

# Influência da detecção multiusuário baseada na técnica OFDMA em redes *ad hoc*

Lucas de Oliveira<sup>1</sup> e Renata Mataveli Viti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Elétrica, Professor da UNIP Campinas, [prof.lucasunip@gmail.com](mailto:prof.lucasunip@gmail.com)

<sup>2</sup>Mestre em Engenharia Elétrica, Professora da PUC-MG, [renatamv@pucpcaldas.br](mailto:renatamv@pucpcaldas.br)

**Resumo** – Este artigo apresenta um modelo de sistema para uma rede *ad hoc* sem fio empregando a técnica de acesso OFDMA. É realizado um estudo sobre o desempenho da rede analisando a taxa de erros de bits e a vazão de dados quando o sistema é submetido a um esquema de detecção multiusuário ótimo, arranjo de antena e aplicação de código corretor de erro, neste caso código convolucional. Os resultados mostram que o sistema onde foi empregado o arranjo de antenas e o código convolucional apresenta melhor desempenho frente aos demais.

**Palavras-chave:** Rede sem fio *ad hoc*, OFDMA, análise de desempenho de rede sem fio.

**Abstract** – In this paper, a system model for a wireless *ad hoc* networks is presented, using the OFDMA access technique. The research contemplates the performance of the network with respect to the bit error rate and the data flow when the system is submitted to an optimal multiuser detection scheme, antenna arrangement and the application of error corrector code. The results show that the system where the array of antennas was used together with the convolutional code, presented better performance compared to the others.

**Keywords:** *ad hoc* wireless network, OFDMA, wireless network performance analysis.

## I. INTRODUÇÃO

O crescimento da comunicação sem fio tem se destacado nos últimos anos, devido à facilidade de instalação quando comparado às redes que fazem uso de fios e, também, por permitir mobilidade, flexibilidade e praticidade. Tais redes sem fio podem abranger comunicações de curta distância e pouca mobilidade até comunicações com maiores distâncias e alta mobilidade [1][2][3][4].

Os terminais móveis podem desfrutar da comunicação por meio de redes infraestruturada e autoestruturada. Na primeira, os dispositivos móveis se comunicam com pontos de acesso (estações rádio base, por exemplo) conectados a uma rede infraestruturada; já na segunda, um conjunto de dispositivos móveis com habilidade de comunicarem entre si, podem dinamicamente formar uma

rede para a troca de informações, não possuindo, no entanto, qualquer infraestrutura fixa ou controle central, utilizando ondas de rádio para transmissão dos dados. A pesquisa em questão concentra-se em explorar as características desta rede autoestruturada, também conhecida como redes móveis *ad hoc* ou MANET (*Mobile ad hoc Network*), tecnologia esta em grande ascensão [5][6][7].

As redes *ad hoc* estão em forte ascensão pelo fato de desfrutar de rápida instalação, por ser bastante tolerantes a falhas, possuírem vasta mobilidade e sua conectividade permitir ligar a qualquer nó que esteja a seu alcance [2][3][8].

Em redes *ad hoc* sem fio, pode deparar-se com situações em que dois terminais não podem comunicar-se diretamente, devido às limitações da comunicação via rádio e, desta forma, outros terminais realizam a função de encaminhar as informações pela rede, de forma a estabelecer uma rota de múltiplos saltos (*multihop*) entre a fonte e o destino da informação, em que a descoberta da melhor rota e sua manutenção são tarefas realizadas pelos próprios terminais. Sua comunicação ainda enfrenta obstáculos para se tornar mais confiável e permitir altas taxas de transmissão. Preocupação com consumo de energia e segurança são constantes, dificultando principalmente um sistema de roteamento mais eficiente [4][9][10][11].

Como pode ser percebido, muita pesquisa ainda se faz necessária para que uma rede *ad hoc* apresente um ótimo desempenho. Neste sentido, buscando melhorar o desempenho deste sistema, a técnica OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), aliada a um esquema de detecção multiusuário [12] e arranjo de antenas, será utilizada em uma rede *ad hoc*, de modo a eliminar grande parte da interferência.

Em uma rede OFDMA, para cada usuário é alocado um conjunto de subportadoras e a seleção pode se dar através de algumas formas de modulação [13]. As taxas de bits destas subportadoras podem ser diferenciadas entre si de acordo com a SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) que venham a apresentar; valor alto para esta relação implica em transmitir mais bits por subportadora, enquanto que valor baixo reflete em uma transmissão com poucos bits por símbolo [14].

O presente artigo encontra-se organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta, resumidamente, os principais conceitos sobre a técnica OFDM de modo a dar ênfase ao

---

OLIVEIRA, L.; VITI, R. M.

*Influência da detecção multiusuário baseada na técnica OFDMA em redes ad hoc*

©Revista Ciência e Tecnologia, Campinas, v. 20, n. 37, p. 47 - 54, jul./dez. 2017 - ISSN: 2236-6733

caso particular OFDMA. As redes *ad hoc* são abordadas na Seção III, cabendo a Seção IV abordar a fusão da técnica OFDMA com as redes *ad hoc*. O ambiente de simulação, apresentado na Seção V, apresenta algumas limitações e condições dentro da rede *ad hoc* estabelecida e, conseqüentemente, os resultados experimentais obtidos encontram-se na Seção VI. Finalmente, a Seção VII apresenta as respectivas conclusões.

## II. OFDM

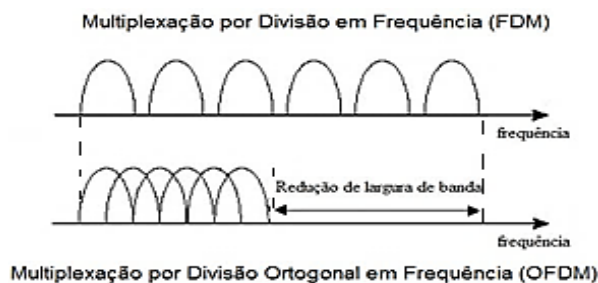
O ambiente de propagação terrestre é severo em relação às reflexões que o sinal esteja submetido, além de poder ser atenuado com aumento da distância, desvanecimento em larga e pequena escala, dentre outros diversos tipos de deterioração.

Uma alternativa para o problema do desvanecimento em pequena escala é a utilização de equalizadores na recepção com o intuito de reduzir, dentre outros fatores, a interferência entre símbolos. Entretanto, quanto maior a taxa de transmissão desejada, maior será a complexidade do projeto de um equalizador, onde deve ser realizado a partir do conhecimento exato das características do meio de transmissão [14].

Sistemas de transmissão, paralelos ou multiplexados, que são baseados na modulação multiportadora, podem ser a solução para o problema. Como principal vantagem, tem-se a redução da sensibilidade do sistema ao espalhamento de retardo do canal, diminuindo assim a interferência entre símbolos [15]. Dentro desse contexto, encontra-se a técnica de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*).

A técnica OFDM é uma derivação de FDM (*Frequency Division Multiplex*), devido ao fato de utilizar o mesmo método de segmentação de banda, mas com uma diferença, que consiste na ortogonalização das sub-bandas, de modo que uma não consiga interferir na outra e a diminuição da banda total ocupada é de aproximadamente 50% [16]. A Figura 1 mostra esta relação entre FDM e OFDM, evidenciando a redução de largura de banda para a utilização de 6 subportadoras.

Figura 1 – Espectro utilizado por 6 portadoras utilizando FDM e OFDM



Fonte: Autores.

Os estudos em torno do OFDM visam à transmissão em altas taxas [17]. Em princípio, a geração direta e a demodulação do sinal OFDM requerem conjuntos de osciladores coerentes, resultando em uma implementação complexa e cara, particularmente quando o número de subportadoras é elevado [14]. Com o uso de DFT (*Discrete Fourier Transform*), através de sua ferramenta computacional IFFT/FFT (*Inverse Fast Fourier Transform /Fast Fourier Transform*) tornou-se possível a utilização da técnica OFDM por meio de processamento computacional [16] [18].

De posse da seqüência de dados ( $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{N-1}$ ), onde cada dado é representado por um número complexo  $c_n = a_n + jb_n$ , aplica-se a DFT e obtém-se como resultado o vetor  $C = (C_0, C_1, C_2, \dots, C_{N-1})$  de  $N$  números complexos [18]. Para um tempo de amostragem  $\Delta t$ , igual ao inverso da taxa de símbolo de um dado arbitrário pertencente a seqüência, a equação do sinal OFDM através da IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) é representada por [18]:

$$S_m = Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{-jw_n \Delta t m} \right\} \quad (1)$$

O índice  $m$  varia de 0 até  $N-1$  e representa o número de amostras do sinal OFDM. A frequência angular é expressa por:

$$w_n = 2\pi f_n \quad (2)$$

Para o sinal OFDM,  $f_n$  pode ser representada por:

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t} = \frac{n}{T_{OFDM}} \quad (3)$$

O termo  $T_{OFDM}$  refere-se ao tempo de sinalização de cada feixe paralelo. A Equação 4, por sua vez, representa o intervalo na qual as amostras são tomadas:

$$t_m = m\Delta t \quad (4)$$

Deste modo, a Equação 5 sintetiza a equação do sinal OFDM no domínio discreto:

$$S_m = Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{-j2\pi f_n t_m} \right\} \quad (5)$$

$$S_m = Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{-\frac{j2\pi n}{N} m} \right\}$$

Como a transmissão é realizada utilizando apenas a parte real, tem-se a Série de Fourier apresentada na Equação 6, em que  $i_n$  e  $q_n$  são os coeficientes da série [18]:

$$S_m = \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(2\pi f_n t_m) + q_n \sin(2\pi f_n t_m)] \quad (6)$$

Que também pode ser representada, de forma semelhante, por:

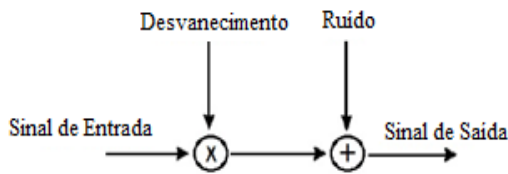
$$S_m = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ i_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N} m\right) + q_n \sin\left(\frac{2\pi n}{N} m\right) \right] \quad (7)$$

Sendo assim, através da IDFT é possível obter o sinal OFDM a partir do espectro de frequência do símbolo (vetor  $C_n$ ). Como no sinal OFDM a simetria não existe, pois cada símbolo é independente, os resultados da IDFT geram componentes complexas. Vale destacar que a transmissão é realizada utilizando apenas a componente real [16][18].

Este sinal OFDM é gerado a partir de um conversor série-paralelo de uma sequência de dados a ser transmitida, separando a sequência em  $N$  feixes de dados [18]. Cada um destes feixes modula uma subportadora complexa, onde sua componente em fase modula uma portadora cossenóide e a componente em quadratura modula uma portadora senóide, ambas em mesma frequência [16]. Isso significa que os símbolos de entrada podem ser vistos como a amplitude de cada subportadora transmitida. A ortogonalidade está intrínseca entre as funções seno e cosseno.

A recuperação do sinal OFDM é realizada através da aplicação da DFT nos dados recebidos, após a passagem do sinal transmitido pelo canal que acrescenta desvanecimento à sua composição e, na recepção, é adicionado ruído. A Figura 2 representa a adição do ruído e a multiplicação do desvanecimento.

Figura 2 – Canal com ruído e desvanecimento.



Fonte: Autores.

Em uma rede OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), cada usuário é alocado em determinado conjunto de subportadoras, sendo que cada usuário pode assumir diferente tipo de modulação, tais como QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) usada em subportadoras com baixa interferência, onde a quantidade de informação carregada é maior (mais bits por símbolo), BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) e QPSK (*Quaternary PSK*), sendo esta última usada em subportadoras com alta interferência, com menos bits por

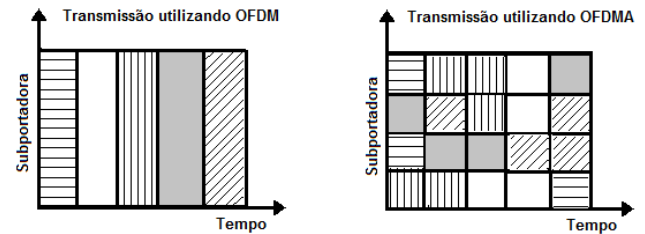
símbolo [13][19]. Deste modo, enquanto a técnica de multiplexação OFDM utiliza a banda de frequência destinada a um único usuário, a técnica de múltiplo acesso compartilha a banda com vários usuários simultaneamente.

Na técnica OFDMA, cada conjunto de subportadoras recebe a denominação de subcanal e não precisa ser adjacente. Na transmissão descendente (*downlink*), os subcanais podem ser solicitados por diferentes receptores. Na transmissão ascendente (*uplink*), um transmissor pode ser associado a um ou mais subcanais [19].

Dentre as vantagens da técnica de múltiplo acesso, por não apresentar banda de guarda entre os sinais transmitidos, a técnica OFDMA possui melhor eficiência espectral, além de possuir também uma alta resistência à interferência e à distorção multipercursos, devido à ortogonalidade das subportadoras [16][19]. Para suportar altas taxas de transmissão, mais de uma subportadora pode ser utilizada por um usuário.

Por fim, na técnica OFDMA, muitos usuários transmitem no mesmo *time-slot* sobre vários subcanais, conforme sintetizado pela Figura 3. Ao contrário desta, a técnica OFDM destina a banda disponível para um único usuário.

Figura 3 – Diferença entre *time-slot* OFDM e OFDMA.



Fonte: Autores.

### III. REDES AD HOC

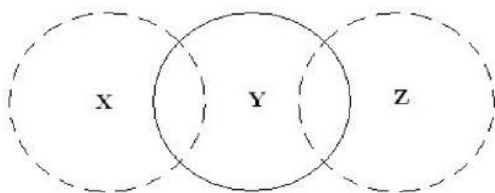
Uma rede *ad hoc* móvel pode ser definida como um conjunto de estações móveis, sem fio, formando uma rede temporária sem a necessidade de qualquer administração centralizada ou infraestrutura fixa [20][21]. Pelo fato de não fazerem uso de uma estrutura estacionária, de trocar informações localmente e de serem criadas em qualquer instante e em qualquer lugar, constituem as características fundamentais em que se baseiam estas redes, despertando interesse principalmente para os cenários que necessitem instalar rapidamente uma rede, como por exemplo nas áreas militares, de emergência e comercial [4][21].

Um grupo de trabalho, IETF (*Internet Engineering Task Force*), denominado de MANET, tem por objetivo principal desenvolver especificações para protocolos de roteamento e tecnologias relacionadas à camada de rede em redes *ad hoc*, assim como endereçamento, segurança e a interação entre os protocolos das camadas inferior e superior [22].

Em redes *ad hoc*, como os dispositivos móveis podem mover-se arbitrariamente, a topologia da rede muda frequentemente e de forma imprevisível, requerendo permanente adaptação e reconfiguração das rotas [21]. Isto permite que perdas de conectividade entre os nós possam ser solucionadas com o estabelecimento de uma nova rota para a comunicação.

Quanto ao comportamento dos nós, cada nó móvel pode operar não somente como um *host*, mas também como um roteador, encaminhando pacotes por múltiplos saltos para outras estações que podem não estar diretamente no alcance de transmissão um dos outros. Por exemplo, a Figura 4 ilustra a situação do nó X desejando comunicar-se com o nó Z, porém seu alcance de transmissão não permite esta comunicação e, desta forma, uma rota é descoberta utilizando o nó Y para que o nó Z receba o sinal proveniente de X.

Figura 4 – Rede *ad hoc* de três nós



Fonte: Autores.

Caso o nó Z estivesse dentro do alcance de cobertura do nó X, a comunicação poderia ser realizada diretamente, ao contrário da rede infraestruturada que, mesmo próximos, a comunicação entre os nós teria que passar pela estação de suporte à mobilidade.

Porém, esta rede sem fio também apresenta algumas desvantagens como, por exemplo, a taxa de erros mais elevada. Outra questão refere-se à sua topologia, que por ser dinâmica e levando em consideração que esta é formada por dispositivos móveis, resulta em sérias restrições quanto ao consumo de energia para se manterem funcionando [4][20]. Deste modo, o consumo devido ao processamento necessário para que rotas entre terminais sejam descobertas e mantidas, deve ser cuidadosamente controlado. Nesse aspecto, os protocolos de roteamento tornam-se pontos críticos para um bom funcionamento da rede [5][6].

Os protocolos de roteamento são responsáveis por encontrar, estabelecer e manter rotas entre dois nós que desejam se comunicar. Estes protocolos são responsáveis por lidar com consumo de energia, banda passante limitada e altas taxas de erros [6][20]. É importante que esses protocolos gerem o mínimo de *overhead* possível e que a quantidade de banda consumida por eles seja pequena.

O *overhead* gerado e a quantidade de banda consumida são fatores diretamente relacionados à rapidez com que as rotas são estabelecidas e à frequência com que

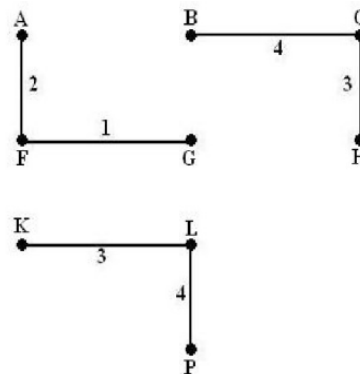
elas são atualizadas. Diferentes técnicas foram criadas, dando origem a protocolos que conseguem estabelecer rotas mais rapidamente que outros, e ainda outros que geram menos *overhead* e consomem menos banda, porém consomem mais tempo para estabelecer uma determinada rota.

#### IV. OFDMA E REDES AD HOC

A técnica OFDMA, quando empregada em uma rede *ad hoc*, pode refletir em mais usuários utilizando a mesma banda sem causar interferência [13].

Outro aspecto importante refere-se à redução de interferências no enlace estabelecido. Pode-se ter sinais provenientes de diferentes transmissores ao mesmo tempo em um mesmo receptor, desde que o sinal de cada um destes esteja sendo transmitido por diferentes subportadoras. Este fato pode ficar evidenciado pela Figura 5, que se refere a uma porção do cenário da rede *ad hoc* adotada.

Figura 5 – Parte do cenário adotado.



Fonte: Autores.

A Tabela 1 relaciona as subportadoras com as nomenclaturas utilizadas na Figura 5.

Tabela 1 – Alocação das subportadoras.

Números	Subportadoras
1	1-32
2	33-64
3	65-96
4	97-128

De acordo com a Figura 5, o terminal F pode receber o sinal do terminal A e ao mesmo tempo receber o sinal do terminal G, já que estas transmissões acontecem com as subportadoras 1-32 e 33-64, respectivamente, não acontecendo interferência na transmissão.

Por outro lado, o mesmo não acontece para os receptores C e L. O receptor C, por sua vez, recebe o sinal



dos terminais B e H, com suas respectivas subportadoras, porém recebe uma porção dos sinais provenientes dos receptores K e P, que estão transmitindo para o terminal L. Assim, o sinal resultante em C contém informações provenientes dos terminais B, H, K e P, sendo estes dois últimos interferentes.

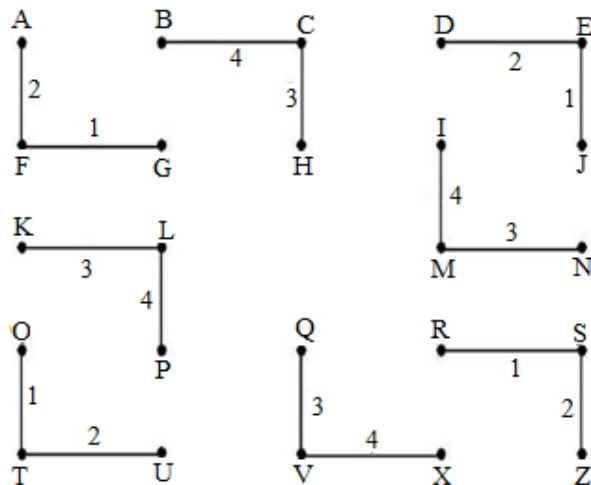
Analisando estes interferentes, nota-se que o terminal P transmite nas mesmas subportadoras que o terminal B, interferindo somente na transmissão realizada de B para C. O mesmo raciocínio pode ser afirmado a respeito do sinal K em relação ao enlace C-H.

Desta forma, quanto mais terminais existirem na rede, transmitindo nas mesmas subportadoras, mais interferência existirá entre estes.

## V. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O ambiente adotado para simulação corresponde a uma rede *ad hoc* delimitada por 24 terminais, em que foi destinado 16 terminais para operar como transmissores e 8 como receptores. Com o intuito de minimizar interferências no cenário estabelecido, 4 grupos de subportadoras foram utilizadas, conforme Tabela 1. Desta forma, o cenário utilizado é caracterizado pela Figura 6.

Figura 6 – Cenário estabelecido para 24 terminais.



Fonte: Autores.

As nomenclaturas 1, 2, 3 e 4 utilizadas para os enlaces, têm como objetivo minimizar a complexidade na representação deste cenário estabelecido.

Esta representação dos enlaces está associada a diferentes faixas de frequências e pelo fato de outros terminais fazerem uso da mesma faixa de frequência em suas transmissões, as nomenclaturas se repetem dentro deste cenário.

Os 8 terminais empregados na recepção foram nomeados por C, E, F, L, M, T, V e S, cabendo aos demais terminais realizarem a transmissão. Vale frisar que os

terminais caracterizados como transmissores, dentro desta rede *ad hoc* evidenciada pela Figura 6, realizam suas respectivas transmissões em diferentes faixas de frequências, de acordo com a Tabela 1.

Para um determinado receptor, dentro deste cenário, os sinais interferentes são provenientes de todos enlaces que estiverem transmitindo na mesma faixa de frequência do sinal recebido naquele momento. Por exemplo, o enlace F-A, que faz uso da subportadora de índice 2, encontrará possíveis interferências advindas dos enlaces E-D, T-U e S-Z, já que estes enlaces também realizam a transmissão por meio desta mesma subportadora.

A Tabela 2 ilustra, para cada enlace estabelecido entre transmissor e receptor, todos os possíveis interferentes:

Tabela 2 – Enlaces utilizados na rede.

Enlace	Enlace interferente	Subportadoras
F-A	E-D, T-U, S-Z	2
F-G	E-J, T-O, S-R	1
C-B	L-P, M-I, V-X	4
C-H	L-K, M-N, V-Q	3
E-D	F-A, T-U, S-Z	2
E-J	F-G, T-O, S-R	1
L-K	C-H, M-N, V-Q	3
L-P	C-B, M-I, V-X	4
M-I	C-B, L-P, V-X	4
M-N	C-H, L-K, V-Q	3
T-O	F-G, E-J, S-R	1
T-U	F-A, E-D, S-Z	2
V-Q	C-H, L-K, M-N	3
V-X	C-B, L-P, M-I	4
S-R	F-G, E-J, T-O	1
S-Z	F-A, E-D, T-U	2

Diante destas condições estabelecidas, diferentes técnicas foram utilizadas para analisar o desempenho desta rede *ad hoc* com relação à taxa de erro de bit e, em paralelo, apresentar o comportamento da vazão de dados, conforme análises na Seção VI.

## VI. RESULTADOS

Através do cenário adotado, Figura 6, algumas medidas foram obtidas para os enlaces. As medidas estão dispostas na Tabela 3 e, para cada enlace, foram calculados os ângulos e distâncias em relação aos respectivos interferentes.

Tabela 3 – Medidas obtidas através do cenário.

	$\theta$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
F-G	0°	0°	270°	326,3°	20	10	18,03
F-A	90°	18,4°	288,4°	323,1°	15,81	15,8	25
C-H	270°	315°	270°	225°	14,14	15	14,14
C-B	180°	251,6°	284°	315°	15,81	20,61	7,07
E-D	180°	270°	180°	233,1°	20	20	25
E-J	270°	251,6°	198,4°	216,9°	15,81	15,81	25
M-I	90°	270°	206,6°	135°	10	11,18	14,14
M-N	0°	225°	135°	180°	7,07	7,07	15
L-K	180°	0°	45°	315°	15	7,07	7,07
L-P	270°	90°	315°	26,6°	10	14,14	11,18
T-O	90°	71,6°	36,9°	18,4°	15,81	25	15,81
T-U	0°	90°	0°	53,1°	20	20	25
V-Q	90°	135°	90°	63,4°	14,14	15	14,14
V-X	0°	71,6°	104°	135°	15,81	20,61	7,07
S-R	180°	90°	180°	146,3°	10	20	18,03
S-Z	270°	108,4°	198,4°	143,1°	15,81	15,81	25

A Tabela 3 é composta dos seguintes parâmetros: na primeira coluna encontra-se todos os enlaces, seguido do ângulo do terminal transmissor ( $\theta$ ) e dos ângulos interferentes ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ) com suas respectivas distâncias em metros ( $d_1, d_2, d_3$ ). Os ângulos são empregados no processo de arranjo de antenas junto com as distâncias que também são utilizadas na detecção multiusuário [23].

Neste contexto, o arranjo de antenas foi utilizado com o propósito de diminuir a interferência entre os canais e proporcionar a diminuição do desvanecimento por multipercursos, refletindo na diminuição da BER (*Bit Error Rate*). Além disso, esta técnica permite acesso múltiplo por divisão de espaço, aumento da capacidade de canais e eficiência espectral, possibilitando aumentar a extensão de cobertura [24][25].

Além de sofrer degradação devido as interferências já mencionadas, o sistema também é degradado pelo ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Para amenizar as atenuações sofridas pelo sinal, diferentes técnicas foram combinadas para alcançar o melhor desempenho, dentre estas encontram-se a presença de detecção multiusuário, código corretor de erro [26] e arranjo de antenas.

Para o ambiente de simulação já descrito na Figura 6, as análises efetuadas ilustram o desempenho sobre a média em todos os enlaces referente à taxa de erro de bits e sua respectiva vazão de dados, Equações 8 e 9, para cada combinação destas técnicas propostas neste cenário.

$$BER = \frac{bits_{errados}}{n_{pacote} \cdot N} \quad (8)$$

$$VAZÃO = \frac{n_{pacote} - pacotes_{errados}}{n_{pacote}} \quad (9)$$

Onde  $bits_{errados}$  indica número de bits errados,  $n_{pacote}$  O número total de pacotes enviados,  $N$  o comprimento do pacote e  $pacotes_{errados}$  refere-se ao número de pacotes errados.

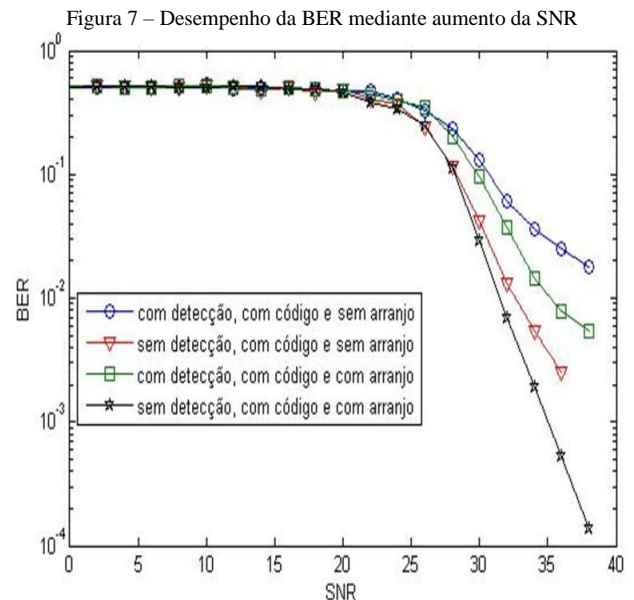
A taxa de erro de bit está relacionada ao número de bits errados dentro de um pacote e a vazão está relacionada ao número de pacotes errados. Vale destacar que para todas simulações foram utilizados 100 bits para representar o conteúdo do pacote.

Para analisar o comportamento do sistema descrito foi adotada a ferramenta de simulação Matlab e o método de Monte-Carlo [27][28][29][30].

De acordo com as próximas análises, conforme a SNR (*Signal to Noise Ratio*) torna-se maior, implica em melhor desempenho da taxa de erro de bit e, conseqüentemente, em menor número de erros no pacote.

#### A. Análise de desempenho através da taxa de erro de bits

De posse do cenário adotado, com os respectivos transmissores e receptores já abordados, o comportamento da taxa de erro de bits foi analisado em função do aumento da relação sinal/ruído, mediante combinações alternadas entre as técnicas de detecção multiusuário, código convolucional e arranjo de antenas. A Figura 7 corrobora os respectivos desempenhos obtidos.



Fonte: Autores.

De todas combinações empregadas, o pior desempenho refere-se à presença do código convolucional aliada à ausência do arranjo de antenas, utilizando a detecção multiusuário. Contudo, quando não se fez o

emprego da detecção multiusuário neste cenário, foi verificado que o sistema corrigiu maior quantidade de erros.

Nesta análise, para uma SNR de 36dB, quando se fez a utilização da detecção multiusuário, a BER apresentou um valor de aproximadamente  $2,5 \times 10^{-2}$ . Em contrapartida, para este mesmo valor de SNR, o valor foi de aproximadamente  $2,5 \times 10^{-3}$  quando não se fez uso da detecção multiusuário, garantindo assim mais robustez às degradações sofridas pelo sistema.

Entre o desempenho destas duas análises realizadas, encontra-se a situação em que foi empregada a detecção multiusuário juntamente com o código convolucional, porém com a utilização de arranjo de antenas. O arranjo de antenas proporcionou, para uma SNR de 38dB, o valor da BER de  $5,4 \times 10^{-3}$ , mediante ao valor de  $1,8 \times 10^{-2}$  quando não utilizado o arranjo de antenas. Percebe-se, quantitativamente, o quanto o arranjo de antenas pode trazer melhorias ao sistema.

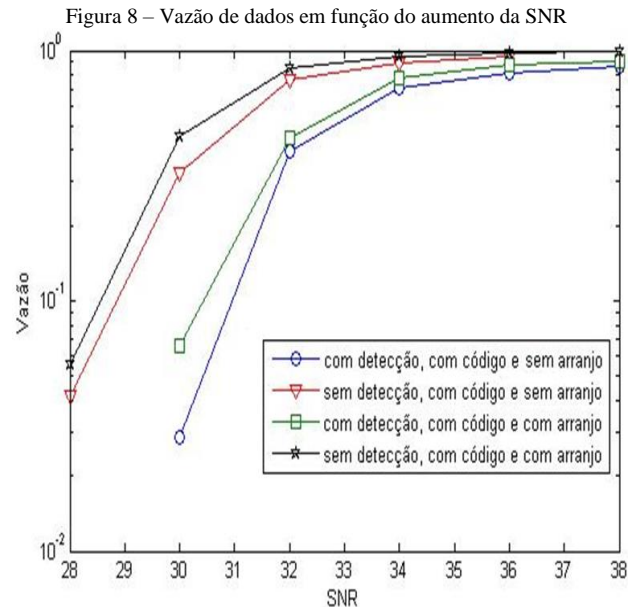
Por fim, a menor taxa de erro de bits para uma determinada relação sinal/ruído foi alcançada através do emprego do código convolucional juntamente com arranjo de antenas, contudo sem levar em conta a detecção multiusuário. O desempenho com a ausência da detecção multiusuário é superior à mesma configuração em que se utiliza a detecção multiusuário, apresentando uma redução de  $1,97 \times 10^{-3}$  na taxa de erro de bits para a SNR de 36 dB.

### B. Análise de desempenho da vazão de dados

A vazão de dados é extraída da probabilidade de erro de pacote. O pacote é considerado errado quando um ou mais bits apresentam erro, por isso é observado uma defasagem no desempenho da vazão em relação ao da BER. Para o pior cenário da análise anterior, o desempenho da BER começou a ter um aumento a partir de 24 dB, mas na vazão de dados este aumento só foi percebido a partir de 30dB, conforme evidenciado pela Figura 8.

Mantendo a coerência, a pior situação refere-se ao emprego da combinação do código convolucional, com ausência da utilização do arranjo de antenas e com a presença da detecção multiusuário. Para esta configuração, ao se retirar a detecção multiusuário do sistema, observou-se que para uma SNR de 34dB, valores de  $7,1 \times 10^{-1}$  e  $8,9 \times 10^{-1}$  foram obtidos, respectivamente, corroborando no quanto a ausência desta detecção pode melhorar na vazão de dados.

Mantendo ainda o pior caso apresentado como referência, mantendo o código corretor de erros e detecção multiusuário, percebe-se que ao empregar o arranjo de antenas também houve um ligeiro aumento no desempenho, referente a  $1 \times 10^{-1}$  para a SNR de 34dB. Porém, esta configuração se mostrou inferior à análise comparada anteriormente.



Dentre as configurações empregadas, a vazão de dados se mostrou superior quando o código convolucional, aliado ao emprego do arranjo de antenas, foi utilizado sem a detecção multiusuário. Neste caso, a vazão de dados alcançou um desempenho mais próximo do caso ideal (próximo de 1), para menor valor de SNR comparado ao caso sem arranjo de antenas. Exemplificando, com a utilização do arranjo de antenas, próximo de 32dB, obteve-se uma vazão de aproximadamente 0,85, valor este que somente foi alcançado com 34dB, quando não se fez uso do arranjo de antenas.

## VII. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma rede *ad hoc* sem fio com características particulares quanto à localização dos terminais receptores e transmissores. A análise do desempenho desta rede *ad hoc* possibilitou observar o comportamento da vazão de dados e a relação sinal ruído do sistema. Vale ressaltar que estas duas características são inversamente proporcionais.

Diferentes recursos para diminuir os efeitos da interferência sofridos pelos sistemas foram estudados, sendo estes: arranjo de antenas, código convolucional e detecção multiusuário. Os resultados mostraram que o melhor desempenho foi alcançado quando utilizado arranjo de antenas e código convolucional sem o emprego da técnica de detecção multiusuário.

Isto ocorre devido ao fato do detector multiusuário fazer a decisão dos bits antes deste passar pelo decodificador, dificultando o processo de decodificação. Como o esquema de codificação e decodificação é mais robusto do que a detecção multiusuário, é aconselhável que a decisão dos bits seja realizada somente no processo de decodificação.

REFERÊNCIAS

- [1] NIKNAM, S. *et al.* Multiband OFDMA Heterogeneous network for millimeter wave 5G wireless applications. *IEEE Early Access Articles*, p.5640-5648, 2016.
- [2] GUERRA, O.; ADAME, M. S. Network Ad Hoc routing algorithm: An application with Bluetooth. *IEEE Conference Publications*, 2015.
- [3] BADER, A.; MERAİM, K. A.; ALOUINI, M. S. An efficient multi-carrier position-based packet forwarding protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v.11, n.1, p. 305-315, 2012.
- [4] BADER, A.; ALOUINI, M. S. Mobile Ad Hoc networks in bandwidth-demanding mission critical applications: Practical implementation insights. *IEEE Early Access Articles*, 2016.
- [5] RATH, M. Optimized network layer protocol with cross layer handshaking mechanism in MANET. *IEEE Conference Publications*, 2016.
- [6] RATH, M. Delay and power based network assessment of network layer protocols in MANET. *IEEE Conference Publications*, 2015.
- [7] RHAİEM, O., B.; FOURATI, L. C.; AJIB, W. QoS improvement for video streaming over MANET using network-coding. *IEEE Conference Publications*, 2015.
- [8] FINK, J.; RIBEIRO, A.; KUMAR, V. Robust control of mobility and communications in autonomous robot teams. *IEEE Access*, v.1, p. 290-309, 2013.
- [9] NASIR, A.A. *et al.* Secrecy rate beamforming for multicell networks with information and energy harvesting. *IEEE Transactions Signal Processing*, p. 677-689; 2017.
- [10] TANG, J. *et al.* On the energy efficiency–spectral efficiency tradeoff in MIMO-OFDMA broadcast channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 7, 2016.
- [11] GUPTA, P.; SAXENA, P. *IEEE Conference Publications*, 2010.
- [12] VERDU, S. **Multiuser Detection**. Cambridge University Press, 1998.
- [13] VENKATARAMAN, V.; SHYNK, J. A. Subcarrier and bit allocation algorithm for a beamformer in an OFDMA Ad Hoc network. *Department of Electrical and Computer Engineering, University of California*, p. 1084-1088, 2005.
- [14] RAPPAPORT, T.S., **Comunicações sem fio**, São Paulo, SP: Person, p. 232–247, 2009.
- [15] VENKATARAMAN, V.; SHYNK, J. J. Adaptive algorithms for OFDMA wireless Ad Hoc network with multiple antennas. *IEEE, Department of Electrical and Computer Engineering*, p. 110-114, 2004.
- [16] PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. **A Técnica de Transmissão OFDM**. Instituto Militar de Engenharia-IME, 2002.
- [17] BAUM, K., L. A Synchronous coherent OFDM air interface concept for high data rate cellular systems. *IEEE Conference Publications* p. 2222-2226, 1998.
- [18] ZOU, W. Y.; WU, Y. COFDM: An Overview. *IEEE Transactions on Broadcasting*, v. 41, 1995.
- [19] MORELLI, M.; KUO, C. C. J.; PUN, M. Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): A tutorial review. *IEEE Journals & Magazines*, v. 95, 2007.
- [20] JOHNSON, D. B.; MALTZ, D. A. Protocols for adaptive wireless and mobile networking. *IEEE Personal Communications*, p. 34-42, Feb. 1996.
- [21] CORSON, M. S.; MAKER, J. P.; CERNICIONE, J. H. Internet based mobile Ad Hoc networking. *IEEE Internet Computing*, p. 63-70, 1999.
- [22] WATTEYNE, T. *et al.* From MANET to IETF roll standardization: A paradigm shift in WSN routing protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v.13, p. 688-707, 2011.
- [23] TESHIMA, S. K.; ALMEIDA, C. A Lower bound on the normalized interference mean and standard deviation for CDMA systems using antenna arrays. *IEEE Electronics Letters*, v. 36, p. 1761- 1763, 2000.
- [24] GODARA, L. C. Applications of antenna arrays to mobile communications, part I: performance improvement, feasibility, and system considerations. *Proceedings of the IEEE*, v. 85, n. 7, pp. 1031-1060, jun. 1997.
- [25] GODARA, L. C. Applications of antenna arrays to mobile communications, part II: beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, v. 85, n. 8, pp. 1195-1245, 1997.
- [26] LIN, S.; COSTELLO Jr, D. S. **Error Control Coding: Fundamentals and Applications**. Prentice Hall, 1983.
- [27] BINKLEY, D. M. Optimization of scintillation-detector timing systems using Monte Carlo Analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 41, 1994.
- [28] WANG, W.; ZHU, Q. **Varying the sample number for Monte Carlo localization in mobile sensor networks**. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
- [29] COATES, R. F. W; JANACEK, G. J. Monte Carlo simulation and random number generation, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1988.
- [30] ZABARAS, N.; SANKARAN, S. An information theoretic approach to stochastic materials modeling, *IEEE Computing in Science and Engineering*, p. 50-59, 2007.