

# Análise do Desempenho de Sistemas de Comunicação Cooperativa em Canais SUI

Gerson A. Leiria Nunes<sup>1</sup>, Dick C. Melgarejo<sup>2</sup>, Cesar H. Vidal Vargas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Ciências Computacionais – Universidade Federal do Rio Grande – FURG  
Caixa Postal 474 – 96201-900 – Rio Grande, RS – Brasil

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO  
Rua Marquês de São Vicente, 225 – 22451-900 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

<sup>3</sup>Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica - FUCAPI  
Av. Gov. Danilo de Mattos Areosa, 381 – Distrito Industrial – Manaus, AM – Brasil  
{dfrabu, dcarrillom, cesarvidal16}@gmail.com

**Abstract.** *The WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) technology has been developed to improve the rates of transmission through wireless channels, in order to achieve this goal WiMAX should take into account all the damage caused by the channel which causes degradation of the transmitted signal. To reduce these effects is used different strategies, specifically in this work is used some cooperative diversity techniques which have the purpose to analyze the performance in a scenario WiMAX (IEEE 802.16j) through uplink simulations.*

**Resumo.** *A tecnologia WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) vem sendo desenvolvida para melhorar a taxa de transmissão através de canais sem fio. Para conseguir este objetivo, WiMAX deve levar em conta todas as imperfeições do canal sem fio, as quais provocam degradação do sinal transmitido. Para diminuir estes efeitos são utilizadas diversas estratégias. Este trabalho, especificamente, foram consideradas algumas técnicas de diversidade cooperativa para analisar o desempenho em cenários sugeridos no padrão WiMAX (802.16j), através de simulações uplink.*

## 1. Introdução

Alguns dos maiores desafios das atuais tecnologias de comunicação sem fio são: a transmissão a altas taxas, conseguir uma alta eficiência espectral, integração de serviços e baixar os custo de produção dos aparelhos envolvidos no sistema de comunicação.

Paralelamente a estas necessidades, nos últimos anos tecnologias como WiMAX [Andrews, Ghosh, and Muhamed 2007] e LTE [Astély et al. 2009] são exploradas na indústria, mas nenhuma com definições certas de uso, por motivos de regulamento por parte de padronizações nas indústrias de hardware.

Nesse contexto, WiMAX, nome atribuído ao padrão IEEE 802.16 [IEEE 2004] busca oferecer conectividade fixa, portátil e eventualmente móvel sem a necessidade de visada direta (NLOS - *Non Line of Sight*) com uma estação rádio base (BS - *Base Station*).

A emenda 802.16m [IEEE 2007a] que visa o desenvolvimento de uma nova interface aérea que oferece altas taxas de transmissão e uma elevada eficiência espectral. Todo este trabalho, com o objetivo de cumprir os requisitos da IMT-A (*International Mobile Telecommunications-Advanced*). A emenda IEEE 802.16j [IEEE 2007b] propôs uso de *multi-hop* inserindo estações retransmissoras (RS – *Relay Station*) dentro das células, com o objetivo de ajudar na comunicação entre a BS e a estação móvel (MS – *Mobile Station*) e vice-versa.

Neste artigo é apresentado um modelo de um sistema com diversidade cooperativa, para as estruturas de transmissão SISO (*Single-Input and Single-Output*) e MIMO (*Multiple-Inputs and Multiple-Outputs*), os quais utilizam na transmissão canais do tipo Rayleigh e Rice.

O presente trabalho orienta-se à análise de desempenho de algumas configurações de tipo de canal sugeridas nas normas [IEEE 2007b], e está organizado da seguinte maneira: na seção 2, apresenta-se uma descrição dos sistemas de comunicação com diversidade cooperativa. Na seção 3, os cenários de simulação e na seção 4 os resultados de simulação, as conclusões e as referências bibliográficas.

## 2. Sistemas de comunicação com diversidade cooperativa

As técnicas de diversidade permitem ao receptor enxergar o sinal transmitido sobre condições de canais diferentes. Isso torna a transmissão de informação mais confiável. Em particular, a diversidade espacial (múltiplas antenas) vem sendo muito utilizada já que fornece ganhos sem induzir perdas de eficiência espectral. Adicionalmente, a capacidade de sistemas com múltiplas antenas, também conhecidos como MIMO, tem um aumento significativo quando comparada a de sistemas que utilizam apenas uma antena transmissora e uma receptora [Telatar 1999]. Devido a estas características, os sistemas MIMO têm sido alvo de inúmeras pesquisas. Algumas dessas já resultaram em grandes avanços conforme os trabalhos de [Alamouti 1998] e de [Foschini 1996].

Uma área que tem crescido muito nestes últimos anos é a comunicação cooperativa, cujo primeiro modelo foi proposto em [Meulen 1971]. A configuração básica de um sistema de comunicação cooperativo é formada por três elementos: uma MS chamada origem, outra MS chamada de relay (RS) e por fim a BS chamada de destino. A BS receberá o sinal direto transmitido pelo usuário móvel e também as retransmissões do mesmo sinal feitas pelas RSs, conforme apresentado na Figura 1. Sistemas de comunicação cooperativa são vistos como mecanismos para incrementar a ordem da diversidade, robustez e eficiência de energia.

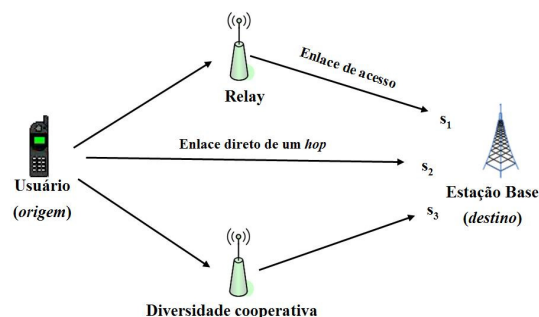


Figura 1. Sistema de Comunicação Cooperativo de três terminais.

O conceito de diversidade cooperativa nasce ao fazer uma analogia com um esquema de transmissão MISO (*Multiple Input and Single Output*), onde um mesmo sinal pode ser transmitido através de antenas descorrelacionadas, fazendo com que os símbolos transmitidos estejam sujeitos a diferentes intensidades de desvanecimento [Machado 2008]. Considerando uma rede distribuída onde as MSs são independentes, pode-se aplicar o conceito de cooperação. As MSs podem trocar informações entre si e retransmitir as informações que foram originadas em outras MSs.

## 2.1. Diversidade cooperativa SISO

Na literatura são apresentados vários esquemas de transmissão e recepção, os quais consideram RSs na estrutura, que tem o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação. O algoritmo DF (*Decode and Forward*) [Nosratinia, Hunter and Hedayat 2004] é um exemplo clássico de transmissão cooperativa. Neste algoritmo as RSs detectam e decodificam o sinal recebido, e depois recodificam esse sinal antes de fazer a retransmissão. A Figura 2 apresenta uma versão modificada desta, usando a codificação de Alamouti [Alamouti 1998], aplicado a um sistema SISO. A transmissão é realizada em dois intervalos de tempo “t” e “t+1”, no primeiro intervalo “t” é transmitida a informação da MS à BS e também entre elas mesmas. Depois, a MS estima a mensagem recebida da outra MS. No instante de tempo seguinte “t+1”, as MSs farão o papel de RS, retransmitindo a mensagem de acordo com o esquema proposto por Alamouti, mostrado na Tabela 1.

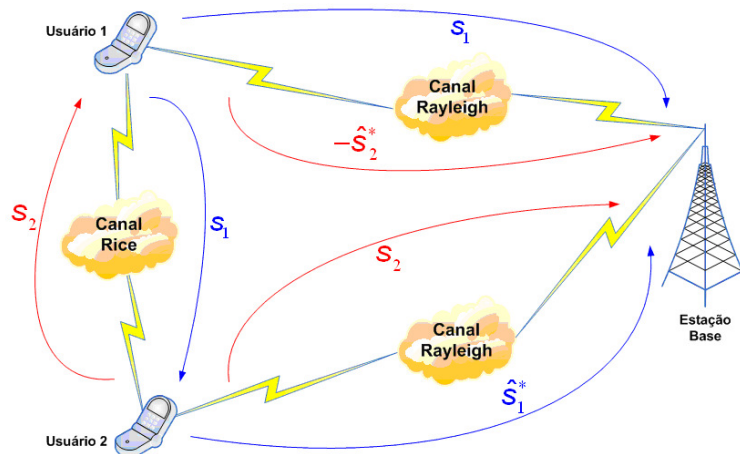


Figura 2. Sistema de Comunicação Alamouti-Cooperativo

Tabela 1. Esquema de transmissão Cooperativo - Alamouti

Usuário	T	t+1
1	$s_1$	$-(\hat{s}_2)^*$
2	$s_2$	$(\hat{s}_1)^*$

Os sinais recebidos nos dois instantes de tempo serão:

$$r(t+1) = -h_1 \hat{s}_2^* + h_2 \hat{s}_1^* + n_2 \quad (1)$$

$$r(t) = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (2)$$

Onde:

$$\hat{s}_1 = s_1 h_{Rice12} + n_{iu1} \quad (3)$$

$$\hat{s}_2 = s_2 h_{Rice21} + n_{iu2} \quad (4)$$

A estimação na BS é realizada através da seguinte combinação:

$$\bar{s}_1 = h_1^* r_1 + h_2^* r_2 \quad (5)$$

$$\bar{s}_2 = h_2^* r_1 + h_1^* r_2 \quad (6)$$

Nas equações acima a variável  $h$  representa o canal de comunicação,  $s$  é o sinal transmitido pelos usuários,  $n$  é o ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*),  $\hat{s}$  é o sinal estimado pela RSs,  $r$  é o sinal retransmitido pelas RSs e  $\bar{s}$  é o sinal estimado na BS. Outras modificações deste algoritmo podem ser encontradas em [Li, Ge, Tang and Xiong 2008] e [Ning, Zhongpei and Shaoqian 2009].

## 2.2. Diversidade cooperativa MIMO

O sistema em estudo é composto por  $(nT:nR:nD)$ , onde  $nT$  é o número de antenas transmissoras na MS,  $nD$  é o número de antenas na BS e  $nR$  é o número de antenas na RS. Neste trabalho considera-se que o sistema esta composto por:  $nT=2$ ,  $nD=2$  e  $nR=2$ . Caracterizando assim um sistema MIMO que precisa de mais de uma antena transmissora e receptora. É importante mencionar que durante a transmissão a RS utiliza o algoritmo DF.

Modelo de canal MIMO: Em tempo discreto a matriz do sinal recebido para um sistema MIMO com “ $n_b$ ” antenas transmissoras e “ $n_a$ ” antenas receptoras, é definida como:

$$y = Hs + n \quad (7)$$

Onde:

$$y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_{n_b}]^T \quad (8)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,n_b} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,n_b} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n_a,1} & h_{n_a,2} & \dots & h_{n_a,n_b} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$s = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_{n_b}]^T \quad (10)$$

$H$  é a matriz do canal, onde  $h_{a,b}$  é o efeito do canal entre a antena transmissora “ $b$ ” e a antena receptora “ $a$ ”,  $s$  é o vetor de símbolos transmitidos, um para cada antena transmissora e  $n(0, N_0I/2)$  é o ruído AWGN estatisticamente independente de potência unitária. Assumimos que a comunicação é realizada em duas fases. Na primeira fase a fonte transmite a mensagem usando a codificação de Alamouti [Alamouti 1998], para a

RS e para a BS. Nesta fase a BS e a RS recebem a mensagem transmitida. A RS decodifica a informação usando MRC (*Maximal Ratio Combining*), como está especificada em [Alamouti 1998]. Durante a segunda fase, a RS avalia o sinal recebido e se ele estiver correto, então será retransmitido para a BS. A BS recebe a informação através de dois canais, um de eles é MS-BS ( $H_{mb}$ ) e o outro RS-BS ( $H_{rb}$ ), a estimação dos símbolos é realizada de maneira independente utilizando MRC, depois os resultados são somados, como está definido na equação 13:

$$y_{mb} = H_{mb}s + n_{mb} \quad (11)$$

$$y_{rb} = H_{rb}s + n_{rb} \quad (12)$$

$$y = H_{mb}^H y_{mb} + H_{rb}^H y_{rb} \quad (13)$$

### 3. Cenários de simulação

De acordo como esta especificado em [IEEE 2007b], [IEEE 2001], existem cenários definidos para realizar simulações sistêmicas que incluem RSs. Estes são:

- ART (*Above Rooftop*), que tem duas RSs por setor.
- BRT (*Below Rooftop*), que tem seis RSs por setor os quais podem estar a 1.5 ou 3 km da BS.

Neste artigo se pretende avaliar o desempenho de sistemas de comunicação cooperativa através de simulações de enlace, em cenários WiMAX (IEEE 802.16j).

Os cenários ART e BRT, como mostra a Figura 3, serão utilizados para avaliar o efeito de pequena escala em uma transmissão WiMAX, que utiliza o modelo de canal SUI [IEEE 2001].

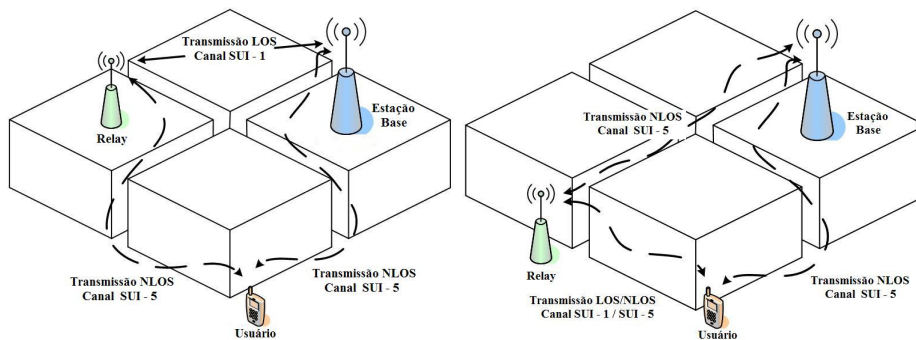


Figura 3. Cenário ART e BRT

#### 3.1. Modelos de canal SUI

O modelo de canal SUI tem as seguintes características [IEEE 2007a], [IEEE 2007b]:

- É composto de três coeficientes com distintos fatores ricianos(K) e distintas potências médias.
- É utilizado para simulação, desenvolvimento e teste de tecnologias sem-fio, fixas e de banda larga.
- Os parâmetros são relacionados com o tipo de terreno, espalhamento de atraso e tipo de orientação da antena.

Dependendo do tipo de terreno, o ambiente de propagação pode ser dividido em três categorias descritas em [IEEE 2007a]:

- Categoria A: máxima perda de percurso em terreno montanhoso com densidade de árvores moderada a densa.
- Categoria B: condição intermediária de perda de percurso.
- Categoria C: de mínima perda de percurso em terreno plano com pouca densidade de árvores.

São definidos seis tipos de canais para diferentes ambientes:

- Canais SUI que têm linha de visada direta (para o caso de antenas omnidirecionais e fator K de 90%) são os canais: SUI - 1(Categoria C), SUI - 2(Categoria C) e SUI - 3(Categoria B).
- Canais SUI que não têm linha de visada direta (para o caso de antenas omnidirecionais e fator K de 90%) são os canais: SUI - 4(Categoria B), SUI - 5(Categoria A) e SUI - 6(Categoria A).

Para efeitos de ilustração, as especificações dos modelos de canal SUI-1 e SUI-5 são apresentadas na Tabela 2. A resposta ao impulso para antenas omnidirecionais com frequência de amostragem de 11,2 Mhz [IEEE 2004] são mostradas na Figura 4.

**Tabela 2. Modelo de canal SUI – 802.16**

CANAL SUI-1				
Parâmetro	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidade
Atraso	0	0,4	0,9	$\mu s$
Potência	0	-15	-20	dB
Factor K	4	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz

CANAL SUI-5				
Parâmetro	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidade
Atraso	0	4	10	$\mu s$
Potência	0	-5	-10	dB
Factor K	0	0	0	
Doppler	2.0	1.5	0.5	Hz

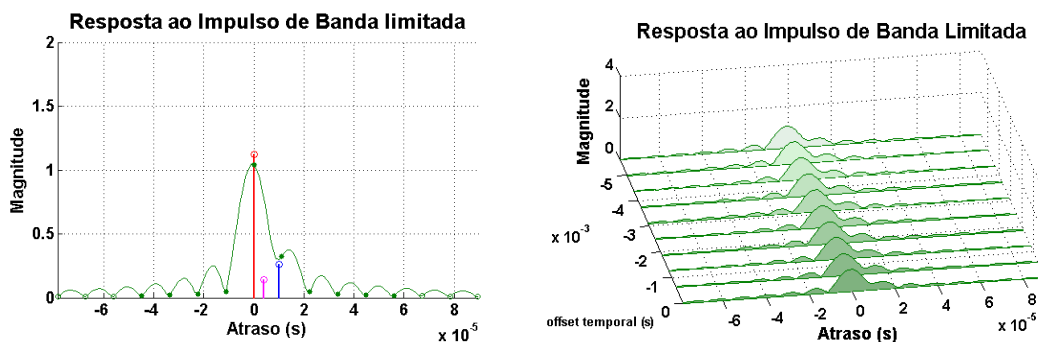


Figura 4. Resposta ao impulso do canal SUI-5

#### 4. Resultados de simulação e conclusões

O objetivo desta seção é avaliar o desempenho de sistemas de comunicação com diversidade cooperativa em cenários WiMAX (IEEE 802.16j) definidos em [IEEE 2007b]. São utilizadas as estruturas de transmissão cooperativas SISO e MIMO, as quais utilizam o algoritmo DF. Os resultados obtidos permitiram medir o efeito provocado pelo desvanecimento de pequena escala, utilizando os modelos de canal SUI-1 e SUI-5.

Considerando os parâmetros envolvidos na simulação dos cenários ART e BRT, a utilização da estrutura Alamouti cooperativo DF MIMO mostrou-se como a opção mais robusta e eficaz para mitigar o efeito do desvanecimento de pequena escala, onde apresenta melhor desempenho em termos de *Bit Error Rate* (BER) quando comparado ao caso cooperativo DF SISO. Os resultados destas simulações são apresentados nas Figuras 5 e 6.

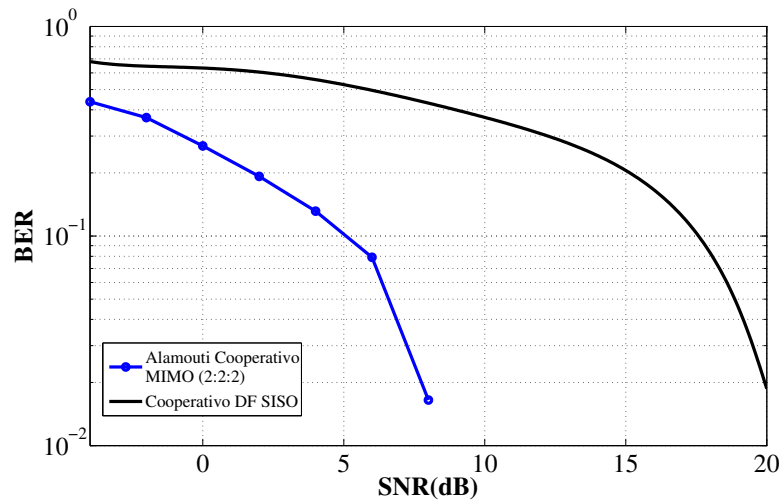


Figura 5. BER x SNR Alamouti cooperativo DF MIMO e cooperativo DF SISO - Cenário ART

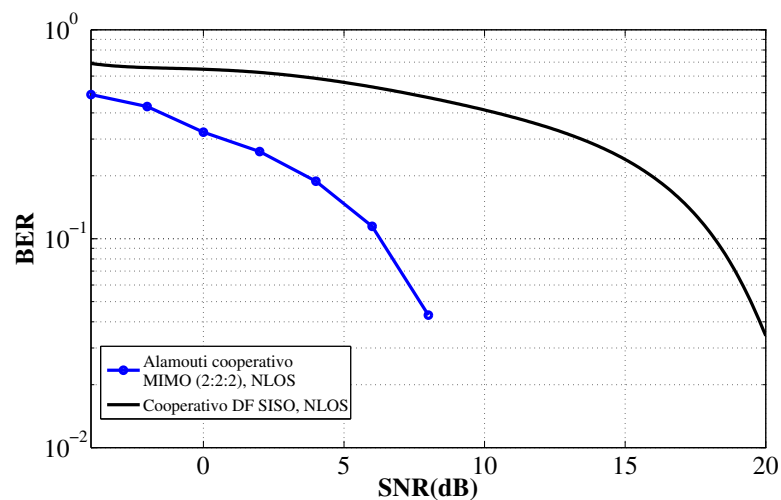


Figura 6. BER x SNR Alamouti cooperativo DF MIMO e cooperativo DF SISO - Cenário BRT

Conclui-se baseado nos resultados de simulação, que o cenário ART tem uma suave melhoria de desempenho, quando comparado ao BRT nas opções de cooperação

SISO e MIMO. A melhoria ocorre devido ao canal entre a RS e a BS serem do tipo SUI-1, o qual não é totalmente NLOS, como o canal SUI-5 do caso BRT.

## Referências

- J. G. Andrews, A. Ghosh and R. Muhamed (2007), *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, 1<sup>st</sup> edition.
- D. Astély, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström and S. Parkvall (2009), “Lte: the evolution of mobile broadband - [lte part ii: 3gpp release 8],” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 4, pages 44–51.
- IEEE 2004 Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16, disponível em: [http://users.ece.utexas.edu/~rheath/courses/mimo/suggested\\_readings/ref/23-1.pdf](http://users.ece.utexas.edu/~rheath/courses/mimo/suggested_readings/ref/23-1.pdf).
- IEEE 2007a, Draft IEEE 802.16m Evaluation Methodology, disponível em: [http://wirelessman.org/tgm/docs/80216m-07\\_037r2.pdf](http://wirelessman.org/tgm/docs/80216m-07_037r2.pdf).
- IEEE 2007b, Multi-hop Relay System Evaluation Methodology, disponível em: [http://www.ieee802.org/16/relay/docs/80216j-06\\_013r3.pdf](http://www.ieee802.org/16/relay/docs/80216j-06_013r3.pdf).
- E. Telatar (1999), “Capacity of multi-antenna gaussian channels,” pages 585–595.
- S. Alamouti (1998), “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 16, pages 1051–1458.
- G. Foschini (1996), “Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multiple antennas,” *Bell Labs Tech.*, vol. 1, no. 1, pages 41–59.
- E. C. van der Meulen (1971), “Three-terminal communication channels,” *Adv. Appl. Probab.*, vol. 3, pages 120–154.
- R. Machado (2008), “Códigos de dispersão linear e comunicação cooperativa em canais de comunicações sem fio com realimentação limitada,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina.
- A. Nosratinia, T. Hunter and A. Hedayat (2004), “Cooperative communication in wireless networks,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, no. 10, pages 74–80.
- J. Li, J. Ge, Y. Tang and X. Xiong (2008), “Cooperative diversity based on alamouti space-time code”, *ICCSIT 2008*, pages 642–646.
- W. Ning, Z. Zhongpei and L. Shaoqian (2009), “Signal space diversity in decode-and-forward cooperative communication”, *CMC'09*, vol. 1, pages 127–130.
- IEEE 2001 Channel Models for Fixed Wireless Applications, IEEE Std. 802.16, disponível em: [http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03\\_01.pdf](http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03_01.pdf).