

**Novas Propostas de Algoritmos de  
Alocação Adaptativa de  
Subportadoras e Bits para Sistemas  
OFDMA.**

**Anderson Daniel Soares**

**DEZEMBRO / 2012**

# **Novas Propostas de Algoritmos de Alocação Adaptativa de Subportadoras e Bits para Sistemas OFDMA.**

ANDERSON DANIEL SOARES

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

Orientador: PROF. DR. RAUSLEY A. A. SOUZA

Co-orientador: PROF. DR. LUCIANO LEONEL MENDES

**Santa Rita do Sapucaí  
2012**

Soares, Anderson Daniel

S676n

Novas Propostas de Algoritmos de Alocação Adaptativa de Subportadoras e Bits para Sistema OFDMA. / Anderson Daniel Soares. – Santa Rita do Sapucaí, 2012.

72 p.

Orientador: Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza; Prof. Dr. Luciano Leonel Mendes.

Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia e anexo.

1. OFDMA 2. Alocação Adaptativa de subportadoras e bits 3. Algoritmos de alocação 4. Walter-filling 5. Engenharia de Telecomunicações. I. Souza, Rausley Adriano Amaral de II. Mendes, Luciano Leonel III. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. IV. Título.

CDU 621.39

Dissertação defendida e aprovada em    /    /    , pela comissão julgadora:

---

Prof.    Dr.    Rausley A. A. de Souza/Instituto Nacional de  
Telecomunicações (INATEL)

---

Prof.    Dr.    Luciano Leonel Mendes/Instituto Nacional de  
Telecomunicações (INATEL)

---

Prof. Dr. Carlos Nazareth Motta Marins/Instituto Nacional de  
Telecomunicações (INATEL)

---

Prof. Dr. Renato Baldini Filho/Universidade Estadual de Campi-  
nas (UNICAMP)

---

**Prof. Dr. Luciano Leonel Mendes -**  
**Coordenador do Curso de Mestrado**

A minha família.

# Agradecimentos

A Deus por me proporcionar sabedoria e conhecimento para poder vencer mais esta etapa em minha vida.

Aos meus pais, José Raymundo Soares e Sandra Mara de Almeida Soares e meus irmãos, Ricardo Alexandre Soares e André Luiz Soares pelo amor, atenção e apoio dado em todos esses anos de minha vida. A minha cunhada Danielle Matias Soares pela palavras de apoio e incentivo. A minha companheira Monique Besmark Nassr pela compreensão, carinho, dedicação e principalmente pela paciência durante essa caminhada.

Aos meus orientadores Luciano Leonel Mendes e Rausley A. A. de Souza pela dedicação e orientação dada para que este trabalho pudesse ter sido realizado. Agradeço também pelos conselhos e exemplos dados para que eu atingisse este objetivo.

Aos amigos do laboratório de Hardware do INATEL, Tiago Reis Rufino Marins, Emerson Siécola, Alexandre Carvalho Ferreira e todos as outras pessoas que de uma maneira ou de outra ajudaram neste trabalho.

Em especial gostaria de agradecer ao grande amigo André Antônio dos Anjos e a Daniely Gomes Silva pela amizade, companheirismo e apoio para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que diretamente e indiretamente colaboraram para que esse trabalho se concretizasse.

# Índice

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Lista de Símbolos	xiii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Princípios do Múltiplo Acesso por Divisão em Frequências Or- togonais</b>	<b>4</b>
2.1 OFDM . . . . .	5
2.2 Técnicas de múltiplo acesso . . . . .	6
2.2.1 OFDM-TDMA . . . . .	6
2.2.2 OFDMA . . . . .	7
2.3 Conclusão . . . . .	13
<b>3 Algoritmos de alocação adaptativa</b>	<b>15</b>
3.1 Modelo do sistema . . . . .	16
3.2 Capacidade do canal e SNR <i>gap</i> . . . . .	18
3.3 Teorema de <i>Water-filling</i> . . . . .	19
3.4 Algoritmo de <i>Water-filling</i> . . . . .	21
3.5 Algoritmo <i>Two-Steps</i> . . . . .	24

3.6	Conclusão . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Algoritmos propostos para alocação adaptativa de recursos para sistemas OFDMA</b>	<b>31</b>
4.1	Algoritmos <i>Water-filling</i> modificado . . . . .	31
4.1.1	Algoritmo <i>Water-filling</i> Modificado - Maximização da Vazão	32
4.1.2	Algoritmo <i>Water-filling</i> Modificado - Robustez . . . . .	33
4.1.3	Algoritmo <i>Water-filling</i> Modificado - Maximização da Robustez . . . . .	37
4.2	Análise de Desempenho dos algoritmos de alocação adaptativa . .	39
4.2.1	Parâmetros de simulação . . . . .	40
4.2.2	Desempenho do algoritmo de <i>Water-filling</i> . . . . .	41
4.2.3	Desempenho do Algoritmo <i>Two-Steps</i> . . . . .	43
4.2.4	Desempenho do Algoritmo de <i>Water-filling</i> modificado - Maximização da vazão . . . . .	48
4.2.5	Desempenho do Algoritmo de <i>Water-filling</i> modificado - Robustez . . . . .	54
4.2.6	Desempenho do Algoritmo de <i>Water-filling</i> Modificado - Maximização da Robustez . . . . .	57
4.3	Conclusão . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Otimização utilizando os multiplicadores de <i>Lagrange</i></b>	<b>65</b>
<b>B</b>	<b>Trabalhos publicados referente à dissertação</b>	<b>68</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>



# Lista de Figuras

2.1	Diagrama em blocos de um sistema OFDM. . . . .	5
2.2	Técnica de múltiplo acesso OFDM-TDMA. . . . .	6
2.3	Exemplo de cenário de comunicação com dois usuários que compartilham o mesmo símbolo OFDM. . . . .	7
2.4	Canais entre dois usuários e a ERB (Estação Rádio-base) que compartilham o mesmo símbolo OFDM. . . . .	8
2.5	Canal seletivo em frequência e variante no tempo. . . . .	8
2.6	Formas de alocação estática: (a) OFDMA não entrelaçado e (b) OFDMA entrelaçado. . . . .	9
2.7	Utilização do canal de comunicação: (a) Subutilização e (b) sobreutilização . . . . .	10
2.8	Distribuição das subportadoras no OFDMA com alocação adaptativa. . . . .	12
2.9	Exemplo de alocação adaptativa de subportadora de um símbolo OFDM. . . . .	12
2.10	Alocação de subportadoras de um algoritmo de maximização da vazão de dados. . . . .	13
3.1	Diagrama em blocos simplificado do modelo do sistema do enlace de subida. . . . .	17
3.2	Estrutura do quadro OFDMA. . . . .	17

3.3	Regiões de distribuição de potência, relação inversa de CNR e o valor do Water-level. . . . .	21
3.4	Exemplo de alocação de subportadora do AW. . . . .	22
3.5	Fluxograma do algoritmo de Water-filling aplicado em U usuários. . . . .	23
3.6	Fluxograma do primeiro passo do algoritmo ATS: estima o número de subportadoras por usuário. . . . .	26
3.7	Fluxograma do segundo passo do algoritmo ATS: aloca as subportadoras para os usuário. . . . .	28
3.8	Fluxograma do algoritmo de bit-loading. . . . .	29
4.1	Fluxograma do AWM-MV. . . . .	34
4.2	Fluxograma do AWM-R. . . . .	36
4.3	Fluxograma do AWM-R - Distribuição das subportadoras restantes. . . . .	37
4.4	Fluxograma do AWM-MR - Distribuição das subportadoras restantes. . . . .	39
4.5	Resposta em frequência dos canais de três usuários. . . . .	41
4.6	Alocação de subportadoras do algoritmo de <i>Water-filling</i> . . . . .	42
4.7	Comportamento do Algoritmo de Alocação de Recursos baseado no Teorema de Water-filling: (a) Vazão de dados por usuário. (b) Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário. (c) Número de subportadoras alocadas para cada usuário. . . . .	42
4.8	Alocação de subportadoras do ATS utilizando o algoritmo de distribuição de bits bit-loading. . . . .	44
4.9	Comportamento do ATS utilizando o algoritmo de bit-loading para alocação dos bits: (a) Vazão de dados por usuário; (b) Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário; (c) Número de subportadoras alocadas para cada usuário. . . . .	45
4.10	Alocação de subportadoras do ATS. . . . .	46

4.11	Comportamento do ATS utilizando o Teorema de Water-filling para alocação dos bits: (a) Vazão de dados por usuário; (b) Eficiência espectral por subportadora de cada usuário; (c) Número de subportadoras alocadas para cada usuário. . . . .	48
4.12	Abordagem Máxima Vazão: (a) Alocação de subportadoras e (b) distribuição de bits em um símbolo OFDM. . . . .	49
4.13	Abordagem Distribuição Aleatória: (a) Alocação de subportadoras e (b) distribuição de bits em um símbolo OFDM. . . . .	50
4.14	Abordagem Máxima Ordem de Modulação: (a) Alocação de subportadoras e (b) distribuição de bits em um símbolo OFDM. . . .	51
4.15	Número de bits de cada usuário, número total e a média de bits por usuário das abordagens MV, DA e MOM. . . . .	52
4.16	Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolos OFDM nas abordagens MV, DA e MOM. . . . .	53
4.17	Número de bits de cada usuário, número total e média de bits por usuário das abordagens MV, DA e MOM. . . . .	55
4.18	Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolos OFDM nas abordagens MV, DA e MOM. . . . .	56
4.19	Probabilidade de erro de símbolo utilizando o canal do usuário 1 apresentado na Figura 4.5. . . . .	57
4.20	Número de bits de cada usuário, número total e média de bits por usuário das abordagens MV, DA e MOM. . . . .	58
4.21	Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolos OFDM nas abordagens MV, DA e MOM. . . . .	59

# Lista de Tabelas

4.1	Valores médios da vazão, eficiência espectral por subportadora e do número de subportadoras de cada usuário, bem como os valores por símbolo OFDM da vazão e subportadoras e a média por usuário utilizando o <i>AW</i> . . . . .	43
4.2	Valores médios da vazão, da eficiência espectral e do número de subportadoras de cada usuário, bem como os valores por símbolo OFDM de bits e subportadoras e a média por usuário utilizando o <i>ATS</i> com o algoritmo de bit-loading. . . . .	46
4.3	Valores médios da vazão, da eficiência espectral e do número de subportadoras de cada usuário, bem como os valores por símbolo OFDM e a média de bit e subportadoras utilizados no <i>ATS</i> . . . .	48
4.4	Número de bits por usuário, por símbolo OFDM e média de bits alocados por usuários no símbolo OFDM nas abordagens <i>MV</i> , <i>DA</i> e <i>MOM</i> . . . . .	51
4.5	Número médio de bits de cada usuário, por símbolo e média por usuário dos 50 símbolos OFDM transmitidos nas abordagens <i>MV</i> , <i>DA</i> e <i>MOM</i> . . . . .	53
4.6	Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média por subportadora do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos utilizando as abordagens <i>MV</i> , <i>DA</i> e <i>MOM</i> . . . . .	54

4.7	Número médio por usuários, por símbolo e média entre os usuário de bits alocados em 50 símbolos OFDM transmitidos empregando as abordagens MV, DA e MOM. . . . .	55
4.8	Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos utilizando as abordagens MV, DA e MOM. . . . .	56
4.9	Número médio por usuários, por símbolo e média entre os usuário de bits alocados em 50 símbolos OFDM transmitidos empregando as abordagens MV, DA e MOM. . . . .	59
4.10	Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos utilizando as abordagens MV, DA e MOM. . . . .	60
4.11	Resultados da alocação do número de bits médio para cada usuário, para cada símbolo OFDM transmitido e por usuário com a transmissão de 50 símbolos OFDM de todos os algoritmos abordados .	61
4.12	Resultados da eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos de todos os algoritmos abordados . . . . .	62

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>3G</b>	<i>Terceira Geração</i>
<b>4G</b>	<i>Quarta Geração</i>
<b>APC</b>	<i>Adiciona Prefixo Cíclico</i>
<b>ATS</b>	<i>Algoritmo Two-step</i>
<b>AW</b>	<i>Algoritmo de Water-filling</i>
<b>AWGN</b>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<b>AWM</b>	<i>Algoritmo de Water-filling Modificado</i>
<b>AWM-MR</b>	<i>Algoritmo de Water-filling Modificado - Máxima Robustez</i>
<b>AWM-MV</b>	<i>Algoritmo de Water-filling Modificado - Máxima Vazão</i>
<b>AWM-R</b>	<i>Algoritmo de Water-filling Modificado - Robustez</i>
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i>
<b>CNR</b>	<i>Channel-to-Noise Ratio</i>
<b>DA</b>	<i>Distribuição Aleatória</i>
<b>DVB-T</b>	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
<b>ERB</b>	<i>Estação Rádio Base</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IFFT</b>	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
<b>ISDB-T</b>	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>

---

<b>ISI</b>	<i>Inter Symbol Interference</i>
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>LTE-Advanced</b>	<i>Long Term Evolution - Advanced</i>
<b>MOM</b>	Máxima Ordem de Modulação
<b>M-QAM</b>	<i>Multi-level Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>MV</b>	Máxima Vazão
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
<b>PC</b>	<i>Prefixo Cíclico</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>RPC</b>	<i>Remove Prefixo Cíclico</i>
<b>SER</b>	<i>Symbol Error Rate</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<b>UHF</b>	<i>Ultra High Frequency</i>
<b>VHF</b>	<i>Very High Frequency</i>
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
<b>WRAN</b>	<i>Wireless Regional Area Networks</i>

# Lista de Símbolos

$\alpha$	Multiplicador de <i>Lagrange</i>
$\Gamma$	SNR <i>Gap</i>
$\Gamma_u$	SNR <i>Gap</i> do $u$ -ésimo usuário
$\delta[\cdot]$	Função impulso
$\lambda$	Constante
$\ell$	Índice do múltiplo percurso
$\rho_u$	Vetor de prioridade atual
$\rho_{0u}$	Vetor de prioridade de referência
$\sigma^2$	Variância do ruído
$\sigma_r$	Desvio padrão da variável aleatória Rayleigh
$\Phi(n)$	Função de restrição da equação a ser maximizada
$v$	Vazão atingida após alocação de bits
$A_{alloc\_min}$	Contador de subportadoras alocadas para atingir a vazão mínima
$A_{u,n}$	Matrix de alocação de subportadora do $u$ -ésimo usuário
$B_{max_u}$	Vazão máxima do símbolo OFDM do $u$ -ésimo usuário
$B_{min_u}$	Vazão mínima do usuário $u$
$BW_{c1}$	Banda de coerência do usuário 1
$BW_{c2}$	Banda de coerência do usuário 2
$BW_{c3}$	Banda de coerência do usuário 3
$\bar{b}$	Quantidade de bits médio por subportadora do símbolo OFDM



---

$b$	Quantidade de bits por símbolo em sistema M-QAM
$b_{max}$	Máxima quantidade de bits por símbolo em sistema M-QAM
$b_n$	Quantidade de bits por símbolo em sistemas M-QAM na $n$ -ésima subportadora
$b_{u,alloc}$	Quantidade de bits a subportadora alocada do usuário $u$
$b_{u,n}$	Quantidade de bits por símbolo em sistemas M-QAM do $u$ -ésimo usuário na $n$ -ésima subportadora
$b_{u,rest}$	Quantidade de bits a subportadora restante do usuário $u$
$C$	Capacidade de um canal AWGN
$c_n$	Carga de bits da $n$ -ésima subportadora
$F(n, P_n)$	Função a ser maximizada
$fs$	Frequência de amostragem
$H_n$	Resposta em frequência do canal na $n$ -ésima subportadora
$H_{u,n}$	Resposta em frequência do canal do $u$ -ésimo usuário na $n$ -ésima subportadora
$h_1[\ell]$	Resposta ao impulso do usuário 1
$h_2[\ell]$	Resposta ao impulso do usuário 2
$h_3[\ell]$	Resposta ao impulso do usuário 3
$K$	Valor do <i>Water-level</i>
$k_c$	Fator de redução da banda de coerência
$M$	Ordem de modulação
$N$	Número total de subportadoras
$n$	Índice da subportadora
$P$	Potência disponível para o símbolo OFDM
$P_{alloc}$	Potência alocada
$P_{es}$	Probabilidade de erro de símbolo

---

$P_n$	Potência a ser alocada na $n$ -ésima subportadora
$P_{min}$	Menor potência a ser alocada da $n$ -ésima subportadora do $u$ -ésimo
$Pt_u$	Potência total do $u$ -ésimo usuário após a alocação das subportadoras
$Pt'_u$	Potência total do $u$ -ésimo usuário quando uma subportadoras é retirada
$P_{tot}$	Potência total do $u$ -ésimo usuário quando uma subportadoras é retirada
$P_u$	Potência disponível do $u$ -ésimo usuário
$P_{u,n}$	Potência do $u$ -ésimo usuário na $n$ -ésima subportadora
$Q(\cdot)$	Função $Q(\cdot)$
$Q(\cdot)^{-1}$	Função $Q(\cdot)$ inversa
$r_{u,i}$	Variável aleatória Rayleigh do $u$ -ésimo usuário do $i$ -ésimo múltiplo caminho.
$s_u$	Número de subportadoras que cada usuário recebe no primeiro passo do algoritmo ATS
$\overline{T_u}$	Relação média entre o ganho do canal e o ruído do usuário $u$
$T_n$	Relação entre o ganho do canal e o ruído na $n$ -ésima subportadora
$T_{u,n}$	Relação entre o ganho do canal e o ruído do usuário $u$ na $n$ -ésima subportadora
$u'$	$u$ -ésimo usuário prioritário
$V$	Número de usuários

# Resumo

O objetivo desta dissertação é apresentar três novas propostas de alocação adaptativa de recursos para sistemas OFDMA, realizando uma análise de seus desempenhos e comparando-os com outros dois esquemas de alocação de subportadoras e bits. Dos cinco algoritmos apresentados, o primeiro é o algoritmo de *Water-filling*. Este algoritmo maximiza a vazão do símbolo OFDM pela análise da resposta em frequência do canal. O segundo é o algoritmo *Two-Steps*. Sua principal vantagem é garantir as vazões mínimas de cada usuário, o que faz com que as QoS individuais sejam atingidas.

Os algoritmos propostos são baseados em modificações do algoritmo de *Water-filling*, definidos como Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Maximização da Vazão, o Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Robustez e o Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Maximização da Robustez. Estes algoritmos utilizam a resposta em frequência dos canais de comunicação e as vazões mínimas de cada usuário para realizar a alocação dos recursos ao sistema. Seus desempenhos são analisados em diferentes canais de comunicação, onde os resultados mostram a existência de uma maior igualdade de distribuição de recursos entre os usuários se comparado com a distribuição obtida pelo algoritmo de *Water-filling* e apresenta uma maior vazão média quando comparado com o algoritmo *Two-steps*.

Palavras-chave: OFDMA, Alocação adaptativa, *Water-filling*, resposta em frequência do canal, QoS.

# Abstract

The aim of this dissertation is to present three new proposals for resource allocation for OFDMA systems, doing an analysis of their performances, comparing them with two other subcarriers and bits allocation schemes. The five algorithm presented, the first algorithm is the *Water-filling* Algorithm and its maximizes the throughput of OFDM symbol. The second algorithm is the Two-Steps Algorithm. The main advantage of this algorithm is the fact that the minimal data rate required for each user is respected, which means that the individual QoS is achieved.

The algorithms proposed are based on the modifications of the Water-filling Algorithm, defined as Modified Water-filling Algorithm - Maximization of the Throughput, the Modified Water-filling Algorithm - Robustness and the Modified Water-filling Algorithm - Maximization of the Robustness. Those algorithms utilize the frequency response of the communication channels and the minimal throughput of each user to allocate the resources of the systems. Their performances are analyzed in different communication channels, where the results of the distribution of the resources are more equality among the users comparing it with the obtained by the Water-filling algorithm and has a higher average throughput when compared with the Two-steps algorithm.

Keywords: OFDMA, Adaptative allocation, Water-filling, Channel frequency response, QoS.

# Capítulo 1

## Introdução

A técnica de Múltiplo Acesso por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) está se tornando uma das principais soluções para aumentar a eficiência espectral de sistemas de comunicação com múltiplo acesso frente a canais seletivos em frequência [1]. Atualmente, esta técnica vem sendo utilizada em diversos padrões de comunicação. Pode-se destacar a aplicação do OFDMA no sistema LTE (*Long Term Evolution*) [2], que é uma evolução do padrão de telefonia de terceira geração (3G - *3<sup>rd</sup> Generation*), e também no LTE-*Advanced* [3], considerado um sistema de quarta geração (4G - *4<sup>th</sup> Generation*) das comunicações móveis. Outro sistema que também utiliza o OFDMA é o IEEE 802.16, comumente chamado de WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [4]. O OFDMA também é usado no padrão IEEE 802.22 para WRAN (*Wireless Regional Area Networks*) [5], que viabiliza a operação dos rádios cognitivos nas faixas VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*).

Apesar de existirem padrões consolidados que utilizam o OFDMA, como os citados anteriormente, o uso desta técnica para alocação de recursos ainda é tema de estudos. Um dos desafios em utilizá-la consiste em atingir alta eficiência espectral por usuário, explorando as características do canal de comunicação. Devido à seletividade em frequência do canal, o desvanecimento não ocorre em

todas as subportadoras do símbolo OFDM, assim a diversidade em frequência é explorada pelo OFDMA.

Pelo fato do canal entre os usuários serem independentes e descorrelacionados, os nulos espectrais dos diferentes canais tem baixa probabilidade de ocorrerem nas mesmas faixas de frequência. Assim, a alocação dos recursos, tanto de subportadoras, quanto de bits, deve explorar essas características para fazer a melhor utilização do canal de comunicação. A escolha do algoritmo de alocação é de fundamental importância para maximizar a eficiência espectral. Novamente, é importante salientar que os algoritmos de alocação de recursos devem considerar a resposta em frequência do canal para alcançar a melhor forma de alocar os recursos [6–12].

O algoritmo de alocação de subportadoras que emprega o teorema de *Water-filling*, apresentado em [11] e [12] consiste apenas na análise da resposta em frequência do canal no procedimento de distribuição de subportadoras. Com isso, os usuários com melhores condições de transmissão são favorecidos. Além da análise do canal, as vazões mínimas de cada usuário também são consideradas no processo de alocação dos recursos de transmissão entre os usuários em [6–10]. Neste caso, todos os usuários transmitem dados em todos os símbolos OFDM para manter, no mínimo, a vazão definida pela QoS (*Quality of Service*).

Este trabalho tem como objetivo apresentar três novas propostas de alocação de recursos para sistemas OFDMA, comparando seus desempenhos com outros esquemas de alocação de recursos. Os algoritmos a serem utilizados como comparações são o AW (Algoritmo de *Water-filling*) e o ATS (Algoritmo *Two-Steps*) [10]. O AW maximiza a vazão do símbolo OFDM utilizando apenas a resposta em frequência do canal para determinar a alocação das subportadoras e bits. O ATS faz a alocação dos recursos utilizando tanto a resposta em frequência do canal, quanto a QoS de cada usuário.

O primeiro algoritmo proposto é o AWM-MV (Algoritmo de *Water-filling*

Modificado - Maximização da Vazão), que também aloca os recursos com a análise da resposta em frequência do canal e das vazões que definem a QoS dos usuários. O segundo e o terceiro algoritmos propostos, o AWM-R (Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Robustez) e o AWM-MR (Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Maximização da Robustez), têm como objetivo tornar o sistema de comunicação mais robusto, alocando para cada subportadora uma quantidade de bits inferior ao que ela é capaz de transportar. Em ambos os algoritmos, a análise da vazão mínima dos usuários também é realizada. Ao atingir as vazões mínimas, o AWM-R pode alocar mais bits ao símbolo OFDM, enquanto que no AWM-MR, as cargas de bits são reduzidas de forma que todas as subportadoras sejam alocadas, sem a adição de mais bits ao símbolo OFDM além das vazões mínimas alocadas para cada usuário.

Para atingir esse objetivo, este trabalho está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta as características do símbolo OFDM e duas técnicas que proporcionam múltiplo acesso junto ao OFDM, o OFDM-TDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Time Division Multiple Access*) e o OFDMA. No OFDMA são apresentadas as vantagens e desvantagens de utilização dos vários tipos de alocações de subportadoras e bits para os usuários. O Capítulo 3 descreve o princípio do teorema de *Water-filling* como um procedimento de otimização da distribuição da potência aos usuários. Além disso, são analisados dois algoritmos de alocação adaptativa presentes na literatura. No Capítulo 4, são apresentados três novos algoritmos de alocação adaptativa, um que maximiza a vazão e outros dois que aumentam a robustez do sistema, todos estes atendendo à QoS mínima dos usuários. A análise de desempenho dos quatro algoritmos e as comparações entre eles também são analisadas neste capítulo. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Princípios do Múltiplo Acesso por Divisão em Frequências Ortogonais

O uso de técnicas de transmissão com múltiplas portadoras proporciona maior robustez aos dados em canais seletivos em frequência [13]. Nesse contexto, para atingir a mesma eficiência espectral de um sistema de portadora única em uma mesma largura de faixa, o OFDM se destaca pela utilização de frequências ortogonais, sendo largamente utilizado nos sistemas de comunicação, como por exemplo, o DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) [14] e o ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial) [15].

Atualmente, além de atender às demandas de transmissão em altas taxas, deve-se também proporcionar acesso ao sistema a múltiplos usuários. Dentre as diversas técnicas de múltiplo acesso aplicadas em conjunto com o OFDM destaca-se o OFDMA. Esta técnica permite alocar mais de um usuário nas diversas sub-portadoras que compõem o mesmo símbolo OFDM. O LTE [2] e o WiMAX [16] são exemplos de padrões que utilizam essas técnicas.

Neste capítulo são apresentadas as características da técnica OFDM e as técnicas que o utilizam para proporcionar múltiplo acesso.

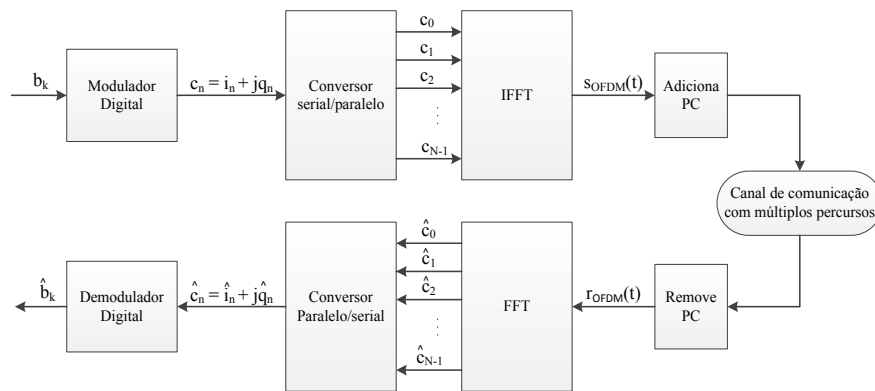


## 2.1 OFDM

Na técnica OFDM, a largura de faixa do canal é dividida em subcanais de modo que diversos feixes de dados paralelos são transmitidos, usando diferentes subportadoras multiplexadas no domínio da frequência [18]. Uma das vantagens desse tipo de transmissão é a robustez frente a desvanecimentos seletivos em frequência [16], onde cada subportadora sofre desvanecimento plano desde que sua largura de faixa seja menor que a banda de coerência do canal [19]. Neste caso, os efeitos da ISI (*Inter Symbol Interference*) são minimizados e o procedimento de equalização na recepção torna-se mais simples [18]. O OFDM emprega subportadoras ortogonais, atingindo uma eficiência espectral praticamente igual àquela obtida em esquemas de portadora única, mas com maior robustez frente aos efeitos dos múltiplos percursos presentes no canal de comunicações [20].

Para eliminar os efeitos da interferência entre símbolos OFDM sucessivos, causada pelos atrasos de propagação do canal, é introduzido o intervalo de guarda entre os símbolos [1]. Este intervalo deve ser igual ou maior que o maior atraso provocado pelo canal. Na técnica OFDM é utilizado o conceito de prefixo cíclico (PC) para preencher o intervalo de guarda [13].

A Figura 2.1 apresenta o diagrama em blocos de um transmissor e receptor OFDM.



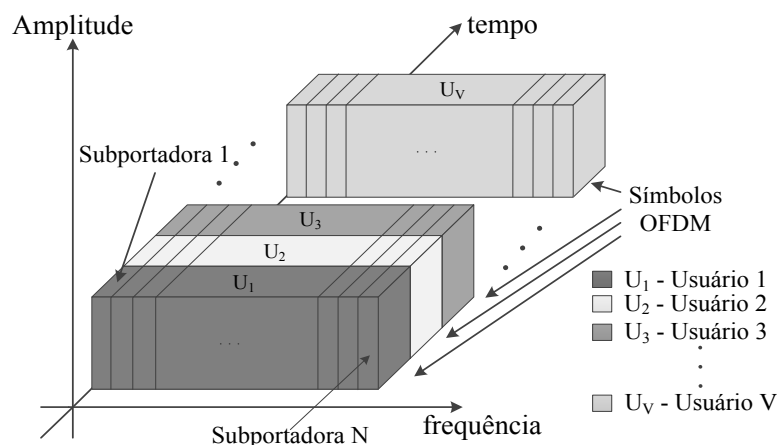
**Figura 2.1:** Diagrama em blocos de um sistema OFDM.

## 2.2 Técnicas de múltiplo acesso

Esta seção apresenta algumas técnicas de múltiplo acesso utilizadas em conjunto com a técnica OFDM para o compartilhamento de recursos de transmissão entre vários usuários. Serão apresentadas as técnicas OFDM-TDMA e OFDMA, sendo o OFDMA analisado com mais detalhes.

### 2.2.1 OFDM-TDMA

Esta técnica [21] proporciona múltiplo acesso pelo compartilhamento temporal do canal de comunicação. Desta forma, cada usuário utiliza todas as subportadoras de um símbolo OFDM para transmitir seus dados em janelas de tempo pré-definidas, como ilustrado na Figura 2.2.



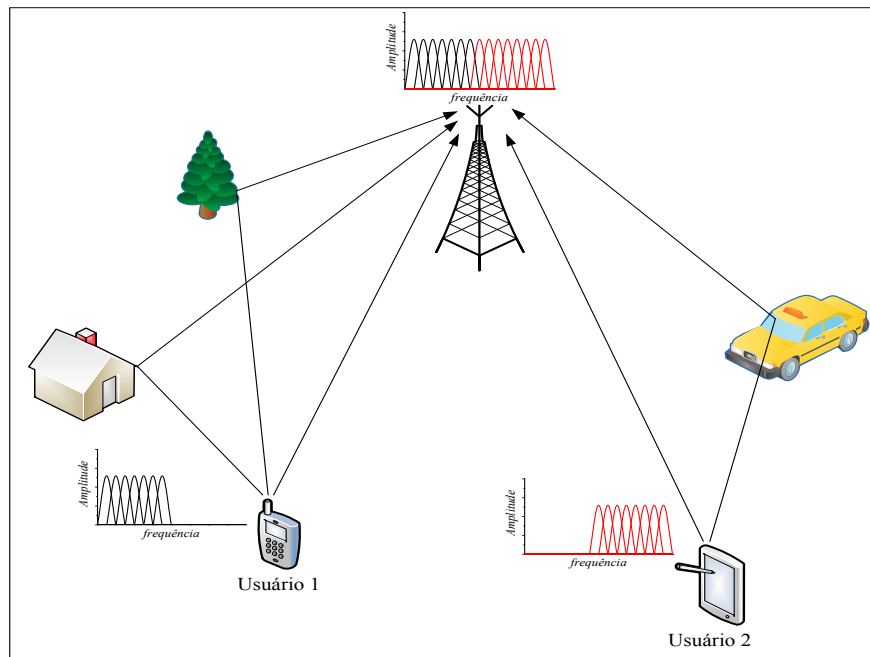
**Figura 2.2:** Técnica de múltiplo acesso OFDM-TDMA.

A eficiência espectral desta técnica pode ser baixa quando o volume de dados a ser enviado pelos usuários é menor que a capacidade dos símbolos OFDM. Neste cenário, diversas subportadoras não são utilizadas, reduzindo assim a eficiência espectral do sistema. Uma solução para resolver esse problema é a utilização do OFDMA.

### 2.2.2 OFDMA

O múltiplo acesso por divisão em frequências ortogonais consiste em alocar subportadoras de um mesmo símbolo OFDM para diferentes usuários, ou seja, o símbolo OFDM transmitido em um dado instante de sinalização carrega informações provenientes de diversos usuários distintos. Assim, aumenta-se a probabilidade de os recursos dos símbolos OFDM serem efetivamente utilizados.

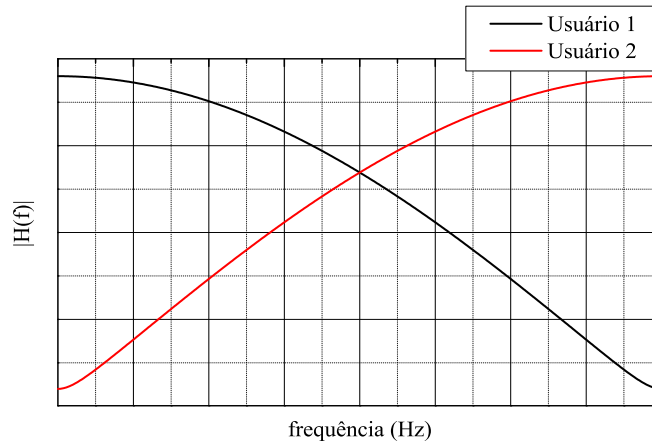
Assumindo um cenário onde os canais de comunicação são estatisticamente independentes e descorrelacionados [18], as subportadoras do símbolo OFDM, que sofrem desvanecimento seletivo em frequência no canal de um usuário, têm baixa probabilidade de estarem nas mesmas condições nos outros usuários. A Figura 2.3 apresenta um cenário onde dois usuários que experimentam canais independentes podem compartilhar as subportadoras de um símbolo OFDM.



**Figura 2.3:** Exemplo de cenário de comunicação com dois usuários que compartilham o mesmo símbolo OFDM.

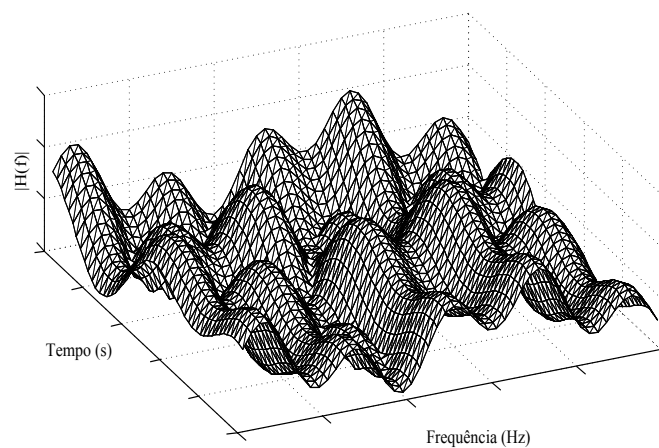
A Figura 2.4 apresenta um exemplo da resposta em frequência dos canais dos usuários da Figura 2.3. Nesse exemplo, nota-se que a ação dos múltiplos percursos faz com que a resposta do canal varie ao longo da frequência e que a independência

dos canais dos usuários resulte em respostas em frequência distintas entre eles. Assim, a probabilidade de ambos os canais apresentarem uma elevada atenuação na mesma faixa de frequência é baixa.



**Figura 2.4:** Canais entre dois usuários e a ERB (Estação Rádio-base) que compartilham o mesmo símbolo OFDM.

Em ambientes onde exista mobilidade, a resposta em frequência do canal passa a ser variante no tempo. Neste caso, os subcanais mais adequados para a transmissão dos dados de um usuário variam de um símbolo para outro, de acordo com o tempo de coerência do canal. Como exemplo, a Figura 2.5 ilustra um canal seletivo em frequência e variante no tempo.



**Figura 2.5:** Canal seletivo em frequência e variante no tempo.

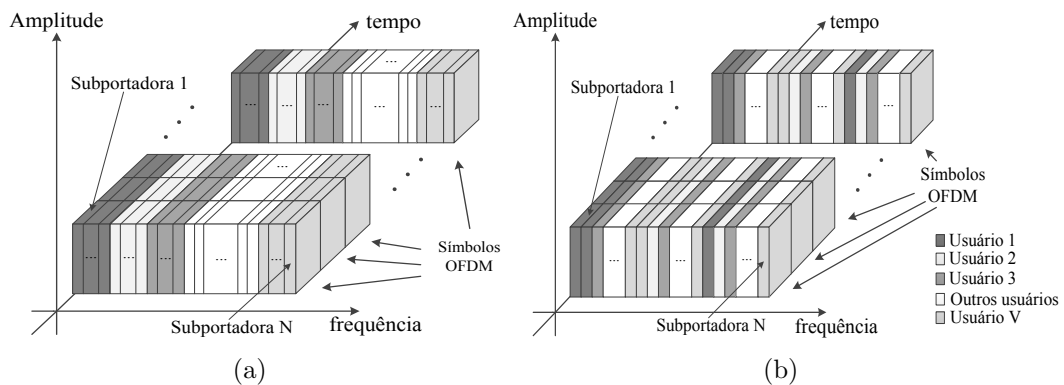
Nas próximas seções são apresentadas as técnicas de alocação de recursos estática e adaptativa. Será feita uma análise dessas técnicas para demonstrar que

a escolha da técnica de alocação de recursos aos usuários baseada na resposta em frequência do canal resulta no aumento da eficiência de transmissão do sistema.

### 2.2.2.1 OFDMA com alocação estática

A técnica OFDMA com alocação estática distribui grupos fixos de subportadoras aos usuários no símbolo OFDM, de modo que ao longo da comunicação os usuários ocupem sempre as mesmas subportadoras para transmissão de seus dados.

Na Figura 2.6 é apresentada duas formas de alocação estática. Na primeira, mostrada na Figura 2.6 (a), os usuários recebem apenas um grupo de subportadoras, enquanto que na segunda, mostrada na Figura 2.6 (b), vários pequenos grupos entrelaçados de subportadoras são alocados aos usuários. Neste caso, a alocação entrelaçada apresenta a vantagem de reduzir erros em rajada, de modo que os esquemas de codificação de canal se tornem mais eficazes, minimizando a probabilidade de erro no receptor.

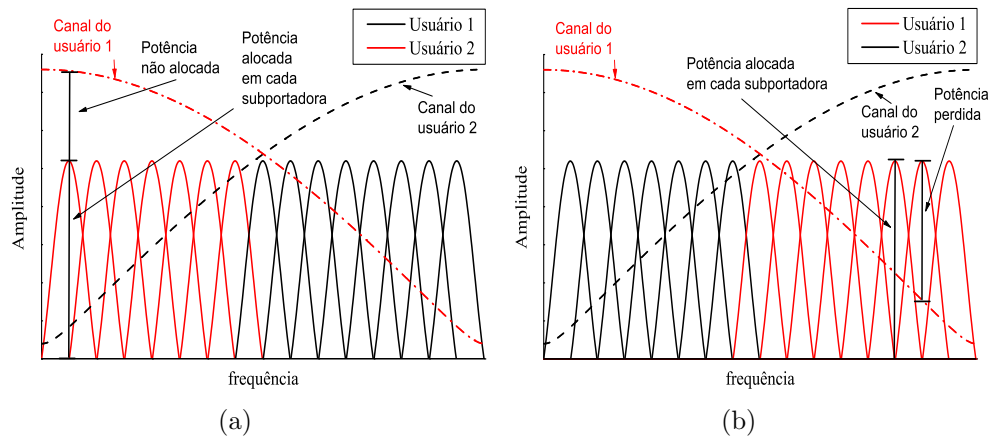


**Figura 2.6:** Formas de alocação estática: (a) OFDMA não entrelaçado e (b) OFDMA entrelaçado.

A alocação fixa das subportadoras apresenta a desvantagem de subutilizar ou sobreutilizar o canal de comunicação. Considera-se que um canal de comunicação é subutilizado quando o número de bits transportado pelo símbolo OFDM é menor que sua capacidade máxima. Isso ocorre quando um usuário aloca uma quantidade de bits em uma subportadora menor do que sua capacidade máxima. A Figura 2.7 (a) apresenta este cenário, onde estão representados a resposta em

frequência dos canais dos usuários e as potências alocadas em cada subportadora. Nota-se que em algumas subportadoras existe a possibilidade de adicionar mais potência do que realmente foi alocada, caracterizando a subutilização da símbolo OFDM.

A sobreutilização do canal de comunicação ocorre quando a ordem de modulação alocada a uma dada subportadora é maior do que ordem de modulação necessária para atender a SER (*Symbol Error Rate*) desejada, podendo acarretar uma elevada taxa de erro de símbolo na recepção. A sobreutilização é ilustrada na Figura 2.7 (b), onde também são representados a resposta em frequência dos canais dos usuários e as potências alocadas em cada subportadora. Em algumas delas, nota-se que a potência alocada será desperdiçada, pois o canal irá degradar essas subportadoras, acarretando erros na recepção.



**Figura 2.7:** Utilização do canal de comunicação: (a) Subutilização e (b) sobreutilização

Todavia, mesmo não atingindo a máxima eficiência espectral do canal, a técnica de alocação fixa apresenta a vantagem de ter baixa complexidade de implementação. Uma solução para minimizar a desvantagem relacionada à ocupação do canal na técnica de alocação fixa é a utilização de esquemas de alocação adaptativa com análise prévia da resposta em frequência dos canais dos usuários. Esta solução é viável em cenários onde haja variações das características de propagação ao longo do tempo.

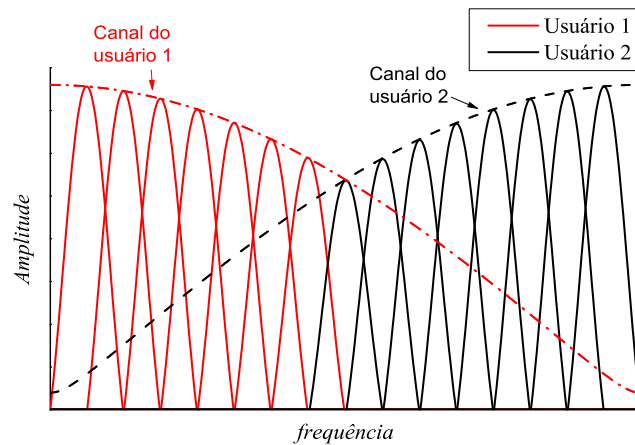
### 2.2.2.2 OFDMA com alocação adaptativa

A técnica OFDMA com alocação adaptativa apresenta maior eficiência espectral em canais seletivos em frequência e variantes no tempo, uma vez que a alocação de recursos leva em consideração a resposta em frequência do canal. Assim, no OFDMA adaptativo, uma dada subportadora é alocada para um usuário quando este puder utilizá-la de forma eficiente. Obviamente, para que este uso eficiente seja possível, é necessário utilizar um esquema de modulação adaptativa [17] onde o número de bits por símbolo seja definido em função da taxa de erro de bit máxima tolerada, da potência disponível, da resposta do canal na frequência da subportadora e do nível de ruído na recepção.

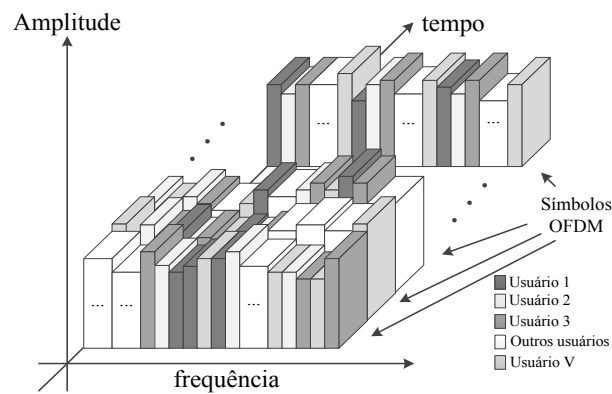
A Figura 2.8 apresenta um exemplo de alocação adaptativa de subportadora dos dois usuários dos canais da Figura 2.4, onde são representados a resposta em frequência dos canais dos usuários e as potências alocada a cada subportadora. Nota-se que a potência alocada em cada subportadora é diferente para cada uma delas e esta variação é proporcional a variação da resposta em frequência dos canais, de modo a evitar a subutilização ou sobreutilização do canal de comunicação. Na mesma figura 2.8, o primeiro usuário ocupa a primeira metade do símbolo OFDM, enquanto que o segundo usuário ocupa a segunda metade, utilizando as faixas de frequência com as melhores condições de propagação. Entretanto, o preço pago para fazer uma melhor utilização do canal de comunicação é o aumento da complexidade de implementação da técnica de alocação.

A Figura 2.9 apresenta um exemplo de alocação de subportadoras e bits, onde estas alocações variam em função da resposta em frequência do canal de cada usuário. Nesta figura, cada bloco corresponde a um conjunto de subportadoras alocadas a um usuário, onde estes blocos variam de posição e amplitude, representando as variações de alocação de subportadoras e bits, respectivamente.

O procedimento de distribuição das subportadoras e das suas ordens de modulação é realizado pelos algoritmos de alocação de recursos, levando em conta



**Figura 2.8:** Distribuição das subportadoras no OFDMA com alocação adaptativa.



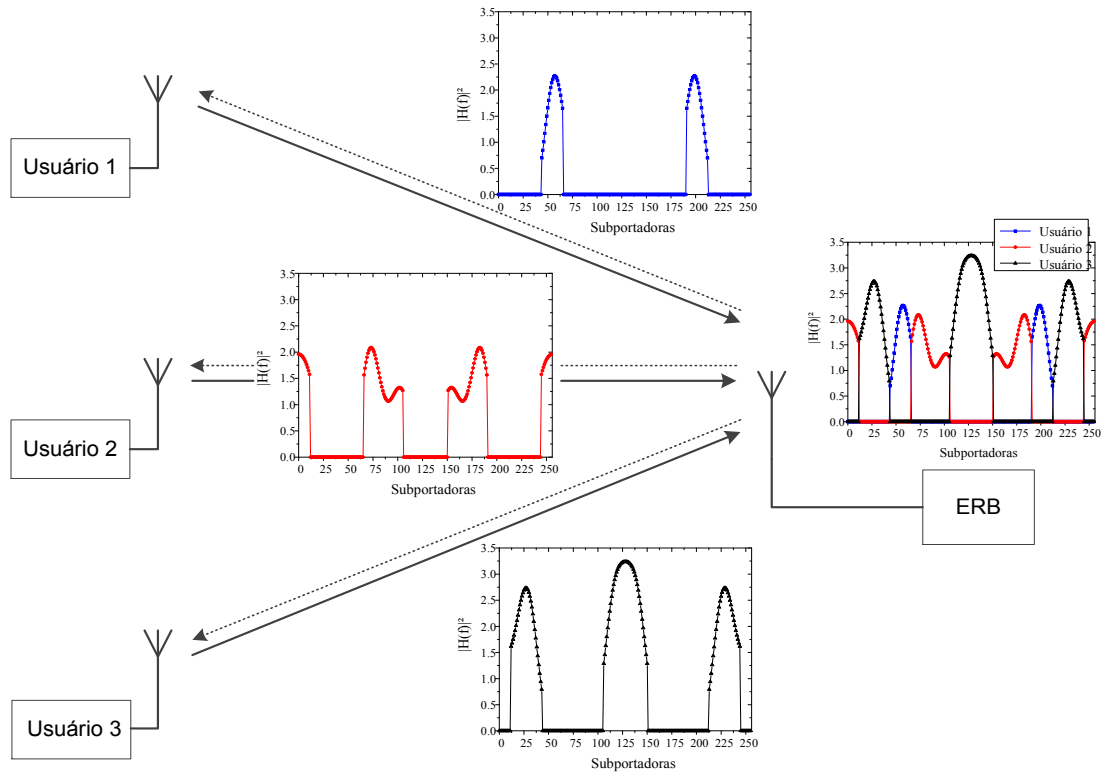
**Figura 2.9:** Exemplo de alocação adaptativa de subportadora de um símbolo OFDM.

as condições dos canais de comunicação e também as demandas dos usuários. Dentre os diversos algoritmos existentes na literatura, destacam-se: (i) algoritmo que otimiza a vazão total, com o objetivo de maximizar a eficiência espectral do sistema; (ii) algoritmos de distribuição dos recursos para atingir as vazões mínimas de cada usuário e (iii) algoritmos de alocação que minimizam a potência dos usuários com a análise da vazão mínima.

Como exemplo de algoritmo de alocação de recursos com a maximização da vazão de dados do sistema, a Figura 2.10 ilustra a distribuição das subportadoras entre três usuários. Neste caso, cada usuário ocupa as subportadoras que podem alocar as maiores cargas de bits, consequentemente as subportadoras com as melhores resposta em frequência, obtendo uma maior eficiência espectral do



sistema.



**Figura 2.10:** Alocação de subportadoras de um algoritmo de maximização da vazão de dados.

## 2.3 Conclusão

Nos canais de comunicações móveis, onde a presença de múltiplos percursos é uma realidade, a utilização da técnica OFDM aumenta a robustez do sinal transmitido frente à seletividade em frequência. As técnicas OFDMA-TDMA e OFDMA são soluções de múltiplo acesso em sistemas OFDM. A técnica OFDMA normalmente resulta em melhor utilização dos recursos do canal, pois comumente um usuário não emprega todas as subportadoras de um símbolo OFDM para a transmissão de seus dados. Como no OFDMA um usuário recebe apenas a quantidade de subportadoras necessária para atender a sua demanda, os recursos do sistema são aproveitados de forma mais eficiente.

Embora a alocação estática de subportadoras seja simples, esta solução não

permite explorar adequadamente os canais de comunicação. O OFDMA com alocação adaptativa explora os canais de comunicação dos usuários em função das respostas em frequência dos mesmos. Mesmo que isto requeira maior complexidade, como a estimação da resposta em frequência dos canais, esta solução resulta em maior eficiência espectral. Isso pode ser observada em [22], onde é apresentado uma proposta de alocação adaptativa de subportadoras e bits com o propósito de minimizar a potência de transmissão. Seus resultados são comparados com as técnicas OFDM-TDMA, OFDM-FDMA não entrelaçada e OFDM-FDMA entrelaçada e verifica-se que o OFDMA apresenta ganhos entre 3 e 4 dB na relação sinal-ruído para uma mesma probabilidade de erro de bit, podendo atingir maior eficiência espectral.

## Capítulo 3

# Algoritmos de alocação adaptativa

A alocação dos recursos do sistema de comunicação aos usuários em um símbolo OFDM é um dos desafios da técnica OFDMA. Para que o processo de alocação seja eficiente, o algoritmo que determina as alocações das subportadoras e suas respectivas cargas de bits aos usuários deve levar em consideração as condições dos canais de comunicação.

O objetivo deste capítulo é apresentar duas abordagens distintas para a implementação do algoritmo de alocação de recursos aos símbolos OFDM. A primeira abordagem, conhecida com AW (Algoritmo de *Water-filling*, consiste em empregar o teorema de *Water-filling*, que visa maximizar a vazão total do sistema. Já a segunda abordagem [10], conhecida como ATS (Algoritmo *Two-Steps*), além de analisar a resposta em frequência do canal, analisa também as demandas mínimas dos usuários no processo de alocação. Com isso, este algoritmo proporciona uma distribuição mais justa dos recursos, resultando em uma menor vazão do sistema se comparado ao AW.

### 3.1 Modelo do sistema

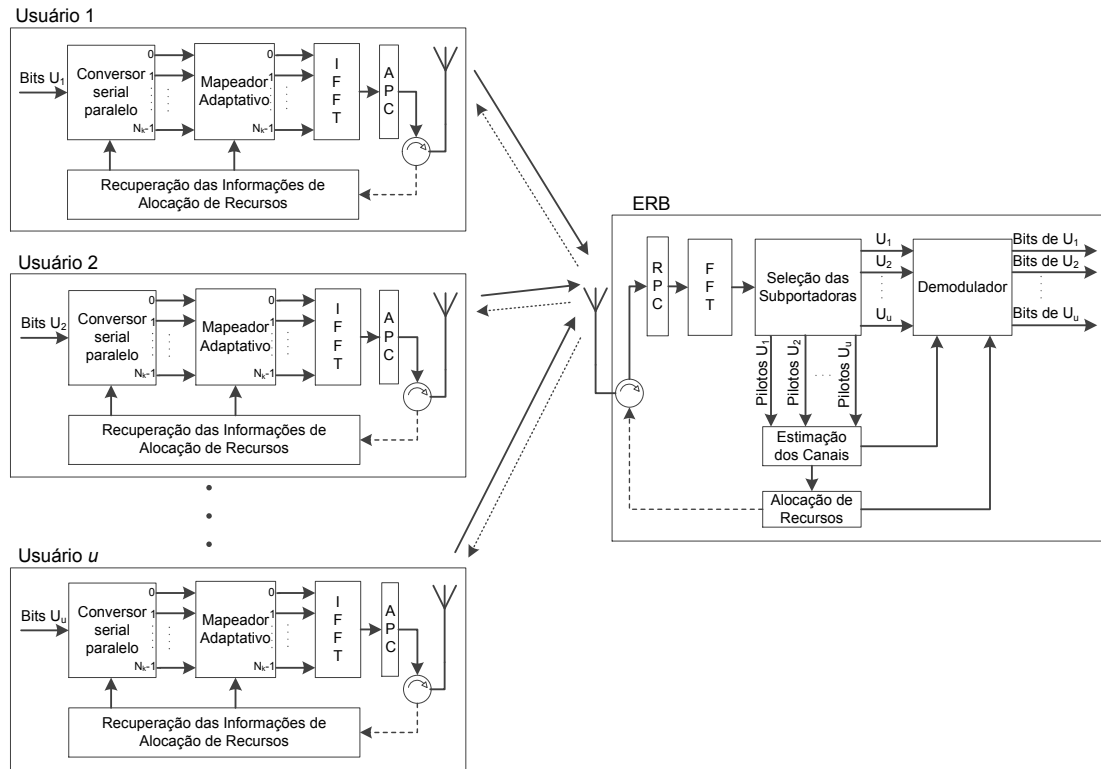
O modelo de sistema de comunicação sem fio de alta taxa utilizado nesse trabalho é constituído de  $u$  usuários e uma ERB (Estação RadioBase). Considera-se que a ERB executa os algoritmos de alocação de recursos, pois apenas ela é capaz de estimar a resposta em frequência dos canais de todos os usuários. Esta concepção permite a utilização da técnica OFDMA tanto no enlace de descida quanto no enlace de subida. Em ambos os sentidos de transmissão, a ERB deve informar a alocação das subportadoras e de suas respectivas cargas de bits aos usuários. Outros fatores determinantes para que a alocação dos recursos de transmissão seja realizado pela ERB é o seu alto desempenho e capacidade de processamento, bem como, a utilização de alta potência de transmissão.

Os resultados apresentados neste trabalho consideram o uso do OFDMA no enlace de subida e na Figura 3.1 é apresentado o diagrama em blocos desse sistema.

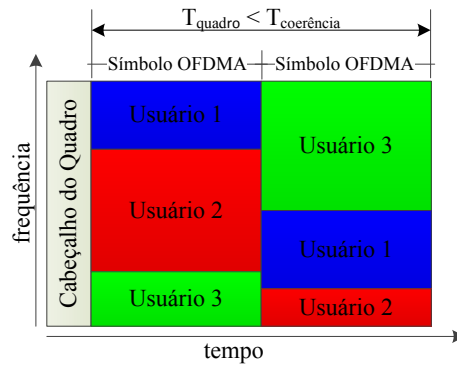
A transmissão da informação de alocação de subportadoras e bits para os usuários requer o aumento do cabeçalho do quadro de dados do sistema, o que reduz a eficiência espectral. No entanto, o uso mais eficiente do canal de comunicação oferece ganho de vazão muito maior do que a redução de vazão em função da transmissão de informação de alocação. Também é importante ressaltar que a queda de eficiência causada por este cabeçalho é proporcional ao comprimento do quadro. Em canais lentos, onde o tempo de coerência é da ordem de grandeza de diversos símbolos OFDM, é possível utilizar quadros maiores, obtendo maior eficiência. A Figura 3.2 apresenta um exemplo do quadro de comunicação da ERB para três usuários.

Ao receber as informações de alocação de recursos da ERB, cada usuário deve ser capaz: i) selecionar suas subportadoras; ii) alocar as quantidades de bits que cada subportadoras irá transportar e iii) mapeá-los aos seus respectivos símbolos.

Os sinais provenientes dos  $u$  usuários chegam na antena da ERB através dos



**Figura 3.1:** Diagrama em blocos simplificado do modelo do sistema do enlace de subida.



**Figura 3.2:** Estrutura do quadro OFDMA.

canais de comunicação. Esses sinais são linearmente somados na antena da ERB e entregues ao bloco RPC (Remove prefixo cíclico), que remove o prefixo cíclico e entrega o sinal resultante ao bloco da FFT. Este bloco transforma o sinal para o domínio da frequência, permitindo a recuperação das informações do símbolo OFDM.

O bloco Seleção das Subportadoras separa as subportadoras de cada usuário,

entregando cada conjunto de subportadoras de dados para a detecção e recuperação dos símbolos, além de entregar as subportadoras piloto de cada usuário para o bloco de estimação de canal. Este bloco é responsável por determinar a resposta em frequência do canal de cada usuário que será empregada na equalização durante o processo de demodulação e também no processo de alocação de recursos. No bloco Alocação de Recursos, os algoritmos de alocação determinam as subportadoras que devem ser empregadas para cada usuário com suas respectivas cargas de bits e encaminha estas informações para os usuários, utilizando um quadro de transmissão.

O sinal proveniente da ERB é recebido pelos usuários e é entregue para o bloco de Recuperação das Informações de Alocação de Recursos, que irá configurar os blocos de conversão serial paralelo e mapeador adaptativo. O bloco de conversão serial paralelo determina as posições no domínio da frequência que deverão ser utilizadas pelo usuário. O bloco mapeador adaptativo aloca os bits em cada subportadora em função da carga definida pela ERB. O bloco da IFFT gera o símbolo OFDM. Em seguida adiciona-se o prefixo cíclico pelo bloco APC (Adiciona Prefixo Cíclico), para então transmitir o sinal para a ERB.

## 3.2 Capacidade do canal e SNR *gap*

A capacidade de um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) [23] é dada por

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}) \text{ [bits por transmissão]}, \quad (3.1)$$

onde SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) é a relação sinal ruído.

Para o sistema de modulação  $M$ -QAM quadrado, pode-se determinar o número de bits a ser alocado em uma subportadora em função da SNR através de [27]

$$P_{es} = 4 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3\text{SNR}}{M-1}} \right), \quad (3.2)$$

onde  $P_{es}$  é a probabilidade de erro de símbolo e  $M = 2^b$  é a quantidade de símbolos da constelação, sendo  $b$  o número de bits transmitidos em um dado símbolo e  $Q(\cdot)$  é definida como

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (3.3)$$

A capacidade do canal apresentada em (3.1) não pode ser atingida na prática por uma modulação  $M$ -QAM. Neste caso, o número de bits por utilização do canal possível com uma modulação  $M$ -QAM é dado por

$$b = \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SNR}}{\Gamma} \right) \text{ [bits por transmissão]}, \quad (3.4)$$

onde  $\Gamma$  é conhecido por SNR *gap* ou SNR normalizado [27] [28] e definido por

$$\Gamma \cong \frac{1}{3} \left[ Q^{-1} \left( \frac{P_{es}}{4} \right) \right]^2.$$

Analisando (3.1) e (3.4), defini-se  $\Gamma$  como sendo o fator de degradação equivalente da SNR em sistemas de modulação  $M$ -QAM, que resulta em uma menor capacidade de transmissão de bits por utilização do canal em comparação com o limite estipulado por Shannon, dado por (3.1).

### 3.3 Teorema de *Water-filling*

Em um sistema de comunicação que utiliza o OFDM, o número de bits transmitidos por um símbolo  $M$ -QAM na  $n$ -ésima subportadora é dado por

$$b_n = \left\lfloor \log_2 \left( 1 + |H_n|^2 \frac{\text{SNR}}{\Gamma} \right) \right\rfloor, \quad (3.5)$$

onde  $H_n$  é a resposta em frequência do canal na  $n$ -ésima subportadoras e  $\lfloor \cdot \rfloor$  é o maior inteiro menor que o argumento.

Sendo que

$$\text{SNR} = \frac{P_n}{\sigma^2}, \quad (3.6)$$

onde  $P_n$  é a potência alocada para a  $n$ -ésima subportadora e  $\sigma^2$  é a variância do ruído [27]. A quantidade média de bits nas  $N$  subportadoras do símbolo OFDM é dada por

$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\lfloor \log_2 \left( 1 + \frac{|H_n|^2 P_n}{\Gamma \sigma^2} \right) \right\rfloor. \quad (3.7)$$

Assim, para se atingir a máxima capacidade do símbolo OFDM, deve-se otimizar (3.7) com uma apropriada distribuição da potência total entre as  $N$  subportadoras. Logo, deve-se determinar os valores das potências a serem alocadas em cada subportadora,  $P_n$ , sabendo-se que

$$\sum_{n=0}^{N-1} P_n = P, \quad (3.8)$$

sendo  $P$ , uma constante, maior que zero e  $P_n \geq 0$ .

A solução deste problema de otimização pode ser obtida através do método dos multiplicadores de Lagrange [29], tal como pode ser visto no Anexo A. Utilizando este método, tem-se [11]

$$P_n = [K - T_n^{-1}]^+, \quad (3.9)$$

onde  $[\cdot]^+$  define valores maiores que zero,

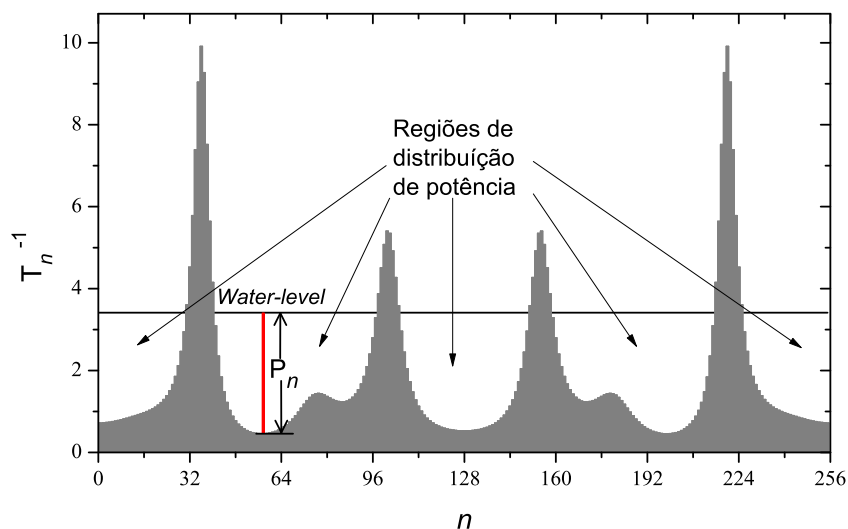
$$T_n = \frac{|H_n|^2}{\Gamma \sigma^2}, \quad (3.10)$$

é a CNR (*Channel-to-Noise Ratio*) na frequência da  $n$ -ésima subportadora e



$$K = \frac{P}{N} + \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} T_n^{-1}, \quad (3.11)$$

é definido como o limiar máximo para distribuição de potência em cada subportadora, denominado de *Water-level*. A Figura 3.3 ilustra um exemplo do teorema de *Water-filling*, onde são destacadas as regiões de distribuição de potência, o *Water-level* e o valor inverso da CNR.



**Figura 3.3:** Regiões de distribuição de potência, relação inversa de CNR e o valor do Water-level.

Observando o resultado apresentado em (3.9) é possível concluir que o teorema de *Water-filling* aloca pouca ou nenhuma potência nas subportadoras que sofrem grandes atenuações do canal comunicação, concentrando a potência disponível nas subportadoras que são menos afetadas pelo canal.

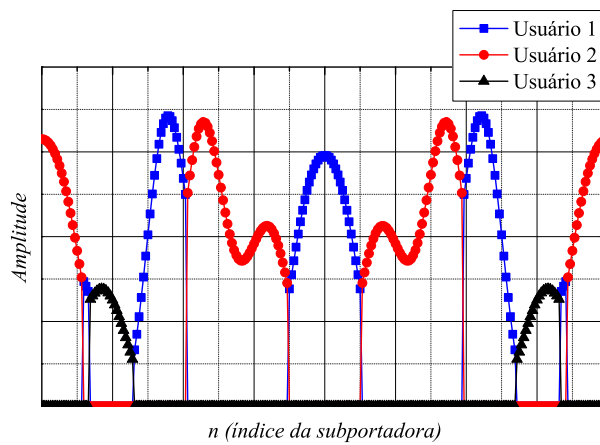
### 3.4 Algoritmo de *Water-filling*

O algoritmo de *Water-filling* (AW) faz alocação de subportadoras para múltiplos usuários em sistemas OFDM empregando o teorema de *Water-filling*. A distribuição das subportadoras obtida com este procedimento maximiza a vazão do sistema OFDM, pois uma subportadora é atribuída para o usuário que pode

melhor explorá-la em termos de alocação de potência.

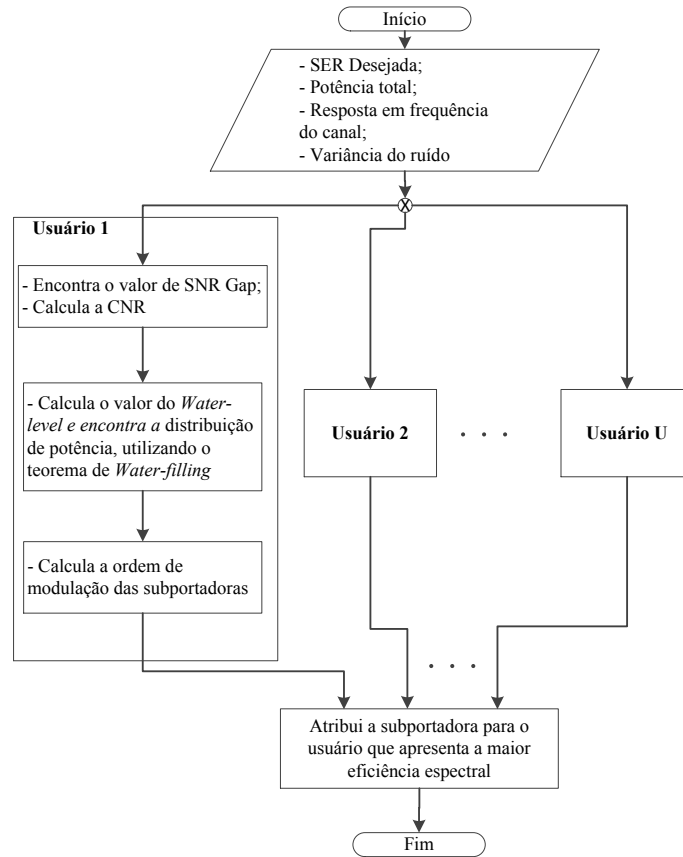
Inicialmente, definidas as potências disponíveis para cada usuário, a probabilidade de erro de símbolo alvo e estimada a resposta em frequência do canal e a variância do ruído, este algoritmo encontra as distribuições de potências em cada uma das subportadora de todos os usuários através de (3.9). Com os valores de potências, é calculada a quantidade de bits que cada uma das subportadoras pode transmitir, segundo (3.5).

Uma dada subportadora será alocada para o usuário que puder transmitir a maior carga de bits, ou seja, que conseguir atingir a maior eficiência espectral. Deste modo, este algoritmo resulta na maior vazão de dados possível por símbolo OFDM. No entanto, como este procedimento de alocação não leva em consideração as demandas mínimas de vazão dos usuários, aqueles que experimentam as piores condições de comunicação, como menor SNR ou um canal de comunicação mais degradado, pode receber pouca ou nenhuma subportadora, ao passo que os usuários que experimentam melhores condições de comunicação passam a receber a maior parte dos recursos disponíveis do sistema. A Figura 3.4 apresenta um exemplo de alocação de subportadoras em um símbolo OFDM, onde neste caso o usuário 3 recebeu poucas subportadoras por utilizar um canal de comunicação ruim, se comparado com os usuários 1 e 2.



**Figura 3.4:** Exemplo de alocação de subportadora do AW.

A Figura 3.5 apresenta o fluxograma deste algoritmo generalizado para  $U$  usuários.



**Figura 3.5:** Fluxograma do algoritmo de Water-filling aplicado em  $U$  usuários.

Ao final da alocação dos recursos pelo AW, o usuário que utiliza o canal de comunicação com as melhores condições de propagação recebe o maior número de subportadoras do que o usuário que utiliza o canal com degradações. Neste caso, a alocação de subportadoras e bits variam de acordo com o canal de comunicação. Usuários que sofrem com a ação seletiva do canal por um período longo de tempo terão suas vazões comprometidas por receberem pouca ou nenhuma subportadora.

Na próxima seção, será apresentado outro algoritmo de alocação de recurso, com o objetivo de minimizar estes problemas.

### 3.5 Algoritmo *Two-Steps*

O Algoritmo *Two-Steps* (ATS) [10] considera tanto a resposta em frequência do canal quanto as vazões mínimas de dados de cada usuário durante o processo de alocação de recursos. Nessa abordagem, todos os usuários recebem uma quantidade suficiente de subportadoras para atender, ao menos, as vazões mínimas que definem suas QoS.

O procedimento de alocação adaptativa de subportadoras e bits desse algoritmo utiliza dois passos. O primeiro estima-se a quantidade de subportadoras a ser concedida para cada usuário, analisando a vazão mínima, a potência disponível a cada um deles e o valor da CNR média. A CNR média é dada por

$$\overline{T}_u = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{u,n}, \quad (3.12)$$

onde

$$T_{u,n} = \frac{|H_{u,n}|^2}{\Gamma_u \sigma^2} \quad (3.13)$$

é a CNR da  $n$ -ésima subportadora do  $u$ -ésimo usuário,  $H_{u,n}$  é a resposta em frequência do  $u$ -ésimo usuário na  $n$ -ésima subportadora e  $\Gamma_u$  é o SNR *Gap* do  $u$ -ésimo usuário.

Inicialmente, é calculado o número de subportadoras que cada usuário recebe através de

$$s_u = B_{min_u} / b_{max}, \quad (3.14)$$

onde  $B_{min_u}$  é a vazão mínima de cada usuário e  $b_{max}$  é o número máximo de bits que uma subportadora pode transmitir no sistema, correspondente a máxima ordem de modulação. Neste primeiro passo, a soma do número de subportadoras atribuída aos usuários é menor do que o número de subportadoras disponíveis  $N$ . Assim, novas subportadoras são alocadas aos usuários até que a potência total

de cada um, dada por

$$Pt_u = s_u \frac{(2^{\frac{B_{min_u}}{s_u}} - 1)}{\overline{T_u}}, \quad (3.15)$$

não exceda a potência disponível para cada usuário, definida por  $P_u$ .

Caso o número de subportadoras atribuídas aos usuários ainda seja menor que  $N$ , onde  $N$  é o número máximo de subportadoras, a potência disponível ( $P_u$ ) é reduzida e o procedimento se repete até não haver mais subportadoras restantes. Tipicamente, a redução de potência usado neste processo é igual a 0,01. Este valor permite uma relação de compromisso entre tempo de convergência e precisão do algoritmo.

Caso o número total de subportadoras alocadas para os usuários ultrapasse o número de subportadoras disponíveis no símbolo OFDM, é retirado uma subportadora do usuário que apresenta a menor diferença entre a potência calculada por

$$Pt'_u = (s_u - 1) \frac{\left(2^{\frac{B_{min_u}}{(s_u-1)}} - 1\right)}{\overline{T_u}} \quad (3.16)$$

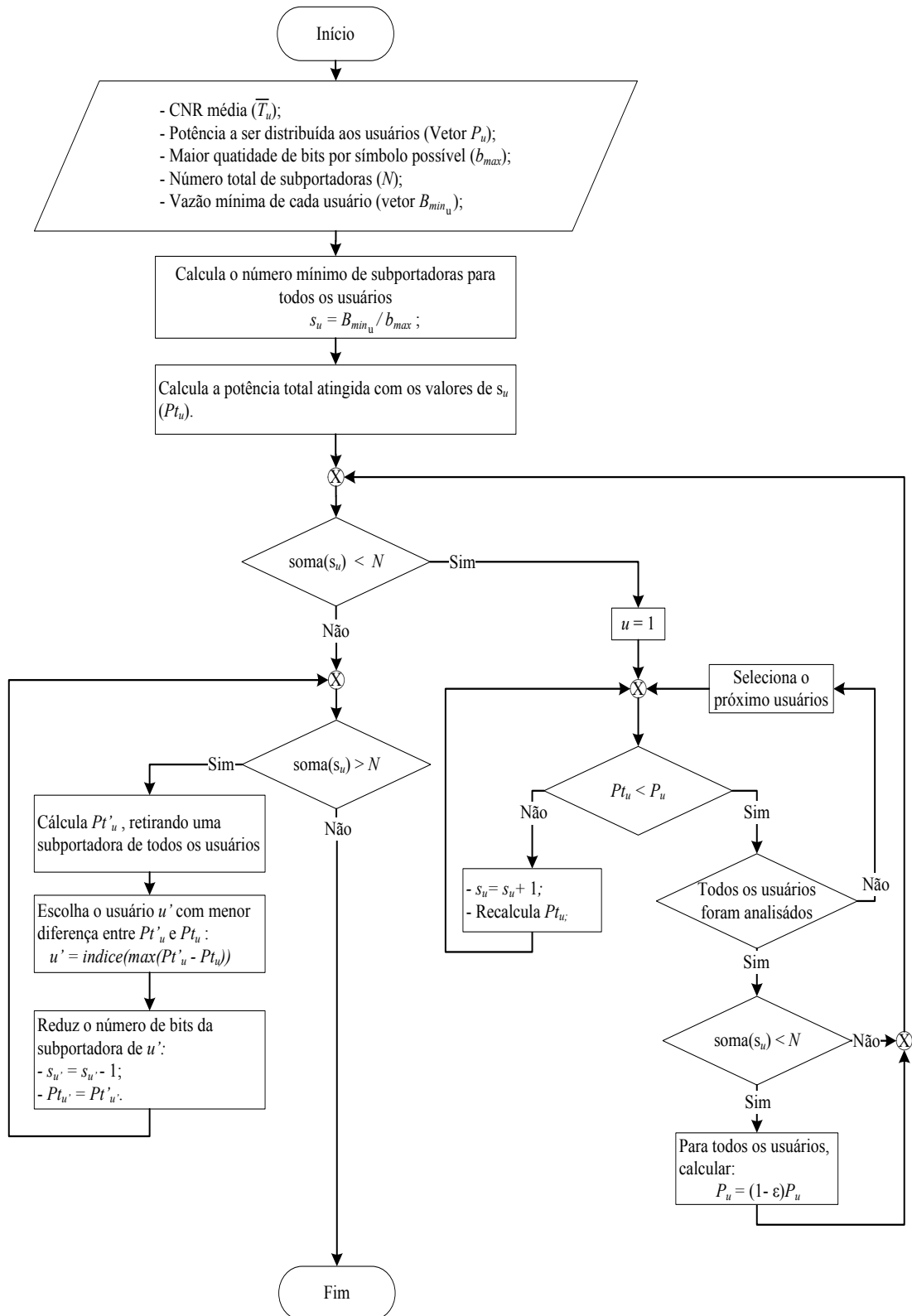
e a potência disponível  $Pt_u$ .

Este procedimento se repete até que o número de subportadoras alocada seja igual ao número de subportadoras disponíveis. O fluxograma desse primeiro passo é apresentado na Figura 3.6 com mais detalhes.

No segundo passo são determinadas as posições das subportadoras dos usuários em função da melhor CNR, dado por (3.13). Para isso, é necessário alocar os recursos priorizando os usuários. O primeiro usuário prioritário é o que apresentar o maior valor dado por

$$\rho 0_u = \frac{s_u}{N} \quad \forall u. \quad (3.17)$$

Assim, uma subportadora para usuário prioritário com maior CNR é alocada



**Figura 3.6:** Fluxograma do primeiro passo do algoritmo ATS: estima o número de subportadoras por usuário.

e o valor de  $s_u$  é decrementado em uma subportadora.

Defini-se

$$\rho_u = \frac{s_u}{\sum_{u=1}^V s_u} \quad (3.18)$$

como sendo o vetor de prioridade atual, onde  $V$  é o número total de usuários. Com isso, o cálculo dos próximos usuários prioritários é dado por

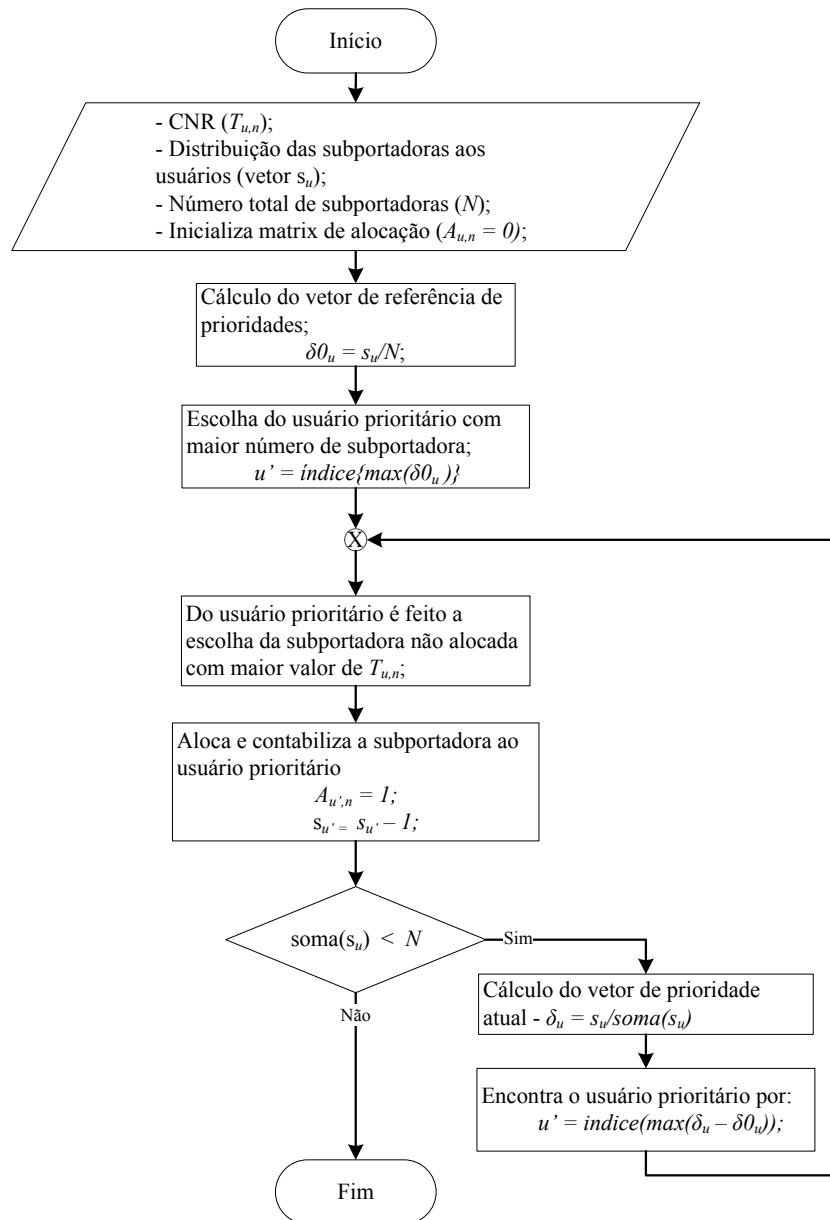
$$u' = \text{índice}(\max(\rho_{0_u} - \rho_u)). \quad (3.19)$$

Encontrando o novo usuário prioritário, o procedimento se repete até que todas as subportadoras sejam alocadas. A Figura 3.7 apresenta o fluxograma do segundo passo com maiores detalhes.

A execução destes dois passos realiza a alocação das subportadoras dos usuários ao símbolo OFDM. Para encontrar as ordens de modulação de cada subportadora, o ATS utiliza o algoritmo de *bit-loading* descrito em [24]. Neste algoritmo é feito a análise das subportadoras alocadas para cada usuário. Ele prioriza a alocação da potência mínima necessária para que o usuário transmita sua vazão mínima. Desta forma, dependendo da resposta em frequência do canal dos usuários, pode existir subportadoras que não receberam bits, acarretando a sua não utilização. O cálculo de potência em uma dada subportadora utilizado por este algoritmo é apresentado em (3.20). A Figura 3.8 apresenta o fluxograma do algoritmo.

$$p_{u,n} = (2^{b_{u,n}}) \frac{\Gamma \sigma^2}{|H_{u,n}|^2} \quad (3.20)$$

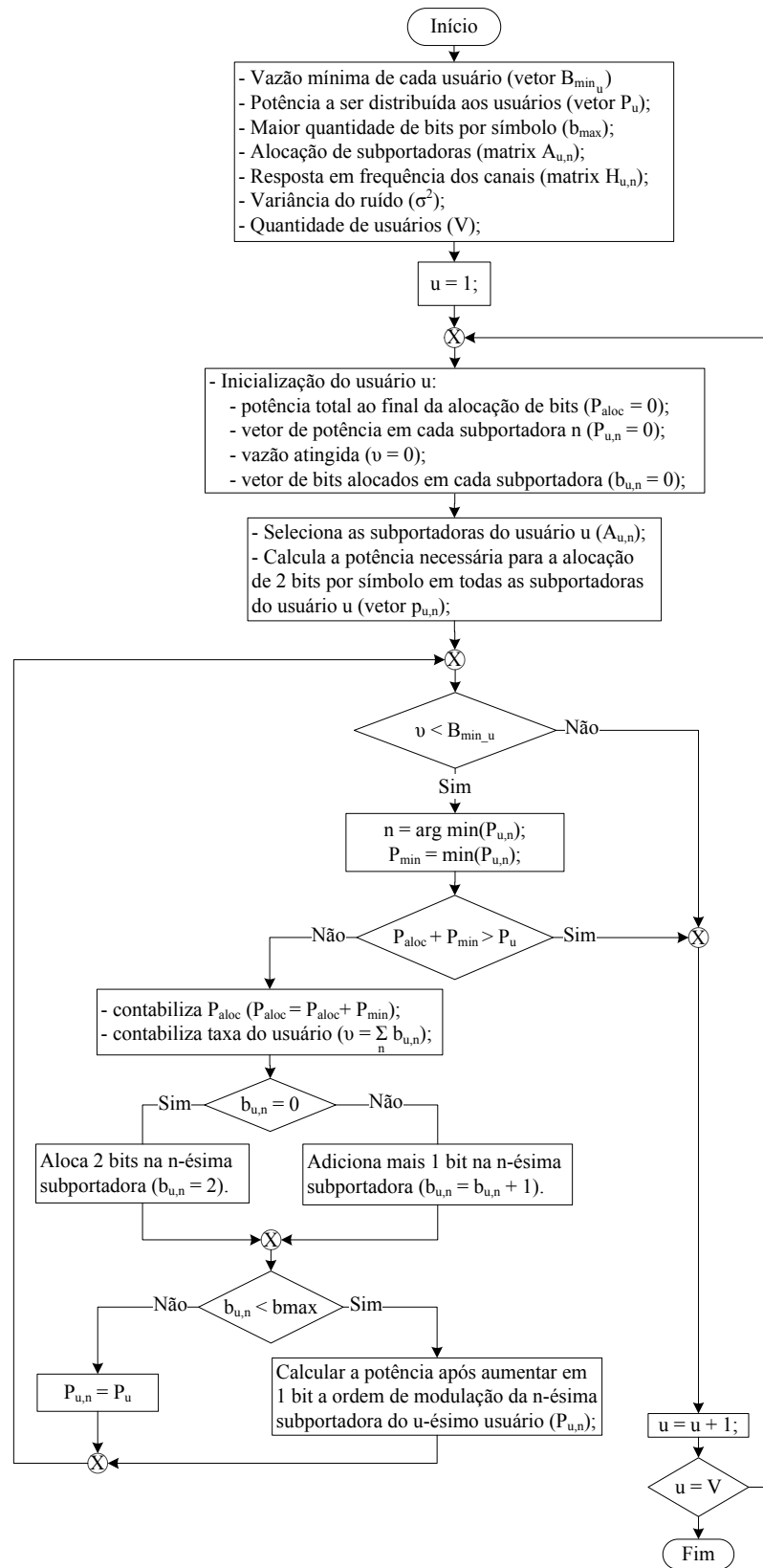
O algoritmo *Two-Steps* apresenta uma vantagem em relação ao algoritmo de *Water-filling* por considerar a demanda mínimas de cada usuários, além da resposta em frequência do canal no processo de alocação de recursos. Com isso, mesmo que um usuário experimente um canal de comunicação com baixa CNR, este irá receber os recursos necessários para atender sua taxa mínima.



**Figura 3.7:** Fluxograma do segundo passo do algoritmo ATS: aloca as subportadoras para os usuário.

A desvantagem deste algoritmo é que nem todas as subportadoras são alocadas para o usuário que pode transmitir a maior carga de bits por símbolo. Isso ocorre devido ao atendimento da demanda mínima dos usuários que experimentam canais mais degradados, resultando na eficiência espectral obtida no ATS menor do que a eficiência espectral obtida com o algoritmo de *Water-filling*.





**Figura 3.8:** Fluxograma do algoritmo de bit-loading.

## 3.6 Conclusão

Um dos grandes desafios em sistemas que empregam o OFDMA como técnica de múltiplo acesso é alocar as subportadoras e os respectivos número de bits por símbolo para os usuários. O algoritmo de *Water-filling* considera apenas as condições de propagação de cada usuário para realizar o processo de alocação de recursos, obtendo um desempenho ótimo no que se refere a eficiência espectral e a vazão do símbolo OFDM. Contudo, este algoritmo pode não atender as demandas mínimas de cada usuário no que se refere a vazão individual de cada um deles.

O algoritmo *Two-Steps* é uma alternativa ao algoritmo de *Water-filling* que considera tanto as respostas em frequência dos canais de comunicação quanto a vazão mínima de cada usuário. Este algoritmo apresenta dois passos, um para a determinação da quantidade de subportadoras para cada usuário e outro para a distribuição dessas subportadoras no símbolo OFDM. Contudo, usuários que experimentam canais mais degradados podem receber subportadoras do símbolo OFDM que não apresentam as maiores ordens de modulação. Com isso, o ATS apresenta uma eficiência espectral menor do que o AW.

## Capítulo 4

# Algoritmos propostos para alocação adaptativa de recursos para sistemas OFDMA

Este capítulo tem como objetivo propor três novos algoritmos de alocação adaptativa de recursos e comparar os desempenhos obtidos com os algoritmos AW e ATS através de simulações computacionais.

### 4.1 Algoritmos *Water-filling* modificado

Os algoritmos de *Water-filling* modificado (AWM) consistem na alteração do algoritmo de *Water-filling* para alocar os recursos do símbolo OFDM, tendo como parâmetro de alocação tanto a resposta em frequência dos canais, quanto as vazões mínimas dos usuários. O AWM-MV (Algoritmo *Water-filling* Modificado - Maximização da Vazão) prioriza a maximização da vazão do sistema, ~~enquanto o AWM-R (Algoritmo *Water-filling* Modificado - Robustez) e o AWM-MR (Algoritmo *Water-filling* Modificado - Maximização da Robustez) fazem com que o sistema de comunicação seja mais confiável, tornando-o mais robustez aos efeitos do canal de comunicação. O AWM-R tem como opção adicionar novas cargas~~

de bits ao sistema, além das cargas de bits necessárias para atingir as vazões mínimas, e o AWM-MR não. Este último apenas redistribui as cargas de bits para manter as vazões mínimas. Cada um desses algoritmos tem por objetivo determinar as melhores distribuições de subportadoras e suas respectivas cargas de bits para cada usuários, atendendo as vazões mínimas e utilizando os recursos do sistema de maneira eficiente.

As subseções a seguir apresentam estes algoritmos em detalhe.

#### 4.1.1 Algoritmo *Water-filling* Modificado - Maximização da Vazão

Primeiramente, como no algoritmo AW, é realizada a distribuição de potência para as subportadoras de cada usuário empregando o teorema de *Water-filling* e as cargas de bits de cada uma delas é calculada por (3.5). A fim de encontrar a vazão máxima que cada usuário atingir, caso utilizassem o canal de comunicação individualmente, é realizado a soma das cargas de bits alocadas as subportadoras de cada deles, de forma que

$$\begin{aligned}
 B_{max_1} &= \sum_{n=0}^{N-1} b_{1,n} \\
 B_{max_2} &= \sum_{n=0}^{N-1} b_{2,n} \\
 &\dots \\
 B_{max_u} &= \sum_{n=0}^{N-1} b_{u,n},
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde  $b_{u,n}$  é a carga de bit do  $u$ -ésimo usuário na  $n$ -ésima subportadora e  $B_{max_u}$  é a vazão máxima em bits do símbolo OFDM do  $u$ -ésimo usuário.

Para distribuir as subportadoras aos usuários, primeiramente é realizada a alocação das vazões mínimas de cada um deles definida pela QoS. Para isso, o algoritmo prioriza o usuário que possui a maior vazão mínima. Após a escolha

do usuário prioritário, sua subportadora com a capacidade de alocar a maior quantidade de bits é alocada ao símbolo OFDM. Em seguida, o número de bits alocados para esta subportadora é decrementada da vazão mínima desse usuário. Um novo usuário prioritário é escolhido em função do maior valor da nova vazão mínima e o processo se repete. Caso haja subportadoras não utilizadas após todos os usuários terem suas cargas mínimas atingidas, pode-se distribuir estas subportadoras entre os usuários empregando uma das três abordagens, descritas a seguir:

- a) Máxima Vazão (MV): A subportadora é alocada para o usuário que tem a maior vazão média.
- b) Distribuição Aleatória (DA): A alocação da subportadora ao usuário escolhido de forma aleatória, seguindo uma distribuição uniforme.
- c) Máxima Ordem de Modulação (MOM): Uma subportadora é alocada ao usuário que pode transmitir o maior número de bits por símbolo nesta subportadora.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma do AWM-MV. Os parâmetros de entrada são as cargas mínimas definida pela QoS, as potências disponíveis, a SER desejada e a estimação da resposta em frequência dos canais de cada usuário, bem como a variância do ruído.

#### 4.1.2 Algoritmo *Water-filling* Modificado - Robustez

O Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Robustez (AWM-R) é uma modificação do AW com o objetivo de tornar a transmissão dos dados mais confiável, reduzindo as ordens de modulação das subportadoras alocadas aos usuários. É importante ressaltar que a vazão mínima de cada usuário continua sendo atendida. Ao contrário do algoritmo de maximização da vazão, que utiliza toda a potência distribuída para transmitir o maior número de bits, a priorização da robustez utiliza essa mesma potência para a transmissão de uma menor quantidade de bits por símbolo em cada subportadora, tornando a transmissão mais robusta.

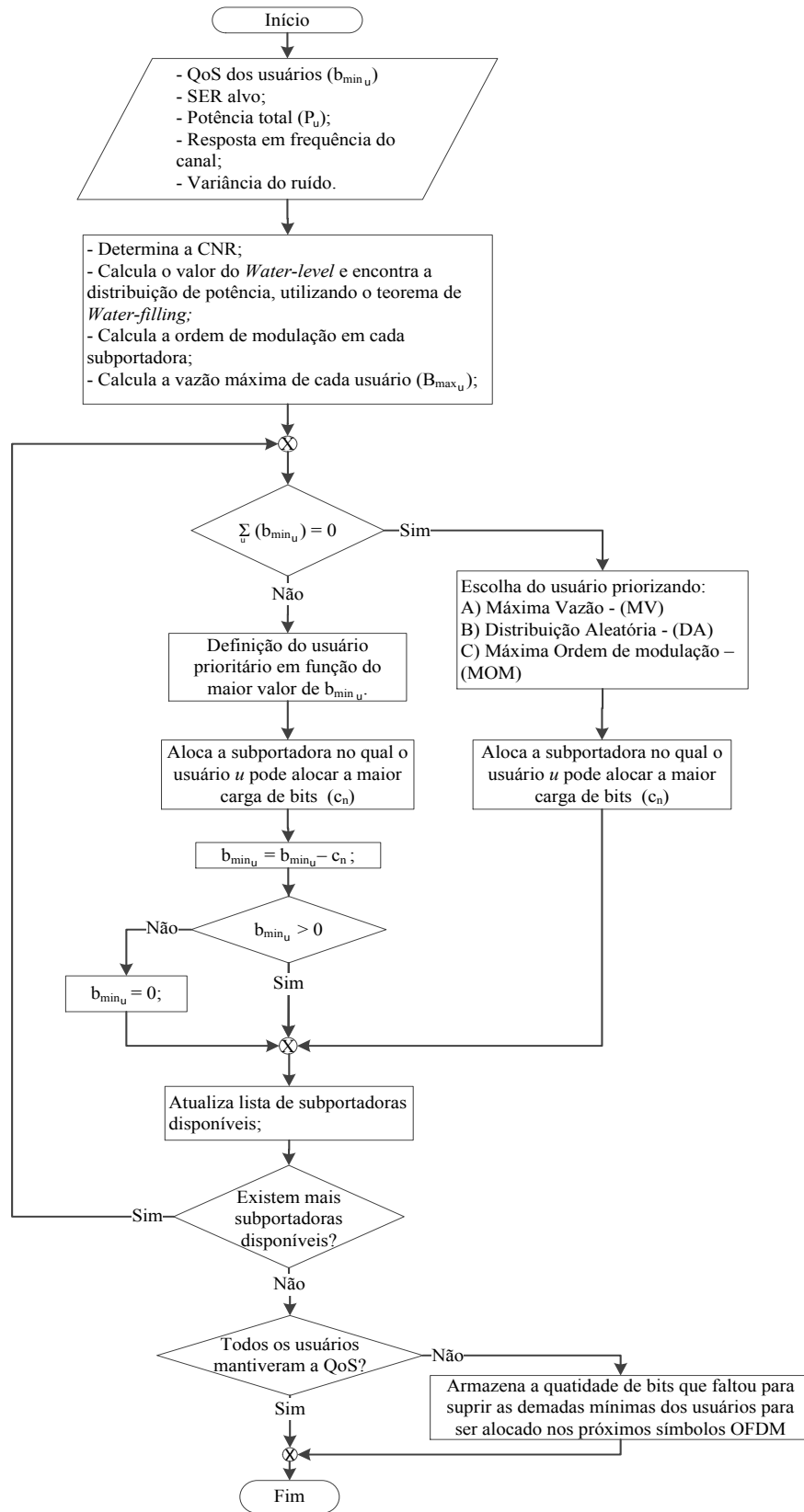
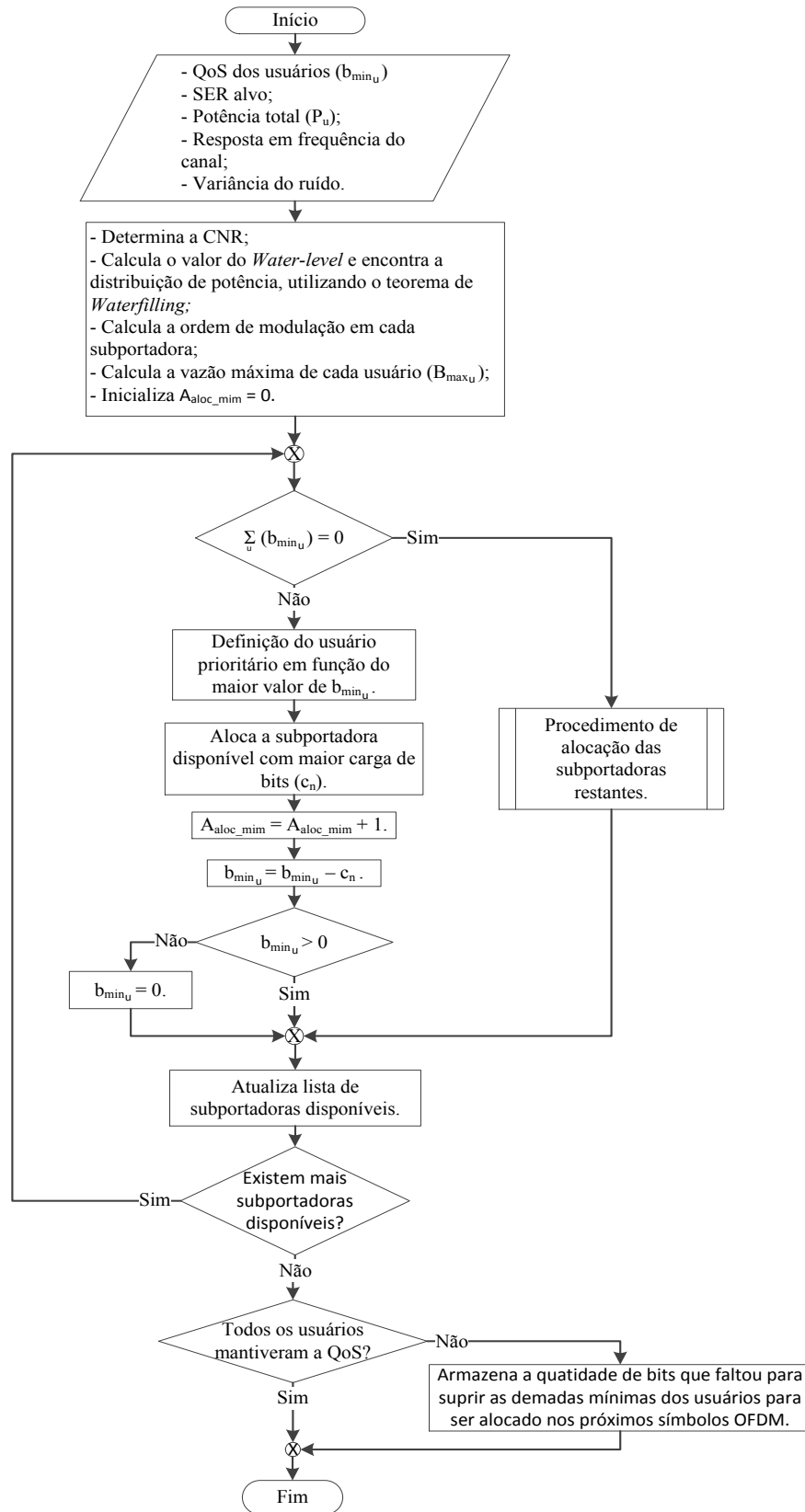


Figura 4.1: Fluxograma do AWM-MV.

Primeiramente, esse algoritmo segue os mesmos passos do AWM-MV para suprir as vazões mínima dos usuários. Após determinar a distribuição de potência entre as subportadoras de cada usuário através do teorema de *Water-filling*, calcula-se as ordens de modulação de cada subportadora através de (3.5). O usuário prioritário é determinado em função da maior vazão mínima. Este usuário recebe a subportadora na qual a mesma consegue transmitir a maior carga de bits. A subportadora é ocupada e o processo se repete até que todos os usuários tenham as demandas mínimas atendidas. Neste primeiro passo a robustez não é levada em consideração, pois é prioritário garantir a vazão mínima. A Figura 4.2 apresenta o fluxograma deste algoritmo.

Caso existam subportadoras restantes após atender as vazões mínimas de todos os usuários, o algoritmo passa para o procedimento de aumentar a robustez dos dados, redistribuindo os bits das subportadoras com as maiores cargas de bits já alocada para as subportadoras restantes, utilizando uma das abordagens DA, MOM ou MV. Esse processo se repete até que todas as subportadoras já alocadas reduzam suas cargas de bits. Caso ainda exista subportadoras restantes, estas são alocadas reduzindo suas cargas de bits.

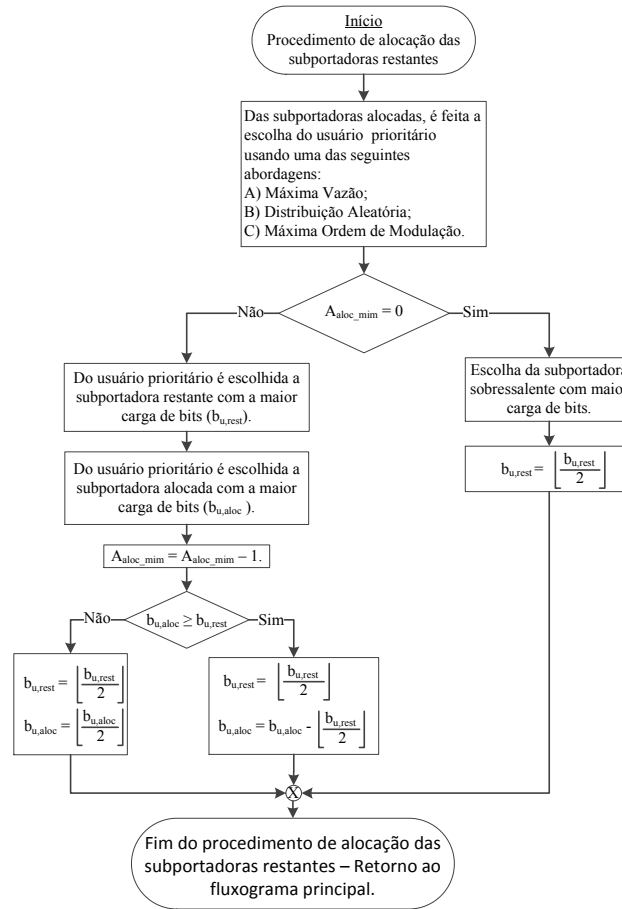
A Figura 4.3 apresenta o procedimento de alocação das subportadoras restantes. A escolha do usuário prioritário é feita analisando as subportadoras alocadas, utilizando uma das abordagens MV, DA ou MOM. Após a escolha do usuário, duas subportadoras com as maiores quantidade de bits são selecionadas, uma subportadora alocada e uma subportadora restante. Dentre os diversos critérios que podem ser utilizados a redistribuição dos bits, esse algoritmo realoca sempre que possível, a metade dos bits das subportadoras alocadas e restantes, e quando não é possível, procura manter no mínimo a carga de bits anterior ao procedimento de realocação. Entende-se por metade, o inteiro ou o inteiro superior da metade da ordem de modulação. Também é apresentado na Figura 4.3 o procedimento de alocação das subportadoras restantes após a redistribuição dos bits



**Figura 4.2:** Fluxograma do AWM-R.



das subportadoras alocadas.



**Figura 4.3:** Fluxograma do AWM-R - Distribuição das subportadoras restantes.

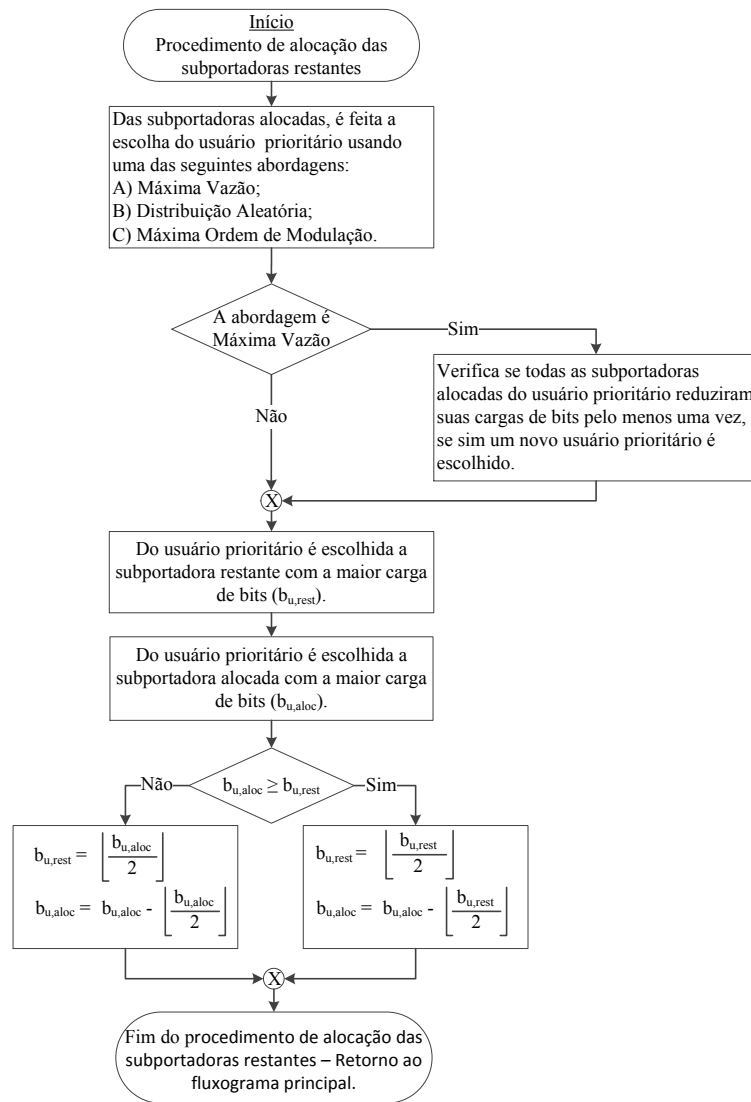
### 4.1.3 Algoritmo *Water-filling* Modificado - Maximização da Robustez

O Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Maximização da Robustez (AWM-MR) tem como finalidade maximizar a robustez dos dados a serem transmitidos, tendo como limite as vazões mínimas de cada usuário. A alocação de subportadoras e bits para atingir as vazões mínimas é a mesma aplicada no AWM-R, apresentado no fluxograma da Figura 4.2. Após atingir as vazões mínimas, o procedimento de alocação das subportadoras restantes é executado como apresentado no fluxograma da Figura 4.4.

O usuário prioritário é escolhido analisando as subportadoras alocadas e utilizando uma das abordagens MV, DA ou MOM. Do usuário prioritário são escolhidas duas subportadoras com as maiores quantidades de bits, sendo uma subportadora alocada e uma subportadora restante. Com a análise da quantidade de bits que cada uma dessas subportadoras pode receber, este algoritmo realoca os bits de forma a manter no mínimo a carga de bits anterior a este procedimento. Para isso, a subportadora restante recebe a metade da menor quantidade de bits entre as duas subportadoras selecionadas. A subportadora alocada recebe a diferença entre sua carga de bits e o número de bits alocado na subportadora restante. Este procedimento se repete até que não haja mais subportadoras restantes no símbolo OFDM.

Nos três algoritmos propostos, a distribuição de subportadoras e bits aos usuários atende a vazão mínima. Quando a capacidade do símbolo OFDM resultar em uma capacidade menor do que as demandas mínimas dos usuários, devido às condições do canal dos usuários e da relação sinal-ruído, a quantidade de bits que não puderam ser alocadas no símbolo atual são armazenadas e transmitidas nos próximos símbolos, quando houver uma melhora do canal de transmissão. É importante notar que esta solução pode causar um aumento no atraso da transmissão de dados.

Nas próximas seções serão apresentados o desempenho dos algoritmos AWM-MV, AWM-R e AWM-MR, bem como os algoritmos AW e ATS. Também será feita comparações entre eles, analisando suas características de alocação dos recursos nos símbolos OFDM.



**Figura 4.4:** Fluxograma do AWM-MR - Distribuição das subportadoras restantes.

## 4.2 Análise de Desempenho dos algoritmos de alocação adaptativa

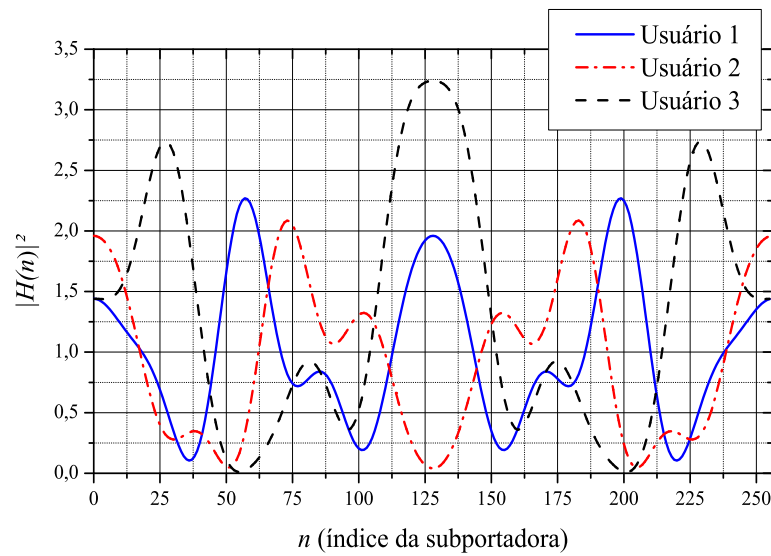
Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações de cada um dos algoritmos propostos e dos dois algoritmos descritos no Capítulo 3. Também será realizada a análise de desempenho de todos os algoritmos, comparando a distribuição das subportadoras, a vazão máxima e a eficiência espectral atingida pelos usuários em cada um deles.

### 4.2.1 Parâmetros de simulação

Nas simulações foram utilizados canais seletivos em frequência e variantes no tempo, ponderados por uma variável aleatória com distribuição Rayleigh [30], onde o tempo de coerência dos canais são superiores ao tempo de duração do símbolo OFDM. No total, três usuários compartilham os recursos do sistema, sendo que cada um requer, no mínimo, a transmissão de 200 bits por símbolo OFDM, que é composto por 256 subportadoras. Foi adotada uma potência total disponível para cada usuário no valor de 37 dB acima da variância do ruído no receptor, mantendo uma alta SNR, e uma probabilidade de erro de símbolo alvo de  $10^{-6}$ . A resposta ao impulso do canal de cada usuário é dada por:

$$\begin{aligned} h_1[\ell] &= r_{1,0}0,9\delta[\ell] + r_{1,4}0,4\delta[\ell - 4] - r_{1,7}0,2\delta[\ell - 7] + r_{1,9}0,1\delta[\ell - 9] \\ h_2[\ell] &= r_{2,0}0,8\delta[\ell] + r_{2,3}0,5\delta[\ell - 3] + r_{2,7}0,2\delta[\ell - 7] - r_{2,9}0,1\delta[\ell - 9] \\ h_3[\ell] &= r_{3,0}0,9\delta[\ell] + r_{3,2}0,6\delta[\ell - 2] - r_{3,5}0,4\delta[\ell - 5] + r_{3,9}0,1\delta[\ell - 9] \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde  $h_1[\ell]$ ,  $h_2[\ell]$  e  $h_3[\ell]$  são as respostas ao impulso dos canais dos usuários 1, 2 e 3, respectivamente, e  $r_{u,i}$  é uma variável aleatória com distribuição Rayleigh do  $u$ -ésimo no  $i$ -ésima múltiplo percurso, com  $\sigma_{r_{u,i}} = 1/\sqrt{2}$ . Assumindo uma frequência de amostragem do sistema igual a  $f_s$  e um fator de redução da banda de coerência  $k_c = 50$ , as bandas de coerência média dos canais são  $BW_{c1} = 9,70 \cdot 10^{-3}f_s$ ,  $BW_{c2} = 10,10 \cdot 10^{-3}f_s$  e  $BW_{c3} = 11,14 \cdot 10^{-3}f_s$  correspondente aos usuários 1, 2 e 3, respectivamente. A escolha destes canais foi feita de forma que as maiores atenuações dos canais ocorressem em posições distintas do espectro. A Figura 4.5 apresenta a resposta em frequência dos canais descritos em (4.2), assumindo neste caso, que os canais são estáticos e com valores de  $r_{u,i} = 1$ .

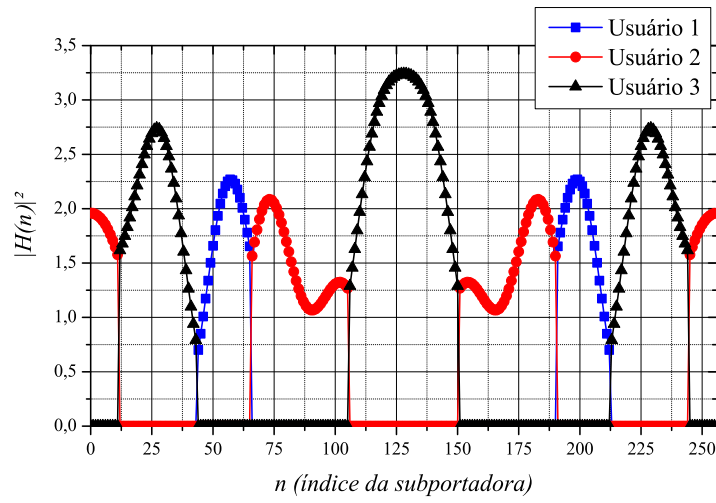


**Figura 4.5:** Resposta em frequência dos canais de três usuários.

### 4.2.2 Desempenho do algoritmo de *Water-filling*

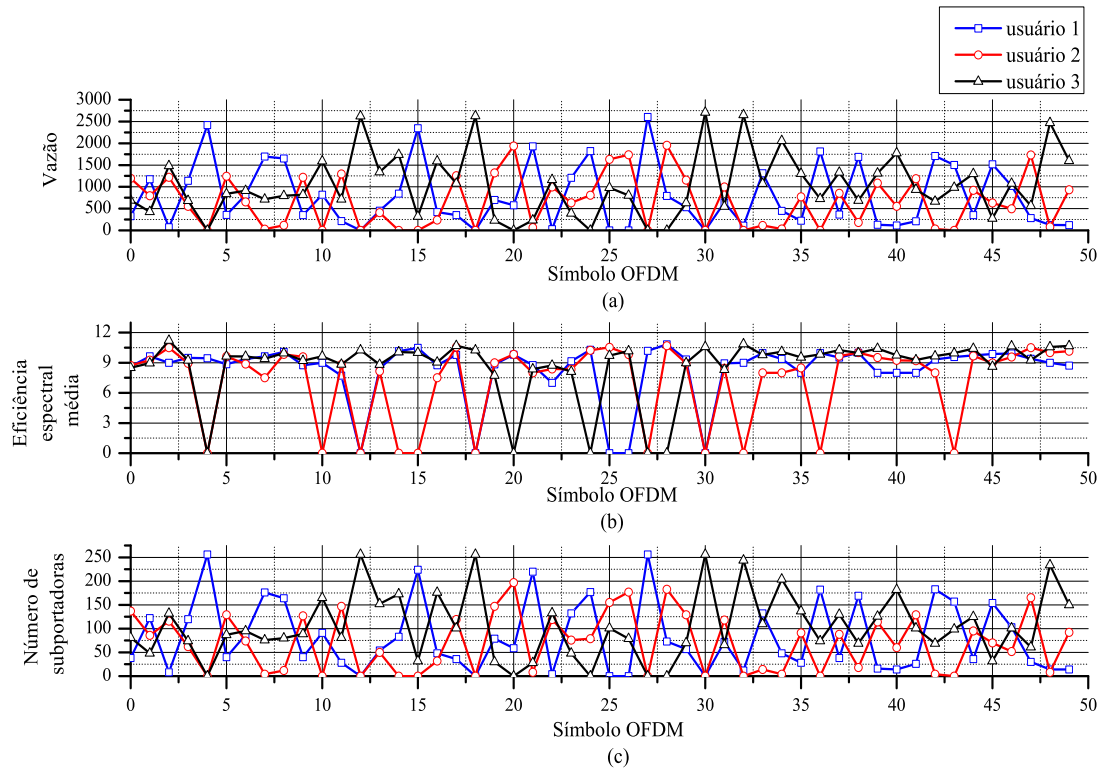
Nesta seção serão apresentados os resultados da simulação do AW descrito na Seção 3.4. A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos da alocação das subportadoras aos usuários em um único símbolo OFDM aplicada aos canais apresentados na figura 4.5. Neste caso, foram alocados 420, 968 e 1066 bits aos usuários 1, 2 e 3, respectivamente, atingindo uma média de 818 bits transmitidos. O fato do canal entre o usuário 1 e a ERB ser o mais degradado e do AW não considerar a vazão mínima dos usuários no processo de alocação, isso faz com que este usuário receba poucos recursos quando comparado com os demais usuários, que apresentam melhores condições de propagação. Em um canal de comunicação, a banda de coerência média determina seu grau de seletividade, onde o canal com a menor banda de coerência média é o mais seletivo. Desta forma, com a análise das respectivas bandas de coerência dos canais dos usuários, nota-se que o canal utilizado pelo usuário 1 é mais seletivo se comparado ao canal do usuário 3.

A Figura 4.7 apresenta os resultados da alocação de bits, a eficiência espectral média por subportadora e o número de subportadoras por usuário em 50 símbolos OFDM transmitidos. Como pode ser notado, ocorrem grandes variações



**Figura 4.6:** Alocação de subportadoras do algoritmo de Water-filling.

de alocação de subportadoras e bits aos usuários de um símbolo OFDM para outro. Isso ocorre, pois os canais de cada usuário também variam a cada símbolos OFDM.



**Figura 4.7:** Comportamento do Algoritmo de Alocação de Recursos baseado no Teorema de Water-filling: (a) Vazão de dados por usuário. (b) Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário. (c) Número de subportadoras alocadas para cada usuário.

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios de bits transmitidos, a eficiência espectral média por subportadora, o número médio de subportadoras por usuário, bem como, a média de bits por usuário e a eficiência espectral média por subportadora correspondente a 50 símbolos OFDM transmitidos.

Neste caso, com a transmissão de vários símbolos OFDM, nota-se que, na média, o usuário 3 novamente é o usuário que apresenta as melhores condições de transmissão por receber a maior quantidade de subportadoras e bits do sistema, enquanto o usuário 2 é o usuário que utiliza o canal com as piores condições de transmissão, resultando no menor valor de vazão.

Outra observação importante sobre o resultado apresentado na Figura 4.7(a) é que a carga de bits alocada a um dado usuário é menor do que a vazão mínima requerida em diversos símbolos OFDM. Isso ocorre porque este algoritmo não considera as vazões mínimas definidas para cada usuário no procedimento de alocação de subportadoras e bits.

**Tabela 4.1:** *Valores médios da vazão, eficiência espectral por subportadora e do número de subportadoras de cada usuário, bem como os valores por símbolo OFDM da vazão e subportadoras e a média por usuário utilizando o AW.*

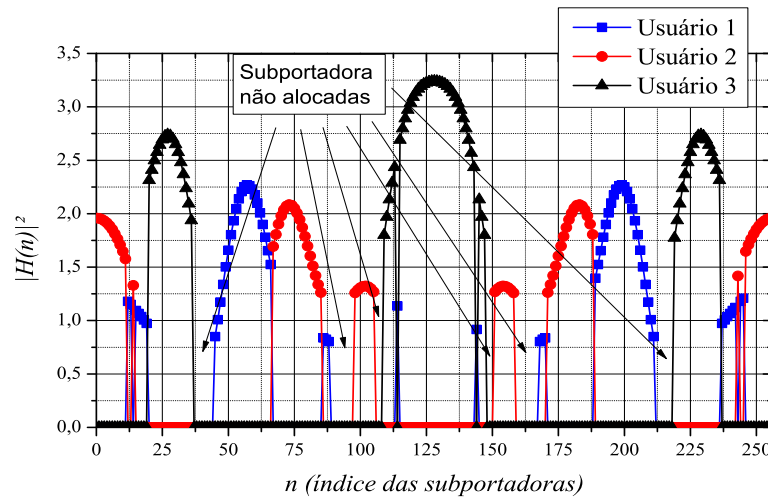
	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
Número médio de bits (bits)	786,38	661,42	1029,70	2477,50	825,83
Eficiência espectral média (bits/símbolo)	9,59	9,48	9,89	–	9,68
Número médio de subportadoras (subportadoras)	82,00	69,74	104,26	256	85,33

### 4.2.3 Desempenho do Algoritmo Two-Steps

Como descrito na Seção 3.5, o algoritmo Two-Steps apresenta uma solução de alocação adaptativa em sistemas de comunicação para manter a vazão mínima dos usuários na transmissão de seus dados.

A Figura 4.8 apresenta a distribuição das subportadoras em um único símbolo OFDMA, considerando os canais na Figura 4.5. Como resultado, mesmo um usuário não apresentando as melhores condições de transmissão, ele recebe recur-

para que sua vazão mínima seja satisfeita. Neste caso, foram alocados 200 bits para cada usuário. A quantidade de bits alocados é igual às vazões mínimas dos usuários. Isso ocorre porque o algoritmo de *bit-loading*, responsável pela alocação de bits no ATS, aloca apenas as vazões mínimas de modo que a potência distribuída para cada usuário seja minimizada. Com isso, havendo subportadoras restantes após atingir as vazões mínimas, estas não serão utilizadas, acarretando uma diminuição da eficiência espectral do sistema.

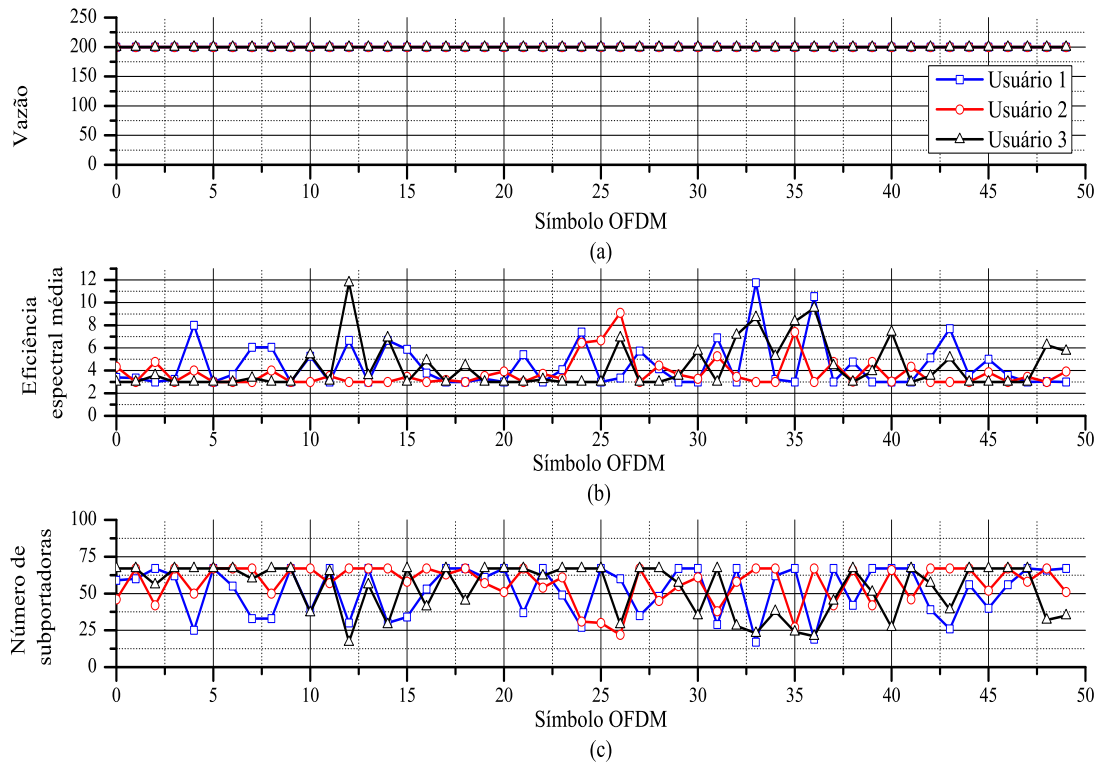


**Figura 4.8:** Alocação de subportadoras do ATS utilizando o algoritmo de distribuição de bits *bit-loading*.

A Figura 4.9 apresenta a transmissão dos 50 primeiros símbolos OFDM, considerando as resposta ao impulso dos canais definidos em (4.2), com  $r_{u,i}$  variando segundo uma distribuição Rayleigh. A vazão por usuário, a eficiência espectral média por subportadora e o número de subportadoras alocada para cada usuário também são apresentados nesta figura. Através da Figura 4.9(a) é possível concluir que a vazão atingida por todos os usuários é igual a vazão mínima. Com as variações dos canais de comunicação ao longo da transmissão dos símbolos OFDM, os valores da eficiência espectral e da alocação de subportadoras variam para manter a vazão do sistema constante, tal como pode ser visto na Figura 4.9(b).

Como a vazão é igual a vazão mínima, os usuários que conseguem obter ele-





**Figura 4.9:** Comportamento do ATS utilizando o algoritmo de bit-loading para alocação dos bits: (a) Vazão de dados por usuário; (b) Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário; (c) Número de subportadoras alocadas para cada usuário.

vada eficiência espectral requerem uma quantidade menor de subportadoras, ao passo que os usuários que experimentam uma baixa eficiência espectral requerem um elevado número de subportadoras. Isso pode ser observado comparando as Figuras 4.9(b) e 4.9(c). Esta conclusão é mais evidente quando um usuário utiliza um canal de comunicação com grandes degradações. A exemplo, pode-se analisar a transmissão do trigésimo sexto símbolo OFDM, onde o usuário 1 e 3 utilizam uma pequena quantidade de subportadoras com alta eficiência espectral, ao passo que o usuário 2 utiliza a maior quantidade de subportadoras e uma baixa eficiência espectral.

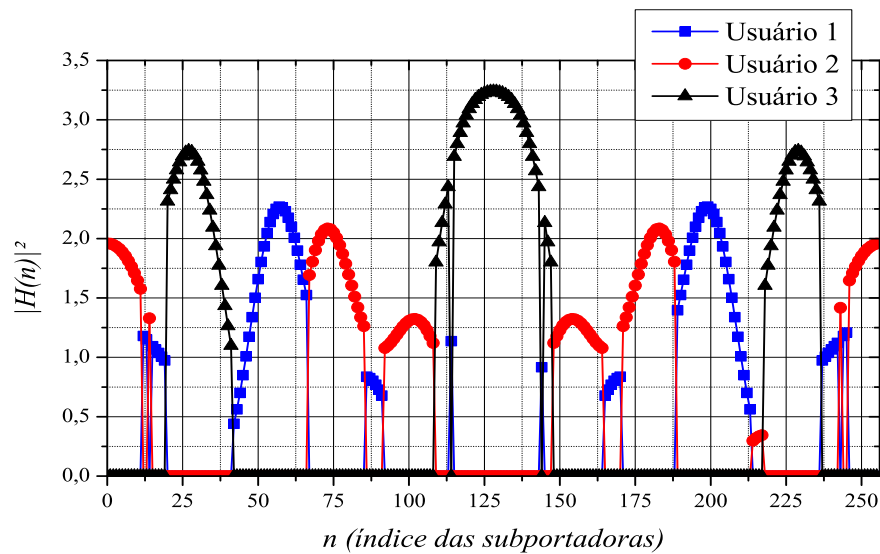
Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados médios e totais da alocação dos recursos da simulação apresentada na Figura 4.9. Pela quantidade média de subportadoras alocadas, confirma-se que não foram alocadas todas as subportadoras dos símbolos OFDM aos usuários, tendo por consequência, a redução da eficiência

espectral do sistema.

**Tabela 4.2:** Valores médios da vazão, da eficiência espectral e do número de subportadoras de cada usuário, bem como os valores por símbolo OFDM de bits e subportadoras e a média por usuário utilizando o ATS com o algoritmo de bit-loading.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
Número médio de bits (bits)	200,00	200,00	200,00	600,00	200,00
Eficiência espectral (bits/símbolo)	3,81	3,51	3,73	–	3,68
Número médio de subportadoras (subportadoras)	52,42	57,06	53,68	163,16	54,39

Para que seja feita uma comparação justa entre os algoritmo AW, AWM-MV e o ATS, a alocação de bits do ATS, realizada pelo algoritmo de *bit-loading* foi modificada para o método de alocação de bits utilizado nos algoritmos AW e AWM-MV. A alocação de bits nesse caso é realizada por (3.5), após encontrar as distribuições de potência pelo teorema de *Water-filling*. Por fim, são alocadas apenas as subportadoras distribuídas aos usuários realizadas no final do segundo passo do ATS. Como resultado, a Figura 4.10 mostra a distribuição das subportadoras em um único símbolo OFDM no canal da Figura 4.5. Nesta mesma figura, os usuários 1, 2 e 3 receberam 790, 990 e 780 bits, respectivamente. Nesta caso, a quantidade de bits alocada entre os usuários foi mais igualitária, se comparada com a alocação realizada no algoritmo AW.

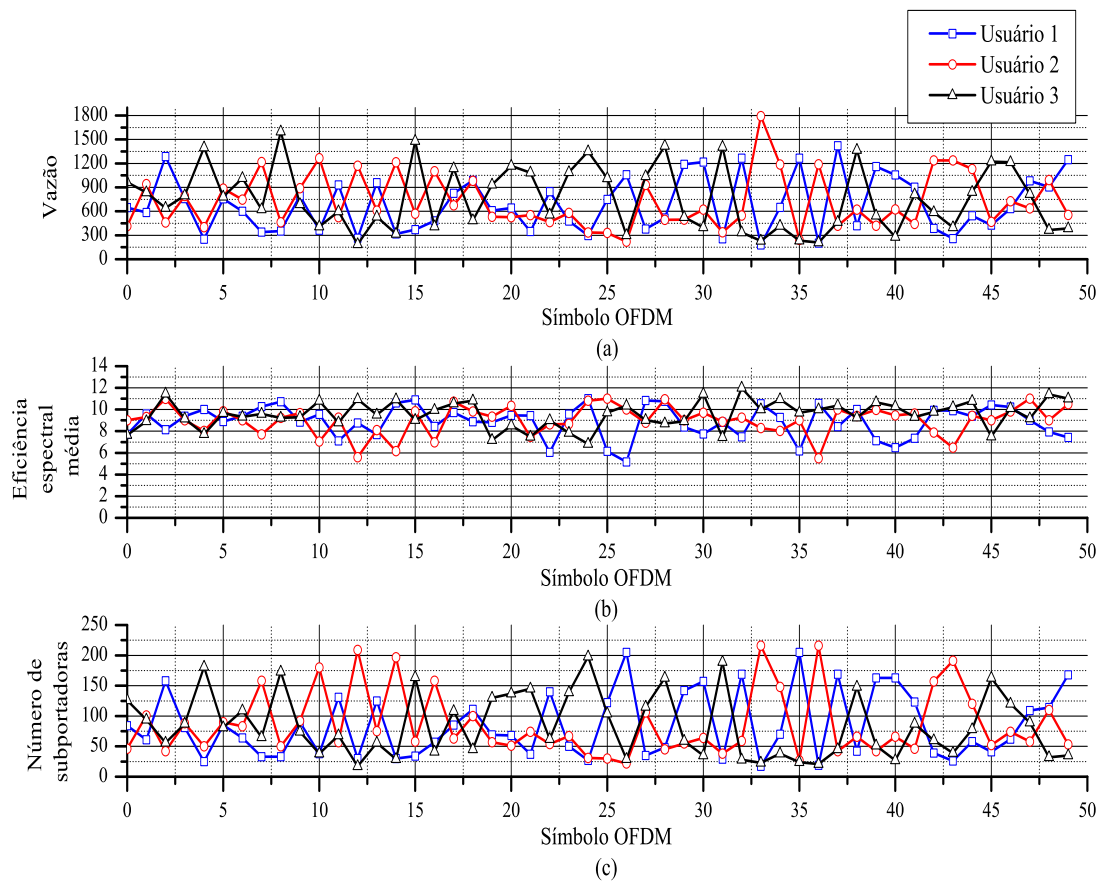


**Figura 4.10:** Alocação de subportadoras do ATS.

A Figura 4.11 apresenta o número de bits alocados para cada usuário, a eficiência espectral média e o número de subportadoras alocadas aos usuários nos 50 primeiros símbolos OFDM transmitidos, considerando as resposta ao impulso dos canais definidos em (4.2), com  $r_{u,i}$  variando segundo uma distribuição Rayleigh. Nota-se que mesmo com a variação da distribuição dos bits ao longo da transmissão, o número de bits distribuído aos usuários não é menor do que a vazão mínima. Para isso, na presença de desvanecimento seletivo dos canais, a eficiência espectral é reduzida, acarretando no aumento da quantidade de subportadoras alocadas a um determinado usuário, como pode ser verificado nas Figuras 4.11 (b) e (c). Com a análise da transmissão do trigésimo primeiro símbolo OFDM este efeito pode ser verificado com mais detalhes. Nota-se que o usuário 1 e 3 apresentam as menores quantidades de subportadoras com as maiores eficiência espectral, ao passo que o usuário 2 apresenta a maior quantidade de subportadora com a menor eficiência espectral.

A Tabela 4.3 apresenta as médias do número de bits distribuído, a eficiência espectral média por subportadora e o número médios de subportadoras distribuídos aos usuários da Figura 4.11. Também é apresentada o total e a média dos bits transmitidos, da eficiência espectral e das subportadoras alocadas aos usuários. Como era esperado, esses valores reafirmam que a distribuição dos recursos é feita de maneira mais justa entre os usuários, de modo que todos obtenham a vazão mínima necessária em todos os símbolos transmitidos.

No entanto, o custo dessa distribuição mais justa dos recursos é uma redução da vazão total do sistema. Isso ocorre porque o ATS aloca subportadoras para um dado usuário visando atingir a vazão mínima, mesmo que haja outro usuário que possa explorar esta subportadora de forma mais eficiente.



**Figura 4.11:** Comportamento do ATS utilizando o Teorema de Water-filling para alocação dos bits: (a) Vazão de dados por usuário; (b) Eficiência espectral por subportadora de cada usuário; (c) Número de subportadoras alocadas para cada usuário.

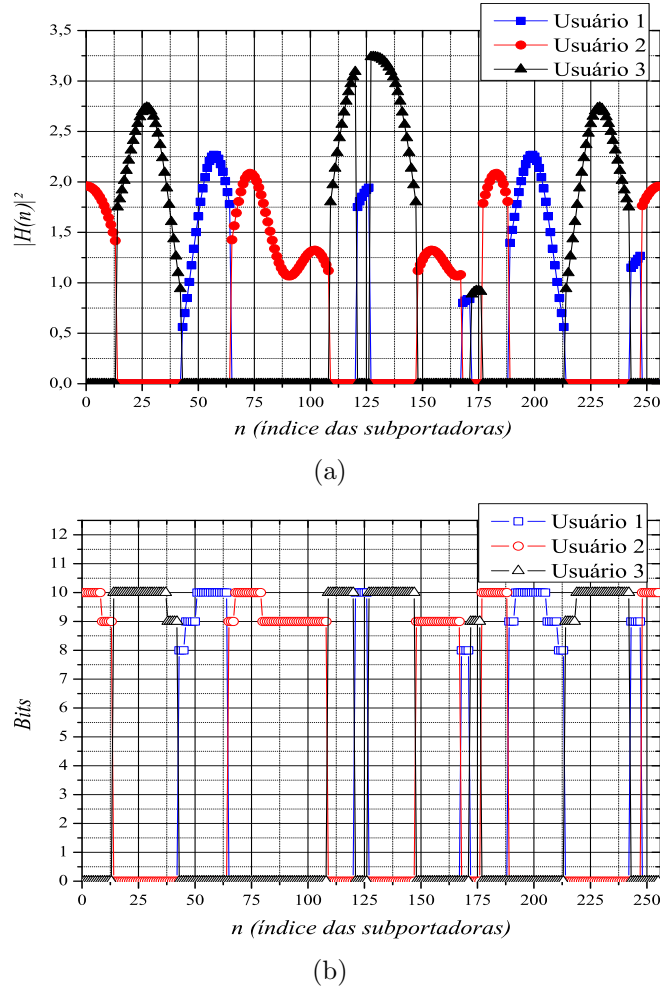
**Tabela 4.3:** Valores médios da vazão, da eficiência espectral e do número de subportadoras de cada usuário, bem como os valores por símbolo OFDM e a média de bit e subportadoras utilizados no ATS.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
Número médio de bits (bits)	687,26	724,40	758,28	2106,32	723,31
Eficiência espectral (bits/símbolo)	8,22	8,51	9,03	—	8,23
Número médio de subportadoras (subportadoras)	84,82	86,48	84,50	256	85,33

#### 4.2.4 Desempenho do Algoritmo de *Water-filling* modificado - Maximização da vazão

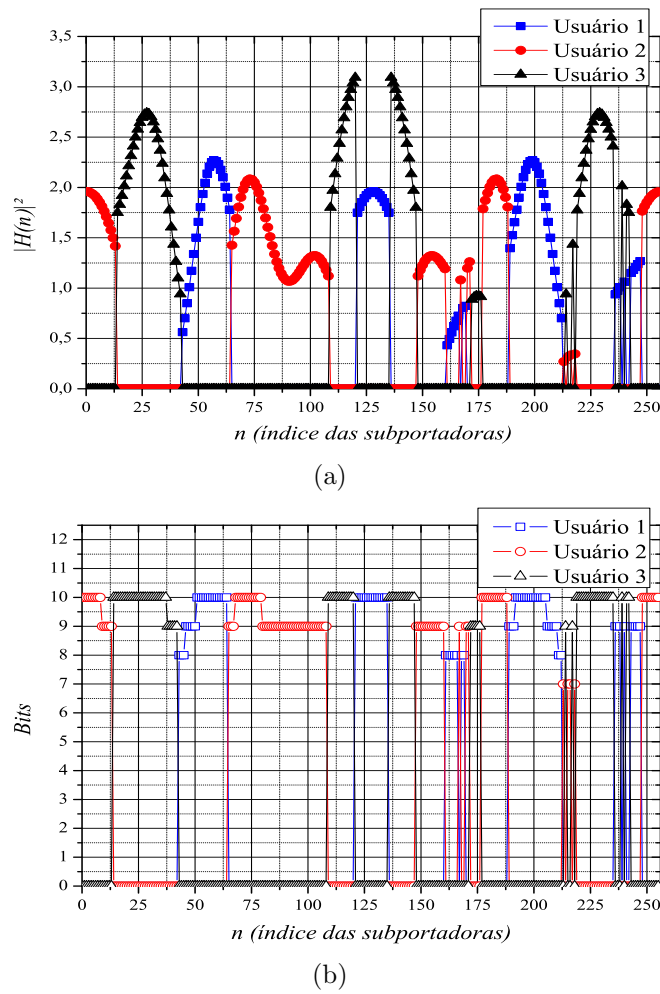
Nesta seção são apresentados os resultados da simulação de alocação de recursos do AWM-MV. As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam a alocações das subportadoras e dos bits aos usuários utilizando as abordagens MV, DA e MOM, respec-

tivamente. Os três usuários que compartilham o sistema, utilizam os canais com respostas em frequência apresentados na Figura 4.5.



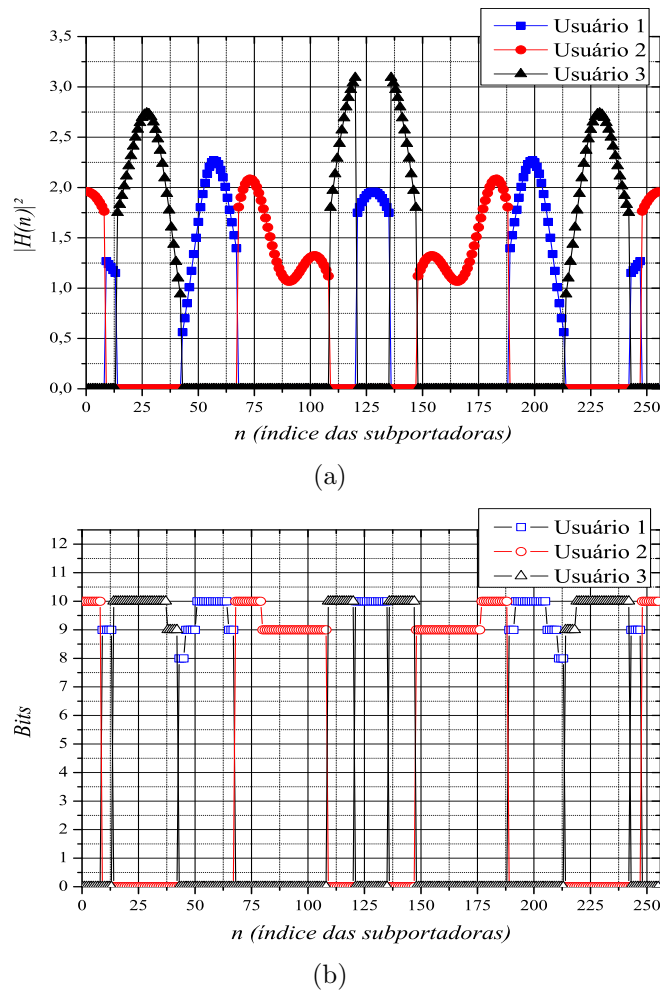
**Figura 4.12:** Abordagem Máxima Vazão: (a) Alocação de subportadoras e (b) distribuição de bits em um símbolo OFDM.

Nota-se que para atingir a vazão mínima requerida, algumas subportadoras são alocadas aos usuários mesmo não apresentando as melhores condições de transmissão. Com isso, a distribuição dos bits nas três abordagens (MV, DA e MOM) é mais justa entre os usuários se comparada com a alocação realizada no AW, como também pode ser visto na Tabela 4.4. É importante ressaltar que o usuário 3 utiliza o canal com as melhores condições de propagação, enquanto o usuário 1 utiliza o canal mais degradado. Por este motivo, com a abordagem MV, o usuário 3 é beneficiado, uma vez que este algoritmo prioriza o usuário



**Figura 4.13:** Abordagem Distribuição Aleatória: (a) Alocação de subportadoras e (b) distribuição de bits em um símbolo OFDM.

que pode atingir a maior vazão de bits, ou seja, que tem as melhores condições de transmissão. Já na abordagem MOM, o usuário 2 é o que apresenta a maior vazão, uma vez que este usuário apresenta uma maior quantidade de subportadoras capazes de receber cargas de bits elevadas. Já na abordagem DA, não é possível afirmar qual usuário utiliza o canal com as melhores ou piores condições de propagação, nem qual deles apresenta as maiores ordens de modulação, devido à alocação do usuário ser realizada de maneira aleatória. Essas análises são válidas desde que o número de subportadoras restantes seja grande, para que seja possível utilizar algum das três abordagens (MV, DA e MOM) e verificar as diferenças entre elas. Caso contrário, estas abordagens não são utilizadas ou



**Figura 4.14:** Abordagem Máxima Ordem de Modulação: (a) Alocação de subportadoras e (b) distribuição de bits em um símbolo OFDM.

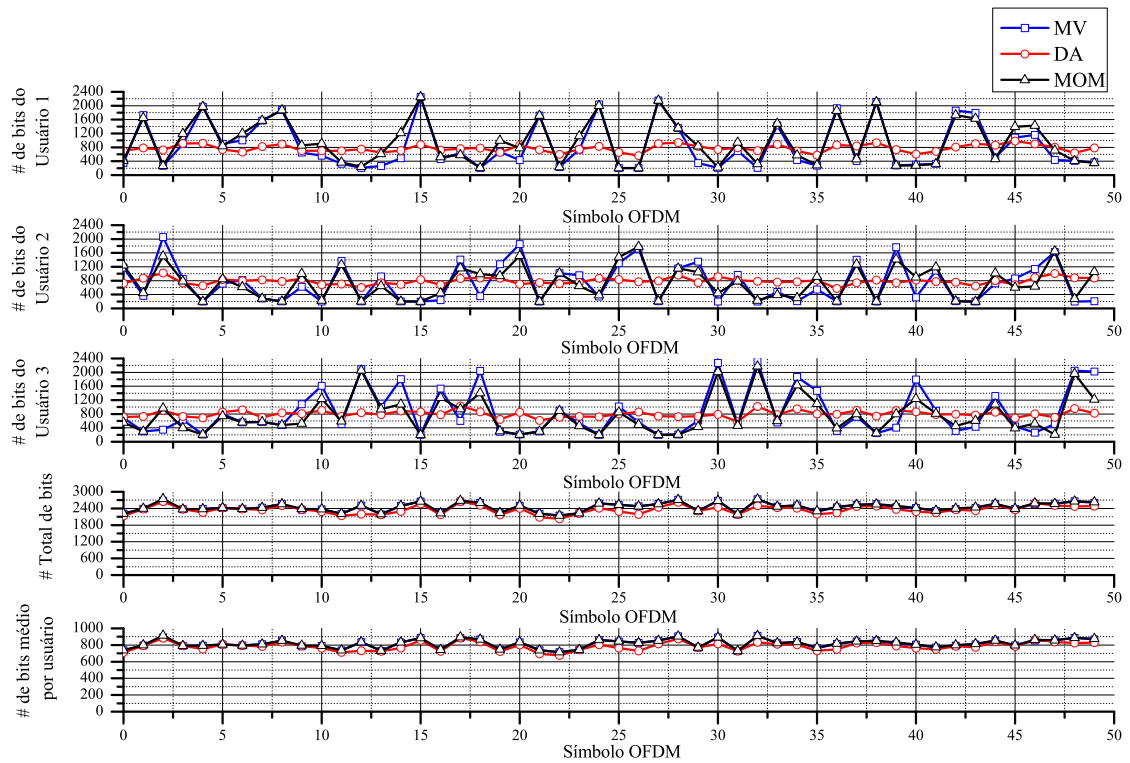
são pouco utilizadas, porque grande parte das subportadoras dos usuários foram alocadas para atingir as vazões mínimas.

**Tabela 4.4:** Número de bits por usuário, por símbolo OFDM e média de bits alocados por usuários no símbolo OFDM nas abordagens MV, DA e MOM.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
MV (bits)	582	923	945	2450	816,33
DA (bits)	705	824	913	2442	814,00
MOM (bits)	712	932	810	2445	818,00

Na Figuras 4.15, a alocação de bits de cada usuário e o valor médio de bits por usuário por símbolo OFDM com as abordagens MV, DA e MOM são apresentadas. A eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolo

OFDM das três abordagens de alocação são apresentadas na Figura 4.16. Nessas figuras, os resultados apresentados são obtidos considerando-se 50 símbolos OFDM, onde a resposta ao impulso dos canais é dado por (4.2) e  $r_{u,i}$  varia a cada símbolo OFDM segundo uma distribuição Rayleigh.



**Figura 4.15:** Número de bits de cada usuário, número total e a média de bits por usuário das abordagens MV, DA e MOM.

Na distribuição dos bits aos usuários, a abordagem DA resulta em pouca variação na alocação dos recursos e uma menor vazão média do sistema, como mostrado na Tabela 4.5. As abordagens MV e MOM apresentam uma maior variação na alocação do número de bits alocados para cada usuário, sendo que a abordagem MOM apresenta uma vazão média ligeiramente superior à abordagem MV. Essa conclusão era esperada devido o usuário prioritário na abordagem MOM ser o que apresenta a subportadora com maior ordem de modulação.

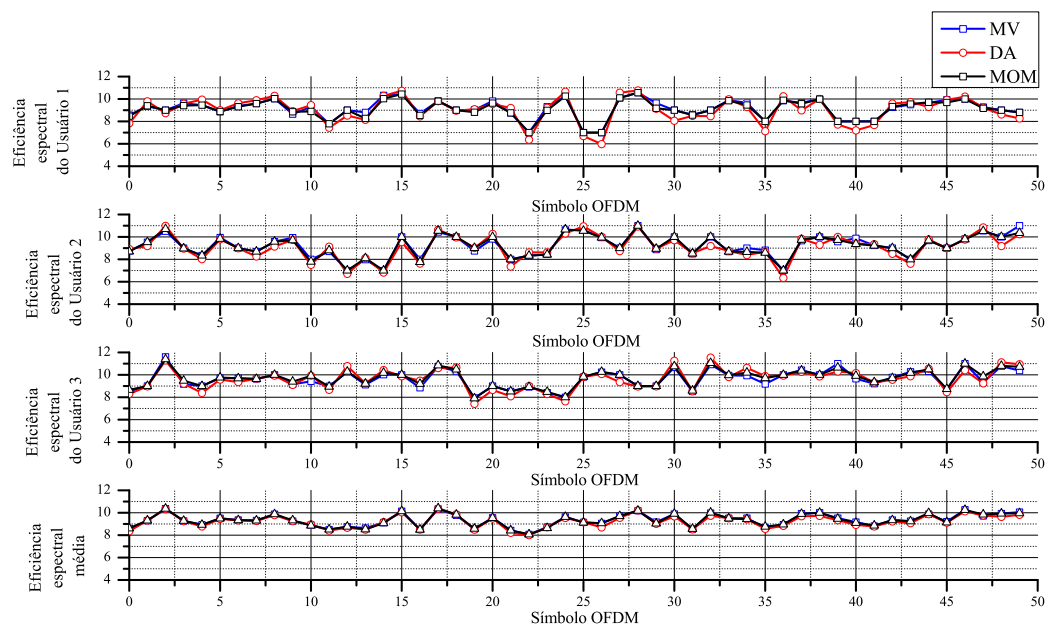
A eficiência espectral dos usuários, mostrada na Figura 4.16, também apresenta grandes variações entre os símbolos OFDM transmitidos, mas não apresenta grandes variações entre as abordagens analisadas. Isso ocorre, pois a razão entre



**Tabela 4.5:** Número médio de bits de cada usuário, por símbolo e média por usuário dos 50 símbolos OFDM transmitidos nas abordagens MV, DA e MOM.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
MV (bits)	858,74	730,36	856,16	2445,26	815,09
DA (bits)	782,90	766,44	810,52	2359,86	786,62
MOM (bits)	952,48	734,96	766,28	2453,72	817,91

o número de bits e o número de subportadoras alocadas por usuário é próximo nas três abordagens descritas.



**Figura 4.16:** Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolos OFDM nas abordagens MV, DA e MOM.

Na Tabela 4.6 é apresentada a eficiência espectral média obtida pelas três abordagens. Nota-se que a abordagem MOM atinge a maior eficiência espectral e a DA, a menor. Contudo, um usuário que utiliza um canal de comunicação com condições ruins de propagação pode obter uma vazão de dados mais alta com a abordagem DA do que seria possível com as outras abordagens. Isso é possível, pois a abordagem DA aloca a subportadora aos usuários aleatoriamente, não analisando a resposta em frequência dos canais dos usuários.

Da mesma forma que o ATS, o AWM-MV aloca os recurso com a análise das respostas em frequência dos canais dos usuários e das vazões mínimas definidas a

**Tabela 4.6:** *Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média por subportadora do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos utilizando as abordagens MV, DA e MOM.*

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Média
MV (bits/símbolo)	9,48	9,37	9,38	9,55
DA (bits/símbolo)	8,98	9,08	9,60	9,22
MOM (bits/símbolo)	9,41	9,42	9,96	9,58

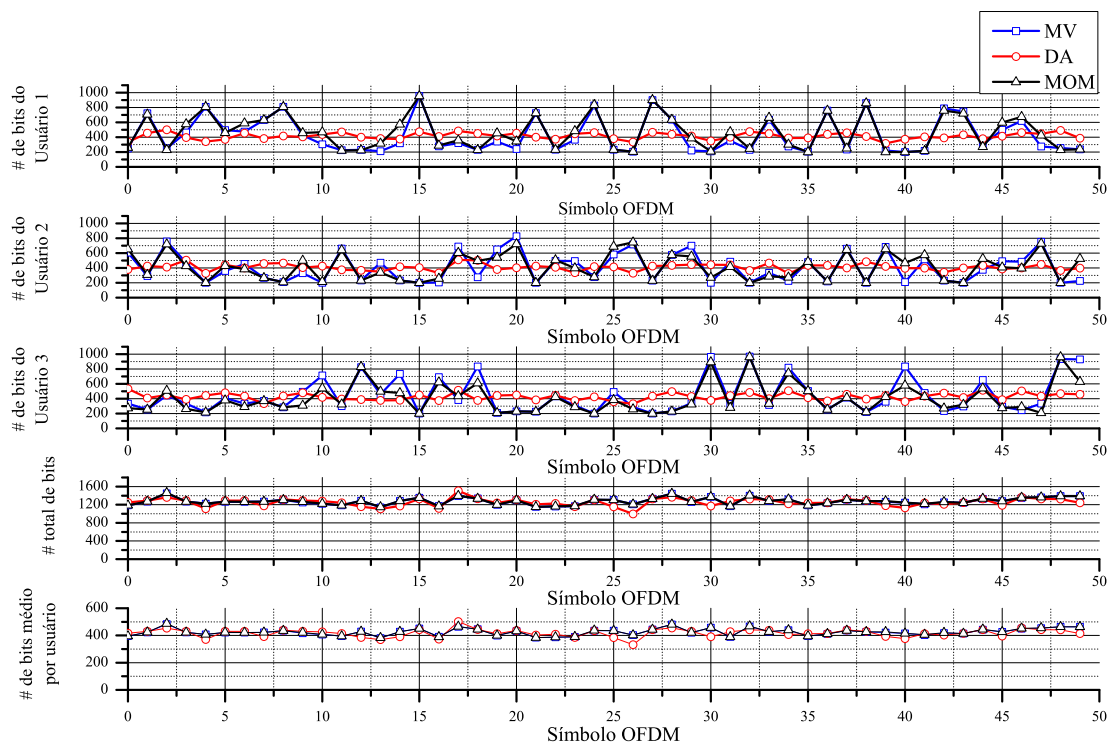
eles. Comparando os resultados obtidos de vazão média por usuário nas Tabelas 4.3 e 4.5, verifica-se que o AWM-MV apresenta uma vazão maior do que o ATS, utilizando qualquer uma das três abordagens.

Através das Tabelas 4.1 e 4.6, também é importante ressaltar que o AWM-MV apresenta a eficiência espectral média inferior ao AW em qualquer uma das abordagens, pois o fato de garantir a vazão mínima para um dado usuário, significa alocar subportadoras para usuários que não são necessariamente aqueles que melhor possam explorá-las. No entanto, o uso das abordagens MOM e MV permite minimizar o impacto desta alocação e obter valores de eficiência espectral próximos daqueles obtidos com o AW.

#### 4.2.5 Desempenho do Algoritmo de *Water-filling* modificado - Robustez

Como descrito na Subseção 4.1.2, a priorização da robustez é utilizada para fazer com que o sistema de comunicação apresente menor taxa de erro de bit. Para a análise desse algoritmo foram utilizadas os mesmos parâmetros aplicados ao AWM-MV, onde a resposta ao impulso dos canais é dado por (4.2), com  $r_{u,i}$  variando segundo uma distribuição Rayleigh. A Figura 4.17 mostra a distribuição dos bits entre os usuários e o número médio de bits por símbolo OFDM para as abordagens MV, DA e MOM. A MOM e a MV apresentam grandes variações na distribuição dos bits aos usuários, sendo que a abordagem MOM atinge uma maior eficiência espectral média. Também pode-se verificar que a abordagem DA

novamente apresenta pouca variação do número de bits distribuídos aos usuários e atinge a menor vazão do sistema. Contudo, um usuário com uma condição de canal desfavorável com relação aos outros, pode obter uma vazão mais alta com a abordagem DA do que seria possível com as outras abordagens. Esta conclusão também podem ser confirmadas através da Tabela 4.7, que apresenta os valores médios das transmissões dos 50 símbolos OFDM, onde o usuário 2 atingiu vazões mais altas na abordagem DA do que na abordagem MV e MOM.



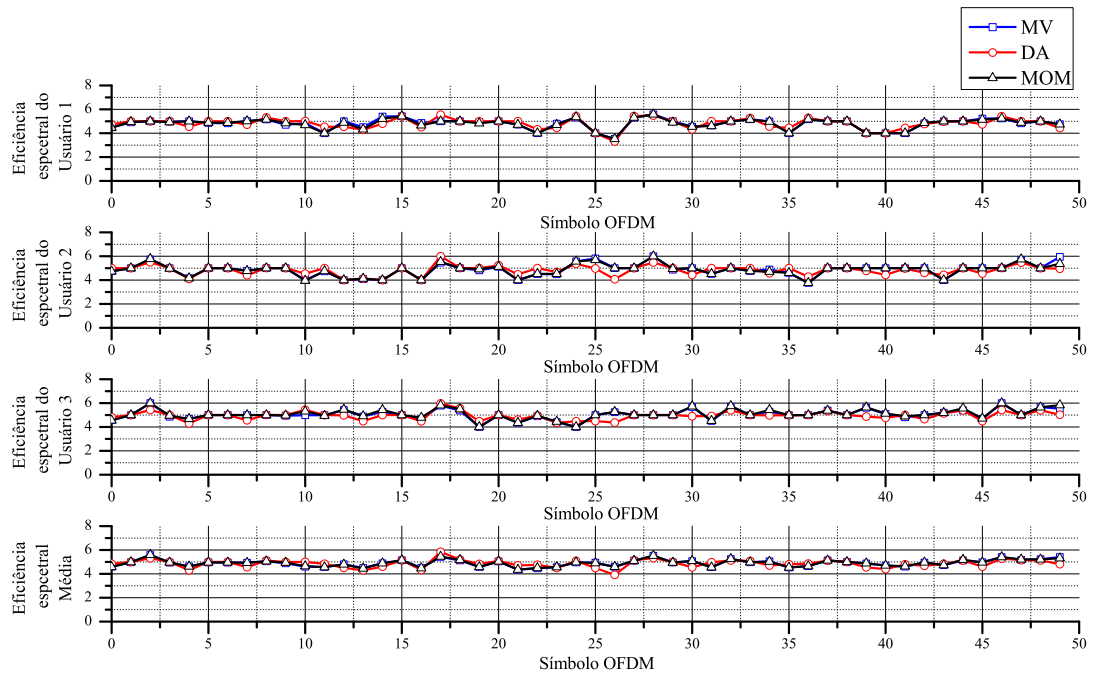
**Figura 4.17:** Número de bits de cada usuário, número total e média de bits por usuário das abordagens MV, DA e MOM.

**Tabela 4.7:** Número médio por usuários, por símbolo e média entre os usuário de bits alocados em 50 símbolos OFDM transmitidos empregando as abordagens MV, DA e MOM.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
MV (bits)	428,76	404,54	442,82	1276,12	425,37
DA (bits)	417,20	422,76	417,52	1257,48	419,16
MOM (bits)	461,90	413,14	403,90	1278,94	426,31

A Figura 4.18 apresenta os resultados da eficiência espectral média de cada

usuário e do símbolo OFDM das três abordagens implementadas, enquanto a Tabela 4.8 apresenta a eficiência espectral média de cada usuário e do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos. Novamente, a abordagem MOM apresenta a maior eficiência espectral do sistema e a DA a menor.



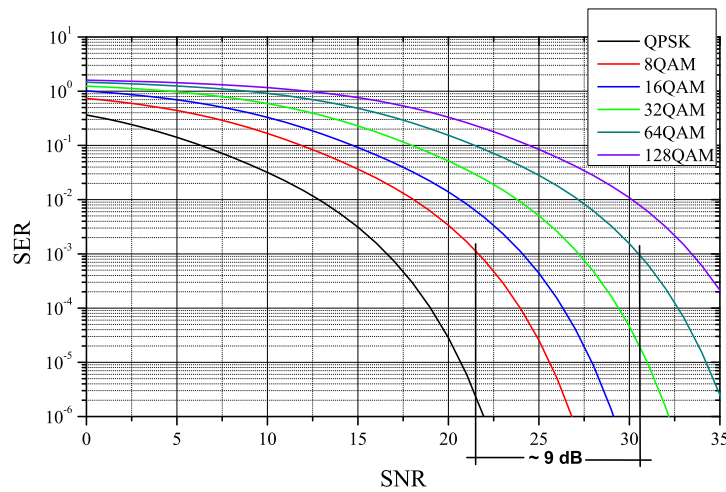
**Figura 4.18:** Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolos OFDM nas abordagens MV, DA e MOM.

**Tabela 4.8:** Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos utilizando as abordagens MV, DA e MOM.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Média
MV (bits/símbolo)	4,91	4,91	5,13	4,98
DA (bits/símbolo)	4,86	4,85	5,02	4,91
MOM (bits/símbolo)	4,90	4,92	5,19	5,00

Comparando os resultados obtidos nas Tabelas 4.5 e 4.6 com os obtidos nas Tabelas 4.7 e 4.8 é possível observar que o AWM-R resulta em taxas de dados inferiores do que o AWM-MV, pelo fato de que cada subportadora recebe uma quantidade menor de bits do que ela é capaz de transmitir, tornando-a mais robustas aos efeitos seletivos do canal. Nos resultados obtidos do AWM-R, a redução

do número de bits por símbolo foi da ordem de duas vezes o que significa reduções entre 3 dB a 9 dB na SNR para a mesma SER alvo para ordens de modulação que variam entre 2 a 7 bits por símbolos, conforme pode-se observar na Figura 4.19. Isso ocorre, porque a redução de um bit na ordem de modulação de uma dada subportadora faz com que haja um decréscimo de 3 dB na SNR para uma mesma probabilidade de erro de símbolo [18].



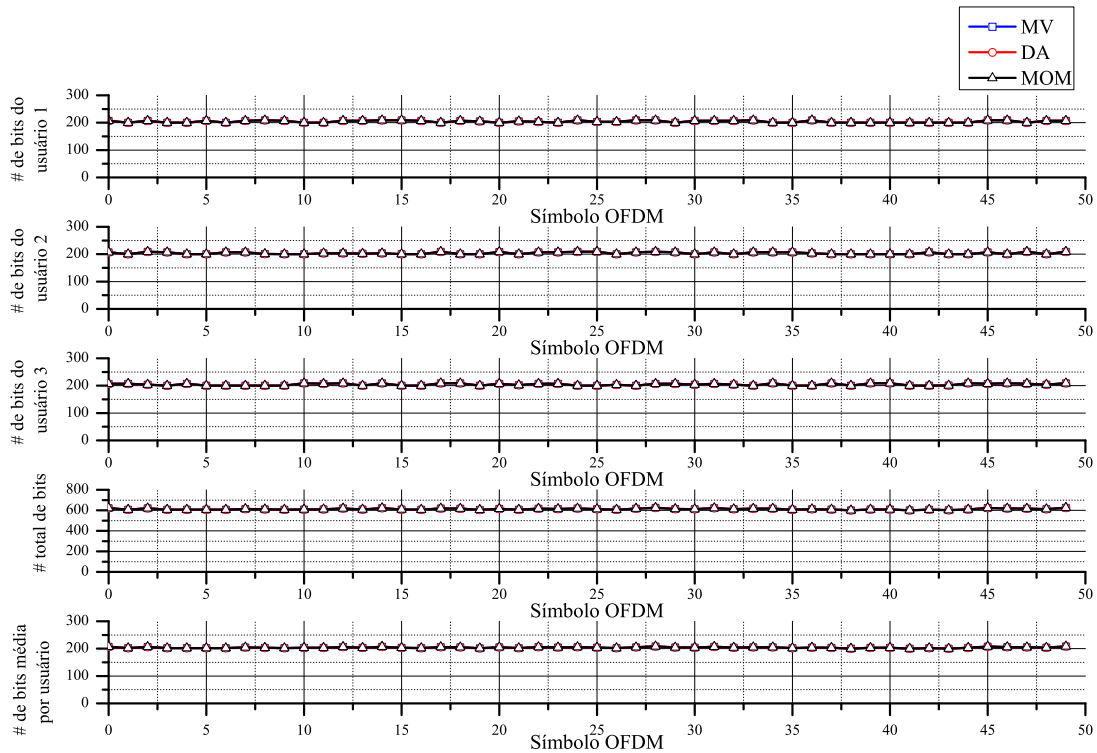
**Figura 4.19:** Probabilidade de erro de símbolo utilizando o canal do usuário 1 apresentado na Figura 4.5.

#### 4.2.6 Desempenho do Algoritmo de *Water-filling* Modificado - Maximização da Robustez

Como descrito na Subseção 4.1.3, a maximização da robustez tem como finalidade fazer com que o sistema apresente uma menor taxa de erro de bit, alocando para os usuários a quantidade de bits necessária para atingir as vazões mínimas. Para a análise desse algoritmo foram utilizadas os mesmos parâmetros aplicados ao AWM-MV, onde a resposta ao impulso dos canais é dado por (4.2), com  $r_{u,i}$  variando segundo uma distribuição Rayleigh.

A Figura 4.20 apresenta a distribuição dos bits de cada usuário e a média de bits alocada aos usuários nas abordagens MV, DA e MOM na transmissão de 50 símbolos OFDM. Pode-se verificar que não existem variações na vazão de dados

entre as abordagens em todos os usuários. Isso ocorre porque este algoritmo alocar apenas as vazões mínimas de cada usuário, utilizando as três abordagens para obter essas vazões, como apresentado na Figura 4.2.



**Figura 4.20:** Número de bits de cada usuário, número total e média de bits por usuário das abordagens MV, DA e MOM.

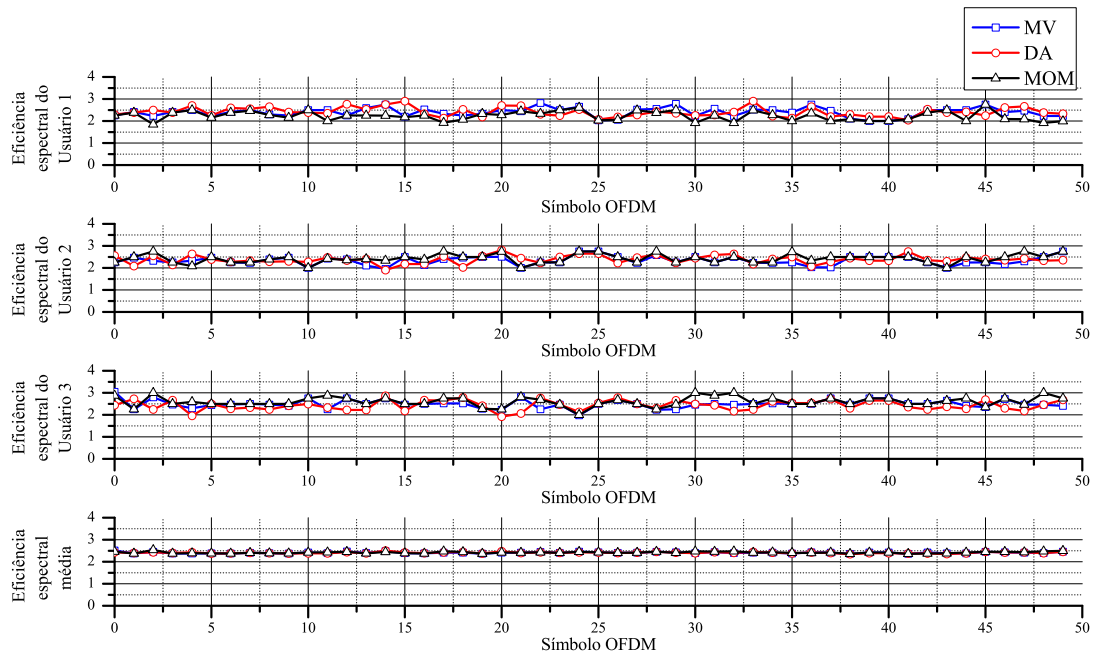
A Tabela 4.9 apresenta o número médio de bits alocados aos usuários e a média de bits dos usuários dos 50 símbolos OFDM transmitidos nas três abordagens. Novamente pode-se comprovar a não existência de variações de alocação de bits aos usuários entre estas abordagens. No procedimento de alocação de bits, cada usuário pode receber uma quantidade de bits ligeiramente superior a quantidade de bits necessária para atingir as vazões mínimas, resultando também em uma vazão média ligeiramente superior.

Na Figura 4.21 é apresentado a distribuição da eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolo OFDM nas abordagens MV, DA e MOM. Nota-se que existe uma pequena variação entre os valores das eficiência espectral entre as três abordagens e entre os usuários. Isso ocorre, pois as quan-

**Tabela 4.9:** Número médio por usuários, por símbolo e média entre os usuário de bits alocados em 50 símbolos OFDM transmitidos empregando as abordagens MV, DA e MOM.

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
MV (bits)	204,14	203,68	204,28	612,10	204,03
DA (bits)	204,14	203,68	204,28	612,10	204,03
MOM (bits)	204,14	203,68	204,28	612,10	204,03

tidades de subportadoras alocadas para cada usuário também variam entre as abordagens, resultando em variações na eficiência espectral, dado que a quantidade de bits alocado é igual a vazão mínima de cada usuário.



**Figura 4.21:** Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e do símbolos OFDM nas abordagens MV, DA e MOM.

A Tabela 4.10 apresenta os valores médios da eficiência espectral por usuário e do símbolo OFDM. Nesta tabela, novamente nota-se que existe uma pequena variação nos valores da eficiência espectral entre as três abordagens e entre os três usuários. Contudo, na média, os valores da eficiência espectral são iguais entre as abordagens, devido as vazões médias também serem iguais.

**Tabela 4.10:** *Eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos utilizando as abordagens MV, DA e MOM.*

	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Média Total
MV (bits/símbolo)	2,38	2,32	2,48	2,39
DA (bits/símbolo)	2,37	2,36	2,44	2,39
MOM (bits/símbolo)	2,21	2,41	2,59	2,39

## 4.3 Conclusão

Os resultados obtidos na simulação do algoritmo de *Water-filling* comprovam a priorização da alocação de recursos aos usuários que utilizam os canais com as melhores respostas em frequência. No entanto, esse algoritmo não distribui os recursos do sistema aos usuários de maneira eficiente, pois um usuário pode receber uma grande quantidade de subportadoras sem que as necessite, prejudicando outros usuários que mesmo estando em condições desfavoráveis de transmissão, necessitam de uma taxa de bits mais elevada.

Os algoritmos ATS e o AWM-MV apresentam uma solução para o problema de distribuição dos recursos do algoritmo de *Water-filling*. Além de analisar a resposta em frequência do canal, esses dois algoritmos fazem a análise da vazão mínima de cada usuário, distribuindo os recursos de acordo com a demanda de cada um. Como era esperado, tanto no ATS, quanto no AWM-MV, eles apresentam uma vazão média menor entre os usuários em relação ao algoritmo de *Water-filling*. No algoritmo AWM-MV, as três abordagens de alocação dos recursos apresentaram desempenho superior em relação ao ATS, que atinge uma vazão média menor. As abordagens, MOM e MV atingiram vazões maiores do que a abordagem DA, sendo que a MOM obteve a maior eficiência.

Como proposta de aumentar a confiabilidade do sistema, foram apresentados dois outros algoritmos, o AWM-R e o AWM-MR. O AWM-R reduz a quantidade de bits das subportadoras alocadas que atingiram as vazões mínimas dos usuários, realocando-os para as subportadoras restantes. Caso haja mais subportadoras



restantes no símbolo OFDM, após essa realocação, são adicionados mais bits ao sistema correspondente a metade das quantidade de bits das subportadoras restantes. Neste caso, entre as abordagens apresentadas, a MOM novamente apresentou a maior vazão média e a DA apresentou a menor. O AWM-MR reduz a eficiência espectral das subportadoras alocadas que atingiram as vazões mínimas e as redistribui até que todas as subportadoras restantes sejam utilizadas. Neste caso, a vazão do sistema resulta em valores próximos as vazões mínimas independente das abordagens MV, DA e MOM utilizadas.

As comparações entre os algoritmos abordados nesse trabalho podem ser melhores explorados numericamente analisando as Tabelas 4.11 e 4.12. Estas apresentam os resultados da alocação da quantidade de bits e da eficiência espectral média de cada usuário e a média por usuário e por símbolo OFDM na transmissão de 50 símbolos OFDM.

**Tabela 4.11:** *Resultados da alocação do número de bits médio para cada usuário, para cada símbolo OFDM transmitido e por usuário com a transmissão de 50 símbolos OFDM de todos os algoritmos abordados*

Algoritmos	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Total	Média
AW	786,38	661,42	1029,70	2477,50	825,83
ATS - <i>bit-loading</i>	200,00	200,00	200,00	600,00	200,00
ATS - AW	687,26	724,40	758,28	2106,32	723,31
AWM-MV - MV	858,74	730,36	856,16	2445,26	815,09
AWM-MV - DA	782,90	766,44	810,52	2359,86	786,62
AWM-MV - MOM	952,48	734,96	766,28	2453,72	817,91
AWM-R - MV	428,76	404,54	442,82	1276,12	425,37
AWM-R - DA	417,20	422,76	417,52	1257,48	419,16
AWM-R - MOM	461,90	413,14	403,90	1278,94	426,31
AWM-MR - MV	204,14	203,68	204,28	612,10	204,03
AWM-MR - DA	204,14	203,68	204,28	612,10	204,03
AWM-MR - MOM	204,14	203,68	204,28	612,10	204,03

**Tabela 4.12:** Resultados da eficiência espectral média por subportadora de cada usuário e a média do símbolo OFDM dos 50 símbolos transmitidos de todos os algoritmos abordados

Algoritmos	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3	Média
AW	9,59	9,48	9,89	9,68
ATS - <i>bit-loading</i>	3,81	3,51	3,73	3,68
ATS - AW	8,22	8,51	9,03	8,23
AWM-MV - MV	9,48	9,37	9,38	9,55
AWM-MV - DA	8,98	9,08	9,60	9,22
AWM-MV - MOM	9,41	9,42	9,96	9,58
AWM-R - MV	4,91	4,91	5,13	4,98
AWM-R - DA	4,86	4,85	5,02	4,91
AWM-R - MOM	4,90	4,92	5,19	5,00
AWM-MR - MV	2,38	2,32	2,48	2,39
AWM-MR - DA	2,37	2,36	2,44	2,39
AWM-MR - MOM	2,21	2,41	2,59	2,39

# Capítulo 5

## Conclusões

Os algoritmos de alocação adaptativa com a análise da resposta em frequência do canal e a vazão mínima de cada usuário se destacam como uma das principais técnicas para a maximização da vazão de um sistema OFDMA.

As técnicas de alocação de subportadoras e bits para o símbolo OFDMA é de grande interesse para maximização da vazão e de robustez dos sistemas de comunicações. Desta forma, o estudo de novas técnicas de alocação adaptativa faz-se necessário para aumentar o desempenho do sistema e manter a relação de compromisso entre a demanda dos usuários e as condições do canal de comunicação.

Nesse trabalho, algoritmos de alocação adaptativa baseados no teorema de *Water-filling* foram explorados. No AW, a maximização da vazão do símbolo OFDM é atingida, ao preço do usuário que utiliza o canal com as piores condições de transmissão não ter oportunidade de transmitir sua vazão mínima. No ATS e no AWM-MV, além das respostas em frequência dos canais, as vazões mínimas de cada usuário também são consideradas, distribuindo os recursos de transmissão de maneira mais justa entre os usuários. Nas abordagens utilizadas no AWM-MV (DA, MV e MOM), todas apresentaram uma vazão maior que no ATS. Dentre elas, a abordagem DA apresentou a menor vazão total e a MOM a maior, isso ocorreu porque uma dada subportadora sempre será alocada para o usuário que melhor puder explorá-la.

Para ambientes onde a maximização da vazão não é prioritária e que se deseja transmitir dados com confiabilidade, o AWM-R e o AWM-MR apresentam-se como soluções interessantes por manter a vazão mínima de cada usuário, priorizando a confiabilidade do sistema. Esses algoritmos também pode ser usado para reduzir o consumo de potência, já que a redução de 1 bit da carga de uma subportadora proporciona uma redução da SNR de 3 dB para uma mesma SER alvo.

## Sugestões para trabalhos futuros

Alguns temas que podem ser explorados para alocação de recursos ao OFDMA para trabalhos futuros.

1. Análise de desempenho dos algoritmos apresentados em função da relação sinal-ruído.
2. Propor novas soluções aos algoritmos apresentados para determinação do número de usuários máximos a serem alocados a um mesmo símbolo OFDMA.
3. Propor uma solução ao algoritmo AWM-R para a diminuição da ordem de modulação ocorra de forma variável, dependendo das características de transmissão dos usuários e do canal de comunicação.

## Anexo A

# Otimização utilizando os multiplicadores de *Lagrange*

O procedimento de otimização abordado é utilizado para maximizar a taxa de transmissão em um sistema OFDM através da distribuição da potência total em todas as subportadoras, sendo que a potência total é constante.

Desta forma, o método dos multiplicadores de *Lagrange* é aplicado para encontrar o valor ótimo de potência a ser distribuído entre as subportadora de modo que satisfaça as seguintes condições:

$$\begin{aligned} &\text{maximizar} \quad \left( \bar{b} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \log_2 \left( 1 + \frac{|H_n|^2 \cdot P_n}{\Gamma \cdot \sigma^2} \right) \right) \\ &\text{sujeito a} \quad \sum_{n=0}^{N-1} P_n = P. \end{aligned}$$

O método dos multiplicadores de *Lagrange* define que

$$\frac{d}{dP_n} F(n, P_n) + \alpha \cdot \frac{d}{dP_n} \Phi(n) = 0. \quad (\text{A.1})$$

onde  $\alpha$  é o multiplicador de *Lagrange* e que a função a ser maximizada seja da forma

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(n, P_n) d_n, \quad (\text{A.2})$$

e esta apresenta uma ou mais restrições dada por

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(n) d_n = \lambda, \quad (\text{A.3})$$

onde  $\lambda$  é uma constante.

Aplicando este método na equação a ser maximizada e em sua restrição, verifica-se que

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(n, P_n) d_n \rightarrow \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{|H_n|^2 \cdot P_n}{\Gamma \cdot \sigma^2} \right),$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(n) d_n = \lambda \rightarrow \sum_{n=0}^{N-1} P_n = P.$$

Assim, aplicando a definição dos multiplicadores de *Lagrange* dado por A.1, tem-se

$$\frac{d}{dP_n} \left[ \frac{1}{N} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{|H_n|^2 \cdot P_n}{\Gamma \cdot \sigma^2} \right) \right] + \alpha \cdot \frac{d}{dP_n} P_n = 0. \quad (\text{A.4})$$

Pela diretiva das equações diferencias

$$\frac{d}{d_x} \cdot \log_a(u) = \frac{\log_a(e)}{u} \cdot \frac{d}{d_x}(u)$$

$$\frac{\log_2(e)}{N \cdot \left( 1 + \frac{|H_n|^2 \cdot P_n}{\Gamma \cdot \sigma^2} \right)} \cdot \frac{d}{dP_n} \left( 1 + \frac{|H_n|^2 \cdot P_n}{\Gamma \cdot \sigma^2} \right) + \alpha = 0. \quad (\text{A.5})$$

Isolando  $P_n$

$$P_n = -\frac{\Gamma \cdot \sigma^2}{|H_n|^2} - \frac{\log_2(e)}{\alpha \cdot N}. \quad (\text{A.6})$$

Aplicando A.6 na restrição e isolando  $\alpha$

$$\alpha = -\frac{\log_2(e)}{P + \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\Gamma \cdot \sigma^2}{|H_n|^2}} \quad (\text{A.7})$$

substituindo A.7 em A.6

$$P_n = \frac{P + \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\Gamma \cdot \sigma^2}{|H_n|^2}}{N} - \frac{\Gamma \cdot \sigma^2}{|H_n|^2} \quad (\text{A.8})$$

Analisando o primeiro termo da equação A.8, verifica-se que o termo é uma constante. Assim, definindo esse termo igual a  $K$ , chamado de *water-level* ou nível de água, tem-se

$$K = \frac{P}{N} + \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{\Gamma \cdot \sigma^2}{|H_n|^2}}{N} \quad (\text{A.9})$$

Desta forma, a distribuição das potências entre as subportadoras fica igual a

$$P_n = \left[ K - \frac{\Gamma \cdot \sigma^2}{|H_n|^2} \right]^+, \quad (\text{A.10})$$

dado que  $[\cdot]^+$  é definido como valor positivo maior ou igual a zero.

Desta forma, conclui-se que a potência a ser distribuída na subportadora  $n$  é a quantidade de potência que se pode colocar entre os limites do valor do *water-level* e a relação inversa de  $CNR$ , sendo que o somatório da distribuição de  $P_n$  deve ser sempre igual a potência total disponível  $P$ , como pode ser visualizado na Figura 3.3.

## Anexo B

# Trabalhos publicados referente à dissertação

- A. D. Soares, L. L. Mendes and R. A. A. Souza, “*A Subcarrier and Bit Allocation for Mobile OFDMA Systems*,” Virginia Tech, Blacksburg, EUA, 2012.
- A. D. Soares, L. L. Mendes e R. A. A. Souza, “*Análise de desempenho do Algoritmo de Water-filling Modificado para Alocação de Recursos em Sistemas OFDMA*,” em Anais do XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasília, DF, 2012.



# Referências Bibliográficas

- [1] S. C. Yang, “*OFDMA system analysis and design*,” Boston: Artech House, 2010.
- [2] 3GPP TR 25.814 V7.1.0, “*Technical Report 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)*,” (Release 7), 2006-09.
- [3] ETSI TR 136 913 v10.0.0, “*Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)(LTE-Advanced)*,” (Release 10), 2011-04.
- [4] IEEE 802.16j-2009, Institute of Electrical and Electronics Engineers “*Wireless Broadband*,” 2009.
- [5] IEEE 802.22-10/0073r03, Institute of Electrical and Electronics Engineers “*Wireless Regional Area Networks*,” 2010.
- [6] E. B. Rodrigues and F. Casadevall, “*Rate adaptive resource allocation with fairness control for OFDMA networks*,” EW. 18th European Wireless Conference European Wireless, 2012.
- [7] D. Ghosh and P. Mohapatra, “*Throughput-constrained scheduling in OFDMA wireless networks*,” 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012.

- [8] F. Khelifa, W. B. Hassen, M. Afif and A. Samet, “*Adaptive Resource Allocation Scheme using Sliding Window Subchannel Gain Computation: Context of OFDMA Wireless Mobiles Systems*,” Signals and Devices (SSD), 2011 8th International Multi-Conference on Systems, March 2011.
- [9] V. D. Papoutsis and S. A. Kotsopoulos, “*Efficient Rate Adaptive Resource Allocation Scheme in Uplink OFDMA Wireless Systems*,” in ICWMC 2011: The Seventh International Conference on Wireless and Mobile Communications, Luxembourg, 2011.
- [10] G. Münz, S. Pfletschinger and J. Speidel, “*Efficient Subcarrier Allocation for Multiple Access in OFDM Systems*,” in 7th International OFDM-Workshop 2 002 (InOWo’02), Hamburg, 2002, p. 21-25.
- [11] G. Munz, S. Pfletschinger and J. Speidel, “*An efficient waterfilling algorithm for multiple access OFDM*,” in Globecom 2002, Taipei, Taiwan, vol. 1, p. 681-685.
- [12] J. Jang and K. B. Lee, “*Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems*,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 2, pp. 171-178, 2003.
- [13] L. L. Mendes, “*Modelos Matemáticos para Estimação do Desempenho de Sistemas de Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais*,” Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, BR, Julho de 2007.
- [14] ETSI EN 300 744 V1.4.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television*”, Tech. Rep., European Broadcastin Union, 2001.
- [15] ITU-R 205/11, “*Channel Coding, Frame Structure and Modulation scheme for Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB-T)*,” Tech. Rep., International Telecommunication Unio, 1999.

- [16] J. G. Andrews, A. Ghosh and R. Muhamed, *“Fundamentals of Wimax, Understanding Broadband Wireless Networking,”* 1st ed. Massachusetts: Prentice Hall, 2007.
- [17] J. Faezah and K. Sabira, *“Adaptive Modulation for OFDM Systems,”* International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), vol. 1, No. 2, August 2009.
- [18] D. Guimarães, *“Digital transmission: a simulation-aided introduction with VisSim Comm,”* Heidelberg;London: Springer, 2009.
- [19] A. Bahai, *“Multi-carrier digital communications: theory and applications of OFDM,”* 2nd ed. New York: Springer, 2004.
- [20] G. P. Aquino, *“Comparação entre técnicas de redução da PAPR em sinais OFDM,”* Dissertação de Mestrado, INATEL, Santa Rita do Sapucaí, MG, BR, Dezembro de 2011.
- [21] Y.-J. Chang, F.-T. Chien, and C. C. J. Kuo, *“Performance comparison of OFDM-TDMA and OFDMA with cross-layer consideration,”* in Proc. IEEE VTC-06, Sept. 2006.
- [22] C. Y. Wong and R. S. Cheng, *“Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation,”* IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 17, no. 10, 1999.
- [23] David Tse, Pramod Viswanath, *“Fundamentals of wireless Communication,”* Cambridge University Press, Year 2005.
- [24] D. Hughes-Hartogs, *“Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media,”* U.S Patent 4,679,227, July 7, 1987.

- [25] R. V. Sonalkar and R. R. Shively, “*An efficient bit-loading algorithm for DMT applications,*” IEEE Communications Letters, vol. 4, no. 3, p. 80-82, mar. 2000.
- [26] J. M. Cioffi, “*A Multicarrier Primer,*” Stanford University, Stanford, CA, ANSI T1E1, 1991.
- [27] S. Haykin, “*Communication System,*” 5th Edition Hoboken, John Wiley, Year 2009.
- [28] G. David Forney, Jr. Fellow, IEEE, and Gottfried Ungerboeck Fellow, IEEE, “*Modulation and Coding for linear Gaussian Channels,*” IEEE Transaction on Information Theory, Vol.44, No. 6, October 1998.
- [29] S. Boyd and L. Vandenberghe, “*Convex Optimization,*” Cambridge University Press, March 2004.
- [30] R. D. Yate and D. J. Goodman, “*Probability and Stochastic Processes: A Friendly Introduction for Electrical and Computer Engineers,*” John Wiley, 1999.