UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

THIAGO HENRIQUE TON

COMUNICAÇÃO COOPERATIVA COM CODIFICAÇÃO DE REDE E ALOCAÇÃO DE SUBPORTADORAS

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2017

THIAGO HENRIQUE TON

COMUNICAÇÃO COOPERATIVA COM CODIFICAÇÃO DE REDE E ALOCAÇÃO DE SUBPORTADORAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de "Mestre em Ciências" – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Rebelatto

CURITIBA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

T663c
2017

Ton, Thiago Henrique
Comunicação cooperativa com codificação de rede e alocação de subportadoras / Thiago Henrique Ton.-- 2017.
56 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, Curitiba, 2017.
Bibliografia: f. 53-55.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Divisão ortogonal de frequência multiplexada. 3. Acesso múltiplo por divisão de frequência. 4. Teoria da codificação. 5. Multiplexação. 6. Algoritmos. 7. Métodos de simulação. 8. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Rebelatto, João Luiz, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba – UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 778

A Dissertação de Mestrado intitulada **"Comunicação Cooperativa com Codificação de Rede e Alocação de Subportadoras"** defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Thiago Henrique Ton**, no dia 11 de dezembro de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Telecomunicações e Redes, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). João Luiz Rebelatto - Presidente – (UTFPR)
Prof(a). Dr(a). Ohara Kerusauskas Rayel - (UTFPR)
Prof(a). Dr(a). Richard Demo Souza - (UFSC)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 12 de dezembro de 2017.

RESUMO

TON, Thiago Henrique. Comunicação Cooperativa com Codificação de Rede e Alocação de Subportadoras. 56 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Nessa dissertação apresenta-se um novo modelo de cooperação com codificação de rede para cenários em que há múltiplo acesso por divisão de frequências ortogonais (OFDMA). O modelo proposto é desenvolvido sobre o modelo da Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC) incorporando-se a ele a alocação de subportadoras pelo algoritmo de máximas combinações com restrição (MCMA). O objetivo é incorporar ao GDNC a possibilidade de explorar a diversidade em frequência através da correta alocação de subportadoras para os diversos nós do sistema. A análise do modelo proposto, GDNC-OFDMA, é desenvolvida em cenários nos quais o desvanecimento dos blocos de coerência é do tipo Rayleigh. Expressões para probabilidade de *outage* atingida pelo sistema, assim como a curva diversidade-multiplexação (DMT) obtidas são confrontadas com simulações numéricas. O desempenho do GDNC-OFDMA é confrontado com esquema análogo que também explora a diversidade em frequência da mesma forma, o NCC-OFDMA, que é revisitado nesse trabalho de forma a se obter uma versão mais realista do que a originalmente proposta. Os resultados obtidos mostram que o GDNC-OFDMA supera o desempenho em termos de diversidade em relação ao esquema GDNC com o custo de uma redução na taxa de multiplexação, devendo ser preferível a sua adoção nos cenários em que se aplica ao invés da versão original. Ainda, o GDNC-OFDMA tem melhor desempenho em termos de probabilidade de *outage* e diversidade comparativamente ao NCC-OFDMA.

Palavras-chave: Comunicação cooperativa, Codificação de rede, OFDMA

ABSTRACT

TON, Thiago Henrique. COOPERATIVE COMMUNICATION WITH NETWORK-CODING AND SUBCARRIER ALOCATION. 56 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

In this master's thesis a new model for network-coded cooperative communication in orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) scenarios is proposed. The proposed model is an extension of the Generalized Dynamic Network Coding (GDNC), incorporating into it a subcarrier allocation method provided by the maximum-constraint matching allocation (MCMA) algorithm. The objective is to provide GDNC with the ability to explore frequency diversity through proper subcarrier allocation for the nodes in the system. The analysis of the proposed model, GDNC-OFDMA, is developed in scenarios in which coherence blocks undergo Rayleigh fading. Equations for outage probability of the system, as well as the diversity-multiplexing trade-off (DMT) are obtained and compared with numerical simulations. The performance of GDNC-OFDMA is compared with an analogous scheme which also explores frequency diversity in the same manner, the NCC-OFDMA, which is reviewed in this work in order to obtain a more realistic version compared to the one originally proposed. Results showed that GDNC-OFDMA surpasses GDNC in terms of diversity at the cost of a decreasing in multiplexing rate, being preferable its adoption in applicable scenarios rather than the original version. Moreover, GDNC-OFDMA has better performance in terms of outage probability and diversity when compared to NCC-OFDMA.

Keywords: Cooperative communication, Network coding, OFDMA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de sistema cooperativo 16
Figura 2 – Sistema não-coperativo OFDMA 17
Figura 3 – Exemplo de alocação utilizando o algoritmo MCMA 21
Figura 4 – Exemplo de alocação utilizando o algoritmo MCMA 23
Figura 5 – Modelo de sistema para NCC-OFDMA 24
Figura 6 – DMT para NCC-OFDMA de Heidarpour et al. (2015) 25
Figura 7 – Canais que experimentam diversidade L no NCC-OFDMA 27
Figura 8 – Grafos de *outage* dos IFs para destino e para *relay* 28
Figura 9 – DMT do NCC-OFDMA corrigido 31
Figura 10 – Modelo de sistema para avaliar a diversidade vista por um segundo receptor 32
Figura 11 – Probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor . 33
Figura 12 – Probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor para $M = 6$, $N = 12$ e $L = 4$, para $R_0 = 1$ bps/Hz 34
Figura 13 – Probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor para $M = 3$, $N = 16$ e $L = 4$, para $R_0 = 1$ bps/Hz 34
Figura 14 – Probabilidade de *outage* do NCC-OFDMA corrigido 35
Figura 15 – Pacotes transmitidos no GDNC 38
Figura 16 – DMT para GDNC 39
Figura 17 – DMT comparativo dos esquemas 44
Figura 18 – Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA variando-se L 45
Figura 19 – Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA e do NCC-OFDMA 46
Figura 20 – Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA e do GDNC 47
Figura 21 – Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA e do NCC-OFDMA compensado-se R_0 48
Figura 22 – Comparativo de *throughput* para GDNC-OFDMA ($k_1 = k_2 = 2$) e NCC-OFDMA 49
Figura 23 – Comparativo de *throughput* para GDNC-OFDMA ($k_1 = 4$ e $k_2 = 2$) e NCC-OFDMA 49

LISTA DE SIGLAS

AWGN	Ruído Aditivo Gaussiano Branco, do inglês *Additive White Gaussian Noise*
BP	Fase de difusão, do inglês *Broadcast phase*
CP	Fase de cooperação, do inglês *Cooperative phase*
CRC	do inglês *Cyclic redundancy check*
DMT	Compromisso diversidade-multiplexação, do inglês *Diversity-Multiplexing Tradeoff*
DNC	Codificação de rede dinâmica, do inglês *Dynamic Network Coding*
FD-GDNC	Codificação de rede dinâmica generalizada de diversidade cheia, do inglês *Full-diversity Generalized Dynamic Network Coding*
GDNC	Codificação de rede dinâmica generalizada, do inglês *Generalized Dynamic Network Coding*
HK	Algoritmo de Hopcroft-Karp
IF	Pacote de informação, do inglês *Information Frame*
MCMA	Algoritmo de alocação de subportadoras, do inglês *Maximum Constraint* $\mathcal{K}_{1,K}$*-Matching Allocation*
MDS	Distância máxima separável, do inglês *Maximum Distance Separable*
MIMO	Múltipla-entrada múltipla-saída, do inglês *Multiple-Input Multiple-Output*
NCC	Cooperação com codificação de rede, do inglês *Network-coded cooperation*
OFDMA	Acesso com multiplexação por divisão de frequências ortogonais, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OFDM	Multiplexação por divisão de frequências ortogonais, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
PF	Pacote de paridade, do inglês *Parity frame*
R2EHK	Rotação aleatória e expansão Hopcroft-Karp, do inglês *Random Rotation and Expansion Hopcroft-Karp*
SNR	Relação sinal-ruído, do inglês *Signal-to-noise ratio*
UWA	Acústico subaquático, do inglês *Underwater Accoustic*

LISTA DE SÍMBOLOS

M	Número de nós-fonte
u_m	m-ésimo nó fonte
D	Nó destino
N	Número de subportadoras
s_n	n-ésima subportadora
K	Número de subportadoras alocadas para cada usuário
L	Número de bandas de coerência
N_L	Número de subportadoras em uma banda de coerência
$\mathcal{U}$	Conjunto de usuários
$\mathcal{S}$	Conjunto de subportadoras
$Y[n]$	Sinal recebido na n-ésima subportadora
p_t	Potência total de transmissão do sistema
p_{ts}	Potência em cada subportadora
$X[n]$	Sinal transmitido na n-ésima subportadora
$H[n]$	Ganho de canal na n-ésima subportadora
$W[n]$	Ruido aditivo na n-ésima subportadora
N_0	Densidade espectral de ruído
B_s	Largura de banda de subportadora
B	Largura de banda do sistema
ρ	SNR média por subportadora
R_0	Taxa de transmissão do usuário
$C_L(n)$	Capacidade normalizada do bloco de coerência que contém a subportadora n
R_{sch}	Taxa efetiva de transmissão do esquema *sch*
P_{sch}	Probabilidade de *outage* do esquema *sch*
$\mathrm{GF}(q)$	Campo finito de Galois
q	Ordem do Campo de Galois
$\mathcal{K}_{M,N}$	Grafo bipartido completo $M \times N$
$\mathcal{K}_{1,K}$	Grafo bipartido $1 \times K$
$\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$	Grafo que modela a *outage* das subportadoras no OFDMA
e_{mn}	Aresta entre u_m e s_n
ϵ	Conjunto de todas as arestas do grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$
$\mathcal{M}^c_{\mathcal{K}_{1,K}}$	Maior conjunto de cópias disjuntas de $\mathcal{K}_{1,K}$ em $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$
$P_s(K)$	Probabilidade de *outage* da subportadora
$\mathcal{O}(x)$	Termos de maior ordem de x
$\mathcal{R}$	Conjunto de *relays* que decodificaram todos os IFs
$\bar{x}$	Complemento de x
$P_{NO(H)}(\rho)$	Probabilidade de *outage* para o esquema NCC-OFDMA original
$d_{NO(H)}(r)$	DMT para o NCC-OFDMA original
P_r	Probabilidade de *outage* entre fonte e *relay*
$P_{NO}(\rho)$	Probabilidade de *outage* para o esquema NCC-OFDMA corrigido
R_{NO}	Taxa de transmissão efetiva para o NCC-OFDMA corrigido

R_F	Ganho de multiplexação na frequência
R_T	Ganho de multiplexação no tempo
k_1	Número de janelas de tempo durante a fase de difusão
k_2	Número de janelas de tempo durante a fase de cooperação
$P_G(\rho)$	Probabilidade de *outage* do GDNC
P	Probabilidade de *outage* no canal inter-usuário
$d_G(r)$	DMT para o GDNC
$P_{GO}(\rho)$	Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA
$P_{cGO}(\rho)$	Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA com estratégia restrita
R_{GO}	Taxa de transmissão final do GDNC-OFDMA
$d_{GO}(r)$	DMT para o GDNC-OFDMA
$d_{cGO}(r)$	DMT para o GDNC-OFDMA com estratégia restrita
T_{sch}	*Throughput* do esquema *sch*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **11**
1.1 CONTRIBUIÇÕES 13
1.2 MOTIVAÇÃO 14
1.3 OBJETIVOS 14
1.3.1 Objetivo Geral 14
1.3.2 Objetivos Específicos 14
1.4 PUBLICAÇÕES 15
1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO 15
2 PRELIMINARES **16**
2.1 MODELO DO SISTEMA 16
2.1.1 *Diversity Multiplexing Tradeoff* (DMT) 19
2.2 COOPERAÇÃO COM CODIFICAÇÃO DE REDE (NCC) 19
2.3 ALGORITMO *MAXIMUM CONSTRAINT* $\mathcal{K}_{1,K}$*-MATCHING ALLOCATION* (MCMA) 20
2.4 NCC-OFDMA 22
2.5 COMENTÁRIOS 26
3 NCC-OFDMA CORRIGIDO **27**
3.1 PROBABILIDADE DE OUTAGE ATINGIDA PELOS RELAYS 28
3.2 PROBABILIDADE DE OUTAGE DO NCC-OFDMA 29
3.3 DMT 30
3.4 RESULTADOS NUMÉRICOS 32
3.4.1 Probabilidade de outage atingida pelos relays 32
3.4.2 Probabilidade de outage do NCC-OFDMA corrigido 33
3.5 COMENTÁRIOS 35
4 GDNC-OFDMA **37**
4.1 GDNC 37
4.2 DESCRIÇÃO DO ESQUEMA GDNC-OFDMA 39
4.3 PROBABILIDADE DE OUTAGE 40
4.3.1 Estratégia irrestrita 40
4.3.2 Estratégia Restrita 41
4.4 DMT 42
4.4.1 Estratégia Irrestrita 42
4.4.2 Estratégia Restrita 43
4.5 RESULTADOS NUMÉRICOS 44
4.6 COMENTÁRIOS 48
5 COMENTÁRIOS FINAIS **51**
5.1 TRABALHOS FUTUROS 51
REFERÊNCIAS **53**

1 INTRODUÇÃO

Realizar comunicação confiável por um canal sem fio é um grande desafio, principalmente devido à existência de desvanecimento (do inglês *fading*) que está presente no canal e que perturba o sinal de tal forma que a sua correta decodificação pode se tornar impossível. Existem diversas formas de combate aos efeitos deletérios do desvanecimento, dentre elas o aumento da diversidade.

Diversidade é o conceito de se transmitir a mesma informação por canais independentes, seja no tempo, no espaço ou na frequência. Assim, ao se transmitir a mesma informação de forma independente, as chances de que as diversas cópias do sinal sofram simultaneamente desvanecimento profundo é menor (GOLDSMITH, 2005; TSE; VISWANATH, 2005; BRENNAN, 1959).

Uma forma tradicional de se implementar diversidade espaço-temporal é através da utilização de múltiplas antenas (MIMO) no(s) receptor(es) e/ou transmissor(es) (TAROKH et al., 1998, 1999; ALAMOUTI, 1998). Tal solução pode ser inviável em alguns cenários, pois o uso de múltiplas antenas demanda que o tamanho físico dos nós seja maior. Como alternativa, pode-se empregar cooperação entre os nós (NOSRATINIA et al., 2004; LANEMAN et al., 2004). Na comunicação cooperativa, os nós se auxiliam na transmissão de seus pacotes, emulando um sistema MIMO, podendo atingir diversidade no tempo e espaço.

De forma geral, a transmissão em uma rede com cooperação é dividida em duas fases: a fase de difusão (BP, do inglês *Broadcast Phase*), na qual os nós transmitem os seus próprios pacotes de informação (IF, do inglês *Information Frame*); uma fase de cooperação (CP, do inglês *Cooperative Phase*), durante a qual um conjunto de *relays* transmite pacotes de paridade (PF, do inglês *Parity Frame*), *i.e.* informação redundante é enviada ao destino. O fato de os nós cooperarem, transmitindo os PFs, gera um efeito de compartilhamento de antenas, criando uma matriz de antenas distribuídas (LANEMAN et al., 2004).

O papel dos nós durante a CP não precisa se restringir a somente retransmitir os pacotes dos nós parceiros. Os nós podem, durante a CP, combinar diversos IFs utilizando o conceito de codificação de rede, técnica originalmente proposta por Ahlswede et al. (2000), sendo um resultado de grande relevância e que contrariou o senso comum em comunicações em rede até então. O cenário em Ahlswede et al. (2000) é uma rede de computadores comunicando-se ponto-a-ponto em que algumas informações devem ser transmitidas a

vários destinos. Mostrou-se que ao invés de somente retransmitir um pacote, de modo que ele chegue ao destino após algumas retransmissões, é melhor que esse pacote seja combinado com outro(s) pacote(s) antes de ser retransmitido. Dessa forma, é possível reduzir a largura de banda necessária na maioria dos casos.

Apesar de ter sido originalmente pensado para redes de computadores, a codificação de rede se mostrou de grande valia também para a aplicação em cenários sem fio cooperativos, visando aumentar a confiabilidade da rede. Em Xiao et al. (2007), apresenta-se um esquema de comunicação cooperativa com codificação de rede (NCC, do inglês *Network-coded cooperation*) no qual os pacotes PFs são formados por combinações binárias de dois pacotes transmitidos durante a BP. Trabalhos recentes mostraram que a NCC promove maior diversidade que esquemas tradicionais de cooperação (CHEN et al., 2006; XIAO et al., 2012; XIAO; SKOGLUND, 2010; REBELATTO et al., 2012; BAşARAN et al., 2016).

Xiao e Skoglund (2010) propuseram o esquema DNC (Codificação de rede dinâmica, do inglês *Dynamic Network Coding*), mostrando que as combinações lineares realizadas durante a CP devem ser feitas sobre um campo finito não-binário de modo a se atingir aumento na diversidade. Cada um dos M usuários transmite um único IF na BP, seguido da transmissão de $M-1$ PFs por usuário na CP, os quais são combinações lineares adequadamente feitas dos pacotes corretamente decodificados durante a primeira fase. Comparativamente a cenários nos quais não há codificação de rede ou essa codificação é binária, o DNC tem menor probabilidade de *outage* para média e alta SNR (do inglês, *Signal-to-noise ratio*).

Rebelatto et al. (2012) estenderam esse esquema no chamado GDNC (do inglês *Generalized Dynamic Network Coding*). De forma análoga ao DNC, os usuários também transmitem informações independentes a um mesmo destino através de canais independentes. A cooperação também acontece com a transmissão de PFs que são formados como combinações lineares adequadamente feitas dos pacotes corretamente decodificados durante a BP. A diferença é que o sistema permite que mais de um pacote possa ser transmitido em cada uma das fases, em outras palavras, no GDNC os nós transmitem $k_1 + k_2$ pacotes, sendo k_1 IFs e k_2 PFs. Nesse novo esquema, associou-se as combinações lineares com a teoria de códigos corretores de erro de forma que o GDNC é capaz de atingir, em comparação com o DNC, aumento da diversidade e maior taxa de código de forma simultânea.

Além das diversidades temporal e espacial, como em Xiao e Skoglund (2010),

Rebelatto et al. (2012), a diversidade também pode ser obtida através da frequência, com a utilização de múltiplas bandas de coerência em um canal seletivo em frequência. Bai et al. (2009, 2010, 2011) utilizaram a teoria de grafos bipartidos para modelar e analisar a alocação de subportadoras em um cenário não-cooperativo de OFDMA (do inglês *Orthogonal-frequency division multiple access*), mostrando que a máxima diversidade em frequência atingida em um cenário com compartilhamento de subportadoras do OFDMA é a mesma que a atingida em um cenário ponto-a-ponto no OFDM (do inglês *Orthogonal-frequency division multiplexing*) com um único usuário, requisitando pouco *feedback* aos usuários.

Heidarpour et al. (2015) aplicaram os resultados de Bai et al. (2011), avaliando a DMT (do inglês *Diversity-multiplexing tradeoff*) em um cenário de NCC não-binária com OFDMA no qual um conjunto fixo de nós atuava como *relay*, de forma a combinar em um mesmo esquema diversidade espacial e espectral (que será denominado de NCC-OFDMA). Esse trabalho (HEIDARPOUR et al., 2015) então é estendido para um cenário com desvanecimento Ricean (HEIDARPOUR et al., 2017), em contraste com o primeiro trabalho no qual o sinal estava sujeito a um desvanecimento do tipo Rayleigh. Em ambos, porém, é feita uma suposição muito otimista em muitos casos práticos. Os autores assumem que o algoritmo de alocação proposto em Bai et al. (2011) consegue prover a máxima diversidade em frequência para todos os enlaces na rede. Em outras palavras, Heidarpour et al. (2015) assumiram que é possível alocar otimamente as subportadoras para todos os nós de forma que todos atinjam a máxima diversidade em frequência, tanto no canal fonte-destino, quanto no canal fonte-*relay*. Porém, tal alocação não pode ser ótima para todos os enlaces, a menos que os canais sejam altamente correlacionados, suposição que comprometeria a diversidade espacial.

1.1 CONTRIBUIÇÕES

Nesse trabalho, reavalia-se a performance do NCC-OFDMA proposto em Heidarpour et al. (2015, 2017), porém, de uma forma mais realista, na qual somente as mensagens direcionadas diretamente ao destino exploram a diversidade em frequência conseguida com o algoritmo de alocação proposto em Bai et al. (2011).

Partido-se desses novos resultados, propõe-se um novo esquema no qual a diversidade temporal também é explorada, porém sem comprometer a taxa de transmissão. Esse novo esquema, chamado de GDNC-OFDMA, é capaz de atingir melhor desempenho, tanto em termos de probabilidade de *outage* quanto em DMT, em

comparação com o NCC-OFDMA, quando aplicado em um cenário em que os *relays* não são fixos, sendo que os próprios nós que cooperam participam da retransmissão.

1.2 MOTIVAÇÃO

Além de ter sido tema de comum acordo entre orientador e aluno, a maior aplicação de redes de sensores que se comunicam sem fio, em parte motivada pela crescente onda da Internet das Coisas, demanda novas formas de se organizar essas redes procurando a confiabilidade da comunicação entre os nós. A comunicação cooperativa assim como codificação de rede são qualidades que atraem muito interesse nessas novas formas de se organizar a comunicação sem fio entre vários nós.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é incorporar a diversidade em frequência ao esquema GDNC (REBELATTO et al., 2012) em cenários em que o acesso dos usuários é multiplexado na frequência (OFDMA). A variante proposta, denominada de GDNC-OFDMA, deve apresentar melhor desempenho, tanto em termos de probabilidade de *outage* quando em DMT, em comparação com o NCC-OFDMA, quando aplicado a um cenário em que os nós atuam tanto como fonte quanto como *relays*, assim como ser mais adequado que o GDNC nos cenários em que o acesso é multiplexado em frequência.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Reavaliar o desempenho do sistema NCC-OFDMA proposto em Heidarpour et al. (2017) em um cenário mais realista, em que somente o nó responsável por realizar a alocação das subportadoras é capaz de atingir a máxima diversidade em frequência.
- Propor e avaliar o desempenho de uma extensão temporal do NCC-OFDMA, denominada GDNC-OFDMA, em que a diversidade também é obtida através do tempo além do espaço e frequência.
- Verificar os resultados obtidos analiticamente através de simulações computacionais

1.4 PUBLICAÇÕES

Durante o período do mestrado foram submetidos dois artigos para periódicos internacionais: (PEREIRA et al., 2017) e (TON et al., 2017), que estão em processo de revisão.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No Capítulo 2 apresentam-se conceitos fundamentais para suporte aos demais capítulos. No Capítulo 3 revisa-se o esquema NCC-OFDMA proposto em Heidarpour et al. (2017) de uma forma mais realista. No Capítulo 4 apresenta-se o novo esquema GDNC-OFDMA. No Capítulo 5 apresentam-se a conclusão e comentários finais, assim como algumas ideias de trabalhos futuros.

2 PRELIMINARES

2.1 MODELO DO SISTEMA

O sistema do qual trata esse trabalho é composto por M nós-fonte u_m ($m \in 1, 2, ..., M$) ($M \geq 2$), os quais possuem informações distintas que devem ser transmitidas a um único nó destino comum D, como ilustrado na Figura 1. O sistema emprega OFDMA, com N subportadoras em um canal seletivo em frequência e cada subportadora s_n ($n \in 1, 2, ..., N$) é alocada para um determinado usuário, de forma que cada usuário recebe K subportadoras, $K = \lfloor N/M \rfloor$ (GOLDSMITH, 2005). Esse canal pode ser dividido em L bandas de coerência que apresentam desvanecimento Rayleigh independentes e igualmente distribuídos (i.i.d) no tempo, espaço e entre os blocos, com $M > L$, de modo que existem N_L subportadoras em cada banda de coerência ($N_L = N/L$), assumindo-se que $N \gg L$. O conjunto de usuários é chamado de $\mathcal{U}$, ou seja, $\mathcal{U} = \{u_1, ..., u_M\}$ e o conjunto de subportadoras é chamado de $\mathcal{S}$ ($\mathcal{S} = \{s_1, ..., s_N\}$). Ainda, impõe-se uma restrição de que $N_L = aK, a \in [1, 2, 3, ...]$ que será justificada na Seção 3.1.

(a) Fase de difusão (BP) (b) Fase de cooperação (CP)

Figura 1 – Modelo de sistema com $M = 2$ nós-fonte e o nó destino D

O sistema ainda emprega cooperação entre os nós, possuindo duas fases bem distintas:

- **Fase de difusão (BP)**: Durante essa fase, os M nós-fonte transmitem os seus IFs, como mostra a Figura 1a.
- **Fase de cooperação (CP)**: Durante essa fase, um conjunto de *relays* atua transmitindo os PFs, que são formados como combinação linear adequadamente feita dos IFs corretamente recebidos durante a BP, como mostra a Figura 1b.

O funcionamento pormenorizado das duas fases, BP e CP, depende do tipo de sistema utilizado e está melhor descrito na Seção 2.2.

Em Heidarpour et al. (2015, 2017), um *relay* só transmitia durante a CP caso tivesse corretamente recebido todos os IFs dos outros usuários. Caso algum IF não fosse corretamente recebido por um determinado *relay* durante a BP, este não participava da CP. Tal estratégia difere da adotada nesse trabalho, na qual o *relay* participa da CP independentemente de ter ou não recebido corretamente todos os IFs dos outros usuários durante a BP. A primeira estratégia convencionou-se chamar de **restrita**, enquanto a segunda convencionou-se chamar de **irrestrita**. Salienta-se que a estratégia irrestrita não propaga erros, uma vez que só os IFs corretamente decodificados compõe os PFs transmitidos durante a CP, o que pode ser facilmente verificado através de algum tipo de checagem como CRC (do inglês *Cyclic redundancy check*). Além disso, o nó deve informar ao destino como o PF foi formado (um único *bit* por IF, indicando se determinado IF compõe ou não um determinado PF), o que diminui a quantidade de informação útil transmitida, mas se torna desprezível a medida que o tamanho dos pacotes aumenta (XIAO et al., 2012; XIAO; SKOGLUND, 2010; REBELATTO et al., 2012).

O modelo OFDMA empregado nesse trabalho é o mesmo apresentado por Bai et al. (2011). Em Bai et al. (2011), considera-se um sistema OFDMA com N subportadoras distribuídas em L bandas de coerência e M usuários independentes que se comunicam com um nó-destino (D), como na Figura 2, porém não há cooperação entre nós. Assume-se que o canal entre nós é seletivo em frequência e apresenta desvanecimento lento no tempo do tipo Rayleigh, com $N \geq M$ e $N \gg L$. As subportadoras dentro de uma mesma banda de coerência apresentam o mesmo ganho de canal, devido a alta correlação entre elas. Já subportadoras em bandas de coerência distintas não apresentam essa correlação, uma vez que os ganhos são i.i.d. A alocação das subportadoras para cada nó é feita pelo nó destino D, de acordo com o algoritmo MCMA (do inglês, *Maximum Constraint* $\mathcal{K}_{1,K}$*-Matching Allocation*) proposto por Bai et al. (2011) e será melhor detalhado na Seção 2.3.

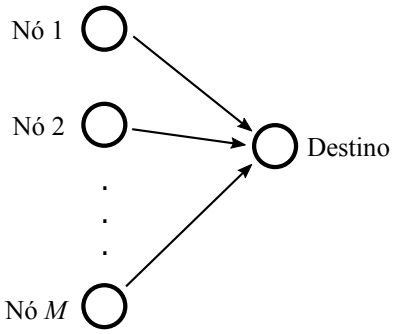


Figura 2 – Sistema não-cooperativo OFDMA com M usuários se comunicando com um nó-destino D

O sinal em frequência recebido $Y[n]$[1] por um nó qualquer (inclusive o nó destino) na n-ésima subportadora é dado por:

$$Y[n] = \sqrt{p_{ts}} H[n] X[n] + W[n], \tag{1}$$

e assume-se que a potência total de transmissão do sistema é dada por p_t, de modo que cada nó transmissor divide igualmente a potência do sinal em todas as subportadoras que lhe foram alocadas[2], de forma que a potência em cada subportadora, p_{ts}, é dada por $p_{ts} = p_t/N$ abstraindo-se o modelo de propagação em larga escala do sistema. $X[n]$ é o sinal transmitido na n-ésima subportadora, $H[n]$ é a realização de ganho de canal na n-ésima subportadora. $W[n]$ é o ruído aditivo Gaussiano branco na n-ésima subportadora (AWGN) com variância de $N_0/2$ por dimensão, em que N_0 representa a densidade espectral de potência do ruído.

Para uma largura de banda de subportadora B_s, de modo que $B_s = B/N$ Hz, em que B é a largura de banda do sistema, têm-se que a SNR média por subportadora, ρ, é dada por:

$$\rho = \frac{p_{ts}}{N_0 B_s} = \frac{p_t}{N_0 B}. \tag{2}$$

Uma subportadora está em *outage* se não consegue suportar uma determinada taxa de transmissão, ou seja, a capacidade do canal é inferior à taxa de transmissão (GOLDSMITH, 2005; TSE; VISWANATH, 2005). No sistema OFDMA, em que as subportadoras são multiplexadas entre os usuários, cada usuário divide o seu pacote nas K subportadoras fornecidas pelo algoritmo de alocação, de forma que a taxa de transmissão em cada subportadora é igual a R_0/K, em que R_0 é a taxa de transmissão do usuário. Assim, a probabilidade de *outage* de uma subportadora s_n é dada por:

$$P_s(K) = \Pr\left\{\frac{1}{N_L} C_L(n) < \frac{R_0}{K}\right\}, \tag{3}$$

na qual $C_L(n)/N_L$ é a capacidade de cada subportadora e $C_L(n)$ é a capacidade normalizada pela banda do bloco de coerência que contém a subportadora n (GOLDSMITH, 2005; TSE; VISWANATH, 2005) e é dada por:

$$C_L(n) = \log_2(1 + \rho |H[n]|^2). \tag{4}$$

[1]Por uma questão de clareza optou-se por omitir os sub-índices indicando receptor e/ou transmissor de cada termo.

[2]Essa forma de alocação se baseia em um único bit de *feedback* por subportadora representando o seu estado de *outage* não sendo necessário conhecimento total sobre o canal e apresenta perda de desempenho insignificante quando comparada com esquemas de alocação mais complexos como a busca exaustiva com *waterfilling* (BAI et al., 2011)

Uma vez que que $|H[n]|^2$ segue uma distribuição exponencial devido ao desvanecimento do tipo Rayleigh, a Equação (3) pode ser escrita como:

$$P_s(K) = 1 - \exp\left(-\frac{2^{R_0 N_L/K} - 1}{\rho}\right) \tag{5a}$$

$$\approx \frac{2^{R_0 N_L/K} - 1}{\rho}, \tag{5b}$$

sendo que aproximação dada pela Equação (5b) é válida para alta SNR.

2.1.1 *Diversity Multiplexing Tradeoff* (DMT)

A DMT (Compromisso diversidade-multiplexação, do inglês *Diversity Multiplexing Tradeoff*) é uma importante característica de um sistema de comunicação, pois expressa uma relação entre o ganho de diversidade (d) e o de multiplexação (r) (TSE; VISWANATH, 2005), sendo definida como:

$$r = \lim_{\rho \to \infty} \frac{R_{sch}}{\log \rho} \tag{6}$$

$$d(r) = -\lim_{\rho \to \infty} \frac{\log P_{sch}}{\log \rho}, \tag{7}$$

em que R_{sch} é a taxa efetiva de transmissão do esquema analisado, P_{sch} é a probabilidade de *outage* do esquema e ρ é a SNR.

Para um sistema hipotético que apresente probabilidade de *outage* dada pela Equação (5), tem-se que $R_{sch} = R_0 N_L/K$ e a Equação (7) para esse esquema seria:

$$d(r) = -\lim_{\rho \to \infty} \frac{\frac{2^{r \log \rho} - 1}{\rho}}{\log \rho} \tag{8a}$$

$$= 1 - r. \tag{8b}$$

2.2 COOPERAÇÃO COM CODIFICAÇÃO DE REDE (NCC)

Inicialmente proposta por Ahlswede et al. (2000), a codificação de rede procurava aumentar a vazão de dados em redes que se comunicavam por fio. Trabalhos recentes aplicaram esse conceito em redes sem fio cooperativas (XIAO et al., 2007; XIAO; SKOGLUND, 2010; XIAO et al., 2012; REBELATTO et al., 2012). Ao usar de codificação de rede, os nós de uma rede cooperativa retransmitem combinações lineares das informações disponíveis, de modo que uma mesma informação chega em

“versões" independentes ao nó destino, possibilitando que a ordem de diversidade do sistema seja aumentada. Os coeficientes da combinação linear são obtidos de um campo finito de Galois, GF(q), em que q é a ordem do Campo de Galois utilizado. Ainda, como mostrado por Rebelatto et al. (2012), esse coeficientes devem ser escolhidos a partir de uma matriz geradora com máxima distância mínima de Hamming, códigos de máxima distância separável (MDS, do inglês *Maximum Distance Separable*). Um exemplo de código que atende a essas especificações é o código Reed-Solomon (REBELATTO et al., 2012).

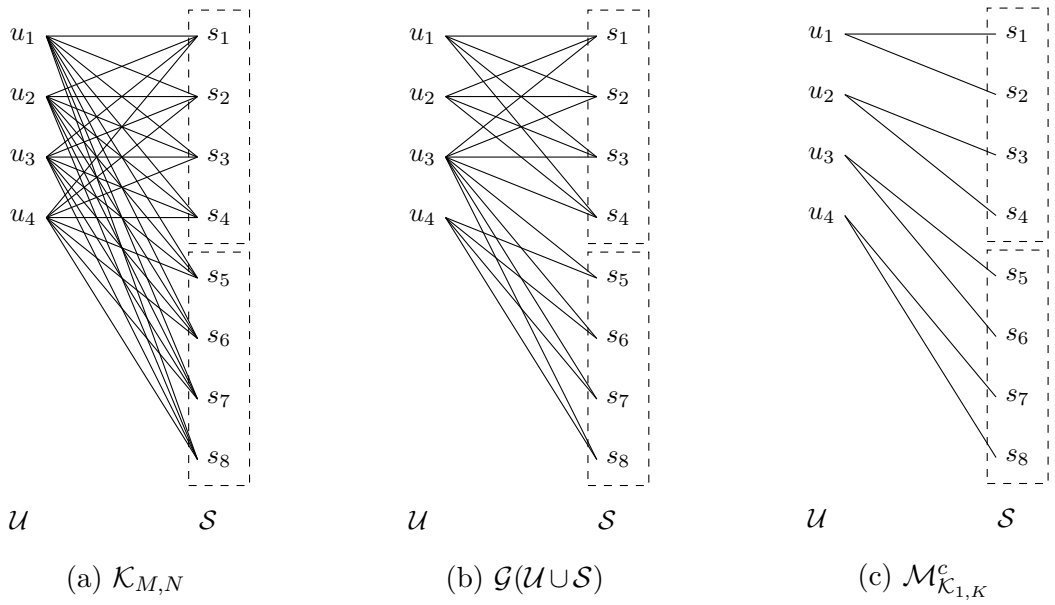
2.3 ALGORITMO *MAXIMUM CONSTRAINT* $\mathcal{K}_{1,K}$*-MATCHING ALLOCATION* (MCMA)

Em Bai et al. (2011), os autores mostram que o algoritmo MCMA consegue alocar otimamente subportadoras em um sistema OFDMA para os diversos usuários, de modo que atinge uma probabilidade de *outage* de mesma ordem (inclinação) que um sistema OFDM ponto-a-ponto, necessitando apenas de um único bit de *feedback* para cada subportadora para sinalizar o estado de *outage* do canal.

Antes de cada transmissão, as subportadoras são alocadas pelo nó destino aos nós transmissores de forma a obter o maior número possível de usuários que não estejam em *outage*. O modelo de grafo proposto por Bai et al. (2011) define $\mathcal{K}_{M,N}$ como sendo um grafo bipartido completo $M \times N$ representando, respectivamente, os M usuários presentes em $\mathcal{U}$ e as N subportadoras presentes em $\mathcal{S}$, como ilustrado na Figura 3a. Um subgrafo que conecta um único usuário a K subportadoras é definido como $\mathcal{K}_{1,K}$. Ainda, seja $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ um grafo bipartido que conecta o vértice $u_m \in \mathcal{U}$ ao vértice $s_n \in \mathcal{S}$ através da aresta e_{mn} se a subportadora s_n não está em *outage* para o usuário u_m. Isso é ilustrado na Figura 3b, na qual as subportadoras $s_5, ..., s_8$ estão em *outage* para u_1 e u_2 e as subportadoras $s_1, ..., s_4$ estão em *outage* para u_4. O conjunto de todas as arestas e_{mn} é definido como ϵ.

Baseando-se no grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$, o nó destino aloca K subportadoras para os usuários objetivando maximizar o número de usuários que não estão em *outage*. Dessa foram, sendo $\mathcal{K}_{1,K}$ um grafo fixo, então o acoplamento $\mathcal{K}_{1,K}$ máximo (no inglês, *maximum* $\mathcal{K}_{1,K}$*-matching*) do grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$, denominado de $\mathcal{M}^c_{\mathcal{K}_{1,K}}$, é o maior conjunto de cópias disjuntas de $\mathcal{K}_{1,K}$ em $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$.

Se um vértice (usuário) em $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ também é um vértice nas cópias de



(a) $\mathcal{K}_{M,N}$ (b) $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S})$ (c) $\mathcal{M}^c_{\mathcal{K}_{1,K}}$

Figura 3 – Exemplo de alocação utilizando o algoritmo MCMA. Na Figura 3a tem-se um grafo bipartido completo $M \times N$, na Figura 3b tem-se um exemplo de grafo modelando um cenário de *outage*, e na Figura 3c tem-se a alocação resultante da aplicação do algoritmo MCMA.

$\mathcal{K}_{1,K}$, então esse vértice está saturado, o que significa que ele foi contemplado com K subportadoras. A Figura 3c representa o acoplamento $\mathcal{K}_{1,K}$ máximo do grafo presente na Figura 3b, saturando todos os usuários em $\mathcal{U}$, isto é, todos os usuários em $\mathcal{U}$ receberam K subportadoras.

Conforme mostrado por Bai et al. (2011), se o destino D conseguir alocar as subportadoras de acordo com o algoritmo MCMA, a probabilidade de *outage* de um dado usuário é dada por:

$$P_D = P_s^L(K) + \mathcal{O}(P_s^L(K)). \tag{9}$$

, na qual $P_s(K)$ é a probabilidade de *outage* da subportadora dado que o usuário recebeu K subportadoras, sendo obtida com a Equação (5), e $\mathcal{O}(x)$ contém os termos de maior ordem de x.

Bai et al. (2011) afirmam que encontrar um acoplamento $\mathcal{K}_{1,K}$ máximo, $\mathcal{M}^c_{\mathcal{K}_{1,K}}$, é computacionalmente muito complexo, e propõem um algoritmo denominado de R2EHK (do inglês *Random Rotation and Expansion Hopcroft-Karp*) que permite alocar as subportadoras para os usuários obtendo a diversidade proposta pela MCMA. Esse algoritmo, R2EHK, foi utilizado ao longo desse trabalho durante as simulações computacionais.

A alocação executada pelo algoritmo R2EHK (BAI et al., 2011) se baseia no

grafo de *outage* das subportadoras, $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$, exemplificado na Figura 3b. Esse algoritmo tem duas fases bem distintas: uma primeira, na qual é feita uma rotação e expansão dos vértices em $\mathcal{U}$; uma segunda, na qual executa-se o algoritmo Hopcroft-Karp (HK) (HOPCROFT; KARP, 1973) para a busca de um acoplamento máximo nesse grafo expandido.

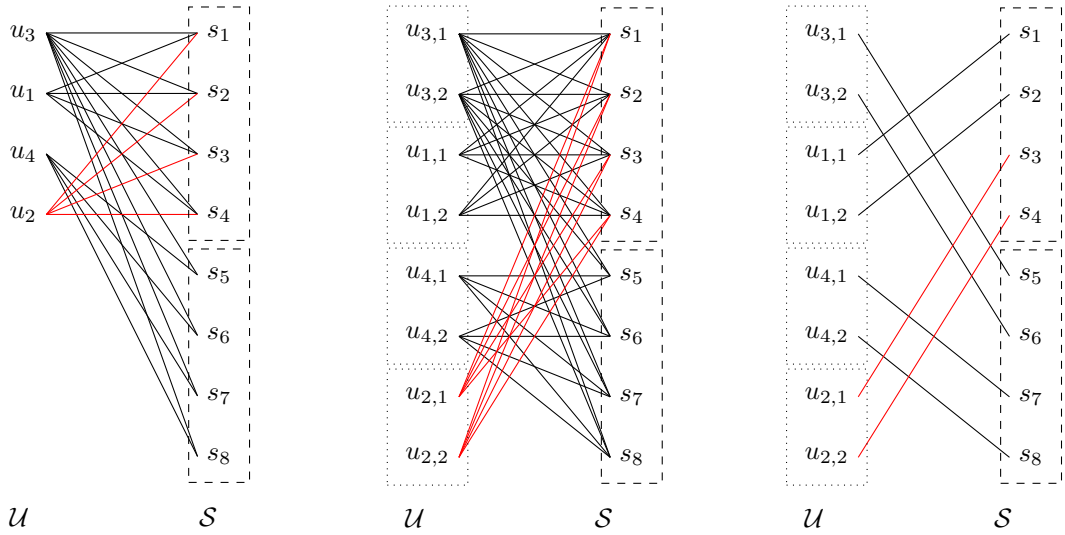
Partindo-se de $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ (Figura 3b), o primeiro passo consistem em se rotacionar com igual probabilidade todos os vértices de $\mathcal{U}$, mantendo todos os vértices existentes. Um possível resultado dessa rotação é mostrado na Figura 4a, em que se destacou as arestas relacionadas ao usuário u_2 de modo a tornar mais visível o funcionamento do R2EHK. Segundo Bai et al. (2011), a rotação se faz necessária para garantir equilíbrio na distribuição das subportadoras de modo que as subportadoras podem ser igualmente distribuídas a todos os usuários.

Para o exemplo dado na Figura 4, teríamos um grafo rotacionado e expandido dado pela Figura **??** após a primeira etapa. A expansão de um vértice em $\mathcal{U}$ consiste em se replicar K vezes esse vértice, assim como as arestas que existiam originalmente. Na Figura 4b, o vértice u_1 foi replicado duas vezes, em $u_{1,1}$ e $u_{1,2}$, pois $K = \lfloor N/M \rfloor = 2$. O mesmo acontece para os demais vértices. As mesmas conexões que existiam anteriormente, foram também replicadas, de forma que todos os vértices replicados em $\mathcal{U}$ continuam adjacentes aos vértices de $\mathcal{S}$ antes da replicação.

A partir da versão rotacionada e expandida do grafo, efetua-se sobre este o algoritmo HK (HOPCROFT; KARP, 1973), que busca pelo acoplamento máximo nessa nova versão do grafo de *outage*. Um possível acoplamento obtido é ilustrado na Figura 4c, e sobre este se desfaz a expansão feita anteriormente, obtendo-se por fim o grafo da Figura 3c.

2.4 NCC-OFDMA

Heidarpour et al. (2015, 2017) apresentam um esquema de comunicação cooperativa com codificação de rede que se utiliza dos resultados de Bai et al. (2009, 2010, 2011). O cenário dispõe de M nós-fonte e R nós-*relay* e o canal entre qualquer par de nós é i.i.d, seletivo em frequência, com desvanecimento Rayleigh, exposto em Heidarpour et al. (2015), e Rice, como exposto por Heidarpour et al. (2017). Diferentemente do exposto na Seção 2.1, em que os nós atuam como fonte de pacotes e na sua retransmissão, no NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2015, 2017) os nós atuam



(a) Rotação (b) Expansão (c) Alocação dada por HK

Figura 4 – Exemplo de alocação utilizando o algoritmo MCMA. Na Figura 3a tem-se um grafo bipartido completo $M \times N$, na Figura 3b tem-se um exemplo de grafo modelando um cenário de *outage*, e na Figura 3c tem-se a alocação resultante da aplicação do algoritmo MCMA.

exclusivamente ou como fonte ou como *relay*, e a transmissão ocorre como se segue:

- Durante a BP, cada um dos M nós-fonte transmite um único IF. Os M IFs transmitidos são multiplexados na frequência (OFDMA), de modo que cada nó-fonte divide o seu IF e o transmite em $K_{BP} = \lfloor N/M \rfloor$ subportadoras. A alocação de subportadoras para os usuários é feita pelo nó destino e se dá através do algoritmo MCMA.

- Para a CP, o modelo proposto por Heidarpour et al. (2015, 2017) adota a estratégia restrita, de modo que somente os *relays* que decodificaram corretamente os M IFs da BP participarão da CP. O PF enviado por um *relay* está distribuído em $K_{CP} = \lfloor N/R \rfloor$ subportadoras. A alocação de subportadoras para os *relays* também se dá através do algoritmo MCMA, sendo também feita pelo destino. O PF enviado por um determinado *relay* é formado como combinação linear de todos os M IFs.

Salienta-se que o parâmetro $K \in \{K_{BP}, K_{CP}\}$ representa em quantas partes um pacote será dividido, sendo que cada parte será transmitida por uma subportadora a uma taxa R_0/K, de modo que a taxa de transmissão de cada usuário é R_0, de forma que K não representa redundância de informação na frequência, e influencia somente na taxa de transmissão por subportadora.

A Figura 5a ilustra quais as transmissões são realizadas durante a BP. Nessa

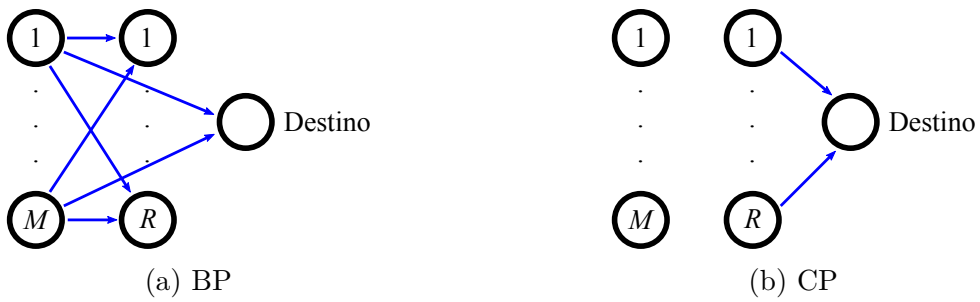


Figura 5 – Modelo de sistema para NCC-OFDMA

primeira etapa, os M nós-fonte difundem os seus IFs para os *relays* e destino. Apenas um pacote é enviado por cada usuário. Na Figura 5b estão destacadas as transmissões que ocorrem durante a CP. Nessa segunda etapa, os nós-*relay* que decodificaram corretamente os M IFs enviam os PFs montados com base nos pacotes recebidos durante a BP.

Heidarpour et al. (2015, 2017) assumem que a alocação pelo MCMA garante que qualquer nó, não somente o nó destino mas também todos os *relays*, enxergue uma alocação ótima de subportadoras dos nós-fonte. Em outras palavras, qualquer enlace entre quaisquer dois nós tem probabilidade P_D de estar em *outage*. A probabilidade de *outage* do sistema pode ser calculada da forma apresentada a seguir.

Seja $\mathcal{R}$ o conjunto de *relays* que decodificaram corretamente todos os IFs transmitidos durante a BP, com $|\mathcal{R}| \leq R$. A probabilidade de ocorrência de $\mathcal{R}$ é dada por:

$$\Pr\{\mathcal{R}\} = \left(\bar{P}_D^M\right)^{|\mathcal{R}|} \left(1 - \bar{P}_D^M\right)^{R-|\mathcal{R}|}, \tag{10}$$

em que $\bar{x}$ é a notação para o complemento de x, de forma que $\bar{x} = 1 - x$.

Para um dado $\mathcal{R}$, o destino recebe um total de $M + |\mathcal{R}|$ pacotes, sendo M IFs da BP e $|\mathcal{R}|$ PFs da CP, e o *outage* de um dado IF acontece se a transmissão direta e pelo menos $|\mathcal{R}|$ pacotes dos $M + |\mathcal{R}| - 1$ pacotes restantes também sofrem *outage* no destino. Tal situação acontece com probabilidade dada por:

$$P(\mathcal{R}) = P_D \sum_{n=|\mathcal{R}|}^{M+|\mathcal{R}|-1} \binom{M + |\mathcal{R}| - 1}{n} \frac{(P_D)^n}{(1 - P_D)^{1+n-M}}, \tag{11}$$

em que $\binom{a}{b}$ é o binomial de a e b.

Por fim, a probabilidade de *outage* do NCC-OFDMA apresentado por Heidarpour

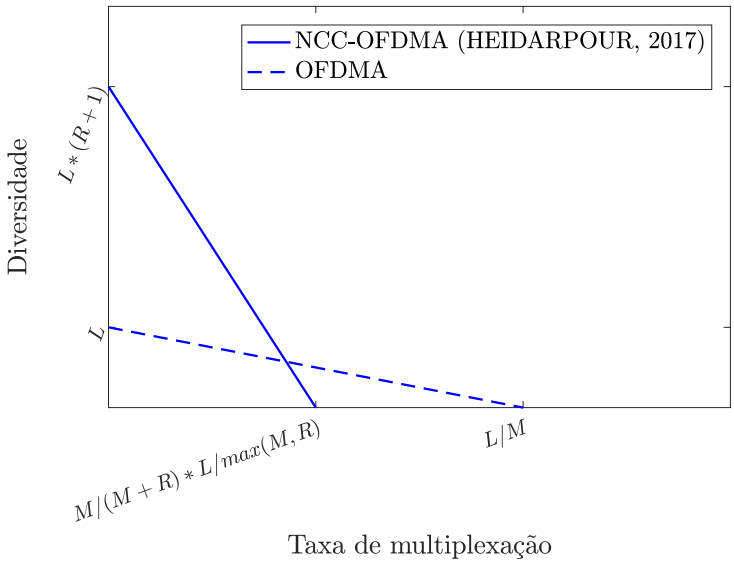


Figura 6 – Comparativo de DMT para o NCC-OFDMA de Heidarpour et al. (2015, 2017) e o OFDMA.

et al. (2015, 2017), $P_{NO(H)}(\rho)$[3], para um canal com desvanecimento Rayleigh é dada por:

$$P_{NO(H)}(\rho) = \sum_{|\mathcal{R}|=0}^{R} \binom{R}{|\mathcal{R}|} \Pr(\mathcal{R}) P(\mathcal{R}), \tag{12}$$

cuja aproximação para alta SNR e para o caso de $M = R$ é obtida fazendo-se $n = |\mathcal{R}|$ em (11), $|\mathcal{R}| = 0$ em (12) e utilizando-se de (5b) é dada por:

$$\lim_{\rho \to \infty} P_{NO(H)}(\rho) \approx \mu \rho^{-L(R+1)}, \text{ tal que } \mu = M^R \left(2^{R_0 N_L / K} - 1\right)^{L(R+1)}. \tag{13}$$

Ainda, a DMT do esquema, $d_{NO(H)}(r)$, é dada por:

$$d_{NO(H)}(r) = \begin{cases} L(R+1)\left(1 - \frac{M+R}{L} r\right) & \text{se } M > R,\ r \in \left(0, \frac{L}{M+R}\right) \\ L(R+1)\left(1 - \frac{R(M+R)}{ML} r\right) & \text{se } M < R,\ r \in \left(0, \frac{ML}{R(M+R)}\right) \\ L(R+1)\left(1 - \frac{2M}{L} r\right) & \text{se } M = R,\ r \in \left(0, \frac{L}{2M}\right) \end{cases}. \tag{14}$$

A Figura 6 compara a DMT desse sistema com a de um sistema OFDMA padrão. Percebe-se que o modelo proposto por Heidarpour et al. (2017) promove aumento da diversidade, porém há perda na taxa de multiplexação.

[3]Sempre que se julgar necessário, utilizar-se-á a notação $NO(H)$ nas equações quando estas se referem ao esquema NCC-OFDMA apresentado em Heidarpour et al. (2015, 2017).

2.5 COMENTÁRIOS

Nesse capítulo, apresentou-se o modelo de sistema de comunicação cooperativa, assim como um esquema que emprega esse modelo juntamente com a codificação de rede e que explora a diversidade no espaço e na frequência: o NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2015, 2017). Apresentou-se também um esquema de alocação de subportadoras em um sistema multi-usuário não cooperativo com OFDMA, o MCMA (BAI et al., 2011).

O algoritmo MCMA (BAI et al., 2011) é uma forma de alocação de subportadoras em sistemas OFDMA não cooperativos no qual múltiplos usuários se comunicam com um único destino. O algoritmo de alocação se mostra vantajoso no sentido de que consegue prover diversidade ao sistema somente através da alocação mais adequada de subportadoras aos nós, com um pequeno custo de um único *bit* de *feedback* (CSI) para cada subportadora.

No NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2017), os autores se utilizam dos resultados de Bai et al. (2011), aplicando a alocação de subportadoras em sistemas cooperativos com codificação de rede conforme exposto. O esquema proposto apresenta maior diversidade que um sistema OFDMA padrão, porém há perda na taxa de multiplexação devido a cooperação. Ainda que esse sistema se mostre melhor em comparação com o OFDMA padrão em relação a diversidade, Heidarpour et al. (2017) assumiram que a alocação de subportadoras feitas pelo destino utilizando o MCMA garante que a diversidade L atingida pela alocação, conforme colocado por Bai et al. (2011), seja vista por todos os nós do sistema. Tal premissa é otimista demais, pois para que esse aumento da diversidade L seja visto por todos os nós é necessário que haja alta correlação entre os canais dos usuários, o que não é fato na maioria dos cenários.

Posto isso, faz-se necessário readequar o esquema NCC-OFDMA para uma forma mais realista, que não considere que a alocação de subportadoras garante o incremento de diversidade para todos os canais, mas somente com os canais dos quais o nó destino faz parte. Essa versão corrigida do NCC-OFDMA é assunto do próximo capítulo.

3 NCC-OFDMA CORRIGIDO

Apresenta-se aqui a versão corrigida do NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2015, 2017). O modelo de sistema adotado é similar ao apresentado na Seção 2.4, com uma modificação com relação a diversidade promovida pelo MCMA. A premissa otimista adotada por Heidarpour et al. (2017) de que todos os canais experimentam um incremento de diversidade L como resultado da alocação das subportadoras é substituída por uma premissa mais realista, a de que somente os canais vistos pelo nó destino experimentam esse aumento da diversidade. Tal consideração se sustenta com o fato de que os resultados obtidos por Bai et al. (2011) consideram um cenário não-cooperativo com múltiplos usuários e um único destino. Nesse cenário, cada usuário transmite de forma independente o seu IF para o destino utilizando as subportadoras que lhe foram alocadas. Como exposto por Bai et al. (2011), a alocação das subportadoras é feita unicamente pelo nó destino, com base em um único *bit* de *feedback* indicando o estado de *outage* do canal. Do ponto de vista de um receptor que não o destino, a alocação de subportadoras parece aleatória, dado que os canais são i.i.d. no tempo e espaço, fazendo com que outro receptor que não o destino não experimente o incremento de diversidade L causado pela alocação.

A Figura 7 ilustra melhor essa justificativa. Perceba que na figura, o nó destino só tem conhecimento dos canais que estão representados pelas linhas cheias, sendo sobre esses canais que o MCMA é executado. Os demais canais que ocorrem entre os nós (linhas tracejadas) além de não serem de conhecimento do MCMA, são i.i.d. no tempo e espaço, de forma que os benefícios do MCMA se restringem a somente os canais em linha cheia.

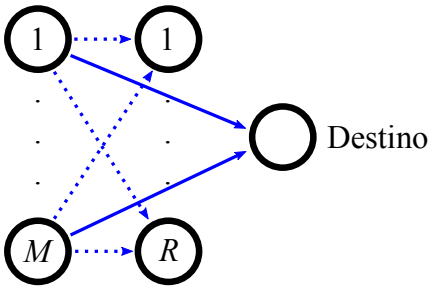
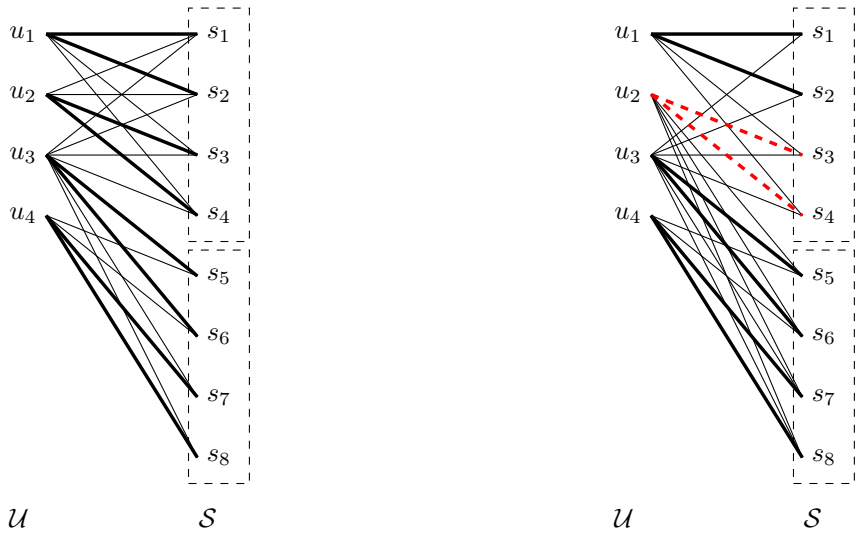


Figura 7 – Canais que experimentam da diversidade L causada pelo algoritmo de alocação de subportadoras MCMA (BAI et al., 2011) em linha cheia. Canais que não experimentam dessa diversidade estão em linha tracejada.



(a) $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ visto pelo destino

(b) $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ visto pelo *relay*

Figura 8 – Grafos de *outage* dos IFs dos usuários visto pelo nó destino e por um *relay*

3.1 PROBABILIDADE DE OUTAGE ATINGIDA PELOS RELAYS

Conforme colocado por Bai et al. (2011), um usuário está em *outage* para o nó que alocou as suportadoras se, após a geração do grafo $\mathcal{M}^c_{\mathcal{K}_{1,K}}$, esse usuário corresponde a um vértice isolado. Tal evento ocorre quando todas as arestas em todas as L bandas de coerência não existem, o que ocasiona a diversidade L vista pelo destino, como mostrado por Bai et al. (2011).

Porém, é fácil de perceber que essa diversidade L não é vista por um outro receptor. A Figura 8b traz um exemplo que ajuda a compreender essa afirmação. Na Figura 8a têm-se o grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ visto pelo nó destino no qual as arestas destacadas (mais grossas) indicam quais subportadoras foram alocadas para cada usuário. Já na Figura 8b têm-se o grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ visto por um outro receptor. É possível perceber que na Figura 8b a *outage* de uma única banda de coerência causou a *outage* do usuário u_2, o que ocorre com probabilidade $P_s(K)$. Perceba que as arestas tracejadas serão aquelas em que u_2 transmitirá o seu IF, porém elas não existem no grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \epsilon)$ visto por um outro receptor que não o destino.

Assim, considerando-se o cenário proposto por Heidarpour et al. (2017, 2015), do ponto de vista de um *relay*, a alocação de subportadoras parece aleatória, dado que os canais são i.i.d. no tempo e espaço.

Dessa forma, a probabilidade de outage de um único pacote entre fonte e *relay* não

é $P_s^L(K)$, como colocado em Heidarpour et al. (2017, 2015). A probabilidade de *outage* de um pacote entre um nó fonte u_m e um *relay* qualquer, definida como P_r, está condicionada a condição de *outage* entre u_m e o destino D. Sempre que um usuário u_m tiver K subportadoras alocadas pelo destino D para si, o que ocorre com probabilidade $1-P_D$, a *outage* de pelo menos uma das K bandas de coerência causa a *outage* do nó u_m do ponto de vista do *relay*, o que ocorre com probabilidade $P_s(K)$. Ainda, sempre que u_m estiver em *outage* para o destino D, ele também estará em *outage* do ponto de vista do *relay*, pois K subportadoras não foram alocadas para u_m de modo que esse possa transmitir o seu pacote. Posto isso, P_r pode ser definido como:

$$P_r = P_s(1-P_D)+P_D \tag{15a}$$

$$P_r \approx P_s, \tag{15b}$$

em que a aproximação dada pela Equação (15b) é válida para a alta SNR e assumindo-se que $L > 1$.

Uma restrição aqui será imposta de forma a se garantir que as Equações (9) e (15) sejam válidas. Tal restrição surge de observações feitas durante as simulações numéricas desse trabalho, que constataram que as Equações (9) e (15) só se mostram válidas se $N_L = aK, a \in [1,2,3,...]$, ou seja, só se N_L for múltiplo inteiro de K. Do ponto de vista do modelo do sistema, isso pode ser entendido como uma banda de coerência devendo ser capaz de conter um número inteiro de usuários. Tal restrição não foi levantada pelos autores do artigo que apresenta o MCMA (BAI et al., 2011), e os resultados apresentados no referido trabalho também não exploram tal situação, sendo difícil assegurar que quando $N_L \neq aK, a \in [1,2,3,...]$ os resultados de Bai et al. (2011) são válidos. Assim, de forma a garantir a validade das Equações (9) e (15), impõe-se a restrição de N_L ser múltiplo inteiro de K. A correção do MCMA para os casos em que $N_L \neq aK, a \in [1,2,3,...]$ está fora do escopo desse trabalho.

3.2 PROBABILIDADE DE OUTAGE DO NCC-OFDMA

Partindo-se da nova probabilidade de *outage* atingida pelos *relays*, calcula-se a nova probabilidade de *outage* do sistema. O processo se dá da mesma forma como apresentado na Seção 2.4.

A probabilidade de ocorrência de $|\mathcal{R}|$ é dada por:

$$\Pr\{\mathcal{R}\} = \left(\bar{P}_r^M\right)^{|\mathcal{R}|}\left(1-\bar{P}_r^M\right)^{R-|\mathcal{R}|}. \tag{16}$$

Note-se aqui que, diferentemente do cálculo apresentado na Seção 2.4, utiliza-se P_r na Equação (16) ao invés de P_D que foi utilizado na Equação (10). Isso é devido à nova probabilidade de *outage* vista pelo *relay*.

Para um dado $\mathcal{R}$, o destino recebe um total de $M+|\mathcal{R}|$ pacotes, sendo M IFs da BP e $|\mathcal{R}|$ PFs da CP, e o *outage* de um dado IF acontece se a transmissão direta e pelo menos $|\mathcal{R}|$ pacotes dos $M+|\mathcal{R}|-1$ pacotes restantes também sofrem *outage* no destino. Tal situação acontece com probabilidade dada por:

$$P(\mathcal{R}) = P_D \sum_{n=|\mathcal{R}|}^{M+|\mathcal{R}|-1} \binom{M+|\mathcal{R}|-1}{n} \frac{(P_D)^n}{(1-P_D)^{1+n-M-|\mathcal{R}|}}. \tag{17}$$

Salienta-se que a Equação (17) é idêntica à Equação (11), ou seja, não trocou-se P_D por P_r como no passo anterior. Isso se justifica pelo fato de que a Equação (17) captura a probabilidade de *outage* dos pacotes direcionados ao nó destino e, por isso, experimentam do aumento de diversidade de ordem L que a alocação por MCMA causa.

Por fim, a probabilidade de *outage* do NCC-OFDMA corrigido, $P_{NO}(\rho)$[1], para um canal com desvanecimento Rayleigh é dada por:

$$P_{NO}(\rho) = \sum_{|\mathcal{R}|=0}^{R} \binom{R}{|\mathcal{R}|} \Pr(\mathcal{R}) P(\mathcal{R}), \tag{18}$$

cuja aproximação para alta SNR, $L>1$ e para o caso de $M=R$ é obtida fazendo-se $n=|\mathcal{R}|$ em (17), $|\mathcal{R}|=0$ em (18) e utilizando-se de (5b) é dada por:

$$\lim_{\rho\to\infty} P_{NO}(\rho) \approx \mu\rho^{-(L+R)}, \text{ tal que } \mu = M^R \left(2^{R_0 N_L/K}-1\right)^{L+R}. \tag{19}$$

3.3 DMT

A taxa de transmissão efetiva do sistema, R_{NO}, considerando a redundância introduzida pela cooperação assim como a multiplexação feita na frequência com o uso do OFDMA é dada por:

$$R_{NO} = R_F R_T R_0 \tag{20a}$$

$$R_{NO} = \frac{MK}{2N} R_0, \tag{20b}$$

[1]Sempre que se julgar necessário, utilizar-se-á a notação NO nas equações quando estas se referem ao esquema NCC-OFDMA corrigido.

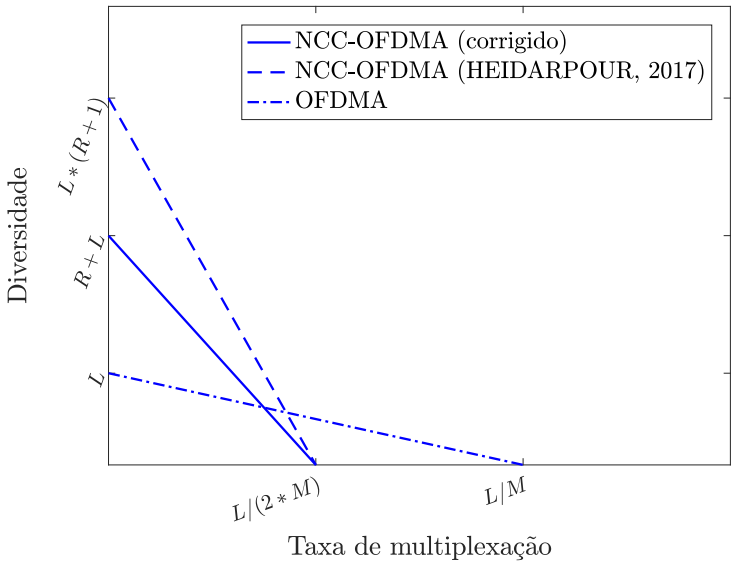


Figura 9 – Comparativo da DMT do NCC-OFDMA corrigido, com a versão de Heidarpour et al. (2015) e com o OFDMA sem cooperação.

na qual R_F é o ganho na taxa de informação devido a multiplexação na frequência (emprego do OFDMA) e R_T é o ganho de multiplexação no tempo (emprego da cooperação). Para o NCC-OFDMA corrigido, tem-se $R_F = MK/N$ e $R_T = 1/2$. A quantidade de *feedback* necessária para a alocação das subportadoras é muito menor que o tamanho do pacote e, portanto, sua influência na taxa de transmissão é desprezível.

Utilizando-se da probabilidade de *outage* para alta SNR (19) e da taxa efetiva de transmissão (20), assim como fazendo as devidas substituições, a DMT para o NCC-OFDMA corrigido, para $M = R$, pode ser calculada da seguinte forma:

$$d_{NO}(r) = -\lim_{\rho\to\infty} \frac{\log P_{NO}(\rho)}{\log \rho} \tag{21a}$$

$$= -\lim_{\rho\to\infty} \frac{\log\left[\mu\rho^{-(R+L)}\right]}{\log \rho} \tag{21b}$$

$$= (R+L)\left(1 - \frac{2M}{L}r\right). \tag{21c}$$

É possível perceber que a diversidade atingida pelo NCC-OFDMA corrigido é $(R+L)$, ao invés de $L(R+1)$, como proposto por Heidarpour et al. (2015, 2017). A Figura 9 traz o comparativo da DMT da versão original do NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2017), do OFDMA e da versão corrigida do NCC-OFDMA. Pela figura é possível perceber que a diversidade da versão corrigida do NCC-OFDMA é inferior ao NCC-OFDMA original, porém se mantém maior que o OFDMA sem cooperação. Ainda, a taxa de multiplexação não se modificou na correção.

3.4 RESULTADOS NUMÉRICOS

De forma a suportar a correção proposta para o NCC-OFDMA, em especial o fato de que somente os canais vistos pelo destino experimentam um aumento de diversidade de ordem L, apresentam-se simulações computacionais que corroboram os resultados analíticos expostos.

3.4.1 Probabilidade de outage atingida pelos relays

Um dos principais pontos no qual se sustenta essa versão corrigida do NCC-OFDMA é que a alocação de subportadoras promovida pelo nó destino não consegue promover um incremento de diversidade em todos os canais do sistema, isto é, a alocação não consegue aumentar a diversidade dos canais fonte-destino e canais fonte-*relay* ao mesmo tempo, pois do ponto de vista de um outro receptor que não o destino a alocação se dá de forma aleatória, o que não garante o aumento de diversidade promovido pelo algoritmo proposto por Bai et al. (2011).

De forma a corroborar essa proposição, utilizou-se o modelo de sistema da Figura 10. O modelo é semelhante ao apresentado na Figura 2, com a diferença de que nesse novo modelo um segundo receptor Z é adicionado. A alocação de subportadoras é feita exclusivamente pelo nó destino e os nós fonte transmitem os seus pacotes de informação a ele utilizando as subportadoras que lhes forma alocadas, como exposto na Seção 2.1. O receptor Z também recebe esses pacotes devido a natureza isotrópica de propagação da comunicação sem fio empregada. Destino e receptor Z experimentam canais i.i.d. para cada um dos usuários seguindo a mesma distribuição apresentada na Seção 2.1.

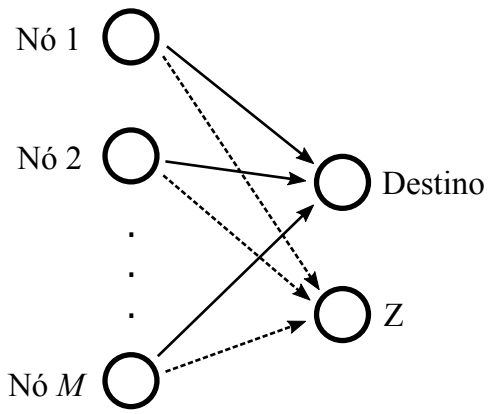


Figura 10 – Modelo de sistema para avaliar a diversidade vista por um segundo receptor

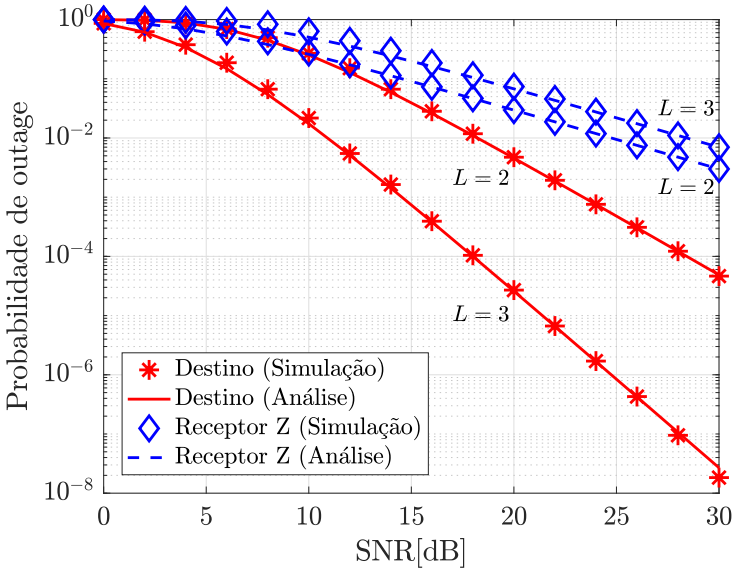


Figura 11 – Probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor para $M = 6$, $N = 12$, $L = [2,3]$ E $R_0 = 1$ bps/Hz.

Dois casos foram simulados, para $L = 2$ e $L = 3$, e são apresentados na Figura 11. Apresenta-se tanto os valores obtidos por meio de simulação numérica (marcadores) assim como o valor teórico (linhas), dado pelas Equações (9) e (15) (linhas contínua e tracejada, respectivamente). Percebe-se claramente que o receptor Z não experimenta a mesma diversidade que o nó destino, comprovando que para o receptor Z a alocação de subportadoras parece aleatória. Além disso, corrobora-se o modelo analítico levantado pelas Equações (9) e (15).

As Figuras 12 e 13 trazem dois resultados de simulações da probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor para casos em que que $N_L \neq aK, a \in [1,2,3,...]$. Na Figura 12 tem-se $M = 6$, $N = 12$ e $L = 4$, o que significa que $N_L = 3$ e $K = 2$. Já na Figura 13 tem-se $M = 3$, $N = 16$ e $L = 2$, de forma que $N_L = 8$ e $K = 5$. É perceptível em ambos os casos que o valor analítico previsto pelas Equações (9) e (15), não condiz com os valores obtidos por simulação, ao contrário do que ocorre na Figura 11. A diferença entre simulação e valor teórico é mais pronunciada na Figura 13. Dessa forma, justifica-se a restrição imposta ao sistema de que $N_L = aK, a \in [1,2,3,...]$.

3.4.2 Probabilidade de outage do NCC-OFDMA corrigido

Confirmada a diferença da probabilidade de *outage* vista por um receptor que não o destino, apresenta-se aqui os resultados das simulações numéricas do NCC-OFDMA corrigido. Na Figura 14, compara-se o desempenho do esquema corrigido com

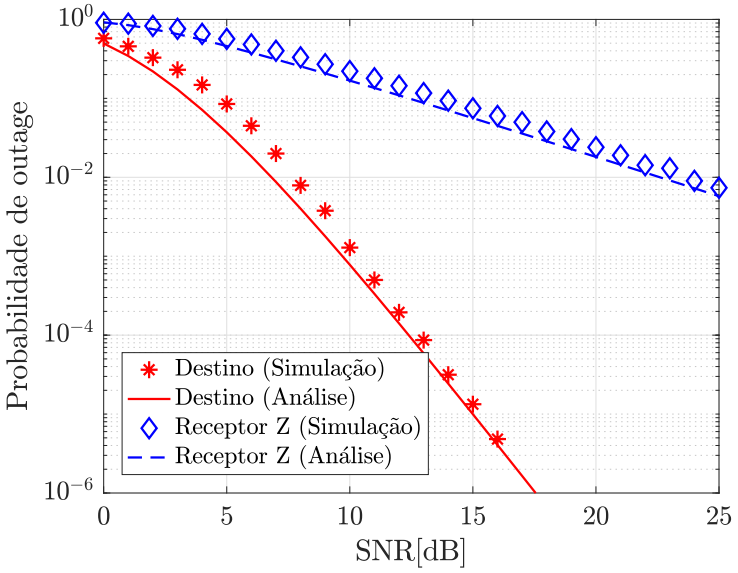


Figura 12 – Probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor para $M = 6$, $N = 12$ e $L = 4$, para $R_0 = 1$ bps/Hz.

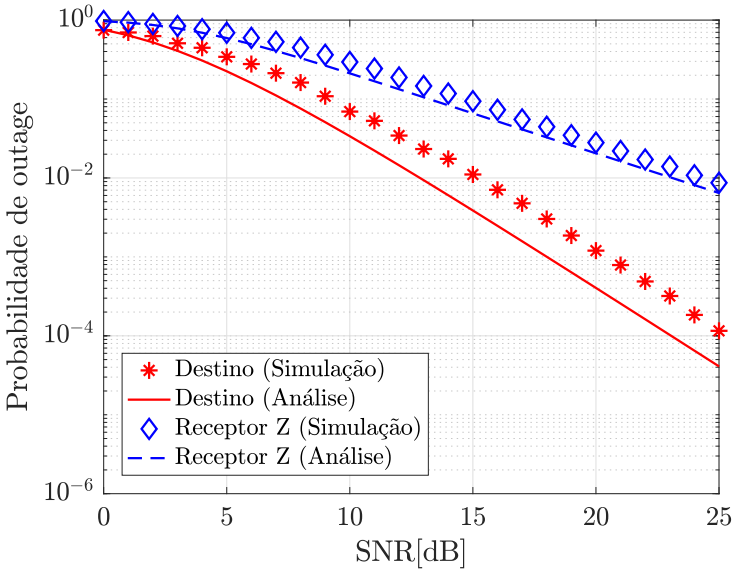


Figura 13 – Probabilidade de *outage* vista pelo destino e por um segundo receptor para $M = 3$, $N = 16$ e $L = 2$, para $R_0 = 1$ bps/Hz.

o apresentado em Heidarpour et al. (2015), trazendo o resultado numérico do esquema corrigido (indicado por "*sim*"), o valor exato obtido pela Equação (18) (indicado por "*ex*") e o valor aproximado para a alta-SNR (indicado por "*ap*"), assim como o valor assintótico do esquema proposto por Heidarpour et al. (2015). No gráfico temos duas situações de L evidenciadas: uma para $L = 2$ e outra para $L = 3$.

É visível a diferença da probabilidade de *outage* entre o NCC-OFDMA corrigido e o proposto por Heidarpour et al. (2015) e que se torna mais significativa a medida que L aumenta, devido a suposição muito otimista sobre a diversidade promovida pela alocação adotada por Heidarpour et al. (2015). Também, pode-se perceber que o valor analítico dado pela Equação (18) condiz com os resultados obtidos numericamente, e que esses resultados se aproximam do valor assintótico para alta SNR.

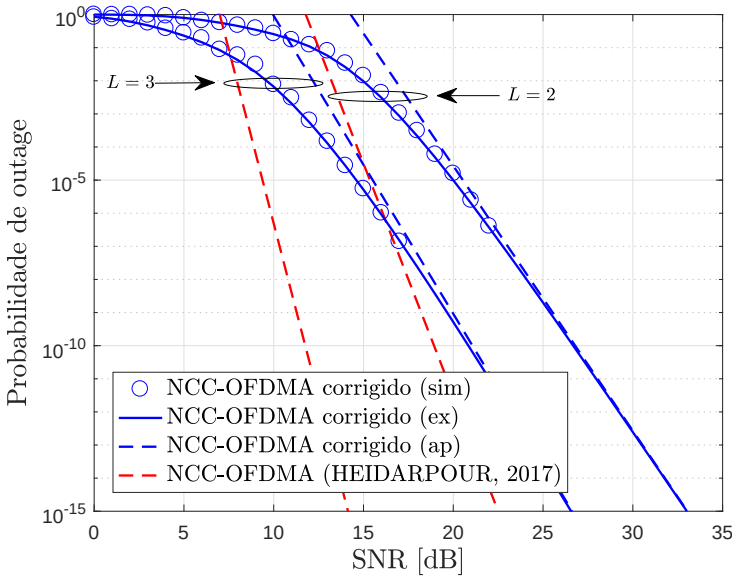


Figura 14 – Comparativo entre a Probabilidade de *outage* do NCC-OFDMA corrigido e de Heidarpour et al. (2015) para $M = R = 6$, $N = 12$, $R_0 = 1$ bps/Hz para cenários de $L = 2$ e $L = 3$. "*sim*" indica curva obtida numericamente, "*ex*" indica curva da equação exata, "*ap*" indica curva aproximada para alta SNR.

3.5 COMENTÁRIOS

Nesse capítulo, apresentou-se a versão corrigida do esquema NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2015, 2017) que propõe uma abordagem mais realista sobre os efeitos da alocação de subportadoras sobre os canais que não aqueles vistos pelo nó destino. A probabilidade de *outage* assim como a DMT para esse esquema corrigido foram apresentadas, assim como os resultados de simulações numéricas que suportam os resultados analíticos obtidos.

Com relação a probabilidade de *outage* atingida pelos *relays* ficou claro e evidente que a alocação de subportadoras proposta por Bai et al. (2011) não consegue promover um incremento de diversidade para outro receptor que não aquele que efetuou a alocação, considerando-se que não há correlação entre os diversos receptores.

Posteriormente, mostrou-se que a nova probabilidade de *outage* do NCC-OFDMA corrigido é maior que a originalmente proposta (HEIDARPOUR et al., 2017), resultado da nova *outage* atingida pelos *relays*.

Ainda, contrariamente ao apresentado por Heidarpour et al. (2017), o esquema NCC-OFDMA não consegue atingir a diversidade de $L(R+1)$ como afirmaram os autores, quando adota-se a visão mais realista sobre os canais. A alocação de subportadoras causa uma diversidade de $R+L$ sobre os pacotes transmitidos. Comparativamente ao OFDMA sem cooperação, o esquema corrigido tem um incremento na diversidade igual ao número de usuários M, para a condição em que $M = R$.

No capítulo a seguir, apresenta-se um novo esquema, o GDNC-OFDMA, que permite explorar a diversidade no tempo, espaço e frequência, assim como atingir taxas de multiplexação maiores que o NCC-OFDMA.

4 GDNC-OFDMA

O GDNC-OFDMA é o novo esquema proposto que procura explorar tanto a diversidade espacial e temporal, propiciada pelo GDNC (REBELATTO et al., 2012), quanto a diversidade em frequência possibilitada pela alocação de subportadoras, conforme exposto por Bai et al. (2011).

4.1 GDNC

O esquema de comunicação cooperativa GDNC foi proposto por Rebelatto et al. (2012). Ele é um esquema de cooperação com codificação de rede que é uma generalização do sistema DNC proposto em Xiao e Skoglund (2010). Ele consegue explorar a diversidade tanto no tempo como no espaço, porém não prevê a exploração da diversidade na frequência. Esse esquema combina a teoria de códigos corretores de erro e a combinação linear de pacotes. Rebelatto et al. (2012) fazem uma analogia entre a matriz de transferência da rede com a matriz geradora de códigos de bloco, mostrando que a diversidade de um sistema é equivalente a distância mínima de Hamming do código de bloco utilizado.

Comparativamente ao DNC, o GDNC consegue, simultaneamente, atingir taxa de transmissão e ordem de diversidade mais elevados. O protocolo de transmissão deste esquema está apresentado abaixo:

- A BP é composta por k_1 janelas de tempo sujeitas a realizações i.i.d. de canal. Cada um dos M ($M \geq 2$) nós transmite um único IF em cada janela, de modo que k_1 IFs terão sido transmitidos ao final da BP por cada usuário. Durante essa fase, os nós ainda tentam decodificar os IFs transmitidos pelos demais nós, como ilustrado na Figura 1a, na qual dois nós enviam cada um o seu próprio IF e tentam decodificar o IF transmitido pelo outro nó.

- A CP é composta por k_2 janelas de tempo também sujeitas a realizações i.i.d. de canal. Em cada janela de tempo, os M nós transmitem um único PF cada, como mostrado na Figura 1b, de modo que k_2 PFs serão transmitidos por cada nó ao final da CP. Os PFs enviados por um determinado nó são formados como combinações lineares de todos os IFs corretamente recebidos por esse nó durante a BP, incluindo o seu próprio IF.

A transmissão de pacotes no GDNC pode ser sumarizada pela Figura 15. Do lado esquerdo temos a BP dos IFs ($I_m(t), m \in [1, M], t \in [1, k_1]$) de cada um dos M usuários. Do lado direito tem-se a CP, em que cada usuário compõe os PFs ($V_m(t), m \in [1, M], t \in [1, k_2]$) de acordo com os IFs que conseguiu decodificar corretamente durante a primeira fase.

	Difusão (BP)			Cooperação (CP)		
Nó 1	$I_1(1)$	...	$I_1(k_1)$	$V_1(1)$	...	$V_1(k_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
Nó M	$I_M(1)$	...	$I_M(k_1)$	$V_M(1)$	...	$V_M(k_2)$
Janela de tempo	1		k_1	$k_1 + 1$		$k_1 + k_2$

Figura 15 – Pacotes transmitidos no GDNC

A probabilidade de *outage* do sistema, $P_G(\rho)$[1], tomando-se os termos de menor expoente, é dada por:

$$P_G(\rho) \approx \binom{k_1 + k_2 - 1}{k_2} P(\rho)^{M+k_2}, \tag{22}$$

na qual P é a probabilidade de *outage* no canal inter-usuário, que para um canal com desvanecimento Rayleigh sem OFDMA é dada por:

$$P(\rho) = 1 - \exp\left(-\frac{2^{R_0} - 1}{\rho}\right). \tag{23}$$

Note-se que a Equação (23) é diferente da Equação (5). Na Equação (5) o expoente de dois é $R_0 N_L / K$, enquanto na Equação (23) é R_0, pois em Equação (5) o sistema emprega a divisão dos pacotes em múltiplas subportadoras, como exposto na Seção 2.1, enquanto que em Equação (23) não há a multiplexação em frequência.

A DMT do sistema, $d_G(r)$, é dada por:

$$d_G(r) = (M + k_2)\left(1 - \frac{k_1 + k_2}{k_1} r\right), r \in \left(0, \frac{k_1}{k_1 + k_2}\right). \tag{24}$$

A Figura 16 compara a DMT do sistema que emprega GDNC com a de um sistema que emprega DNC. Percebe-se que o GDNC, comparativamente ao DNC, promove aumento da diversidade se $M < k_2 + 1$ e aumento taxa de multiplexação se $k_1/k_2 > 1/(M - 1)$.

[1]Sempre que se julgar necessário, utilizar-se-á a notação G nas equações quando estas se referem ao esquema GDNC (REBELATTO et al., 2012).

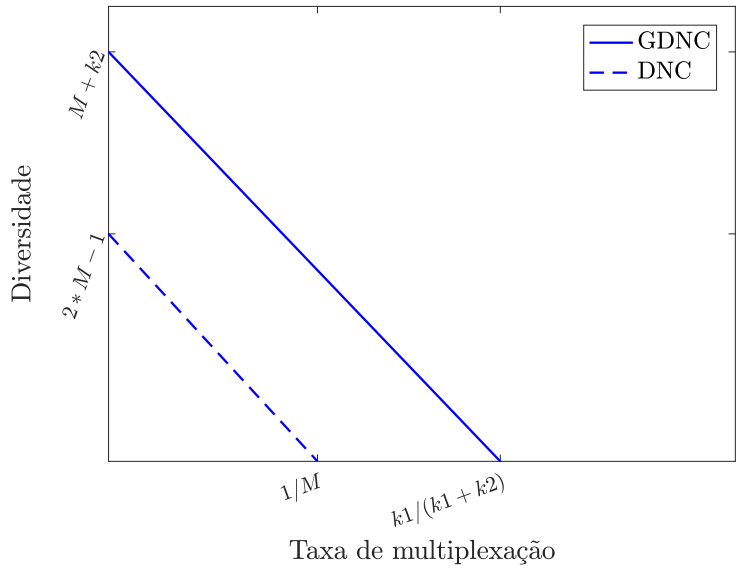


Figura 16 – Comparativo de DMT para GDNC e DNC ($M < k_2 + 1$ e $k_1/k_2 > 1/(M-1)$).

4.2 DESCRIÇÃO DO ESQUEMA GDNC-OFDMA

O esquema funciona de forma semelhante ao GDNC (REBELATTO et al., 2012), adicionando a ele a alocação de subportadoras feita pelo nó destino pelo algoritmo MCMA (BAI et al., 2011). Antes de cada janela de transmissão, tanto na BP quanto na CP, o destino aloca as subportadoras para os M nós, de modo que a alocação de subportadoras ocorre um total de $k_1 + k_2$ vezes ao final de um ciclo completo do GDNC-OFDMA. A transmissão naquela janela de tempo se sucede da mesma forma que no GDNC convencional, com a diferença de que agora cada usuário dispõe de K subportadoras para usar na transmissão do pacote. Os nós transmitem e recebem pacotes simultaneamente sem que haja algum tipo de impedimento imposto pelo sistema, uma vez que transmissão e recepção ocorrem em canais ortogonais na frequência, uma vez que cada subportadora foi alocada para um único nó para cada transmissão (BAI et al., 2011).

Diferentemente do esquema NCC-OFDMA (HEIDARPOUR et al., 2017, 2015), o GDNC-OFDMA não dispõe de um conjunto fixo de *relays*, sendo que os próprios nós-fonte atuam como *relays* durante a CP. Ainda, no GDNC-OFDMA um nó participa da CP independentemente do número de IFs recebidos corretamente durante a BP. Assim, chamaremos o esquema com a estratégia irrestrita de GDNC-OFDMA e aquele em que há restrição na transmissão durante a cooperação será chamado de cGDNC-OFDMA. É interessante notar que o cGDNC-OFDMA para $k_1 = k_2 = 1$ e $M = R$ se reduz ao

NCC-OFDMA corrigido[2]. Denominar-se-á o caso particular do GDNC-OFDMA para $k_1 = k_2 = 1$ e $M = R$ de (G)NCC-OFDMA, tanto na estratégia restrita quanto na irrestrita.

4.3 PROBABILIDADE DE OUTAGE

4.3.1 Estratégia irrestrita

Seja $\mathcal{D}_m(t) \subseteq \{1, ..., M\}$ o conjunto de nós que decodificaram corretamente o IF $I_m(t)$ transmitido pelo usuário u_m no instante de tempo $t \in \{1, ..., k_1\}$, incluindo o usuário u_m. O conjunto de todos os pacotes corretamente decodificados pelos usuários em $\mathcal{D}_m(t)$ é definido como $\mathcal{I}_{\mathcal{D}_m}(t)$.

De forma a tornar mais simples o entendimento, serão omitidos os índices e sub-índices para facilitar a notação, sem causar prejuízo no entendimento. Existem pelo menos $|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2$ pacotes contendo pacotes do conjunto $\mathcal{I}_{\mathcal{D}}$ no nó destino (os pacotes IFs transmitidos durante a BP e os PFs transmitidos durante a CP). O destino necessita decodificar corretamente $|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}|$ pacotes de forma a recuperar todos os IFs no conjunto $\mathcal{I}_{\mathcal{D}}$. Um dado IF é dito em *outage* se a sua transmissão direta e pelo menos $|\mathcal{D}|k_2$ dos $|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1$ pacotes restantes não serão corretamente decodificados no destino. Isso ocorre com probabilidade dada por:

$$P(\mathcal{D}) = P_D \sum_{n=|\mathcal{D}|k_2}^{N_{\text{frame}}} \binom{N_{\text{frame}}}{n} \frac{(P_D)^n}{(1-P_D)^{n-N_{\text{frame}}}} \tag{25a}$$

$$= \binom{|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1}{|\mathcal{D}|k_2} P_D^{|\mathcal{D}|k_2+1} + \mathcal{O}\left(P_D^{|\mathcal{D}|k_2+1}\right) \tag{25b}$$

$$\approx \binom{|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1}{|\mathcal{D}|k_2} P_s^{L(|\mathcal{D}|k_2+1)}. \tag{25c}$$

em que $N_{\text{frame}} = |\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1$.

A probabilidade da ocorrência de $\mathcal{D}$, isso é, a probabilidade de que um conjunto de nós tenha decodificado corretamente um determinado IF, é dada por:

$$\Pr\{\mathcal{D}\} = P_r^{M-|\mathcal{D}|} (1-P_r)^{|\mathcal{D}|-1}. \tag{26}$$

[2]Note-se aqui que o NCC-OFDMA corrigido recai sobre um caso particular do cGDNC-OFDMA se assumir-se que naquele esquema cada nó está ligado a um *relay* através de um canal livre de erro.

Por fim, a probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA, $P_{GO}(\rho)$ [3] é dada por:

$$P_{GO}(\rho) \approx \sum_{|\mathcal{D}|=1}^{M} \binom{M-1}{|\mathcal{D}|-1} \Pr\{\mathcal{D}\} P(\mathcal{D}) \tag{27a}$$

$$\approx \mu P_s^{M+L(k_2+1)-1} \tag{27b}$$

$$\approx \mu \left(\frac{2^{R_0 N_L/K} - 1}{\rho} \right)^{M+L(k_2+1)-1}, \text{ tal que } \mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2}, \tag{27c}$$

em que a aproximação dada na Equação (27b) é obtida após a expansão dos termos de (27a), mantendo-se os termos mais significativos, isto é, os termos com menor expoente e assumindo-se que $L > 1$, e a Equação (27c) tem-se o valor assintótico para alta SNR.

4.3.2 Estratégia Restrita

Nessa estratégia, só transmitem na fase de cooperação (CP) os nós que corretamente decodificaram todos os IFs transmitidos na BP.

Seja $\mathcal{M}$ o conjunto de todos os nós fonte que corretamente decodificaram todos os $(M-1)k_1$ IFs transmitidos durante a BP, com $|\mathcal{M}| \leq M$. A probabilidade da ocorrência de $\mathcal{M}$ é dada por:

$$\Pr\{\mathcal{M}\} = \left[\bar{P}_r^{(M-1)k_1}\right]^{|\mathcal{M}|} \left[1 - \bar{P}_r^{(M-1)k_1}\right]^{M-|\mathcal{M}|}. \tag{28}$$

Para um dado $\mathcal{M}$, o destino recebe $Mk_1 + |\mathcal{M}|k_2$ pacotes, e um *outage* só ocorre para um dado IF se a sua transmissão direta e pelo menos $Mk_1 + |\mathcal{M}|k_2 - 1$ estão em *outage* no destino, o que ocorre com probabilidade dada por:

$$P(\mathcal{M}) = P_D \sum_{n=0}^{Mk_1-1} \binom{Mk_1 + |\mathcal{M}|k_2 - 1}{|\mathcal{M}|k_2 + n} \frac{P_D^{|\mathcal{M}|k_2+n}}{(1-P_D)^{1+n-Mk_1}}. \tag{29}$$

Por fim, a probabilidade de *outage* para um pacote qualquer no cGDNC-OFDMA,

[3] Sempre que se julgar necessário, utilizar-se-á a notação GO nas equações quando estas se referem ao esquema GDNC-OFDMA.

$P_{cGO}(\rho)$ [4], é dada por:

$$P_{cGO} = \sum_{|\mathcal{M}|=0}^{M} \binom{M}{|\mathcal{M}|} \Pr\{\mathcal{M}\} P(\mathcal{M}) \tag{30a}$$

$$\approx [k_1(M-1)]^M P_s^{M+L} \tag{30b}$$

$$\approx [k_1(M-1)]^M \left(\frac{2^{R_0 N_L/K} - 1}{\rho} \right)^{M+L}. \tag{30c}$$

em que a Equação (30b) é obtida após expandir-se a Equação (30a) e obter-se os termos mais significantes, o que significa $n = 0$ em (29) e $|\mathcal{M}| = 0$ em (30a) e assumindo que $L > 1$. Já na Equação (30c) tem-se o valor assintótico da probabilidade de *outage* para a alta SNR.

4.4 DMT

4.4.1 Estratégia Irrestrita

A taxa de transmissão final do sistema, R_{GO}, é dada por:

$$R_{GO} = R_F R_T R_0 \tag{31a}$$

$$= \frac{MK}{N} \frac{k_1}{k_1 + k_2} R_0, \tag{31b}$$

na qual R_F é a taxa de multiplexação na frequência introduzida pelo uso do OFDMA, R_T representa a multiplexação no tempo introduzida pela cooperação. Para o GDNC-OFDMA, $R_F = MK/N$ e $R_T = k_1/(k_1 + k_2)$

A DMT para o GDNC-OFDMA é calculada a partir do conjunto de Equações (6) e (7). Partindo-se dessas equações e utilizando-se da Equação (27), tem-se que a DMT para o GDNC-OFDMA, $d_{GO}(r)$, é dada por:

$$d_{GO}(r) = \lim_{\rho \to \infty} \frac{\log\left(\mu P_s^{M+L(k_2+1)-1}\right)}{-\log \rho} \tag{32a}$$

$$= \lim_{\rho \to \infty} \frac{\log\left(\mu \rho^{[M+L(k_2+1)-1]\left[\frac{M(k_1+k_2)}{Lk_1} r - 1\right]}\right)}{-\log \rho} \tag{32b}$$

$$= (M + L[k_2+1] - 1)\left(1 - \left[\frac{k_1+k_2}{k_1}\right] \frac{M}{L} r\right). \tag{32c}$$

[4]Sempre que se julgar necessário, utilizar-se-á a notação *cGO* nas equações quando estas se referem ao esquema GDNC-OFDMA com estratégia restrita.

4.4.2 Estratégia Restrita

A taxa de transmissão final do sistema, R_{cGO}, é dada por:

$$R_{cGO} = R_F R_T R_0 \tag{33a}$$

$$= \frac{MK}{N} \frac{k_1}{k_1 + k_2} R_0, \tag{33b}$$

na qual R_F é a taxa de multiplexação na frequência introduzida pelo uso do OFDMA, R_T representa a multiplexação no tempo introduzida pela cooperação. Para o cGDNC-OFDMA, $R_F = MK/N$ e $R_T = k_1/(k_1 + k_2)$

A DMT para o cGDNC-OFDMA é calculada a partir do conjunto de Equações (6) e (7). Partindo-se dessas equações e utilizando-se da Equação (30), tem-se que a DMT para o cGDNC-OFDMA, $d_{cGO}(r)$, é dada por:

$$d_{cGO}(r) = \lim_{\rho \to \infty} \frac{\log\left([k_1(M-1)]^M P_s^{M+L}\right)}{-\log \rho} \tag{34a}$$

$$= \lim_{\rho \to \infty} \frac{\log\left([k_1(M-1)]^M \rho^{[M+L]\left[\frac{M(k_1+k_2)}{Lk_1} r - 1\right]}\right)}{-\log \rho} \tag{34b}$$

$$= (M+L)\left(1 - \left[\frac{k_1 + k_2}{k_1}\right] \frac{M}{L} r\right). \tag{34c}$$

A Figura 17 sintetiza os resultados de DMT obtidos para os novos esquemas, comparando-os com o OFDMA sem cooperação e com o GDNC (REBELATTO et al., 2012). É possível perceber pelo gráfico que o esquema GDNC-OFDMA apresenta a maior diversidade entre todos os esquemas comparados (GDNC, cGDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e OFDMA), uma vez que $M + L(k_2+1) - 1 \geq M + k_2, \forall L \geq 1$ e $M + L(k_2+1) - 1 \geq M + L, \forall k_2 \geq 1$. Ainda, garantindo-se que $k_1 > k_2$ tem-se que a multiplexação do GDNC-OFDMA será maior que a do NCC-OFDMA. O cenário exposto na Figura 17 é válido para $k_1/k_2 > \max\{1, L/(M-L)\}$ e $k_2 > L$, em que $\max\{x, y\}$ é o maior entre os valores x e y.

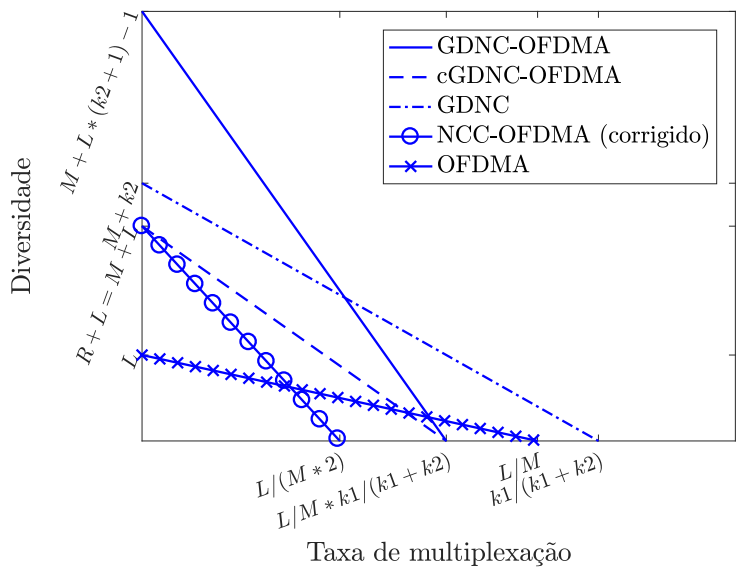


Figura 17 – DMT comparativo dos esquemas GDNC-OFDMA (restrito e irrestrito), GDNC, NCC-OFDMA e OFDMA.

4.5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Apresenta-se aqui os resultados numéricos que suportam o modelo proposto do GDNC-OFDMA, sua performance comparativamente ao NCC-OFDMA corrigido, assim como em relação ao GDNC (REBELATTO et al., 2012).

A Figura 18 traz um comparativo da probabilidade de *outage* em função da SNR para diferentes valores de L, para o cenário em que $M = 6$, $k_1 = k_2 = 2$ e $R_0 = 1$ bps/Hz. No gráfico, são mostrados os valores obtidos através de simulação numérica, o valor analítico dado pela Equação (27a) e o valor assintótico dado pela Equação (27c). Percebe-se que, como previsto analiticamente, o aumento do número de bandas de coerência não só diminui a *outage*, como também aumenta a diversidade. As divergências entre simulação e valor analítico se devem a aproximações feitas durante a dedução.

O segundo caso compara um cenário com $M = 4$, $L = 2$ e $R_0 = 1$ bps/Hz para os dois esquemas apresentados nesse trabalho - o NCC-OFDMA e o GDNC-OFDMA - com as duas estratégias disponíveis - a irrestrita[5] e a restrita. Os quatro casos possíveis estão representados na Figura 19, na qual estão colocados os valores obtidos através de simulação numérica, assim como os valores analíticos dados pelas Equações (18), (27a) e (30a), dependendo de cada caso. Pelo gráfico pode-se concluir que a estratégia irrestrita é a mais adequada para os dois esquemas, uma vez que não se restringe o número de

[5]Ainda que o NCC-OFDMA na sua versão corrigida não contemple a estratégia irrestrita, o seu desempenho pode ser estimado com o (G)NCC-OFDMA para a mesma estratégia.

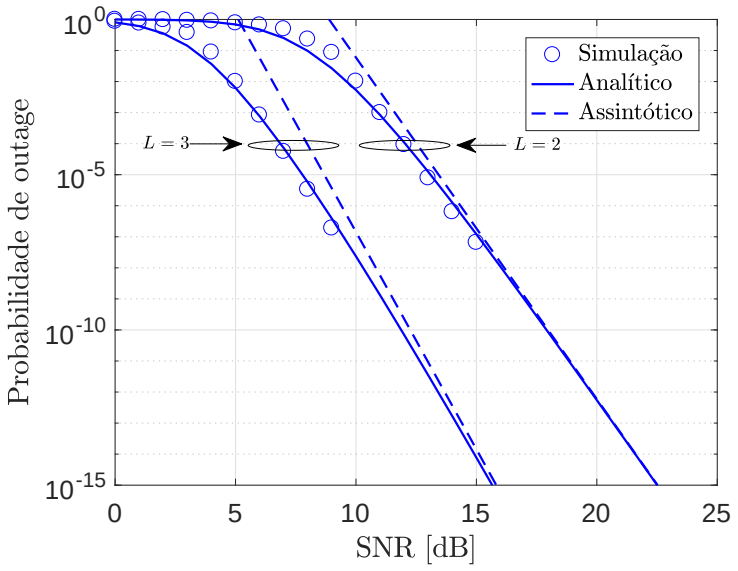


Figura 18 – Probabilidade de *outage* para $M = 6$, $k_1 = k_2 = 2$ e $R_0 = 1$ bps/Hz variando-se $L = [2, 3]$ para o GDNC-OFDMA. As linhas contínuas são os valores analíticos para cada caso e os marcadores são os valores numéricos para cada caso.

nós participantes durante a CP. Enquanto que na estratégia restrita, o cGDNC-OFDMA tem pior desempenho que o NCC-OFDMA, na estratégia irrestrita o GDNC-OFDMA tem melhor desempenho que o NCC-OFDMA. Essa inversão de desempenho causada pela mudança na estratégia tem dois motivos: na estratégia restrita, um nó do cGDNC-OFDMA tem menores chances de participar da CP, pois deve receber corretamente Mk_1 pacotes, ao invés de M como no NCC-OFDMA. Além disso, a *outage* de um único pacote no nó *relay* durante a BP faz com que k_2 pacotes deixem de ser transmitidos na CP, o que prejudica significativamente o grande benefício que o GDNC-OFDMA traz, pois as múltiplas transmissões durante a CP causam aumento da diversidade.

Comparativamente ao GDNC (REBELATTO et al., 2012), sabe-se que o GDNC-OFDMA consegue atingir maior diversidade, pois explora-se a dimensão da frequência também, como mostrado na Figura 17. A Figura 20 corrobora essa proposição colocada anteriormente, agora comparando a probabilidade de *outage* obtida analiticamente dos esquemas GDNC-OFDMA nas duas estratégias contra o GDNC (REBELATTO et al., 2012). O valor assintótico para cada curva também é mostrado. O gráfico da Figura 20 evidencia de forma mais visível que a incorporação da diversidade em frequência obtida com a incorporação do algoritmo de alocação de subportadoras traz significativo benefício ao GDNC (REBELATTO et al., 2012) e que essa incorporação é mais significativa na estratégia irrestrita do que na restrita. Percebe-se que mesmo a diversidade do cGDNC-OFDMA sendo maior que a do GDNC, pois $M + L > M + k_2$ para o caso exposto, a restrição imposta por causa da estratégia adotada causa maior prejuízo que os benefícios

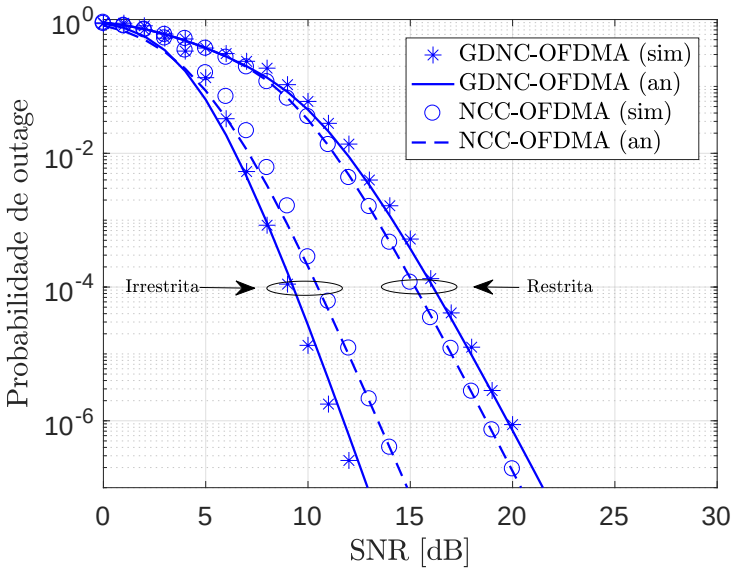


Figura 19 – Probabilidade de *outage* para $M = 4$, $L = 2$ e $R_0 = 1$ bps/Hz para o GDNC-OFDMA ($k_1 = k_2 = 2$) e para o NCC-OFDMA adotando-se a estratégia irrestrita e restrita. As linhas são os valores analíticos para cada caso e os marcadores são os valores numéricos para cada caso.

propiciados pela maior diversidade. Já a estratégia irrestrita explora de maneira mais eficiente a diversidade em frequência, fato que está capturado na Equação (32) pelo fator Lk_2 que existe, de forma que a diversidade na frequência amplifica a diversidade temporal e vice-versa. Dessa forma, nos cenários nos quais o GDNC-OFDMA é aplicável, conforme detalhado na Seção 2.1, este modelo deve ser considerado ao invés do GDNC (REBELATTO et al., 2012), uma vez que consegue atingir maior diversidade e menor probabilidade de *outage*, observando-se que uma SNR adequada é adotada.

Em alguns cenários, o GDNC-OFDMA pode apresentar uma taxa efetiva de transmissão inferior ao do NCC-OFDMA, ou seja, $R_{GO} < R_{NO}$. Isso é causado pela diversidade temporal que o GDNC (REBELATTO et al., 2012) introduz, que, dependendo dos parâmetros k_1 e k_2, pode resultar na menor taxa efetiva de transmissão para o GDNC-OFDMA. Em outras palavras, sempre que $k_1 < k_2$, o GDNC-OFDMA apresentará um atraso na transmissão dos pacotes em comparação com o NCC-OFDMA, assumindo-se que os outros parâmetros permaneçam constantes. De forma a se eliminar esse atraso é necessário compensar R_0 no GDNC-OFDMA, de modo que $R_{GO} = R_{NO}$. É facilmente verificável que R_0 deve ser multiplicado por $(k_1 + k_2)/(2k_1)$ no GDNC-OFDMA, o que garante que $R_{GO} = R_{NO}$. Tal cenário em que há compensação de R_0 está ilustrado na Figura 21. O cenário ilustrado é para $M = 6$, $L = 2$, $R_0 = 1$ bps/Hz, $k_1 = 3$ e $k_2 = 6$. O gráfico mostra o caso do NCC-OFDMA para os parâmetros colocados, assim como o GDNC-OFDMA em duas situações: a primeira em que não há compensação de R_0, ou

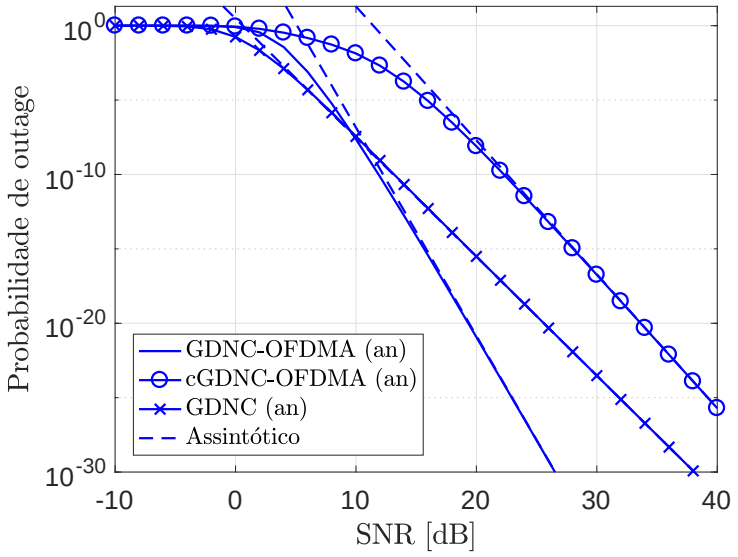


Figura 20 – Probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA (estratégias restrita e irrestrita) e do GDNC (REBELATTO et al., 2012) para $M = 6$, $k_1 = k_2 = 2$, $R_0 = 1$ bps/Hz, $L = 3$ e $N = 12$.

seja, cada nó transmite a taxa $R_{GO} = 1$ bps/Hz; e a segunda na qual há a compensação da taxa de transmissão, de modo que os nós transmitem a uma taxa $R_{GO} = 1.5$ bps/Hz.

Como era esperado, o aumento da taxa de transmissão deslocou a curva de *outage* para a direita, em torno de 5dB. Porém, mesmo com o aumento da probabilidade de *outage*, o GDNC-OFDMA ainda tem melhor desempenho que o NCC-OFDMA, sendo que a região em que o NCC-OFDMA é melhor é para regiões nas quais o erro é muito alto para ambos os esquemas. Logicamente, tal situação depende de toda a configuração do sistema (número de nós, bandas de coerência, ...), sendo que é impossível generalizar que para outras configurações de parâmetros, a compensação desempenhará de forma similar a exemplificada. Contudo, o exemplo ilustra a flexibilidade do GDNC-OFDMA, que permite ao modelo atender algum tipo de requisito ou restrição (no caso, a taxa efetiva de transmissão) sem que isso impacte de forma significativa no seu desempenho.

Apesar de uma análise mais detalhada da *throughput* dos sistemas apresentados não ser o foco desse trabalho, é interessante mencioná-la, pois trabalhos futuros podem utilizar esse parâmetro como métrica de avaliação ou em outras análises.

Define-se a *throughput* de um sistema, T_{sch}, como sendo a taxa livre de erro do sistema, que é dada por:

$$T_{sch} = R_{sch}(1 - P_{sch}), \tag{35}$$

em que

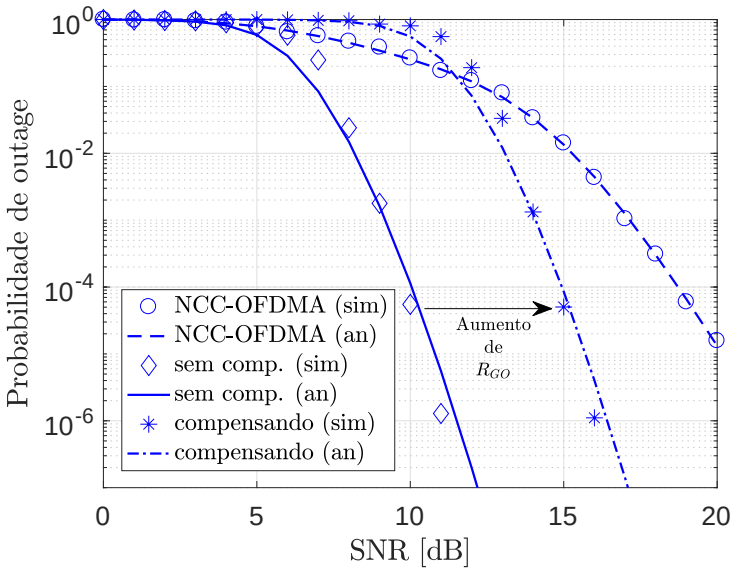


Figura 21 – Probabilidade de *outage* para $M = 6$, $L = 2$ para o GDNC-OFDMA ($k_1 = 3$ e $k_2 = 6$) e para o NCC-OFDMA compensado-se R_0 no primeiro esquema de forma a se igualar a taxa efetiva de transmissão de ambos. As linhas são os valores analíticos para cada caso e os marcadores são os valores numéricos para cada caso.

Nas Figuras 22 e 23, a *throughput* de transmissão dos sistemas GDNC-OFDMA (estratégias irrestrita e restrita) e NCC-OFDMA é apresentada para dois cenários: na Figura 22, temos $k_1 = k_2 = 2$ de forma que a taxa efetiva de transmissão dos três cenários é a mesma ($R_{GO} = R_{cGO} = R_{NO}$); e na Figura 23, têm-se que $k_1 = 4$ e $k_2 = 2$, o que faz com que $R_{GO} = R_{cGO} > R_{NO}$. Somente o valor analítico é colocado no gráfico.

Nota-se pelos gráficos que existe um valor ótimo de R_0 que maximiza a *throughput* de transmissão e, por consequência, a *throughput* total do sistema, em todos os casos apresentados. Esse ponto ótimo pode ser de interesse em trabalhos futuros sobre o esquema.

4.6 COMENTÁRIOS

Apresentou-se aqui o esquema de cooperação GDNC-OFDMA que é uma aplicação do esquema GDNC (REBELATTO et al., 2012), que explora diversidade temporal e espacial, combinado com um esquema de alocação de subportadoras, o MCMA, que permite explorar diversidade na frequência (BAI et al., 2011). Tal esquema, objetivo principal dessa dissertação, se mostrou melhor que o esquema de cooperação NCC-OFDMA, nas versões corrigida e original, em termos de probabilidade de *outage* assim como taxa de multiplexação e diversidade.

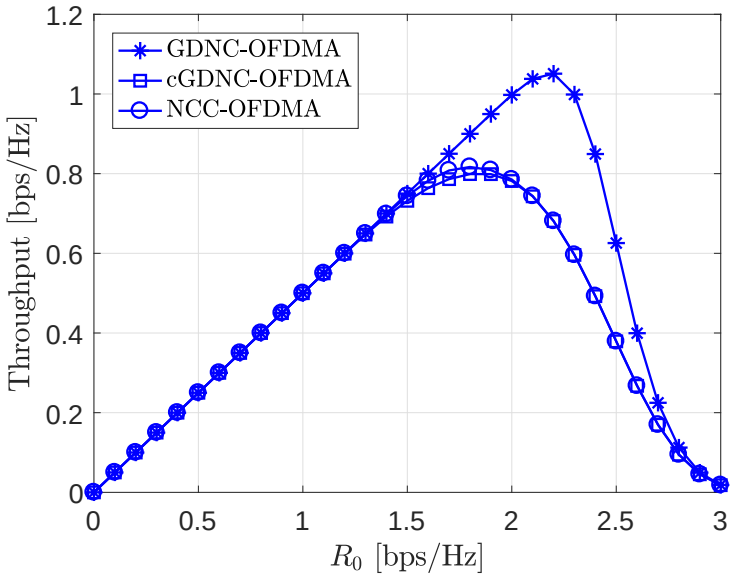


Figura 22 – Comparativo da *throughput* dos dois sistemas: GDNC-OFDMA ($k_1 = k_2 = 2$) (estratégias irrestrita e restrita) e NCC-OFDMA corrigido para $M = 6$, $L = 2$, $N = 12$ e $\rho = 20$dB.

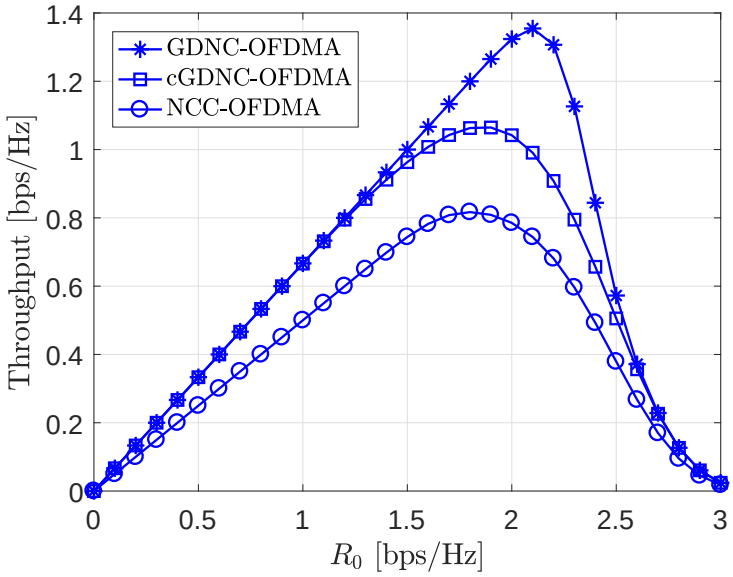


Figura 23 – *Throughput* dos dois sistemas: GDNC-OFDMA ($k_1 = 4$ e $k_2 = 2$) (estratégias irrestrita e restrita) e NCC-OFDMA corrigido para $M = 6$, $L = 2$, $N = 12$ e $\rho = 20$dB.

Dois modos de funcionamento do GDNC-OFDMA foram apresentados, sendo diferentes com relação a estratégia adotada durante a CP. Na restrita, um nó só participa da CP se tiver decodificado corretamente todos os pacotes transmitidos durante a BP. Na irrestrita, uma nó participa da CP independentemente do número de pacotes recebidos corretamente. Análise teórica e simulações foram feitas para ambos, mostrando-se que a estratégia restrita tem pior desempenho, proporcionando maior probabilidade de *outage* aos pacotes. Similarmente, fez-se uma comparação contra a estratégia irrestrita para o NCC-OFDMA, utilizando-se para tal o caso particular do GDNC-OFDMA em que $k_1 = k_2 = 1$, pois o NCC-OFDMA recai sobre um caso particular do cGDNC-OFDMA. Mostrou-se que mesmo que o NCC-OFDMA adotasse a estratégia irrestrita, isso não é o suficiente para superar as múltiplas transmissões que o GDNC-OFDMA faz durante a CP.

Por permitir explorar de três formas a diversidade do sistema, o GDNC-OFDMA com a estratégia irrestrita permite atingir menor probabilidade de *outage* para uma mesma SNR quando comparado com o NCC-OFDMA, sem que isso cause qualquer prejuízo na taxa de multiplexação, uma vez que é possível ajustar os parâmetros do sistema de forma a ajustar a DMT para atender a diversidade e taxa de multiplexação desejadas.

Comparando-se contra a versão originalmente do GDNC (REBELATTO et al., 2012), o GDNC-OFDMA consegue explorar de forma bastante eficiente a diversidade em frequência que o MCMA introduz, conseguindo um incremento significativo de diversidade, de forma que a diversidade em frequência potencializa a diversidade temporal e vice-versa, fazendo com que nos cenários nos quais o modelo se aplica ele se mostra como solução mais eficaz que o GDNC somente.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Nessa dissertação de mestrado apresentou-se um novo esquema que comunicação cooperativa com codificação de rede que permite explorar a diversidade em três graus: no tempo, no espaço e na frequência. O novo esquema, denominado GDNC-OFDMA, é resultado da combinação do esquema GDNC (REBELATTO et al., 2012), esquema de cooperação com codificação de rede que possui diversidade espacial e temporal, com o esquema de alocação de subportadoras em sistemas OFDMA apresentado em (BAI et al., 2011), esquema que possibilita explorar a diversidade na frequência.

O esquema de alocação de subportadoras MCMA apresentado em (BAI et al., 2011) foi inicialmente combinado com comunicação cooperativa em (HEIDARPOUR et al., 2015), no então denominado NCC-OFDMA. Os resultados em (HEIDARPOUR et al., 2015, 2017) mostraram que a combinação do MCMA com a comunicação cooperativa conseguia explorar a diversidade em frequência e com isso melhorar a confiabilidade da comunicação sem fio. Entretanto, Heidarpour et al. (2015, 2017) fazem uma suposição otimista com relação aos canais vistos pelos vários nós do sistema, não aplicável em cenários reais, e por conseguinte, superestimam o desempenho do sistema.

Uma versão mais realista do esquema NCC-OFDMA foi desenvolvida nesse trabalho, assim como seu formulamento analítico e resultados numéricos que o suportam. Mostrou-se que o esquema corrigido tem pior desempenho que o originalmente proposto em (HEIDARPOUR et al., 2015, 2017), em termos de diversidade atingida. Além disso, a imposição de que os nós só podem cooperar se tiverem decodificado todos os IFs da BP limita ainda mais o esquema.

O GDNC-OFDMA apresenta melhor desempenho com relação ao NCC-OFDMA, tanto em termos de diversidade, taxa de multiplexação, assim como probabilidade de *outage*. Ainda, o GDNC-OFDMA adiciona uma nova possibilidade de se explorar a diversidade ao GDNC: a frequência. Em cenários nos quais é aplicável o GDNC-OFDMA, este apresenta melhor desempenho que o GDNC (REBELATTO et al., 2012).

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O novo esquema proposto, GDNC-OFDMA, abre espaço para uma ampla possibilidade de trabalhos futuros. Pode-se avaliar o sistema utilizando outra métricas, como: a eficiência energética do sistema, o atraso da chegada dos pacotes ao destino

devido a cooperação e *throughput*.

Outra possibilidade que é interessante de se investigar é uma versão do MCMA que considere as particularidades de um sistema cooperativo, uma vez que o sistema foi originalmente proposto para cenários sem cooperação. Também sugere-se revisitar o MCMA (BAI et al., 2011) e corrigi-lo para cenários nos quais N_L não é múltiplo inteiro de K, e também avaliar os efeitos da alocação de potência sobre a *outage*.

Também pode-se explorar a aplicação de tal esquema em variantes do GDNC (REBELATTO et al., 2012), como o FD-GDNC (Codificação de rede dinâmica generalizada de diversidade cheia, do inglês *Full-diversity Generalized Diversity Network Coding*). Nesse esquema, os nós conseguem recuperar IFs não decodificados corretamente durante a BP com base nos PFs transmitidos durante CP e, assim, contribuir para reduzir a probabilidade de *outage* de um pacote (REBELATTO et al., 2011).

Ainda, é possível aplicar o GDNC-OFDMA em outros modelos de canal nos quais o desvanecimento não é do tipo Rayleigh e sua modelagem é mais complexa, como o canal acústico subaquático (UWA, do inglês *Underwater accoustic*) (SOZER et al., 2000) e o canal óptico de espaço-livre (FSO, do inglês *Free-space optical*) (KHALIGHI; UYSAL, 2014).

REFERÊNCIAS

AHLSWEDE, R.; CAI, N.; LI, S. Y. R.; YEUNG, R. W. Network information flow. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 46, n. 4, p. 1204–1216, Jul 2000. ISSN 0018-9448.

ALAMOUTI, S. M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 16, n. 8, p. 1451–1458, Oct 1998. ISSN 0733-8716.

BAşARAN, S. T.; KURT, G. K.; UYSAL, M.; ALTUNBAş, . A tutorial on network coded cooperation. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 18, n. 4, p. 2970–2990, Fourthquarter 2016. ISSN 1553-877X.

BAI, B.; CHEN, W.; CAO, Z.; LETAIEF, K. B. Optimal diversity-multiplexing tradeoff in ofdma systems. In: **2009 IEEE International Conference on Communications**. 2009. p. 1–5. ISSN 1550-3607.

BAI, B.; CHEN, W.; CAO, Z.; LETAIEF, K. B. Max-matching diversity in ofdma systems. **IEEE Transactions on Communications**, v. 58, n. 4, p. 1161–1171, April 2010. ISSN 0090-6778.

BAI, B. B.; CHEN, W.; LETAIEF, K. B.; CAO, Z. Diversity-multiplexing tradeoff in ofdma systems: An h-matching approach. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 10, n. 11, p. 3675–3687, November 2011. ISSN 1536-1276.

BRENNAN, D. G. Linear diversity combining techniques. **Proceedings of the IRE**, v. 47, n. 6, p. 1075–1102, June 1959. ISSN 0096-8390.

CHEN, Y.; KISHORE, S.; LI, J. Wireless diversity through network coding. In: **IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.** 2006. v. 3, p. 1681–1686. ISSN 1525-3511.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162.

HEIDARPOUR, A. R.; KURT, G. K.; UYSAL, M. Diversity-multiplexing tradeoff for network coded cooperative ofdma systems. In: **2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. 2015. p. 4368–4373. ISSN 1550-3607.

HEIDARPOUR, A. R.; KURT, G. K.; UYSAL, M. Finite-snr diversity-multiplexing tradeoff for network coded cooperative ofdma systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 3, p. 1385–1396, March 2017. ISSN 1536-1276.

HOPCROFT, J. E.; KARP, R. M. An $n^{5/2}$ algorithm for maximum matchings in bipartite graphs. **SIAM Journal on Computing**, v. 2, n. 4, p. 225–231, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/0202019>.

KHALIGHI, M. A.; UYSAL, M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 16, n. 4, p. 2231–2258, Fourthquarter 2014. ISSN 1553-877X.

LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dec 2004. ISSN 0018-9448.

NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 10, p. 74–80, Oct 2004. ISSN 0163-6804.

PEREIRA, Z. C.; TON, T. H.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D.; UCHôA-FILHO, B. F. Generalized network-coded cooperation in ofdma communications. **IEEE Access**, 2017.

REBELATTO, J. L.; UCHôA-FILHO, B. F.; SILVA, D. Full-diversity network coding for two-user cooperative communications. In: **2011 IEEE Information Theory Workshop**. 2011. p. 543–547.

REBELATTO, J. L.; UCHOA-FILHO, B. F.; LI, Y.; VUCETIC, B. Multiuser cooperative diversity through network coding based on classical coding theory. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 60, n. 2, p. 916–926, Feb 2012. ISSN 1053-587X.

SOZER, E. M.; STOJANOVIC, M.; PROAKIS, J. G. Underwater acoustic networks. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 25, n. 1, p. 72–83, Jan 2000. ISSN 0364-9059.

TAROKH, V.; JAFARKHANI, H.; CALDERBANK, A. R. Space-time block coding for wireless communications: performance results. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 17, n. 3, p. 451–460, Mar 1999. ISSN 0733-8716.

TAROKH, V.; SESHADRI, N.; CALDERBANK, A. R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 44, n. 2, p. 744–765, Mar 1998. ISSN 0018-9448.

TON, T. H.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D. On the performance of network-coded cooperative ofdma systems with subcarrier allocation. **IEEE Wireless Communications Letters**, July 2017.

TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521845270.

XIAO, L.; FUJA, T. E.; KLIEWER, J.; COSTELLO, D. J. A network coding approach to cooperative diversity. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 53, n. 10, p. 3714–3722, Oct 2007. ISSN 0018-9448.

XIAO, M.; KLIEWER, J.; SKOGLUND, M. Design of network codes for multiple-user multiple-relay wireless networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 60, n. 12, p. 3755–3766, December 2012. ISSN 0090-6778.

XIAO, M.; SKOGLUND, M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding. **IEEE Transactions on Communications**, v. 58, n. 12, p. 3345–3351, December 2010. ISSN 0090-6778.