessidade de combustível, influência do fluxo do ar na plataforma, dentre outros fatores. No entanto, é possível perceber um consenso de que LAPs são plataformas que não ultrapassam a altitude de 1 km para manter a relativa facilidade de uma implementação e não atrapalhar a trajetória de veículos aéreos tripulados.

Figura 1 - Ilustração de redes terrestres e aérea compostas por LAPs e HAPs



Fonte: (CAO, YANG, *et al.*, 2018)

Neste trabalho será considerada apenas a camada de LAPs, ilustrada na Figura 1, possuindo uma comunicação cooperativa com outras LAPs, com ERBs terrestres ou atuando sozinha como uma ERB.

Diversas plataformas podem ser usadas para a implementação de redes de comunicação aéreas, como: balões, drones, dirigíveis, veículos aéreos não tripulados e tripulados, como o helicóptero. Entretanto, essa escolha não é arbitrária, pois demanda um estudo de todas as características de cada opção, local de implementação, verba disponível, capacidade de locomoção terrestre, entre outros fatores. Chandrasekharan, Gomez, *et al.* (2016) realizaram uma extensa pesquisa contendo modelos de canal, comparação de plataformas, funções de rede e regulamento de redes aéreas para dar vida ao ABSOLUTE, um projeto com componentes terrestre e aéreo capaz de disponibilizar rede 4G (LTE-Advanced) de modo barato e eficiente usando um Helikite ancorado em um carro como LAP. De acordo com o estudo, o uso de plataformas aéreas fornece uma vantagem de comunicação em relação a torres terrestres por causa de ângulo formado entre a antena e o terminal.

Redes de comunicação baseadas em LAPs oferecem grandes vantagens de implementação quando comparadas a ERBs terrestres em recuperação de desastres. Porém, a estrutura de uma rede baseada em LAP se mostra muito mais complexa devido à capacidade de diversas topologias de rede e dimensões da plataforma aérea, assim como sua movimentação no ar. Por isso, há três grandes perspectivas a se considerar na implementação de redes LAP: controle de movimento, mecanismos de rede e transmissão do sinal (CAO, YANG, *et al.*, 2018).

Neste trabalho, a última perspectiva será importante para estimar corretamente o modelo de canal a ser simulado e obter resultados confiáveis. Pela transmissão do sinal, protocolos eficientes e modelos de canais fidedignos à transmissão real para oferecer transmissão de pacotes em altas taxas e eficiência do uso de banda.

Ainda que o foco principal deste trabalho seja a simulação de uma rede formada por LAPs considerando fatores de uma devastação de terríveis proporções, essas mesmas plataformas podem ser usadas para auxiliar a comunicação móvel em um evento que promova uma grande concentração de pessoas. Nesta era de digitalização e transformação digital, o compartilhamento de conteúdo, seja ele vídeo, voz ou dados, é extremamente importante para a integração social de milhões de pessoas, e

outras milhões onde o seu trabalho é, justamente, compartilhar. Eventos comuns que reúnem milhares de pessoas, como partidas de futebol, shows e conferências causam um pico de demanda gigantesco na rede móvel causando congestionamentos e impossibilitando a comunicação com o mundo externo (e online).

No sentido de suportar um cenário de grande utilização da rede ou de recuperar comunicações de emergência, entra em ação o 5G. A quinta geração da arquitetura de comunicações desempenha um papel importante nestes casos, pois sua capacidade de suportar alto volume de tráfego e baixa latência permite que aplicações que se apoiam nessas características tenham total proveito de todo o recurso disponibilizado.

O 3GPP (2019), órgão responsável pela regulamentação, padronização e criação de tecnologias de telecomunicações, elencou uma série de casos de uso em que o 5G pode realizar em comunicações por meio de HAPs/Satélite. Esta lista de casos de uso foi adaptada para que se adequem em um ambiente formado por LAPs, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Possíveis casos de uso em um cenário de desastre usando LAPs

Serviço ativador do 5G	Caso de uso do 5G	Descrição do caso de uso	Serviço habilitado pelos LAPs
eMBB	Broadcast direto ao nó/Segurança pública de pequena ou grande área	Serviços de vídeo entregues direto a um ou mais terminais	Drones capazes de filmar toda a área destruída e enviar a imagem através dos LAPs para terminais do serviço de emergência
eMBB	Broadcast direto ao nó	Autoridades de segurança pública que precisam de comunicação instantânea para avisar sobre eventos catastróficos e obter instruções	Broadcast/Multicast direto para o equipamento do usuário seja ele um celular ou veículo
eMBB	Segurança pública de área local	Autoridades médicas que necessitam de orientação em vídeo para a realização de procedimentos	Ambulâncias dentro do sistema de 5G estarão equipadas para se comunicar com LAPs e transmitir vídeo e/ou movimento de sensores para auxílio do médico socorrista

Fonte: Adaptado de (3GPP, 2019)

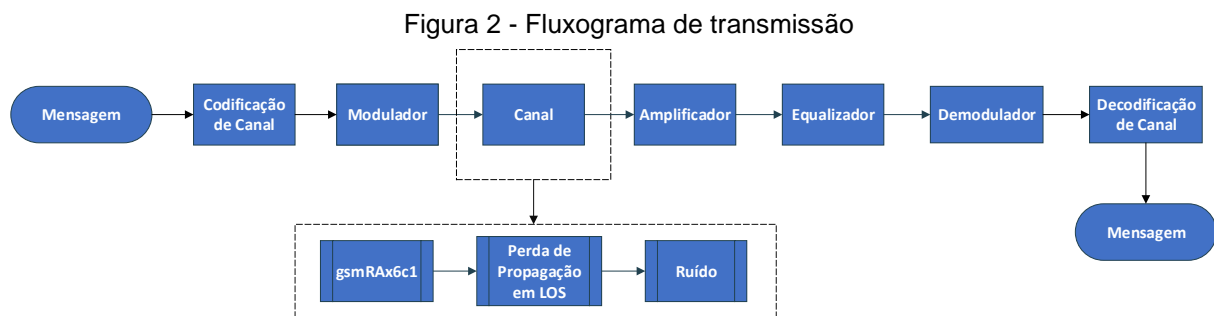
Porém, o conjunto de todos os benefícios que o 5G traz para a conectividade móvel da sociedade somado aos sofisticados casos de uso elaborados pela indústria traz um aumento de complexidade enorme embutida na infraestrutura necessária para que as vantagens do 5G se tornem realidade. Considera-se neste trabalho que o LAP é um equipamento agnóstico; não se conhece qual plataforma aérea será implementada. Então a energia necessária para abastecer uma plataforma que ofereça a potência que a quinta geração de telefonia móvel possui é extraordinária e irrealizável em termos práticos.

Isso levanta a seguinte discussão: todo esse poderio é necessário para restaurar as comunicações em situações de emergência? Em destruições de grandes proporções, o simples fato de existir buscas de vítimas mais efetivas e troca de informações remota entre autoridades é muito mais importante do que os casos de uso apresentados acima. Sendo necessário, então, que apenas áudio e pequenas amostras de dados sejam trocados terminais, compartilhamento de vídeo e aplicações avançadas são dispensáveis em uma situação emergencial.

Dito isso, embora o nível de inovação em que vivemos atualmente dê embasamento para que seja possível a execução de um projeto desta dimensão em um futuro próximo, a simulação de um modelo de canal de 5G foge do escopo deste trabalho e o foco assumido aqui é simular uma transmissão com um canal de características semelhantes a uma rede EDGE padronizada.

METODOLOGIA E SIMULAÇÃO

O fluxo de uma transmissão segue um caminho bem definido, embora o sinal de rádio sofra diversas interferências, atrasos, reflexões e dispersões até chegar ao receptor. Logo, um fluxograma foi criado com o objetivo de acompanhar com clareza o caminho a ser seguido e ter uma visão geral do sistema. Na programação da simulação, alguns passos podem vir antes de outros por conveniência, mas a aplicação destes processos no sinal segue a ordem vista aqui:



Como dito anteriormente, há um incrível aumento de complexidade na construção de uma arquitetura tão poderosa, e também na simulação e nos testes da arquitetura 5G. Portanto, optou-se por simular um canal semelhante à rede 2.5G (EDGE), porém que não segue absolutamente todos os requisitos desta rede. Antes de conduzir e esclarecer os passos que foram feitos durante a simulação neste trabalho, algumas premissas foram assumidas:

Tabela 2 - Coeficientes usados na simulação

Coeficiente	Descrição	Valor
h	Altura do LAP em relação ao solo	200 m
d	Distância do equipamento ao LAP	500 m
f	Frequência da portadora	2,8 GHz

No caminho representado pela Figura 2, a geração da mensagem não é de grande importância, pois independente de qual seja, terá de passar pelo mesmo fluxograma imposto. O que vale dizer neste momento é que será simulada uma transmissão digital de uma mensagem binária.

Modulação

Para que os símbolos binários possam ser transmitidos de forma a serem tolerantes à intensa atenuação que irá ocorrer no canal, a modulação é a técnica de alterar as propriedades do sinal a fim de suportar as distorções e permitir que o sinal possa ser recuperado no receptor com mais confiabilidade.

Neste trabalho serão usadas três modulações para comparar o resultado final da simulação: BPSK, cujos símbolos terão sua fase modificada e serão transmitidos apenas dois símbolos pelo canal; 4-QAM, onde além da fase, a amplitude também é modulada e o mapeamento de símbolos é de 4 bits por símbolo; e 16-QAM, com a mesma modulação em quadratura do 4-QAM, porém 16 símbolos sendo transmitidos.

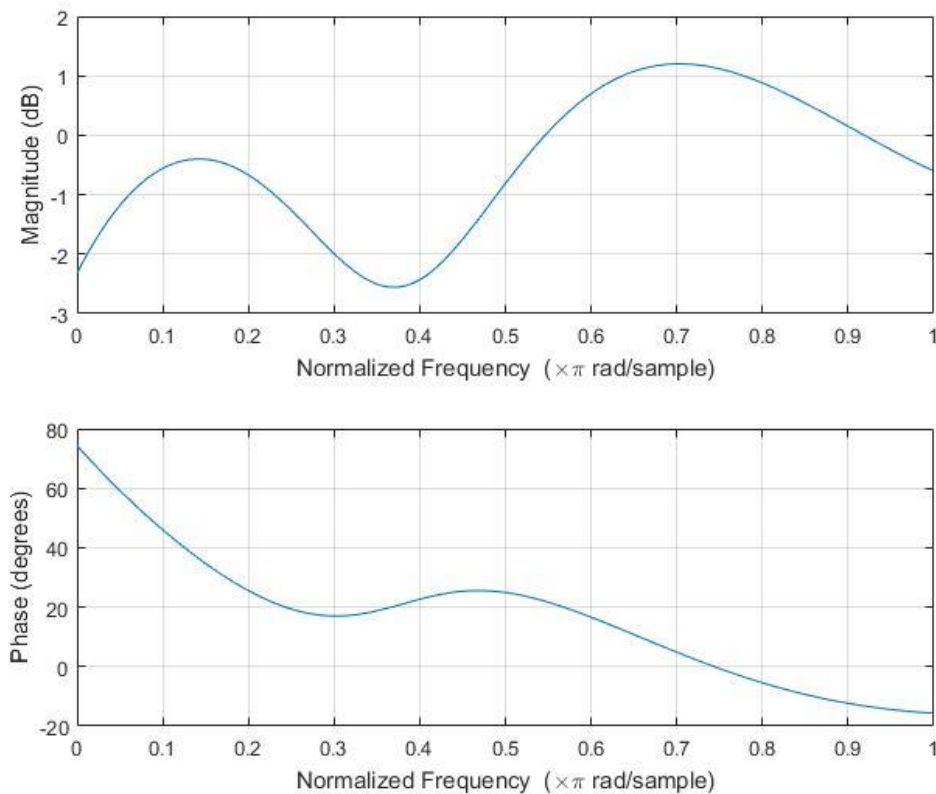
Canal

O modelo de canal é, praticamente, o componente de maior atenção neste trabalho, pois é ele que irá ditar os aspectos estatísticos desta transmissão. Antes, uma observação: durante a revisão da bibliografia para este trabalho, não foi encontrado um modelo de canal específico para comunicação baseado em LAP. Por isso, foram testados vários canais padronizados que o software Matlab disponibiliza para simulações. Neste trabalho, por estarmos tratando de uma transmissão Uplink, o modelo de canal pode ser simplificado para um modelo rural, visto que o LAP estará em um ponto alto do território e possivelmente o EU terá linha de visada com a plataforma aérea. Dada uma área de destruição, o sinal transmitido a partir de celulares de vítimas poderá sofrer com desvios vindo de escombros ou outros objetos; este tipo de desvio forma um cluster de reflexão, onde o equipamento transmissor está muito próximo do chão ou de superfícies que irão refletir o sinal. Este modelo de cluster é um modelo complexo de simulação e foge do escopo deste trabalho. O canal usado para a simulação segue a distribuição de atenuação de Rice, cujo sinal transmitido possui uma componente de alta energia, devido a um fator de linha de visada para o receptor, e outras componentes de menor energia. Caso haja componentes de multipercurso relevantes, o canal Rice se torna uma distribuição de Rayleigh (RAPPAPORT, 2009).

Na simulação, foi usado o **gsmRax6c1**, um canal obtido a partir de funções padronizadas do software Matlab. Este é um modelo construído a partir de medidas empíricas para terrenos rurais e usado para simulações multipercurso com uma

componente dominante de linha de visada. O canal utilizado possui 6 taps e os dados experimentais podem ser encontrados no trabalho do (3GPP, 2007). Segue a resposta em frequência do canal utilizado:

Figura 3 – Resposta em frequência do canal durante a simulação



A perda de propagação diz respeito à perda de potência do sinal durante a sua viagem pelo meio. Diversos trabalhos elaboraram seus próprios cálculos de perda de propagação que melhor consegue descrever o impacto do meio no sinal transmitido. Qiu, Chu, *et al* (2017), por exemplo, chegaram a seu modelo da perda de propagação através de medidas experimentais realizadas a partir da trajetória de vôo de um drone atuando como transmissor para a comunicação ar-superfície. O modelo resultante conta com um termo derivado da distância relativa D entre receptor e transmissor, a perda dada a distancia de referência D_0 e também um termo de desvanecimento de pequena escala seguindo a distribuição de Rice.

$$PL(D) = PL(D_0) + 10n \log \left(\frac{D}{D_0} \right) + X_\sigma(K) \quad (1)$$

Na Equação acima, n é um termo também obtido experimentalmente e expressa o expoente da perda de propagação; seu valor varia de acordo com a altura do drone e com o intervalo de frequência da portadora (banda C ou banda L). $X_\sigma(K)$ é o componente de desvanimento em pequena escala e K é o fator de Rice, proposto pelos autores, dependente da altura do drone.

Chandrasekharan, Gomez, *et al.* (2016) modelam a perda de propagação de forma mais básica, assumindo que esta métrica depende da perda referente às transmissões em linha de visada (LOS, do inglês Line of Sight) e NLOS (non-LOS) também da perda de propagação no espaço livre (FSPL, do inglês Free Space Path Loss):

$$PL_\xi = FSPL + \eta_\xi \quad (2)$$

cujo símbolo ξ representa o grupo de propagação (LOS ou NLOS) e η é a perda de propagação adicional de cada grupo.

Al-Hourani, Kandeepan e Jamalipour (2014) também consideraram, como mostra a Equação (3), a perda de propagação adicional como a diferença da perda de propagação do sistema pela perda em espaço livre, uma derivação direta da Equação (2). Entretanto, os autores definiram a perda de propagação do sistema como função da diferença entre a potência transmitida e a potência recebida.

$$\eta_n = PL_n - FSPL_n \quad (3)$$

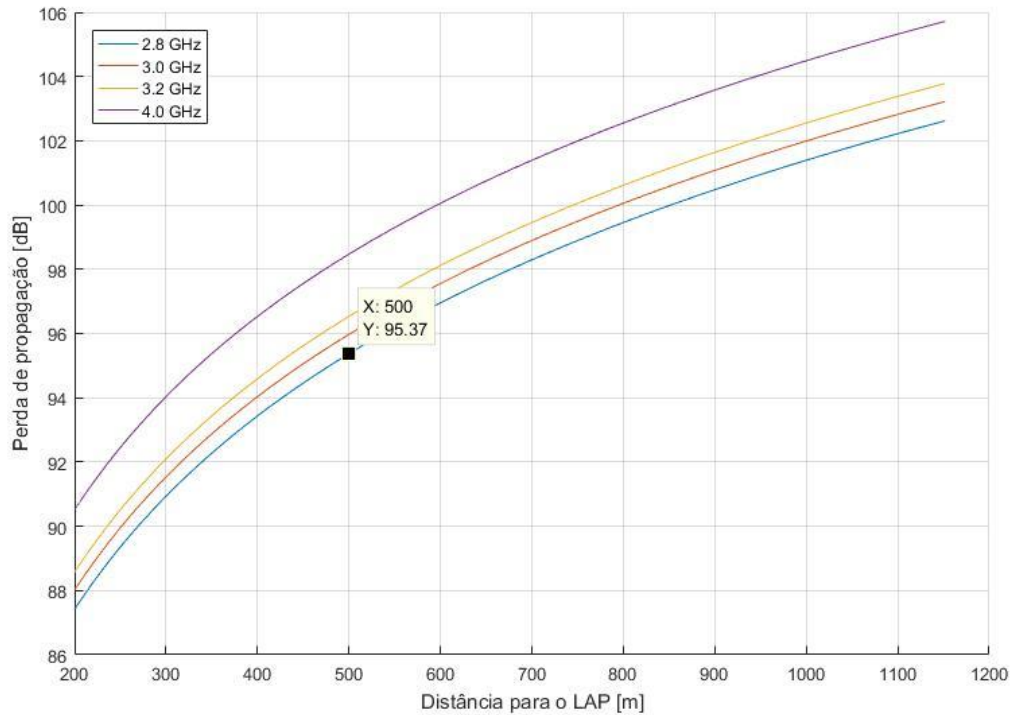
$$PL_n = 10 \log(P_{TX}) - 10 \log(P_{RX_n}) \quad (4)$$

Para este trabalho foi assumido, sem perda de generalidade, que a potência média de transmissão é unitária, o que facilita a realização da simulação e, portanto, o modelo de FSPL pode representar fielmente a diminuição da potência do sinal no receptor. Foi usado então, para todo o resto do trabalho, o cálculo da perda de propagação derivada da equação de Friis e adaptada de (AL-HOURANI, KANDEEPAN e JAMALIPOUR, 2014).

$$FSPL = 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d - 147,55 \quad (5)$$

Onde f é a frequência da portadora em Hz e d é a distância em metros do transmissor até o LAP. A figura abaixo mostra a perda de propagação do sinal em relação à distância em linha reta do transmissor ao LAP.

Figura 4 – Perda de propagação para diversas frequências de portadora



Além disso, ruído branco é adicionado ao sinal para simular uma transmissão real pelo espaço livre.

Ao final destas três etapas que compõem o canal, por onde o sinal é intensamente atenuado, o sinal resultante $s(n)$ possui uma amplitude muito baixa, sendo necessário amplificá-lo antes de iniciar o processamento no receptor. Por isso, um ganho é aplicado ao sinal resultante:

$$\beta = \text{máx}\{|s(n)|\} \quad (6)$$

Logo, o sinal amplificado é dado por:

$$u(n) = \frac{s(n)}{\beta} \quad (7)$$

Equalizador

Modelos de canais de comunicações móveis são particularmente mais agressivos que um canal AWGN padrão, pois a sua natureza variante no tempo introduz diversas interferências e distorções ao sinal, sendo necessário um processamento robusto para obter uma demodulação favorável. Assim sendo, o equalizador somado à codificação de canal são componentes imprescindíveis para que o sinal recebido pelo LAP esteja livre de qualquer interferência introduzida pelo canal e a mensagem possa ser entendida completamente.

O equalizador é um componente do sistema que visa minimizar a Interferência Intersimbólica (ISI – Intersymbol Interference) causada pela distorção do canal de rádio móvel. Em um caminho multipercurso, o sinal se espalhará e chegará no mesmo receptor em momentos diferentes no tempo causando uma sobreposição de símbolos, a ISI. A tarefa do equalizador é – tentar – anular este efeito degradante do sinal.

Utilizou-se nesse trabalho o LMS (Least Mean Square – Mínimo Erro Quadrático Médio), um equalizador linear cujo objetivo é minimizar o erro quadrático médio (MSE, do inglês mean-squared error). O LMS é um equalizador adaptativo e sua implementação é relativamente simples; a ideia por trás de seu algoritmo é obter, através de um método adaptativo, um conjunto de coeficientes capazes de aproximar o sinal dado na entrada do equalizador por um sinal desejado. Seu algoritmo é considerado estocástico devido a movimentação aleatória ao redor do ponto mínimo a cada passo dado iterativamente. De acordo com Rapaport (2009), uma sequência de treinamento deve ser fornecida ao equalizador periodicamente quando se deseja que o sinal equalizado seja uma réplica da entrada, como é o caso deste trabalho.

Pode-se dividir o algoritmo em dois processos: i) um processo de filtragem, cujo erro é estimado dada a comparação entre a saída do filtro e o sinal desejado (d) e ii) um processo adaptativo, onde ocorre o ajuste dos coeficientes de acordo com a estimativa do erro.

Para ser obtida, então, a mínima MSE (MMSE), o objetivo do LMS é minimizar o gradiente da função custo, isto é,

$$\nabla J(n) = -2p + 2Rw(n) = 0 \quad (8)$$

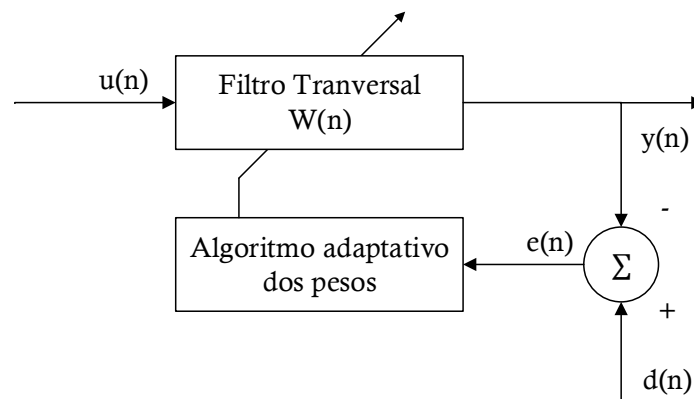
onde \mathbf{w} é o vetor de coeficientes do equalizador, \mathbf{p} é o vetor de correlação cruzada entre a entrada do filtro e o sinal desejado e \mathbf{R} é a matriz de autocorrelação da entrada, conforme as equações a seguir, que mostram as estimativas dessas matrizes obtidas a partir dos sinais disponíveis ao receptor:

$$\hat{R}(n) = u(n)u^T(n) \quad (9)$$

$$\hat{p}(n) = u(n)d(n) \quad (10)$$

O LMS, portanto, calcula iterativamente o menor erro quadrático médio através de atualizações do vetor de coeficientes. A Figura 5 representa o funcionamento do equalizador e é capaz de elucidar os dois processos mencionados acima:

Figura 5 – Diagrama do LMS



Com o auxílio do diagrama acima, pode-se observar três pontos principais de atuação do equalizador. Logo, seu algoritmo pode ser derivado nas três equações que seguem:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (11)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu u(n)e(n) \quad (12)$$

$$y(n) = w^T(n)u(n) \quad (13)$$

O somatório do lado direito da Figura 5 diz respeito a relação descrita na Equação (11), cujo erro $e(n)$ é estimado entre a diferença do sinal desejado $d(n)$ que, como mencionado acima, é o sinal de treinamento e o sinal equalizado $y(n)$. Depois, esta estimativa é multiplicada pelo passo μ previamente definido e, também, pela

entrada $u(n)$ para controlar o peso dos coeficientes $w(n)$ da próxima iteração que serão aplicados à entrada; este mecanismo é representado pela Equação (12). Por último, a Equação (13) mostra o cálculo da saída $y(n)$ do equalizador, que é ajustada pela multiplicação da entrada pelos coeficientes adaptados (HAYKIN, 1996).

Codificação de Canal

Já a codificação de canal diz respeito à técnica capaz de introduzir bits de redundância na mensagem, permitindo que o sinal ainda possa ser corretamente recuperado depois de ser corrompido pelo ruído e pela natureza do canal.

Na aplicação deste trabalho, foi utilizado na simulação um código convolucional implementado pelo Matlab. O código convolucional produz uma saída, conhecida como palavra código, que é gerada através do mapeamento do sinal binário por um registrador de deslocamento finito de k entradas, n saídas e N elementos de memória. Isso significa que as saídas do codificador não dependem apenas do instante atual da entrada, e sim das entradas passadas em N instantes de tempo. Uma métrica relevante para o código convolucional é taxa de codificação, formada pela razão

$$R = \frac{k}{n} \quad (14)$$

que indica a quantidade de redundância inserida na mensagem.

O codificador deste tipo de código pode ser representado de diversas maneiras: matriz geradora, tabela lógica, diagrama de estado, diagrama de árvore, entre outros. Este trabalho dará foco a dois: polinômios geradores e diagrama em treliça.

O polinômio gerador representa, através de seus coeficientes, a conexão entre a entrada binária, a saída e o registrador de deslocamento. Já o diagrama em treliça representa a transição dos bits de entrada para os bits de saída, baseado na quantidade de registradores de deslocamento (RAPPAPORT, 2009).

Na simulação deste trabalho foi usada uma função do Matlab chamada *polly2trellis* para converter um polinômio, uma forma mais simples de representar o codificador, em uma treliça. Esta estratégia é usada para que essa mesma treliça possa ser usada no decodificador. Os polinômios usados foram

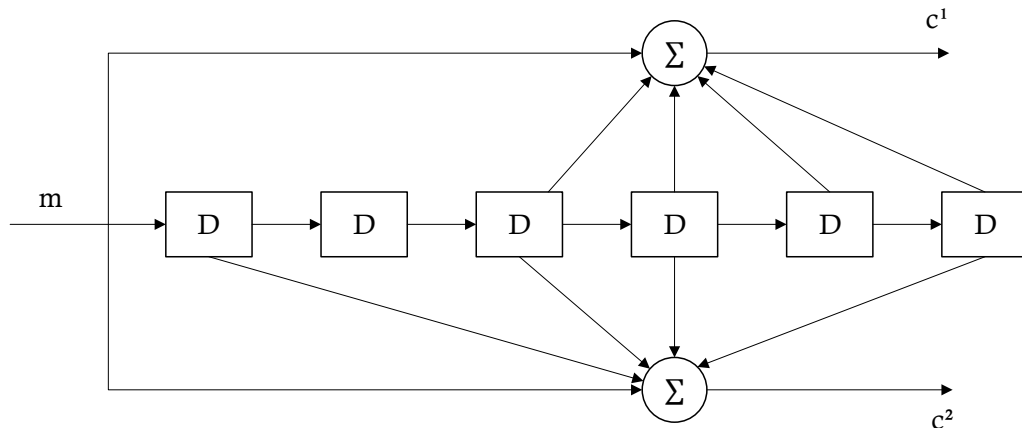
$$g_1(D) = 1 + D^3 + D^4 + D^4 + D^5 + D^6 \quad (15)$$

$$g_2(D) = 1 + D + D^3 + D^4 + D^6 \quad (16)$$

onde D indica um operador de atraso e sua potência revela a quantidade de atraso. O número de polinômios indica, portanto, o número de saídas do codificador, o que significa que este diagrama possui taxa de codificação $R = 1/2$.

A Figura 6 é uma representação visual do codificador dado os polinômios das Equações (15) e (16). Nela, pode-se ver claramente o funcionamento do sistema e como a saída é composta pela entrada mapeada pelos registradores de deslocamento. O somatório é uma operação de adição módulo-2 linear.

Figura 6 – Código convolucional aplicado à mensagem



O decodificador deste código é implementado pelo algoritmo de Viterbi. O algoritmo usa o diagrama em treliça – no caso deste trabalho, a mesma do codificador – para encontrar o caminho que mais se assemelha ao código recebido, sendo um decodificador de máxima verossimilhança: o algoritmo calcula a distância de Hamming para cada palavra código representada por um caminho na treliça; o caminho que possui a menor distância em um dado estágio seguirá para a próxima iteração até se obter a solução ótima (LATHI e DING, 2010).

A decodificação do código convolucional é feita usando a função *vitdec* do Matlab.

RESULTADOS

A simulação é realizada seguindo o fluxo de transmissão mostrado na Figura 2, mas efetivamente o código se repete diversas vezes com diferentes porções da mensagem a ser transmitida e de símbolos de treinamento. Em todos os resultados apresentados a seguir, foram enviados 100 blocos de transmissão compostos por 10 mil bits de informação, 2 mil bits de treinamento e 500 tail bits.

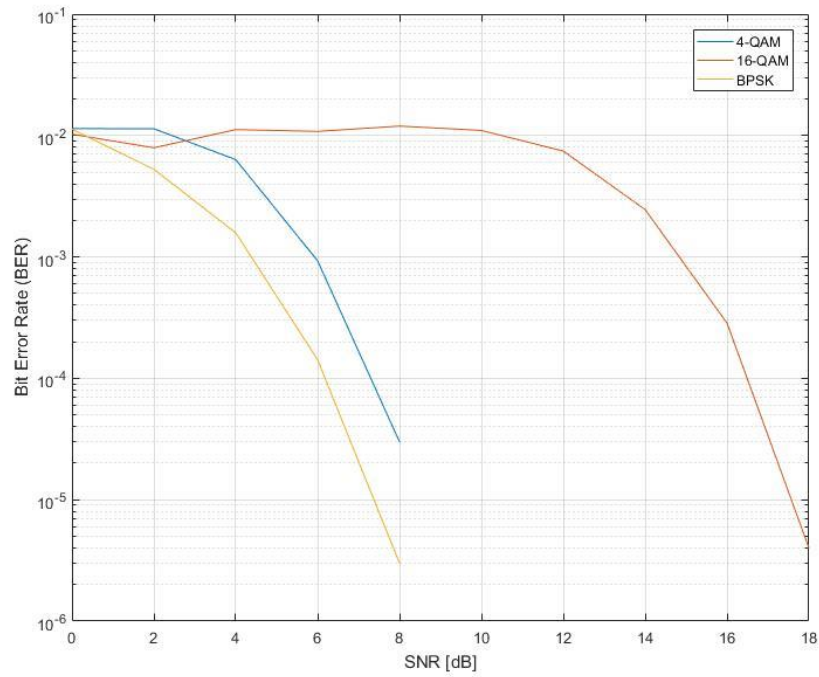
A principal métrica de efetividade desta comunicação simulada é a BER (Bit Error Rate – Taxa de Erro de Bit). Com esta estatística, é possível ter uma clara visualização da distorção imposta pelo canal e da comparação entre as modulações implementadas. A Tabela 2 indica que foram usados valores médios durante a simulação do modelo de canal, podendo-se dizer que o resultado apresentado a seguir é um resultado médio para este modelo de canal.

Nota-se que não houve comparação entre diversos valores de altura do LAP ou distância entre o EU e o LAP devido à baixa diferença de resultados. Ademais, é significativo o foco deste trabalho também no campo prático, portanto qualquer mudança na altura do LAP poderia indicar uma plataforma aérea diferente a ser utilizada, implicando na dificuldade de implementação deste estudo.

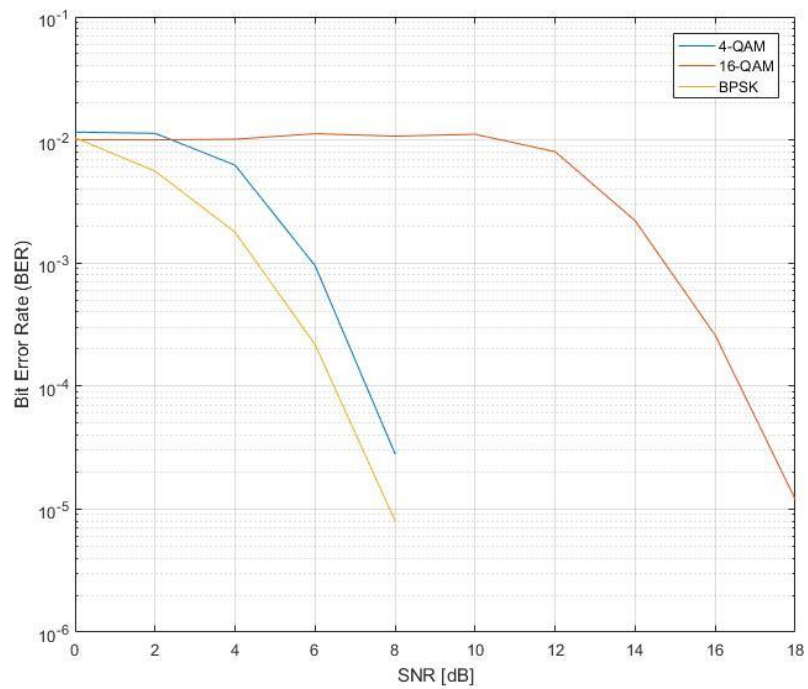
Antes da simulação do canal EDGE, foi realizado um teste com o canal expresso pela Equação (17) para compreender se o sistema está funcionando como planejado. Este teste preliminar está representado pela Figura 7(a) para um desvio Doppler de 0,01 Hz, ou seja, usando os dados da Tabela 2, está sendo analisado o comportamento do sistema para um EU há aproximadamente $1,2 \cdot 10^{-3} m/s$, quase estacionário; e pela Figura 7(b) para um desvio Doppler de 10 Hz, que aponta um deslocamento de aproximadamente $1,2 m/s$ do equipamento do usuário. O equalizador LMS configurado para esta rodada de simulação está com 25 taps e um passo de 0,001. Como é possível observar nos dois gráficos da Figura 7, o sistema se comporta muito bem para um canal que não introduz complexidade e distorce levemente o sinal de entrada. Com SNRs relativamente baixas, a Taxa de Erro de Bit chega a valores abaixo até de 10^{-5} , o que indica uma ótima qualidade da comunicação. Pelo gráfico também é possível determinar que o sinal modulado por um BPSK chegará ao receptor com muito menos erros do que as duas outras modulações. Por exemplo, para uma SNR de 8 dB na Figura 7(a), o BPSK chega

próximo a uma BER de 10^{-5} , enquanto que para 4-QAM e 16-QAM chega-se a valores próximos de 10^{-4} e 10^{-2} , respectivamente.

Figura 7 - Taxa de Erro de Bit por SNR para canal $f(n)$ com $f_D = 0,01\text{Hz}$ e 10Hz



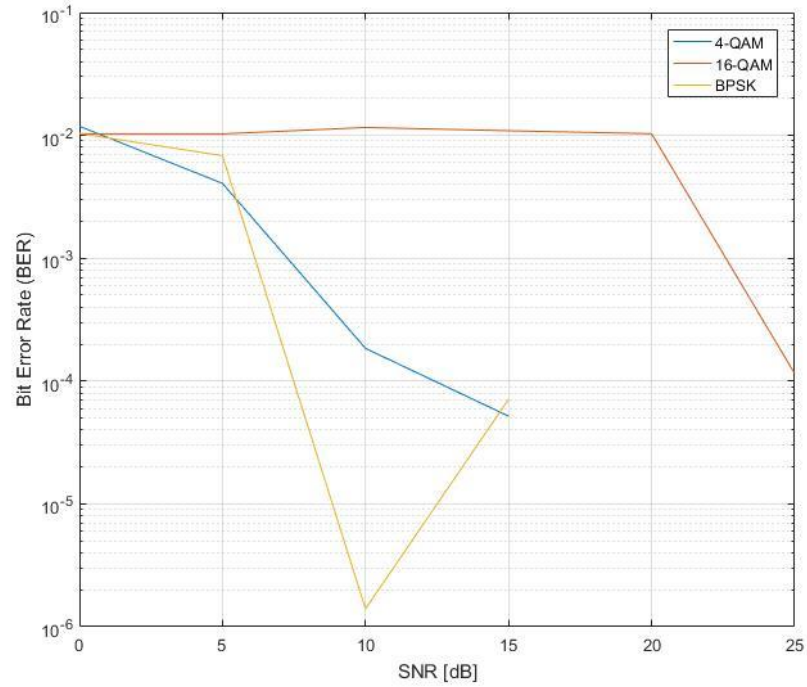
(a)



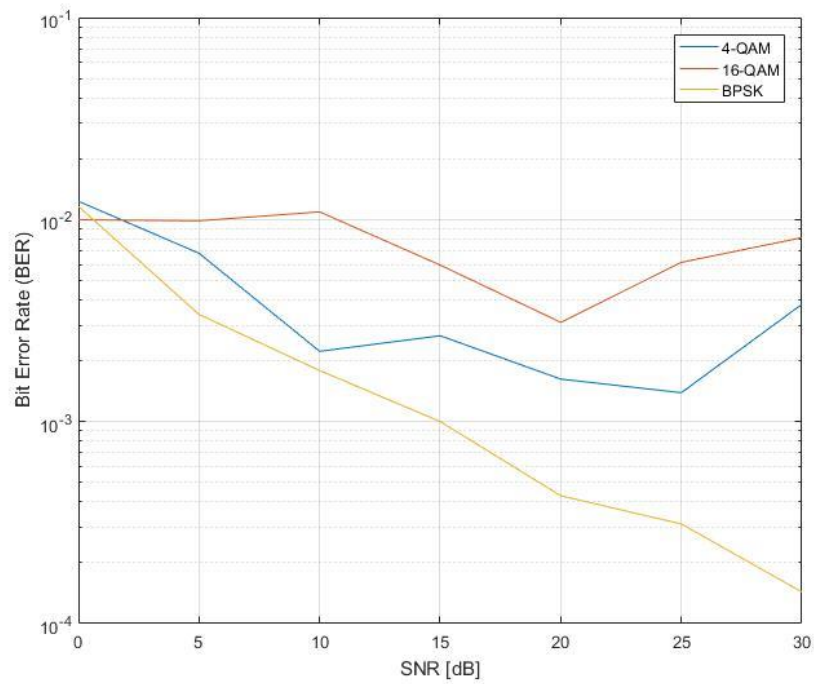
(b)

$$f(n) = x(n) + 0,5x(n - 1) \quad (17)$$

Figura 8 - Taxa de Erro de Bit por SNR para canal EDGE com $f_D = 0,01\text{Hz}$ e 10Hz



(a)



(b)

Para o canal alvo deste trabalho, um canal semelhante à rede EDGE, o equalizador está configurado para 6 taps e um passo de 0,015. Agora observando o gráfico da BER, o resultado obtido é o comportamento incomum das Taxas de Erro de Bit. Na Figura 8 (a), pode-se observar que o sinal modulado por um BPSK consegue ter taxas de erro menores que o 4-QAM, que por sua vez, menores que 16-QAM. Porém os saltos nos valores, e também o aumento para uma SNR de 15 dB na curva do BPSK, não eram esperados e pode indicar um número insuficiente de bits transmitidos para uma análise confiável, que no caso foi de 5 milhões de bits por SNR.

Já na Figura 8 (b), com desvio Doppler de 10 Hz, o resultado da BER para o BPSK está consistente com o esperado e possui valores de erros menores do que 4-QAM e 16-QAM. É possível constatar, também, que os valores da BER para essas duas últimas modulações não variam logaritmicamente, conforme visto nos dois gráficos da Figura 7. Este resultado pode significar que o equalizador não foi capaz de acompanhar as variações do canal.

Portanto, considerando o melhor resultado obtido, que é a curva BER do BPSK para 10 Hz de deslocamento Doppler, o sistema erra, aproximadamente, 500 bits para os 5 milhões de bits transmitidos em uma SNR de 30 dB. Extrapolando esses valores, pode-se dizer que para cada 1 MB enviado, 100 bits chegam errados no receptor. Para uma SNR dessa ordem, espera-se que o desempenho do sistema seja melhor, porém este é um nível de SNR que permite a restauração das comunicações.

A evidente diferença de resultados entre um canal simples modelado por um polinômio de grau 1 e o canal EDGE revela a severidade com que o segundo canal impõe sobre o sinal transmitido. Mesmo que exaustivos testes tenham sido executados a fim de encontrar um número de coeficientes e tamanho do passo ótimos para que o equalizador tenha um ótimo desempenho, os resultados apontam que o equalizador não atuou em seu máximo potencial. Não apenas esses dois fatores, mas o atraso de equalização também influencia diretamente na eficiência do equalizador; um melhor ajuste do atraso pode melhorar o resultado apresentado.

A vantagem do equalizador LMS é a sua baixa complexidade que permite aplicações em ambientes com restrições computacionais e energéticas, como é o caso de uma plataforma aérea de baixa altitude. Nesse sentido, estudos mais profundos são necessários a fim de explorar características do LMS e também da transmissão como um todo para melhorar a recepção do sinal.

CONCLUSÃO

Buscou-se neste trabalho a simulação de um modelo de canal com características da rede EDGE inserido em um ambiente de destruição, onde a solução proposta é a implementação de uma plataforma aérea atuando como estação rádio-base para restauração das comunicações móveis. Foi assumido que o modelo se assemelha com uma comunicação em um espaço rural, com uma componente direta em linha de visada para o LAP e poucas reflexões vindo de casas e prédios – já em forma de destroços causados pelo desastre. Reflexões nos escombros próximos ao chão não foram considerados neste trabalho.

O resultado deixa óbvio que o modelo de canal escolhido é um ambiente bem agressivo para o sinal digital. Pode-se concluir que, nas condições assumidas, as três curvas de BER obtidas para ambos valores de deslocamento Doppler mostram que o sistema é capaz de entregar uma comunicação com qualidade suficiente para a restauração das comunicações em um cenário de destruição, porém os valores de BER são menores do que os esperados. Portanto, a proposta para os próximos passos é que mais estudos devem ser feitos a fim de encontrar equalizadores mais robustos que se adeque as restrições de um LAP e outras modulações sejam abordadas durante a transmissão do sinal.

No entanto, a pesquisa teórica mostra que este assunto é muito relevante para o futuro das telecomunicações. Evoluções tecnológicas como o 5G trazem desafios técnicos enormes para o campo de estudo, porém o ganho de agilidade no socorro às vítimas de regiões destruídas e na recuperação do ambiente destruído é imensurável.

REFERÊNCIAS

3GPP. **Radio transmission and reception**. Valbonne, p. Apêndice C. 2007. (TS 45.005 - Release 7).

3GPP. **Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks**. Valbonne. 2019. (TR 38.811 - Release 15).

AL-HOURANI, A.; KANDEEPAN, S.; JAMALIPOUR, A. Modeling Air-To-Ground Path Loss For Low Altitude Platforms In Urban Environments. **2014 IEEE Global Communications Conference**, Austin, Dezembro 2014.

BALDINI, G. et al. Survey of Wireless Communication Technologies for Public Safety. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 16, n. 2, p. 619-641, Setembro 2013.

BOGDAN-MARTIN, D. **ITUNews**, 2019. Disponível em: <<https://news.itu.int/destruction-and-desolation-hurricane-dorian-and-the-importance-of-emergency-communication-drills/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CAO, X. et al. Airborne Communication Networks: A Survey. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 36, n. 9, p. 1907-1926, Setembro 2018.

CHANDRASEKHARAN, S. et al. Designing and Implementing Future Aerial Communication Networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 54, n. 5, p. 26-34, Maio 2016.

HAYKIN, S. O. **Adaptive Filter Theory**. 3^a. ed. Ontário: Pearson, 1996.

JARWAN, A. et al. LTE-Based Public Safety Networks: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 2, p. 1165-1187, Janeiro 2019.

KATIKALA, S. Google™ Project Loon. **Rivier Academic Journal**, v. 10, n. 2, 2014.

LATHI, B. P.; DING, Z. **Modern Digital And Analog Communication Systems 4th edition**. 4^a. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2010.

QIU, Z. et al. Low Altitude UAV Air-to-Ground Channel Measurement and Modeling in Semiurban Environments. **Wireless Communications in Transportation Systems**, v. 2017, p. 1-11, 13 Novembro 2017.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas**. 2°. ed. São Paulo: Pearson, 2009.