



**PAULO HENRIQUE ODELINO DE CARVALHO**

**ESTUDO DA TECNOLOGIA DAS ANTENAS  
INTELIGENTES**

**LAVRAS – MG**

**2014**

**PAULO HENRIQUE ODELINO DE CARVALHO**

**ESTUDO DA TECNOLOGIA DAS ANTENAS INTELIGENTES**

Monografia de Graduação apresentada ao  
Departamento de Ciência da Computação da  
Universidade Federal de Lavras para obtenção do  
título de Bacharel em Sistemas de Informação

Orientador

Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia

**LAVRAS – MG**

**2014**

**PAULO HENRIQUE ODELINO DE CARVALHO**

**ESTUDO DA TECNOLOGIA DAS ANTENAS INTELIGENTES**

Monografia de Graduação apresentada ao  
Departamento de Ciência da Computação da  
Universidade Federal de Lavras para obtenção do  
título de Bacharel em Sistemas de Informação

APROVADA em 11 de Julho de 2014.

Prof. Dr. Hermes Pimenta de Moraes Júnior UFLA

Prof. Dr. Neumar Malheiros UFLA

Thiago do Prado Ramos DGTI



Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia

(Orientador)

**LAVRAS – MG**

**2014**

*Dedico este trabalho aos meus pais, José Edson (em memória) e Maria Regina.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado saúde para concretizar mais essa etapa na minha vida, paciência para não desistir nas horas mais difíceis dessa caminhada e sabedoria para superar as etapas mais complicadas.

Aos meus pais, José Edson (em memória) e Maria Regina, que sempre nas horas mais difíceis estava ao meu lado, dando total apoio para não desistir.

Aos meus irmãos pelo apoio, carinho e paciência com esse projeto, que tanto demandou tempo, esforço e colaboração de todos para que fosse concretizado.

À minha namorada Ana Paula, pelo amor, companheirismo e carinho, fundamentais para a concretização desse sonho e para seguir em frente.

Ao meu orientador professor Luiz Henrique, pela confiança, apoio, dedicação e comprometimento com este trabalho. Pela paciência e ajuda nas dificuldades, pela excelente supervisão e pela dedicação para que esse projeto fosse concretizado.

Aos professores e funcionários do DCC - Departamento de Ciência da Computação.

Aos amigos e colaboradores da DGTI - Diretoria de Gestão da Tecnologia da Informação, pelo apoio ao longo de todo caminho.

*"A realização não vem com a conquista dos objetivos traçados, mas sim no caminho percorrido até alcançá-lo"(Paulo Master).*

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	<b>6</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>15</b>
1.1 Definição do Problema . . . . .	16
1.2 Objetivo Geral . . . . .	16
1.3 Objetivos Específicos . . . . .	17
1.4 Motivação . . . . .	17
1.5 Solução Proposta . . . . .	19
1.6 Organização do Trabalho . . . . .	19
<b>2 Referencial Teórico</b>	<b>20</b>
2.1 Problemas de propagação de sinal em larga escala . . . . .	20
2.1.1 Difração . . . . .	20
2.1.2 Dispersão . . . . .	21
2.1.3 Reflexão . . . . .	22
2.2 Propagação de caminhos múltiplos em pequena escala . . . . .	23
2.2.1 Fatores que influenciam a atenuação em pequena escala . . . . .	23
2.2.2 Deslocamento <i>Doppler</i> . . . . .	24
2.3 Perda de percurso - <i>Path Loss</i> . . . . .	25
2.4 Interferências co-canal e canal adjacente . . . . .	25
2.4.1 Interferência co-canal . . . . .	26
2.4.2 Interferência canal adjacente . . . . .	26
<b>3 Antenas</b>	<b>28</b>
3.1 Antenas Atuais . . . . .	28
3.1.1 Antena omnidirecional . . . . .	29
3.1.2 Antena setorial-direcional . . . . .	31
3.2 Antenas Inteligentes ( <i>Smart Antenna</i> ) . . . . .	33

3.2.1	Sistemas de antenas de feixe comutado ( <i>Switched Beam</i> ) . . .	35
3.2.2	Sistemas de antenas de conjuntos adaptativos ( <i>Adaptive Array</i> ) . . . . .	36
3.2.3	Algoritmos de DOA . . . . .	37
3.2.3.1	Algoritmo <i>Music</i> . . . . .	37
3.2.3.2	Algoritmo <i>Esprit</i> . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>42</b>
4.1	Tipo de Pesquisa . . . . .	42
4.2	Etapas da Pesquisa . . . . .	42
4.3	Materiais e Métodos . . . . .	43
4.3.1	Dispositivos Utilizados . . . . .	43
4.3.2	Ambiente de Teste . . . . .	45
4.3.3	Métricas Avaliadas . . . . .	46
4.3.4	Ferramentas Utilizadas . . . . .	47
4.3.5	Definição dos Testes . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>51</b>
5.1	Teste de Desempenho . . . . .	51
5.1.1	AP RouterBoard . . . . .	51
5.1.2	AP TP-Link . . . . .	52
5.1.3	AP Ruckus ( <i>Smart Antenna</i> ) . . . . .	53
5.1.4	Discussão . . . . .	53
5.2	Teste de Robustez . . . . .	55
5.2.1	AP RouterBoard . . . . .	56
5.2.2	AP TP-Link . . . . .	56
5.2.3	AP Ruckus . . . . .	57
5.2.4	Discussão . . . . .	58
5.3	Teste de Alcance . . . . .	60

5.3.1	Discussão . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>62</b>
6.1	Conclusões sobre a tecnologia <i>Smart Antennas</i> . . . . .	62
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	63
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Propagação <i>Multipath</i> (CHRIST, 2014). . . . .	15
1.2	Matriz de Beamforming tradicional. Antenas Inteligentes com feixes nulos (YOU, 2014). . . . .	18
1.3	Arranjos de antenas ligados. Feixe em atividade (YOU, 2014). . . . .	18
1.4	Arranjos de antenas adaptativos. Feixes são adaptados conforme a necessidade de cada usuário (YOU, 2014). . . . .	18
2.1	Difração (TIL, 2013). . . . .	21
2.2	Dispersão (CORREIA, 2007). . . . .	22
2.3	Reflexão (SOUZA <i>et al.</i> , 2001). . . . .	22
2.4	Deslocamento <i>Doppler</i> (JUNIOR, 2011). . . . .	24
2.5	Perda de Percurso - <i>Path Loss</i> (CONNIQ, 2013). . . . .	25
2.6	Interferência co-canal (BATTISTI, 2014b). . . . .	26
2.7	Interferência canal adjacente (BATTISTI, 2014c). . . . .	27
3.1	Antena Isotrópica (FREITAS, 2008). . . . .	29
3.2	Largura de feixe de antena direcional (FREITAS, 2008). . . . .	29
3.3	Diagramas de irradiação horizontal e vertical de uma antena omnidirecional (CORREIA, 2007). . . . .	30
3.4	Área de cobertura de uma antena omnidirecional (CORREIA, 2007). . . . .	30
3.5	Diagramas de irradiação horizontal e vertical de uma antena direcional (CORREIA, 2007). . . . .	31
3.6	Área de cobertura de uma antena direcional (CORREIA, 2007). . . . .	32
3.7	Largura de feixe horizontal e vertical de uma antena direcional (BATTISTI, 2014a). . . . .	33
3.8	Sistema de antenas de feixe comutado ( <i>Switched Beam</i> ) (FRENZEL, 2005). . . . .	35

3.9	Sistema de antenas de conjunto adaptativo ( <i>Adaptive Array</i> ) (FRENZEL, 2005). . . . .	36
3.10	Funcionamento do algoritmo <i>Music</i> . Elemento da matriz M com os sinais que chegam de D (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010). . . . .	38
3.11	Funcionamento do algoritmo <i>Esprit</i> : Quatro elementos de matriz linear com dois dupletos (CHRIST, 2014). . . . .	40
4.1	Placa RB433AH (MIKROTIK, 2014). . . . .	43
4.2	AP TP-Link TL-WR941ND (TP-LINK, 2014). . . . .	44
4.3	AP ZoneFlex 7763 (RUCKUS WIRELESS, 2014). . . . .	44
4.4	AP ZoneFlex 7762 (RUCKUS WIRELESS, 2014). . . . .	45
4.5	Rede Wireless em funcionamento (TECHTUDO, 2014). . . . .	46
4.6	Funcionamento do Iperf em linha de comando. . . . .	47
4.7	Funcionamento do Iperf pela interface gráfica Jperf. . . . .	48
4.8	Interface gráfica FlexMaster. . . . .	48
4.9	Interface gráfica Winbox. . . . .	49
5.1	Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP RouterBoard. . . . .	51
5.2	Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP RouterBoard. . . . .	52
5.3	Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP TP-Link. . . . .	52
5.4	Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP TP-Link. . . . .	53
5.5	Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP Ruckus. . . . .	54
5.6	Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP Ruckus. . . . .	54

5.7	Transferência de dados dos AP utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas. . . . .	55
5.8	Transferência de dados dos AP utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas. . . . .	55
5.9	Tentativa de Teste com AP RouterBoard em ambiente externo. . . . .	56
5.10	Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP TP-Link no teste de robustez. . . . .	57
5.11	Teste de capacidade de usuários AP Ruckus. . . . .	58
5.12	Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP Ruckus no teste de robustez. . . . .	58
5.13	Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP Ruckus no teste de robustez. . . . .	59
5.14	Transferência de dados dos AP utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no teste de robustez. . . . .	59
5.15	Teste de limite de distância com AP Ruckus ( <i>Smart Antenna</i> ). Conectando e distanciando do AP. . . . .	60
5.16	Teste de limite de distância com AP Ruckus ( <i>Smart Antenna</i> ). Conectando no limite de acesso do AP. . . . .	61
5.17	Comparação dos testes do AP Ruckus em ambiente externo utilizando o protocolo UDP. . . . .	61

## LISTA DE ABREVIATURAS

3G Terceira Geração

4G Quarta Geração

*Esprit Estimation of Signal Parameters via Rotacional Invariance Technique*

*Music Multiple Signal Classification*

CDMA200 *Code Division Multiple Access*

DGTI Diretoria de Gestão da Tecnologia da Informação

DOA *Direction of Arrival*

DSP *Digital Signal Processor*

GPRS *General Packet Radio Service*

IC Intervalo de Confiança

MIMO *Multiple Input and Multiple Output*

MISO *Multiple Input and Single Output*

NLANR *National Laboratory for Applied Network Research*

SA *Smart Antennas*

SIMO *Single Input and Multiply Output*

SNR *Signal To Noise Ratio*

UFLA Universidade Federal de Lavras

WCDMA *Wideband Code Division Multiple Access*

## RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de estudar e analisar o desempenho das tecnologias atuais utilizadas na transmissão de dados pelos dispositivos móveis e comparar com a tecnologia das Antenas Inteligentes (SA - *Smart Antennas*) que é apontada como a tecnologia chave para o aumento da capacidade de comunicação e qualidade em redes sem fio. A tecnologia por trás das Antenas Inteligentes ainda é incipiente, sendo semelhante à usada em sistemas de radares militares. Os experimentos realizados neste trabalho avaliam as transmissões dos dispositivos sem fio nos ambientes internos e externos. Foram utilizados quatro dispositivos, sendo dois que utilizam as tecnologias atuais e dois que utilizam as tecnologias das Antenas Inteligentes. Nos testes foram avaliadas as métricas, vazão, jitter, números de clientes suportados por cada *Access Point* (AP), número de pacotes transmitidos e número de pacotes perdidos. Os testes foram realizados na Universidade Federal de Lavras (UFLA), e o software Iperf foi utilizado para execução dos experimentos, com o intuito de avaliar o desempenho da transferência de dados usando os protocolos TCP e UDP. Os resultados encontrados comprovam o desempenho da tecnologia das Antenas Inteligentes, e apresentam os benefícios que essa nova tecnologia pode proporcionar na transmissão das redes sem fio. A utilização das Antenas Inteligentes apresentou uma melhora significativa na qualidade da transmissão de dados, além de, suportar um maior número de clientes, quando comparado aos AP que utilizam as tecnologias atuais.

**Palavras-Chave:** Antenas Inteligentes, Desempenho, Transmissão de Dispositivos Móveis, Iperf.

## **ABSTRACT**

This work aims to study and analyze the performance of the currently technologies used in the data transmission for mobile devices and compare it with the Smart Antennas technology that is identified as a key technology to increase communication capability and quality in wireless networks. The technology behind the Smart Antennas is still incipient, being similar to the used in military radar systems. The experiments conducted in this paper evaluated the transmission of wireless devices in indoor and outdoor environments. There were used four devices, two of which use traditional technologies and two that use the technologies of Smart Antennas. During tests were evaluated the metrics, throughput, jitter, number of clients supported by each Access Point (AP), number of packets transmitted and the number of lost packets. The tests were conducted at the Federal University of Lavras (UFLA), and the software Iperf was used to perform the experiments in order to evaluate the data transfer performance using the TCP and UDP protocols. The results prove the performance of the Smart Antennas Technology, and still present the benefits that this new technology can bring to the data transmission in wireless networks. The Smart Antennas usage showed a significant improvement in the data transmission quality, as well as, support to a larger number of customers when compared to the currently AP technology.

**Keywords:** Smart Antennas, Performance, Mobile Data Transmission, Iperf.

# 1 INTRODUÇÃO

A demanda por serviços de redes sem fio nunca foi tão alta, resultando no desenvolvimento de novas tecnologias de base como: GPRS (*General Packet Radio Service*), WCDMA 3G (*Wideband Code Division Multiple Access*), CDMA2000 (*Code Division Multiple Access*), 3G (Terceira Geração) e 4G (Quarta Geração) (CHANG; HU, 2012).

Essas novas tecnologias de base fornecem um padrão para acesso de rádio transparente, estabelecendo, assim, um ambiente móvel, transportando o tráfego de PC, *smartphones* e computadores portáteis. No entanto, o desempenho da comunicação depende da qualidade do sinal de rádio sem fio, que pode sofrer de problemas como propagação *Multipath* em ambientes urbanos (CHANG; HU, 2012). A Figura 1.1 mostra um grande número de dispositivos de comunicação sem fio sendo utilizados que sofrem de problemas de propagação *Multipath*.



**Figura 1.1:** Propagação *Multipath* (CHRIST, 2014).

Esses problemas são provocados pela utilização de antenas omnidirecionais que irradiam sinal por várias direções e por antenas setoriais-direcionais que determinam uma direção para irradiar o sinal. Portanto, a solução foi a criação de novas tecnologias, entre as quais estão as antenas inteligentes (SA - *Smart Antennas*). As SA são consideradas uma promessa de avanço tecnológico para o uso

de redes sem fio devido a sua capacidade de processamento de sinal e redução do problema de propagação *Multipath* (SUNDARESAN; SIVAKUMAR, 2011).

A tecnologia das SA consiste em um sistema que engloba múltiplos elementos de antena e um processador de sinal. Esses sistemas são capazes de combinar um arranjo de antenas simples com processamento digital de sinal, transmitindo e recebendo dados de forma adaptativa, de modo a explorar melhor o canal de comunicação disponível no ambiente no qual a transmissão é efetuada (CHANG; HU, 2012).

## 1.1 Definição do Problema

A forma como o sinal é distribuído pelas antenas tradicionais causa desperdício de recursos, visto que a maior parte do sinal transmitido irradia em direções que não coincidem com a verdadeira posição do usuário. O sinal vindo de uma base pode causar interferência para outros usuários que não estejam utilizando o sinal vindo desta base transmissora (RAPPAPORT, 2009). Também pode haver interferência na base transmissora por meio de sinais oriundos de outros usuários pelo qual ela não é responsável. Além desses problemas, em sistemas semi-direcional é necessário à criação de setores, e o sinal é irradiado em todo o setor e não especificamente na direção do usuário (RAPPAPORT, 2009).

## 1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo e análise do desempenho da tecnologia das SA, por meio de uma ferramenta de análise de tráfego. A tecnologia das SA será comparada com as tecnologias empregadas atualmente nas redes sem fio.

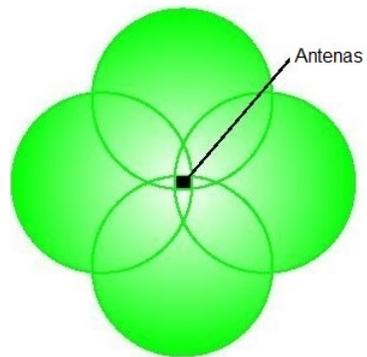
### 1.3 Objetivos Específicos

- Analisar e comparar o desempenho dos dispositivos que utilizam a tecnologia das SA com os dispositivos que utilizam as tecnologias empregadas atualmente nas redes sem fio.
- Realizar testes em ambiente interno para diminuir a interferência ou obstáculos que possam obstruir a propagação do sinal.
- Realizar testes em ambiente externo com interferência e obstáculos que prejudicam a propagação do sinal.

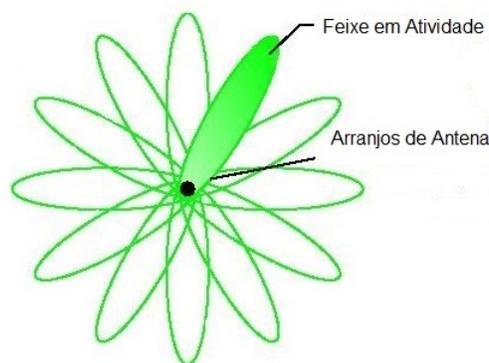
### 1.4 Motivação

Uma das tecnologias que vem crescendo no mercado é a das SA. Essa tecnologia é considerada chave para o aumento da capacidade e qualidade da comunicação em redes sem fio. A ideia fundamental das SA é melhorar o desempenho do sistema de comunicação sem fio aumentando o ganho numa direção escolhida. Isso pode ser conseguido apontando-se os lóbulos principais dos padrões do feixe da antena para os utilizadores (usuários) desejados (NICOLAESCU; STOICA, 2010).

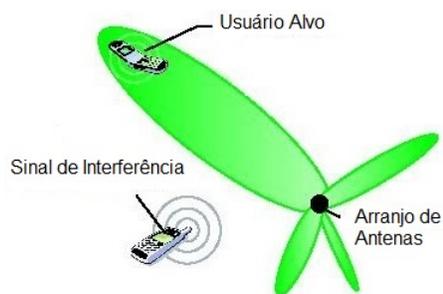
Um sistema de SA combina múltiplos elementos de antena com uma capacidade de processamento de sinal para aperfeiçoar automaticamente a irradiação e/ou o padrão de recepção em resposta às condições do meio de transmissão do sinal. A Figura 1.2 mostra o funcionamento das SA com os feixes nulos, sem nenhum feixe sendo utilizado. A Figura 1.3 mostra o feixe adaptativo em atividade. A Figura 1.4 mostra as SA em funcionamento, além de, apontar a direção do lóbulo principal para um usuário escolhido, o sistema de antena inteligente pode dirigir automaticamente um ou mais valores nulos do padrão de diretividade para uma ou várias fontes de interferência, com isso, diminuindo a interferência de sinais não desejados (NICOLAESCU; STOICA, 2010).



**Figura 1.2:** Matriz de Beamforming tradicional. Antenas Inteligentes com feixes nulos (YOU, 2014).



**Figura 1.3:** Arranjos de antenas ligados. Feixe em atividade (YOU, 2014).



**Figura 1.4:** Arranjos de antenas adaptativos. Feixes são adaptados conforme a necessidade de cada usuário (YOU, 2014).

## 1.5 Solução Proposta

As SA propõem um sistema que reage a mudanças de ambiente dinamicamente, com o objetivo de fornecer um sinal de maior qualidade e melhor aproveitamento das faixas de frequência na comunicação sem fio. Para verificar as soluções propostas pelas SA, avaliamos o desempenho dos dispositivos que utilizam a tecnologia das SA e os dispositivos que utilizam as tecnologias atuais. Os testes foram realizados em ambientes reais e foram executados com a ferramenta Iperf (GATES *et al.*, 2014).

## 1.6 Organização do Trabalho

No capítulo 2, são apresentados os principais problemas de transmissão em redes sem fio com as tecnologias atuais e o conceito de antena, explicando o funcionamento das antenas omnidirecional e setoriais-direcional. No capítulo 3, são apresentadas as antenas inteligentes (*Smart Antennas - SA*), a tecnologia utilizada e os algoritmos que fazem as SA serem inteligentes. No capítulo, 4 é apresentada a metodologia utilizada nesse trabalho. No capítulo 5, são apresentados os resultados e discussão. No capítulo 6, são apresentados a conclusão e possíveis trabalhos futuros.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Os canais de rádio impõem limitações fundamentais para o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio. O caminho do sinal entre o transmissor e o receptor pode variar desde a simples linha de visão até a obstrução completa por prédios, montanhas e folhagens. Os canais de rádio são aleatórios e não oferecem uma análise fácil, até mesmo a velocidade de deslocamento influencia a rapidez com que o nível de sinal enfraquece quando o terminal móvel se afasta (RAPPAPORT, 2009). Neste capítulo, serão apresentadas as limitações fundamentais para o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio e os tipos de antenas tradicionais dos padrões 802.11 a/b/g/n.

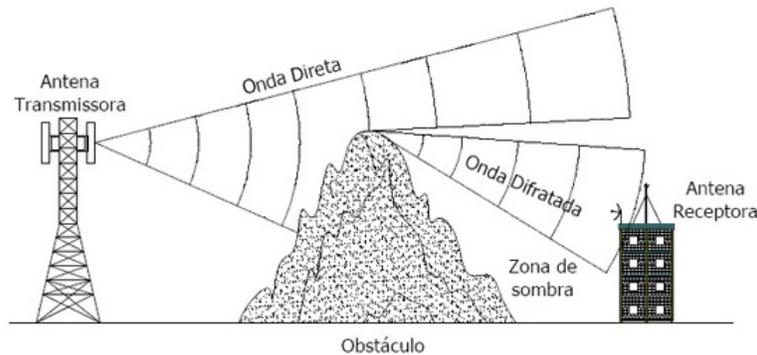
### **2.1 Problemas de propagação de sinal em larga escala**

A perda de propagação compreende o efeito da deterioração da potência recebida com a distância (existindo mesmo nos modelos de propagação em espaço livre) e de vários obstáculos entre os transmissores e receptores (árvores, edifícios, colinas, etc.) presentes nos perfis de redes reais (BLASZCZYSZYN; KARRAY; KLEPPER, 2010). Os problemas por trás da propagação da onda eletromagnética são diversos, mas geralmente podem ser atribuídos à difração, dispersão e reflexão (RAPPAPORT, 2009).

#### **2.1.1 Difração**

A difração é um fenômeno bem conhecido, sendo estudado e descrito inicialmente por Christian Huygens, no ano de 1678. Huygens estabeleceu o princípio no qual a propagação de uma onda de luz pode ser prevista se assumindo que cada ponto da frente de onda atua como uma fonte de uma onda secundária que se propaga em todas as direções. Esse conjunto de ondas que se forma em torno de todas as ondas secundárias é a nova frente de onda (FERREIRA, 2011).

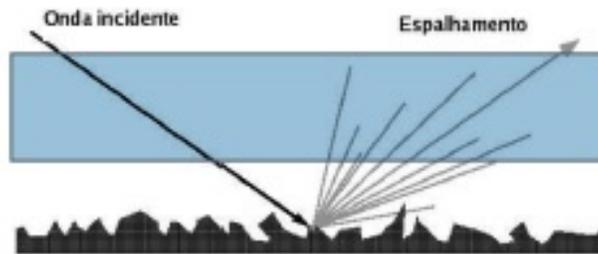
A difração ocorre quando o caminho de um sinal de rádio entre o transmissor e o receptor é obstruído por uma superfície que possui irregularidades (arestas). As ondas secundárias resultantes da superfície de obstrução estão presentes pelo espaço e até mesmo por trás do obstáculo, fazendo surgir uma curvatura de ondas em torno do obstáculo. Isso ocorre até mesmo quando não existe um caminho de linha de visão entre o transmissor e o receptor (RAPPAPORT, 2009). A Figura 2.1 mostra que há uma obstrução do sinal primário que vem da antena transmissora para a receptora, o sinal que chega até a antena receptora é um sinal secundário, que chega por meio de ondas difratadas.



**Figura 2.1:** Difração (TIL, 2013).

### 2.1.2 Dispersão

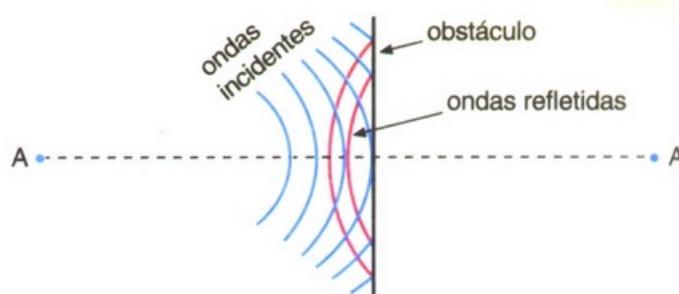
A dispersão ocorre quando o meio pelo qual a onda trafega consiste de objetos com dimensões menores que o comprimento de onda e existe um grande número de obstáculos. As ondas dispersas são produzidas por superfícies ásperas, pequenos objetos, ou por outras irregularidades no canal (RAPPAPORT, 2009). A Figura 2.2 mostra que o sinal ao encontrar uma superfície rugosa, é espalhado para todas as direções, conduzindo outras frentes de ondas para o receptor.



**Figura 2.2:** Dispersão (CORREIA, 2007).

### 2.1.3 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética em propagação colide com um objeto que possui dimensões maiores que o comprimento de onda da onda que se propaga. Reflexões ocorrem na superfície da terra, nos prédios e paredes (RAPPAPORT, 2009). A Figura 2.3 mostra o momento em que as ondas incidentes atingem os obstáculos. Nesse instante, elas sofrem reflexão de modo que cada ponto do obstáculo torna-se fonte de uma onda secundária, que são as ondas refletidas. Essas ondas refletidas podem atenuar o sinal da onda original ou mesmo anular o sinal transmitido.



**Figura 2.3:** Reflexão (SOUZA *et al.*, 2001).

## 2.2 Propagação de caminhos múltiplos em pequena escala

A atenuação em pequena escala, ou simplesmente atenuação (*fading*), é usada para descrever as flutuações rápidas das amplitudes, fases ou atrasos de caminhos múltiplos de um sinal de rádio em um curto período de tempo ou distância. Ela é causada pela interferência entre duas ou mais ondas transmitidas, que chegam ao receptor em tempos ligeiramente diferentes. Essas ondas, chamadas de ondas de caminhos múltiplos, se combinam na antena do receptor, resultando em um sinal que pode variar em amplitude e fase, dependendo da distribuição da intensidade, do tempo relativo de propagação das ondas e da largura de banda do sinal (RAPAPORT, 2009).

### 2.2.1 Fatores que influenciam a atenuação em pequena escala

Segundo (RAPAPORT, 2009), há vários fatores físicos no canal de propagação de rádio que influenciam a atenuação em pequena escala, entre eles estão:

- Propagação de caminho múltiplo: a presença de objetos refletindo o sinal e dispersos no canal de propagação de rádio criam um ambiente em constante mudança, que dissipa a energia do sinal em amplitude, fase e tempo.
- Velocidade da estação móvel: o movimento relativo entre a estação-base e a estação móvel resulta em modulação de frequência aleatória por causa de diferentes deslocamentos *Doppler* em cada um dos componentes do caminho múltiplo.
- Velocidade dos objetos ao redor: se há componentes que estão em movimento contrário aos componentes do caminho múltiplo em um canal de rádio, esses componentes de movimento contrário induzem os componentes do caminho múltiplo a um deslocamento *Doppler*.

- Largura de banda de transmissão do sinal: se a largura de banda de sinal de rádio transmitido for maior que a largura de banda do canal de caminho múltiplo, o sinal recebido será distorcido, mas a intensidade desse sinal não atenuará em um determinado local, ou seja, a atenuação do sinal em pequena escala não será significativa.

### 2.2.2 Deslocamento *Doppler*

O deslocamento *Doppler* foi descoberto pelo físico austríaco Johann Christian Andreas Doppler. Em sua teoria ele relatou que quando a fonte da onda e a frequência recebida estão em direções opostas, há uma diminuição relativa da frequência recebida (SUNXU *et al.*, 2010). Quando uma movimentação da estação móvel em direção à chegada da onda, o deslocamento é positivo, aparentemente há um aumento na frequência recebida. Quando uma movimentação da estação móvel é contrária à chegada da onda, o deslocamento é negativo, aparentemente há uma diminuição na frequência recebida (RAPPAPORT, 2009). A Figura 2.4 mostra um deslocamento contrário entre o transmissor e o receptor do sinal, esse movimento contrário gera um deslocamento negativo, que vai diminuindo a frequência recebida conforme a distância entre a fonte da onda e a base receptora aumenta.

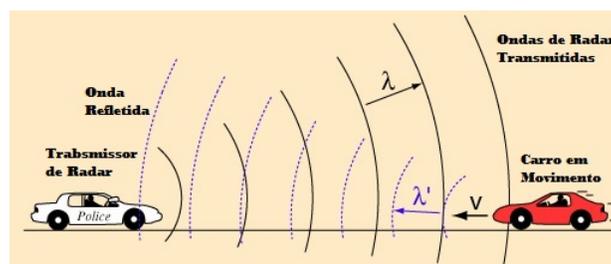


Figura 2.4: Deslocamento *Doppler* (JUNIOR, 2011).

### 2.3 Perda de percurso - *Path Loss*

A perda de percurso é uma medida da redução da densidade de uma onda eletromagnética que se propaga através do espaço. Ela ocorre devido a muitas razões, tais como a perda de espaço livre, absorção, difração, entre outros (KONAK, 2010). A perda de percurso, que representa a atenuação do sinal como uma quantidade positiva, é definida como a diferença (em dB) entre a potência efetivamente transmitida e a potência recebida, e pode ou não incluir o efeito dos ganhos da antena (RAPPAPORT, 2009). A Figura 2.5 mostra uma onda que é emitida de uma estação base e se propaga através do espaço e vai perdendo força até chegar ao seu destino.



Figura 2.5: Perda de Percurso - *Path Loss* (CONNIQ, 2013).

### 2.4 Interferências co-canal e canal adjacente

A interferência é o maior fator limitador no desempenho dos sistemas de redes sem fio. Entre as fontes de interferência, estão: outras estações móveis na mesma célula; uma chamada em operação em uma célula vizinha; outras estações-base operando na mesma faixa de frequência; ou qualquer sistema que inadvertidamente vaze energia para a uma banda de frequência de rede sem fio (RAPPAPORT, 2009).

### 2.4.1 Interferência co-canal

A reutilização de frequência em uma determinada área de cobertura implica que existem várias estações utilizando o mesmo conjunto de frequência. Esse conjunto de estações são chamadas de estações de co-canal e a interface entre os sinais é chamada de interface de co-canal. A interferência de co-canal não pode ser combatida simplesmente aumentando-se a potência de um transmissor, isso porque um aumento no transmissor causa interferência com estações de co-canal vizinhas. A solução é separar fisicamente as estações de co-canal por uma distância mínima para oferecer isolamento suficiente por conta da propagação (RAPPAPORT, 2009). A Figura 2.6 mostra os canais 1 e 2 se entrelaçando de maneira significativa, o uso desses canais entrelaçados no mesmo espaço físico poderia causar interferência entre eles.

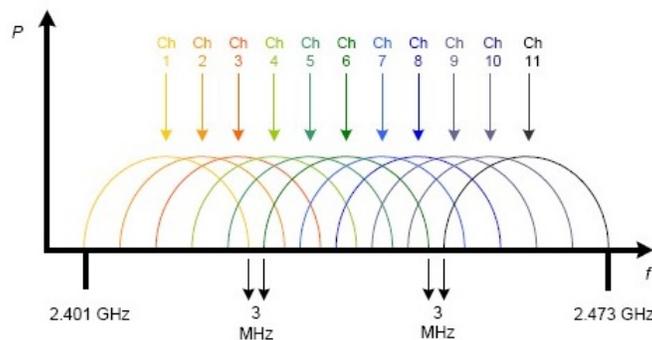


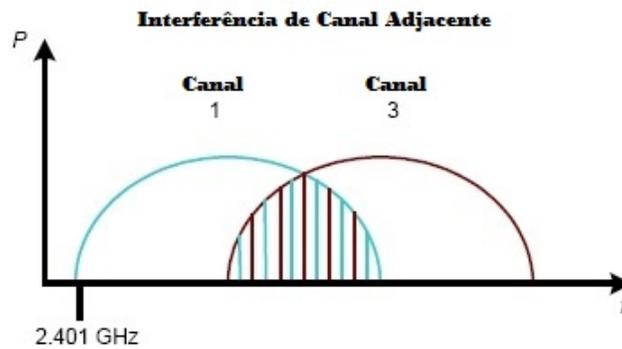
Figura 2.6: Interferência co-canal (BATTISTI, 2014b).

### 2.4.2 Interferência canal adjacente

A interferência que existe no sinal do canal desejado é o resultado de sinais adjacentes. Essas interferências são chamadas de interferência do canal adjacente. Ela resulta de filtros imperfeitos dos receptores, que permitem que frequências vizinhas vazem na banda de passagem. A Figura 2.7 mostra onde há interferência entre os canais 1 e 3. Se há uma transmissão de um canal adjacente e este estiver

transmitindo muito próximo do receptor de uma estação fraca, haverá sérios problemas enquanto o receptor tenta receber o sinal de um canal de uma estação-base no canal desejado (RAPPAPORT, 2009).

Esse problema é conhecido como efeito perto-distante, no qual um transmissor próximo captura o receptor da estação fraca. O efeito perto-distante ocorre quando uma estação móvel, perto de uma estação-base transmite em um canal próximo daquele que está sendo transmitido por uma estação fraca. Isso ocorre porque a estação-base pode ter dificuldades em discriminar o usuário móvel desejado do vazamento causado pelo usuário móvel do canal adjacente. Uma maneira de diminuir a interferência do canal adjacente é através de cuidadosas filtragens e atribuições de canais. Como cada célula só recebe uma fração dos canais disponíveis, uma célula não precisa receber canais que são adjacentes em frequência (RAPPAPORT, 2009).



**Figura 2.7:** Interferência canal adjacente (BATTISTI, 2014c).

## 3 ANTENAS

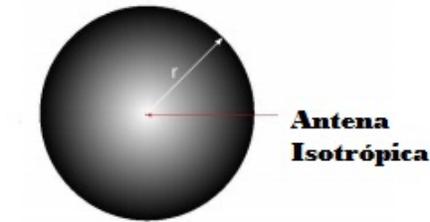
Nesse capítulo será apresentado a tecnologia das antenas atuais e a tecnologia das antenas inteligentes (*Smart Antenna*).

### 3.1 Antenas Atuais

Uma antena é definida como parte de um sistema transmissor ou receptor que é projetado para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas. A energia eletromagnética é transmitida de um meio de transmissão para outro através da antena. Uma antena é um dispositivo recíproco, linear e passivo. Devido à característica da reciprocidade, quando uma antena é utilizada para transmissão, assume-se implicitamente seu uso para recepção, a menos que seja especificado o contrário (FREITAS, 2008).

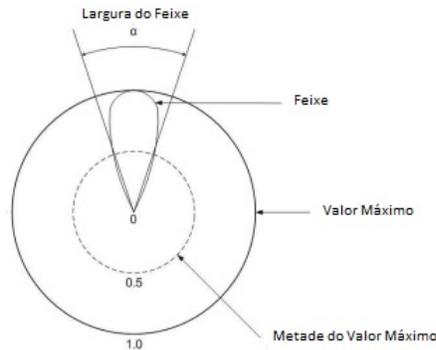
O padrão de radiação é a distribuição espacial de uma quantidade de sinal que caracteriza o campo eletromagnético gerado por uma antena. Essa distribuição espacial pode ser expressa por meio de uma função matemática ou de uma representação gráfica. Uma antena hipotética de baixa perda é definida como isotrópica quando ela irradia com intensidade igual em todas as direções. O padrão de radiação dessa antena é esférico. A Figura 3.1 mostra o padrão de radiação, onde a antena isotrópica é representada por um ponto no centro da esfera e tem alcance de transmissão  $r$ . Esse tipo de antena ideal é utilizado somente para propósitos analíticos (FREITAS, 2008).

Um feixe é definido como o lóbulo principal do padrão de radiação de uma antena. A largura do feixe, também denominada largura do feixe de meia potência, é definida como o ângulo entre as duas direções nas quais a intensidade de radiação é metade do valor máximo (FREITAS, 2008). A Figura 3.2 mostra que o lóbulo principal é a largura de feixe de uma antena direcional em um padrão



**Figura 3.1:** Antena Isotrópica (FREITAS, 2008).

de radiação plotado em potência, na escala de watts. Esses tipos de antenas podem ser definidas como sendo omnidirecional e setoriais-direcional.

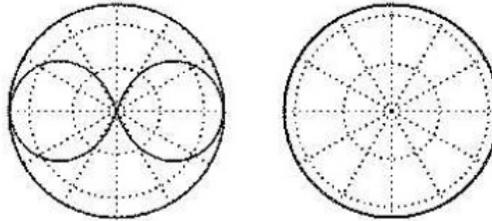


**Figura 3.2:** Largura de feixe de antena direcional (FREITAS, 2008).

### 3.1.1 Antena omnidirecional

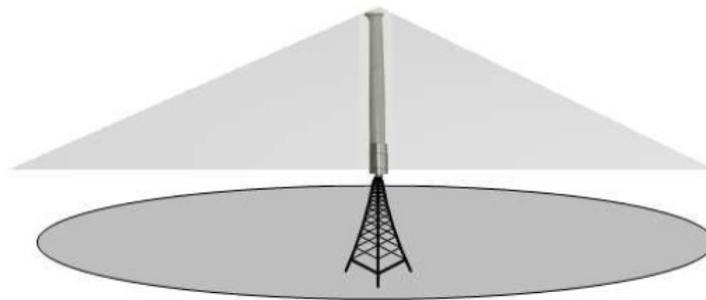
Uma antena que tem um padrão de radiação essencialmente não direcional em um dado plano e um padrão de radiação direcional em qualquer outro plano ortogonal é denominada antena omnidirecional (FREITAS, 2008). Antenas omnidirecionais irradiam o sinal transmitido em todas as direções com o mesmo ganho no plano horizontal. A Figura 3.3 mostra o diagrama de irradiação horizontal para as antenas omnidirecionais, que é semelhante ao das antenas isotrópicas, porém não se tem irradiação uniforme em todas as direções no plano vertical. Atualmente, exis-

tem antenas omnidirecionais que possuem irradiação uniforme no plano vertical, mas não possuem irradiação uniforme no plano horizontal (CORREIA, 2007).



**Figura 3.3:** Diagramas de irradiação horizontal e vertical de uma antena omnidirecional (CORREIA, 2007).

Antenas omnidirecionais são capazes de transmitir e receber em 360 graus ao redor dela, em qualquer outro plano ortogonal a um dado plano da antena cujo padrão de radiação seja não direcional (FREITAS, 2008). A Figura 3.4 mostra a área de transmissão e recepção de uma antena omnidirecional.



**Figura 3.4:** Área de cobertura de uma antena omnidirecional (CORREIA, 2007).

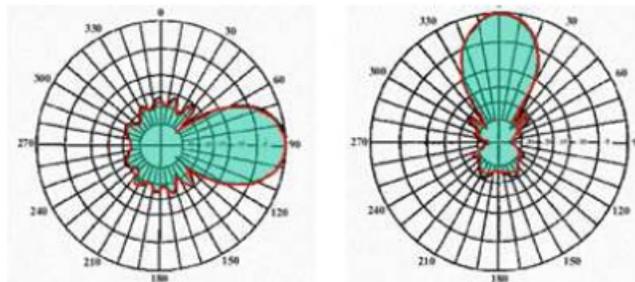
Originalmente, um simples dipolo tem sido usado como antena nas redes ad hoc. A sua estratégia omnidirecional, irradiando e recebendo bem em todas as direções, inunda o meio com o sinal transmitido e atinge o destino com uma pequena parcela da potência transmitida. A potência restante funciona como sinal interferente em outras direções. A radiação omnidirecional limita o desempenho devido ao insuficiente reuso espacial, aos múltiplos saltos em longos enlaces e

às perdas de energia decorrentes da emissão de sinal em direções diferentes da desejada (RAMELLA, 2006).

### 3.1.2 Antena setorial-direcional

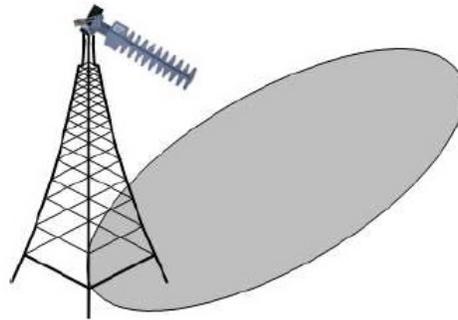
Como solução ao espalhamento de sinal no meio, pode ser construída uma simples antena com direção fixa e preferencial de transmissão e recepção, criando um feixe de radiação (RAMELLA, 2006). Antena direcional é aquela que tem a propriedade de irradiar ou receber ondas eletromagnéticas mais eficientemente em algumas direções que em outras. A diretividade máxima dessa antena é significativamente maior do que a de uma antena dipolo de meia onda (FREITAS, 2008).

As antenas direcionais irradiam o sinal transmitido em somente uma direção que concentra a potência numa determinada direção do espaço. Antenas direcionais possuem características de alta diretividade e alto ganho na transmissão dos sinais (CORREIA, 2007). A Figura 3.5 mostra o padrão de radiação real desse tipo de antena, com o lóbulo principal de maior intensidade e lóbulos laterais e traseiros de menor intensidade. A Figura 3.6 mostra a área de cobertura de uma antena direcional.



**Figura 3.5:** Diagramas de irradiação horizontal e vertical de uma antena direcional (CORREIA, 2007).

Cone e Esfera são os modelos simplificados mais comuns de padrão de radiação de antenas direcionais. O padrão de radiação idealizado é o modelo de radiação mais simplificado e também o mais utilizado. Nesses modelos, todas as



**Figura 3.6:** Área de cobertura de uma antena direcional (CORREIA, 2007).

direções dentro da largura de feixe do lóbulo principal têm um ganho constante. Nenhuma potência é irradiada ou absorvida das outras direções, sendo desprezados os ganhos dos demais lóbulos quando um par de nós está em comunicação, somente os vizinhos cobertos pelos feixes direcionais desses nós devem permanecer em silêncio enquanto a comunicação perdurar (FREITAS, 2008).

Na maioria dos casos, para uma mesma potência de transmissão, quanto mais diretiva for a antena, mais estreita será a largura do seu feixe e maior será o alcance obtido na transmissão. Desse modo, nós que estiverem fora do alcance de um nó que transmita omnidirecionalmente, podem ser alcançados em um salto por um nó transmitindo direcionalmente. Em redes ad hoc, uma única antena com feixe estreito direcional não consegue cobrir os 360 graus ao redor do próprio nó de modo que seja possível estabelecer comunicações em todas as direções do plano azimutal (FREITAS, 2008). A Figura 3.7 mostra como os modelos Cone e Esfera estreitam o feixe de irradiação da antena e aumenta o seu ganho. Quanto maior o ganho da antena, mais estreito é o feixe de radiação e mais longe consegue-se levar o sinal, de forma que mais potência é entregue ao destino em longas distâncias.

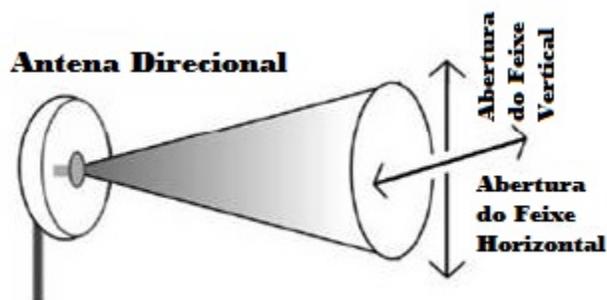


Figura 3.7: Largura de feixe horizontal e vertical de uma antena direcional (BATTISTI, 2014a).

### 3.2 Antenas Inteligentes (*Smart Antenna*)

A teoria por trás da tecnologia das antenas inteligentes (SA, *Smart Antenna*) é semelhante à usada em sistemas de radares militares. Essa tecnologia vem, nos últimos anos, tornando-se uma das áreas mais promissoras da comunicação móvel. As SA consistem em vários elementos radiantes de uma rede combinada e uma unidade de controle que utiliza processadores digitais de sinal (*Digital Signal Processor* - (DSP)). Esses processadores combinam um conjunto de antenas com capacidade de processamento de sinal, que são capazes de aperfeiçoar a recepção e os padrões de radiação dinamicamente, em resposta ao sinal do dispositivo móvel que se desloca sobre a área de cobertura (WANG; GAO; LIU, 2004).

As SA consistem em vários elementos de antena no transmissor e/ou do lado de recepção da ligação de comunicação, cujos sinais são processados de forma adaptativa, a fim de explorar a dimensão espacial do canal de rádio. Independente de onde o tratamento é realizado, no transmissor, no receptor ou em ambas as extremidades da ligação de comunicação, a técnica das SA é definida como entrada múltipla e saída única (MISO, *Multiple Input and Single Output*), entrada única e saída múltipla (SIMO, *Single Input and Multiple Output*) ou múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, *Multiple Input and Multiple Output*). A exploração da dimensão espacial pode aumentar a capacidade da rede sem fio, melhorando a qualidade da transmissão por meio da atenuação de uma série de deficiências de

comunicações móveis como: desvanecimento e multipercorso, interferência co-canal, aumento da taxa de dados e da transmissão simultânea de múltiplos fluxos de antenas diferentes (ALEXIOU; HAARDT, 2004).

As SA empregam um conjunto de elementos radiantes dispostos na forma de um arranjo (*Array*). Os sinais desses elementos são combinados para formar um diagrama de feixe (*Beam Pattern*) móvel ou comutável que acompanhe o sinal desejado. Em um sistema de SA, os arranjos por si só não são inteligentes, sendo preciso um DSP que os tornam inteligentes. O processo de combinar os sinais e de focar a irradiação em uma direção particular é frequentemente referido como conformação de feixe (*Beamforming*) (HOREWICZ, 2006).

As SA são auxiliadas por um algoritmo projetado para uso em ambientes de diversos sinais. Nos elementos da antena que estão ligados ao DSP ocorre a filtragem espacial. As SA tem de cumprir as seguintes funções adicionais: direção de chegada (DOA - *Direction of Arrival*); estimativa e direção do feixe; transmitir e receber sinais de rádio (BASHA *et al.*, 2012).

O objetivo da estimativa DOA é usar os dados recebidos pela matriz para estimar a direção de chegada do sinal. O resultado da estimativa DOA é utilizado pela matriz para criar o feixe adaptativo e comutado, de tal forma a maximizar a potência irradiada para os utilizadores e para suprimir a interferência. Em suma, os grandes projetos de SA são executados com feixes adaptativos. Um projeto bem sucedido de adaptação de SA depende muito do desempenho do algoritmo de estimativa DOA. Na concepção das SA com matriz adaptativa para comunicação móvel o desempenho do algoritmo de estimativa DOA depende de diversos parâmetros, tais como: o número de utilizadores móveis e sua distribuição no espaço; o número de elementos da matriz e o seu espaçamento; o número de amostras de sinal e sinal-ruído (*Signal To Noise Ratio* - SNR) (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010).

As SA costumam ser categorizadas como sistemas de antenas de feixe comutado (*Switched Beam*) ou sistemas de antenas de conjuntos adaptativos (*Adaptive Array*) (WANG; GAO; LIU, 2004).

### 3.2.1 Sistemas de antenas de feixe comutado (*Switched Beam*)

A técnica de feixes comutados é mais simples, mais ela fornece um aumento considerável na capacidade da rede quando comparada aos sistemas tradicionais de antenas omnidirecionais ou aos sistemas setorizados (HOREWICZ, 2006). Um sistema de feixe comutado, é um sistema de antenas que é capaz de comutar eletronicamente a direção do feixe que está transmitindo, dentre um conjunto finito de feixes. Ele é composto por um conjunto finito de N feixes direcionais, onde cada feixe é apontado para uma direção fixa (FREITAS, 2008).

A Figura 3.8 mostra como os sistemas de antena de feixe comutado formam múltiplos feixes fixos com maior sensibilidade em determinadas direções. Quando um utilizador móvel se desloca ao longo da célula, o sistema de feixe comutado monitora a intensidade do sinal e seleciona entre um dos vários feixes fixos pré-determinados e salta de um feixe para outro (BASHA *et al.*, 2012).

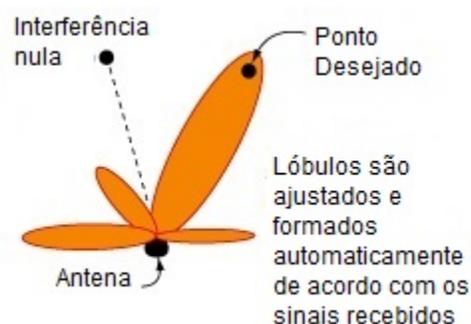


**Figura 3.8:** Sistema de antenas de feixe comutado (*Switched Beam*) (FRENZEL, 2005).

### 3.2.2 Sistemas de antenas de conjuntos adaptativos (*Adaptive Array*)

O sistema de conjuntos adaptativos é a mais inteligente das técnicas. Este sistema acompanha o usuário móvel continuamente dirigindo o lóbulo principal para o usuário e ao mesmo tempo permite que a interferência encontrada no caminho seja dinamicamente minimizada e a recepção do sinal pretendido seja maximizada (HOREWICZ, 2006). Um sistema de conjuntos adaptativos é definido como um sistema de antena que possui elementos de circuito associados com seus elementos irradiadores de modo que uma ou mais das propriedades da antena são controladas pelo sinal recebido (FREITAS, 2008). Sistemas de antenas de conjuntos adaptativos utilizam algoritmos sofisticados para o processamento de sinal, com o intuito de distinguir continuamente entre percursos de sinais desejáveis e de sinais de interferência, além de atualizar o seu padrão de feixes.

A Figura 3.9 mostra como os feixes são criados de acordo com o sinal recebido e ajustados automaticamente para o usuário desejado, com isso diminui-se a interferência. Por meio da combinação de DSP adaptativo e técnicas de processamento espacial, os sistemas de antenas de conjuntos adaptativos alcançam melhores desempenhos que os sistemas de comutação de feixe (BASHA *et al.*, 2012).



**Figura 3.9:** Sistema de antenas de conjunto adaptativo (*Adaptive Array*) (FRENZEL, 2005).

### 3.2.3 Algoritmos de DOA

As SA dependem do desempenho dos algoritmos de estimativa DOA para estimar a chegada do sinal. Os algoritmos de estimativa DOA mais conhecidos são separados em métodos convencionais (clássico) e métodos de subespaço (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010).

Entre os algoritmos de métodos convencionais mais estudados estão o *Bartlett*, *Capon* e o *Min-norm*. Esses algoritmos calculam primeiro o espectro espacial para depois calcular a chegada do sinal por espectro local. Essa estratégia faz com que os algoritmos sofram de falta de resolução angular (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010).

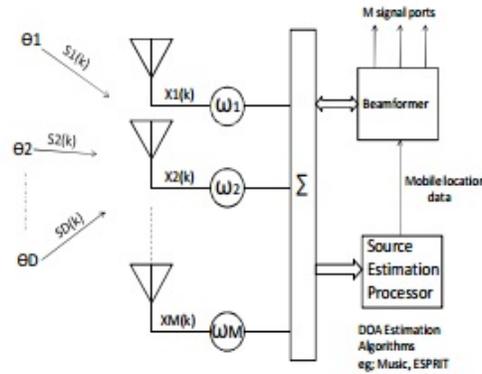
Entre os algoritmos de métodos de subespaço mais conhecidos estão o *Multiple Signal Classification (Music)* e o *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (Esprit)*. Esses algoritmos tem resolução angular alta com métodos mais precisos. E o desempenho de ambos são avaliados em seções de alta resolução, por isso eles são os mais utilizados em projetos de SA (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010). Esses algoritmos são descritos a seguir.

#### 3.2.3.1 Algoritmo *Music*

O algoritmo *Music* foi desenvolvido por Ralph O. Schmidt em 1979. O método foi proposto para a classificação de múltiplos sinais de alta resolução explorando a auto estrutura da matriz de covariância das amostras de entrada (HOREWICZ, 2006).

O algoritmo *Music* faz suposições de que o ruído em cada canal é não correlacionado, e os sinais incidentes são ligeiramente correlacionados, criando uma matriz de correlação de sinal não diagonal (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010). A Figura 3.10 mostra o funcionamento do algoritmo *Music*.

Se o número de sinais que irão impulsionar o elemento da matriz  $M$  é  $D$ , o número de autovalores e autovetores do sinal é  $D$  e o número de autovalores e



**Figura 3.10:** Funcionamento do algoritmo *Music*. Elemento da matriz  $M$  com os sinais que chegam de  $D$  (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010).

autovetores do ruído é  $MD$ . A matriz de correlação com o conjunto de ruído não correlacionado e as variâncias iguais é então dada por:

$$R_{xx} = A * R_{ss} * A^H + \sigma_N^2 * I \quad (1)$$

Onde:

$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), a(\theta_3), \dots, a(\theta_D)]$  é  $M * D$  é a matriz de direção do conjunto.

$R_{ss} = [s_1(k); s_2(k); s_3(k); \dots; s_D(k)]^T$  é  $D * D$  é a fonte da matriz de correlação.

$R_{xx}$  tem autovetores  $D$  associados com sinais e  $M - D$  autovetores associados ao ruído.

Com isso, é possível construir o  $M * (MD)$  subespaço gerado pelos autovetores de ruído de tal forma que:

$$V_N = [v_1; v_2; v_3; \dots; v_{M-D}] \quad (2)$$

Os autovetores do subespaço de ruído são ortogonais a matriz em vetor de direção aos ângulos de chegadas  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_D$  e o *Music Pseudospectrum* é dado como:

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{abs}((a(\theta)\theta^H V_N V_N^H a(\theta)) \quad (3)$$

No entanto, quando as fontes de sinal são coerentes ou existem variações de ruído, a resolução do algoritmo *Music* diminui. Para superar isso, é necessário coletar várias amostras de tempo do sinal recebido, mais os ruídos e assumir ergodicidade e estimar as matrizes de correlação através do tempo médio de:

$$R_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K x(K) * x(k)^H \quad (4)$$

$$R_{xx} = A * R_{ss} * A^H + A * R_{sn} + R_{ns} * A^H + R_{nn} \quad (5)$$

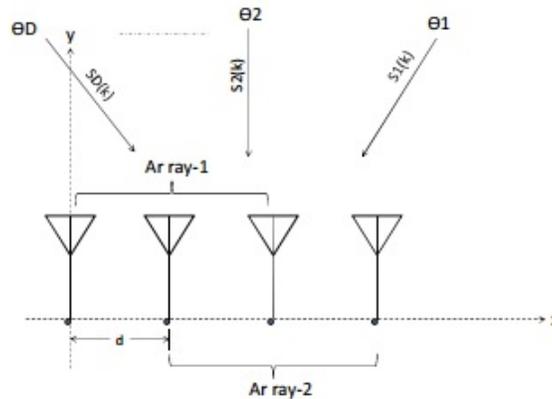
O algoritmo *Music Pseudospectrum* usando a equação (3), oferece alta resolução angular para sinais coerentes (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010).

### 3.2.3.2 Algoritmo *Esprit*

O algoritmo *Esprit* foi desenvolvido por Richard Roy e Thomas Kailath, sendo um método eficiente e robusto computacionalmente para a estimação do DOA. Ele utiliza dois sub-arranjos de antenas idênticos no sentido de que os elementos devem estar em pares separados por um vetor de deslocamento constante denominado  $\Lambda$ , ou seja, o conjunto possui uma invariância especial. As antenas não precisam ser idênticas, porém devem ter o mesmo padrão de sensibilidade (HOREWICZ, 2006).

O algoritmo *Esprit* utiliza estimativa de parâmetros do sinal através de técnicas de invariância rotacional. Ele não envolve uma busca exaustiva através de todos os possíveis vetores de direção para a estimação do DOA, e reduz drasticamente os requisitos computacionais e de armazenamento em relação ao *Music*. O objetivo da técnica do algoritmo *Esprit* é explorar a invariância de rotação no subespaço e o sinal que é criado pelas duas matrizes, com uma estrutura de invariância translacional. O algoritmo *Esprit* assume que há  $D < M$  fontes de banda estreita centrado na frequência central  $f_0$ . Ele assume ainda várias matrizes idênticas parelhas e essas matrizes são deslocadas em um movimento translacional e

não rotacional (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010). A Figura 3.11 mostra o funcionamento do algoritmo *Esprit* com quatro elementos de matriz linear que são compostos por dois dupletos.



**Figura 3.11:** Funcionamento do algoritmo *Esprit*: Quatro elementos de matriz linear com dois dupletos (CHRIST, 2014).

Os dois subarrays, array-1 e array-2 são deslocados pela distância  $D$ . Os sinais induzidos em cada uma das matrizes são dadas por:

$$x_1(k) = A_1 * s(k) + n_1(k)$$

e

$$x_2(k) = A_1 * \Lambda * s(k) + n_2(k)$$

Onde:  $\Lambda = \text{diag}(e^{jkd\sin(\theta_1)}, e^{jkd\sin(\theta_2)}, \dots, e^{jkd\sin(\theta_D)}) = D * D$  é a matriz unitária diagonal com as mudanças de fase parelha para cada avaliação de DOA.

A criação do subespaço do sinal para as duas submatrizes resulta em duas matrizes  $V_1$  e  $V_2$ . Uma vez que as matrizes são relacionadas translacionalmente, os subespaços de autovetores são relacionados por uma única transformação não singular, tal que  $V_1 \Phi = V_2$ .

Também deve existir uma única transformação singular da matriz  $T$ , de tal modo que:

$V_1 = ATeV_2 = A\Lambda_T$  e, finalmente, pode-se dizer que:

$$T\Phi T^{-1} = \Lambda \quad (6)$$

Assim, os valores próprios de  $\Phi$  devem ser iguais para os elementos da diagonal de  $\Lambda$  tal que:

$$\lambda_1 = e^{jkdsin(\theta_1)}, \lambda_2 = e^{jkdsin(\theta_2)} \dots \lambda_D = e^{jkdsin(\theta_D)}$$

Uma vez que os valores próprios de  $F$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ , ....  $I_D$  são calculados, pode-se estimar os ângulos de chegada como:

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{\arg(\lambda_i)}{kd}\right) \quad (7)$$

O algoritmo *Esprit* elimina o procedimento de pesquisa e produz a estimativa DOA direto em termos dos valores próprios sem requisitos computacionais e armazenamento de alto custo. Este método de posicionamento de autoestrutura mostrou excelente precisão e resolução em muitos estudos experimentais e teóricos (LAVATE; KOKATE; SAPKAL, 2010).

## **4 METODOLOGIA**

Este capítulo descreve a metodologia utilizada no trabalho. É apresentada a classificação da pesquisa, as etapas da pesquisa e os materiais e métodos.

### **4.1 Tipo de Pesquisa**

Quanto à natureza da pesquisa, ela pode ser classificada como aplicada, porque ela objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Quanto ao objetivo, ela pode ser classificada como explicativa, já que ela visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Quanto aos procedimentos técnicos, ela pode ser classificada como experimental, uma vez que determina um objeto de estudo, selecionando as variáveis que são capazes de influenciá-lo e definindo as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2002).

### **4.2 Etapas da Pesquisa**

A pesquisa sobre a análise de desempenho das tecnologias tradicionais e da tecnologia das Antenas Inteligentes possui três etapas. A primeira etapa constitui na aquisição de requisitos essenciais para o desenvolvimento e evolução da pesquisa. Nessa etapa ocorreu a definição do assunto abordado, a pesquisa bibliográfica e análise da documentação disponível.

A segunda etapa constitui na elaboração dos testes a serem aplicados aos dispositivos sem fio que utilizam as tecnologias avaliadas em ambientes internos e externos. O intuito é levantar dados para efetuar a comparação entre as tecnologias.

A terceira etapa da pesquisa constitui na análise dos resultados obtidos nos testes e comparação das tecnologias, e por fim, a conclusão da pesquisa. A seguir, são apresentados os materiais e métodos utilizados nos experimentos.

## 4.3 Materiais e Métodos

Esta seção apresenta os materiais e os métodos utilizados na execução dos testes. São apresentados os dispositivos utilizados, o ambiente de teste, as métricas avaliadas, as ferramentas utilizadas e a definição dos testes.

### 4.3.1 Dispositivos Utilizados

Para a execução dos testes utilizou-se quatro dispositivos: uma placa RouterBoard, um AP TP-Link e dois AP Ruckus. A placa RouterBoard é o nome dado a uma série de equipamentos de rádio ou roteadores, que são projetados primariamente para provedores de internet. Eles oferecem acesso banda larga via redes sem fio e suportam alta capacidade de tráfego (MIKROTIK, 2014). O modelo RB433AH foi utilizado nos testes. Ele possui três portas Ethernet, três *slots* para cartões miniPCI, um *slot* microSD para cartões de memória e uma interface serial RS232. A Figura 4.1 mostra o modelo RB433AH.



**Figura 4.1:** Placa RB433AH (MIKROTIK, 2014).

A TP-Link é um fornecedor global de produtos de rede e conectividade. O modelo TL-WR941ND foi utilizado nos testes. Esse AP trabalha com velocidade Wireless de 300 Mbps e utiliza tecnologia MIMO 3T3R (três antenas para transmitir e três antenas para receber). Essas antenas aumentam significativamente a

potência e a estabilidade da rede sem fio (TP-LINK, 2014). A Figura 4.2 mostra o modelo TL-WR941ND.



**Figura 4.2:** AP TP-Link TL-WR941ND (TP-LINK, 2014).

A Ruckus Wireless é uma empresa pioneira no mercado de infraestrutura sem fios. O modelo ZoneFlex 7763 foi utilizado para a execução dos testes internos. Este modelo utiliza tecnologia de feixe adaptável e gerenciamento centralizado. A Figura 4.3 mostra o modelo ZoneFlex 7763.



**Figura 4.3:** AP ZoneFlex 7763 (RUCKUS WIRELESS, 2014).

O modelo ZoneFlex 7762 foi utilizado para execução dos testes externos. Este modelo trabalha simultâneo com os pontos de acesso 2.4/5GHz 802.11n, com tecnologia de feixe adaptável e malha Smart Wi-Fi, que permite aos provedores de serviços e empresas se beneficiem dos níveis avançados de capacidade de de-

sempenho e integração que não seriam possíveis com o Wi-Fi básico (RUCKUS WIRELESS, 2014). A Figura 4.4 mostra o modelo ZoneFlex 7762.



**Figura 4.4:** AP ZoneFlex 7762 (RUCKUS WIRELESS, 2014).

Uma observação importante sobre os dispositivos, é que nenhum dos AP teve suas configurações modificadas, ou seja, todos os AP trabalharam com configurações originais de fábrica.

### **4.3.2 Ambiente de Teste**

Os testes foram realizados na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em ambiente interno somente com cliente e servidor, e em ambiente externo com acesso liberado para todos os dispositivos que estavam no ambiente. O local escolhido para os testes internos foi a Diretoria de Gestão da Tecnologia da Informação (DGTI). Para evitar a conexão de outros usuários ao AP no momento dos testes, foi utilizado senha de controle de acesso.

Para os testes externos, o local escolhido foi a cantina central da UFLA, e o horário escolhido foi entre nove e onze horas, por se tratar de um horário de grande fluxo de usuários no local. No momento dos testes, cliente e servidor dividiram a banda de rede com outros usuários conectados ao AP. Foram distribuídos 512 endereços para os AP e seus clientes. Os endereços dos AP foram fixos e os clientes receberam seus endereços via DHCP. A quantidade de endereços disponibiliza-

dos pode ser justificada devido a grande quantidade de usuários nos ambientes de testes. A Figura 4.5, mostra a conexão dos clientes com o AP.



**Figura 4.5:** Rede Wireless em funcionamento (TECHTUDO, 2014).

### 4.3.3 Métricas Avaliadas

Para os experimentos práticos foram consideradas as seguintes métricas:

- **Vazão:** foi analisado o desempenho de todos os AP na transferência de dados por protocolo TCP e UDP em ambiente interno e externo.
- **Jitter:** foi analisado a variação no atraso no tempo de entrega dos pacotes em ambiente externo.
- **Número de Clientes:** foi analisado o número máximo de clientes que cada AP suporta.
- **Transferência de Pacotes:** foi analisado a quantidade de pacotes transmitidos em ambiente externo.

- Taxa de perda de pacotes: foi analisado o número de pacotes perdidos, baseando-se na diferença entre pacotes transmitidos e perdidos em ambiente externo.

#### 4.3.4 Ferramentas Utilizadas

Para a execução dos testes foram utilizadas as seguintes ferramentas: Iperf, FlexMaster e Winbox. Cada uma das ferramentas é explicada a seguir.

Iperf: a ferramenta Iperf é um software livre, do tipo cliente/servidor desenvolvido pelo *National Laboratory for Applied Network Research* (NLNR) (GATES *et al.*, 2014). O Iperf permite testar/medir a vazão da rede por meio de transferência de dados (2 MBytes a cada dez segundos) usando os protocolos TCP e UDP. Os testes com o UDP também fornecem estatísticas de três métricas: Jitter, número total de pacotes transmitidos e pacotes perdidos (ORTEGA, 2010). O Iperf é um software baseado em linha de comando. A Figura 4.6 mostra a execução do Iperf em linha de comando.



```

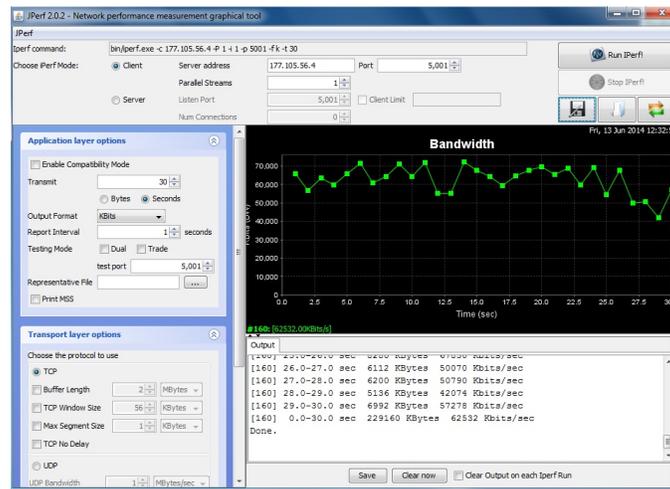
Administrador: C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [versão 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\Henrique>cd \
C:\>cd "Program Files (x86)"
C:\Program Files (x86)>cd Iperf
C:\Program Files (x86)\Iperf>iperf -c 177.105.56.4
-----
Client connecting to 177.105.56.4, TCP port 5001
TCP window size: 0.00 Mbyte (default)
-----
[160] local 10.4.1.56 port 14897 connected with 177.105.56.4 port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[160] 0.0-10.0 sec  63.6 MBytes  53.3 Mbits/sec
C:\Program Files (x86)\Iperf>

```

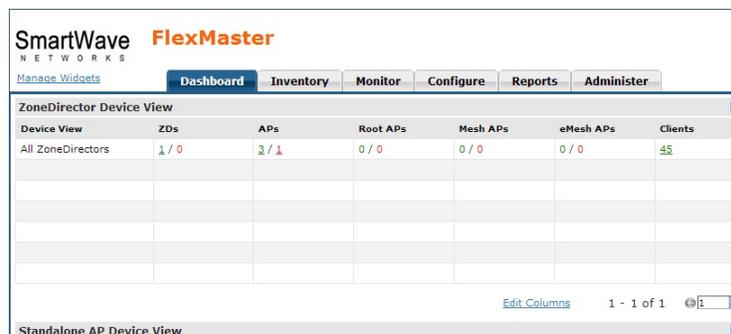
**Figura 4.6:** Funcionamento do Iperf em linha de comando.

Porém, existe uma interface gráfica desenvolvida na linguagem Java chamada Jperf. A Figura 4.7 mostra a execução do Iperf utilizando a interface Jperf. Nos testes foi utilizada a interface gráfica Jperf para facilitar o entendimento dos resultados, já que a mesma fornece gráficos com o tráfego de dados pela rede.



**Figura 4.7:** Funcionamento do Iperf pela interface gráfica Iperf.

FlexMaster: é uma ferramenta desenvolvida pela Ruckus Wireless com uma plataforma de gestão completa para a construção, detecção de falhas, auditoria, gestão e otimização. Ela oferece uma coleção exclusiva de funcionalidades automatizados e personalizados não encontrados em outras plataformas de gerenciamento, como um super painel que fornece relatórios e gráficos (RUCKUS WIRELESS, 2014). A Figura 4.8 mostra a interface do flexmaster.



**Figura 4.8:** Interface gráfica FlexMaster.

Winbox: é uma interface gráfica cliente usada para configurar e supervisionar dispositivos Mikrotik (MIKROTIK, 2014). A Figura 4.9 mostra a interface do Winbox.

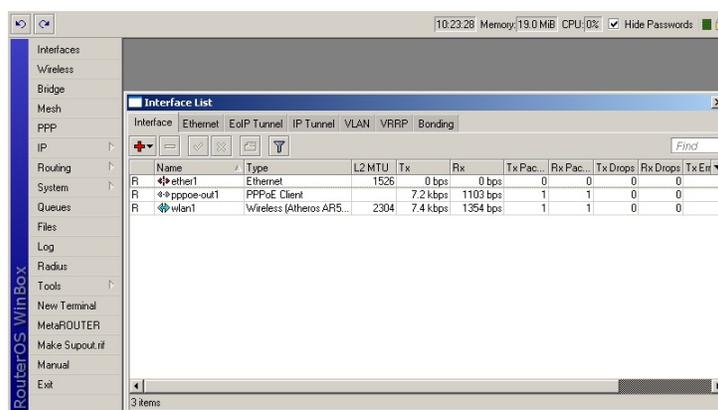


Figura 4.9: Interface gráfica Winbox.

### 4.3.5 Definição dos Testes

Para analisar o desempenho da tecnologia das SA foram executados três testes: desempenho, robustez e alcance.

O teste de desempenho foi executado na DGTI. Para medir o desempenho dos AP, foram feitas transferências de dados utilizando os protocolos TCP e UDP com o intuito de medir a vazão dos AP. Os testes de desempenho foram realizados com vazão com 1 e 5 portas. Foi executado o teste com 5 portas com o intuito de avaliar o desempenho dos AP disputando a banda. Cada teste teve a duração de sessenta segundos e foi repetido por dez vezes.

O teste de robustez foi executado na cantina principal da UFLA. O teste de robustez comparou a capacidade de cada AP em termo de quantidade de usuários conectados ao mesmo tempo. Após verificar a quantidade de usuários de cada AP, foi executado um teste de transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas. O teste de robustez definiu qual AP vai executar o teste de alcance.

O teste de alcance foi executado na cantina principal da UFLA. O teste de alcance verificou o alcance máximo do AP Ruckus, que foi o AP que obteve o melhor desempenho no teste de robustez. Para a execução do teste, foi utilizado

transferência de dados pelo protocolo UDP. O teste de alcance foi executado por dois procedimentos diferentes.

No primeiro teste, conectado ao AP, distanciou-se o máximo possível até encontrar o limite de distância que o AP atendia as solicitações de transferência de dados. No segundo teste, procurou acessar o AP o mais distante possível do ponto de acesso na cantina para executar o teste.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

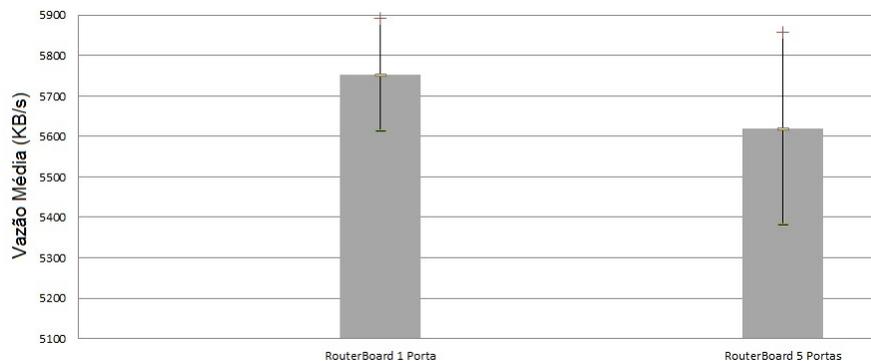
Nesse capítulo serão apresentados os resultados e discussão dos testes de desempenho, robustez e alcance.

### 5.1 Teste de Desempenho

Esta seção apresenta os resultados e discussão dos testes de transferência de dados utilizando os protocolos TCP e UDP executados em cada *Access Point* (AP): RouterBoard, TP-Link e Ruckus na frequência 2.4GHz.

#### 5.1.1 AP RouterBoard

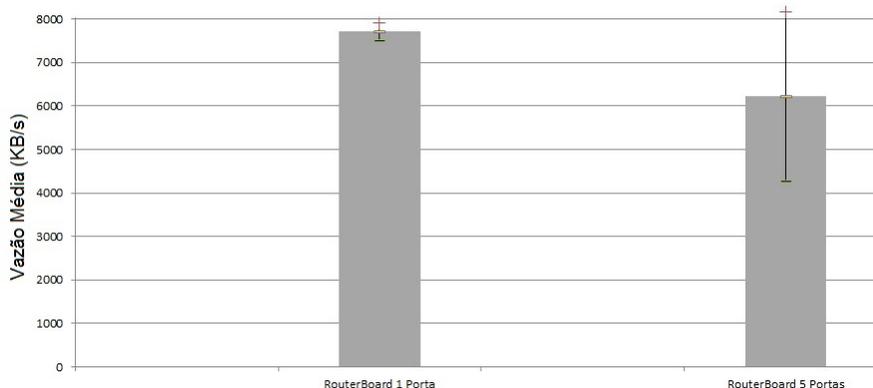
A Figura 5.1 mostra o resultado dos testes utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas. No teste com uma porta, a média da vazão ficou em 5750 KBytes/s, com o intervalo de confiança (IC)  $\pm 2,42\%$ . No teste com cinco portas, o desempenho do AP foi ligeiramente inferior, a média da vazão ficou em 5619 KBytes/s e o IC  $\pm 4,25\%$ .



**Figura 5.1:** Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP RouterBoard.

A Figura 5.2 mostra o resultado dos testes utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas. No teste com uma porta, a média da vazão ficou em 7702

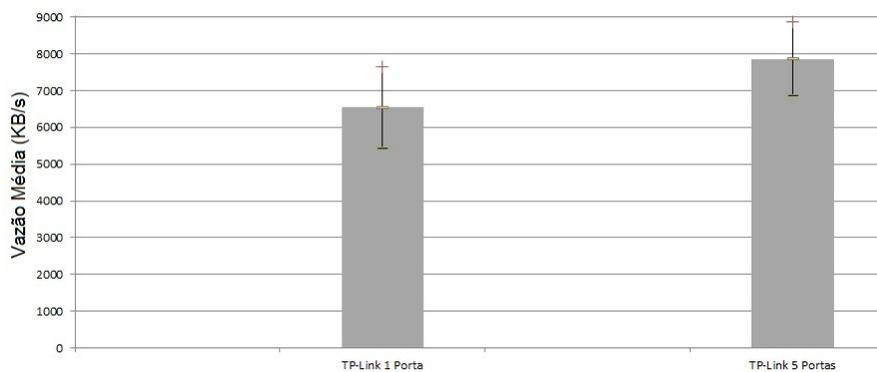
KBytes/s, com o IC  $\pm 2,68\%$ . No teste com cinco portas, o desempenho do AP foi ligeiramente inferior, a média da vazão ficou em 6216 KBytes/s e o IC  $\pm 31,37\%$ .



**Figura 5.2:** Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP RouterBoard.

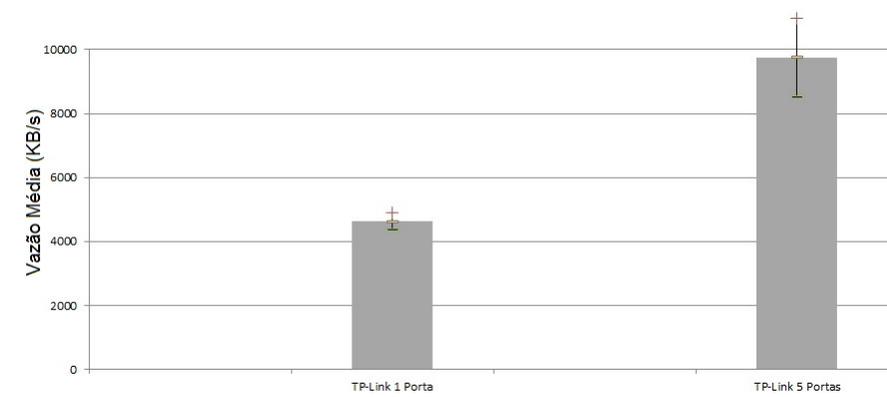
### 5.1.2 AP TP-Link

A Figura 5.3 mostra o resultado dos testes utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas. No teste com uma porta, a média da vazão ficou em 6542 KBytes/s, com o IC  $\pm 17,09\%$ . No teste com cinco portas, o desempenho do AP foi ligeiramente superior, a média da vazão ficou em 7863 KBytes/s e o IC  $\pm 12,83\%$ .



**Figura 5.3:** Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP TP-Link.

A Figura 5.4 mostra o resultado dos testes utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas. No teste com uma porta, a média da vazão ficou em 4623 KBytes/s, com o IC  $\pm 5,71\%$ . No teste com cinco portas, o desempenho do AP foi superior, a média da vazão ficou em 9749 KBytes/s e o IC  $\pm 12,59\%$ .



**Figura 5.4:** Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP TP-Link.

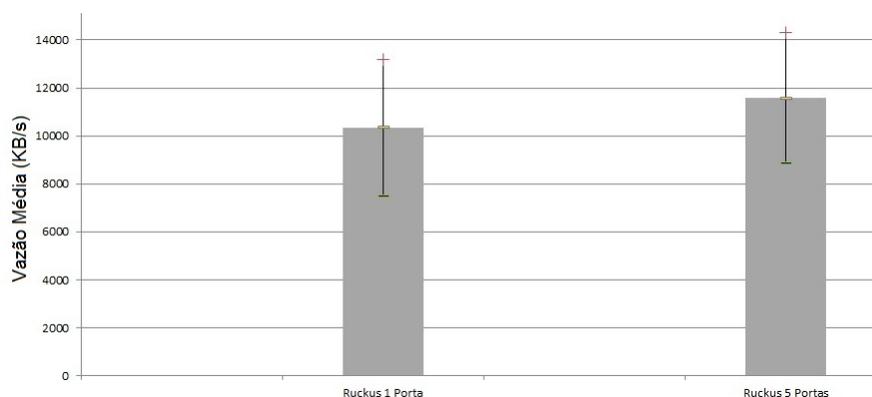
### 5.1.3 AP Ruckus (*Smart Antenna*)

A Figura 5.5 mostra o resultado dos testes utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas. No teste com uma porta, a média da vazão ficou em 10338 KBytes/s, com o IC  $\pm 27,58\%$ . No teste com cinco portas, o desempenho do AP foi ligeiramente superior, a média da vazão ficou em 11577 KBytes/s e o IC  $\pm 23,62\%$ .

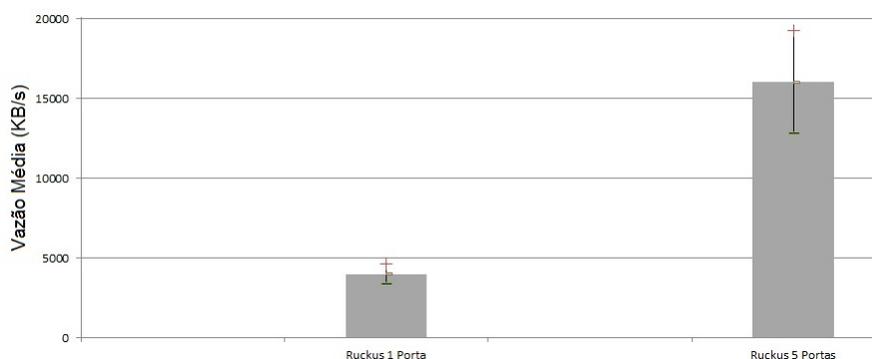
A Figura 5.6 mostra o resultado dos testes utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas. No teste com uma porta, a média da vazão ficou em 3998 KBytes/s, com o IC  $\pm 16\%$ . No teste com cinco portas, o desempenho do AP foi superior, a média da vazão ficou em 16040 KBytes/s e o IC  $\pm 20,19\%$ .

### 5.1.4 Discussão

A Figura 5.7 mostra a comparação dos resultados dos testes utilizando o protocolo TCP em ambos os AP com uma e cinco portas. Os resultados dos testes mostram



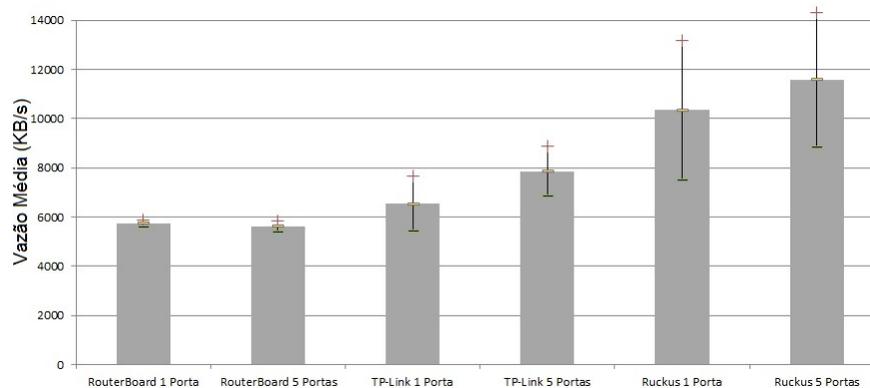
**Figura 5.5:** Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP Ruckus.



**Figura 5.6:** Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP Ruckus.

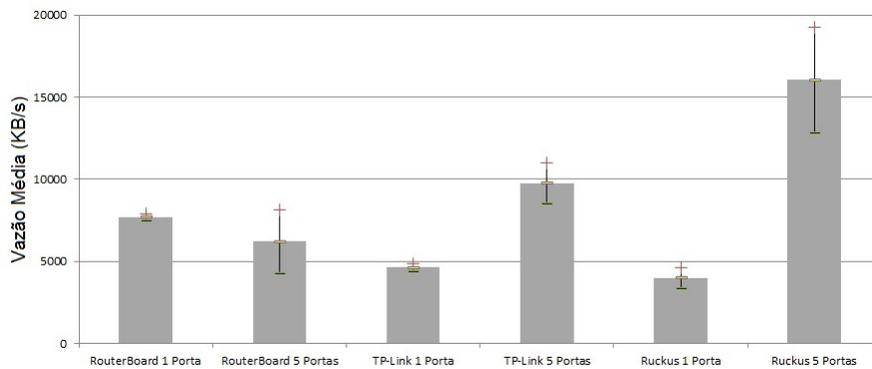
que o AP Ruckus obteve um desempenho melhor com uma e cinco portas. Nos testes com uma porta, o AP Ruckus chega a ter um desempenho superior a quase 90% ao AP RouterBoard e de quase 75% ao AP TP-Link. Já com cinco portas, o desempenho do AP Ruckus chega a dobrar se comparado com o AP RouterBoard, e quase 65% superior ao AP TP-Link.

A Figura 5.8 mostra a comparação dos resultados dos testes utilizando o protocolo UDP. O AP Ruckus obteve o pior resultado nos testes com uma porta, e o melhor resultado no teste com cinco portas. O AP RouterBoard obteve o melhor resultado nos testes com uma porta e o pior resultado com cinco portas. Nos



**Figura 5.7:** Transferência de dados dos AP utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas.

testes com uma porta, o AP RouterBoard chega a ter um desempenho superior a quase 95% ao AP Ruckus e de quase 80% ao AP TP-Link. Já com cinco portas, o desempenho do AP Ruckus chega a ser quase 150% superior ao AP RouterBoard, e quase 65% superior ao AP TP-Link novamente.



**Figura 5.8:** Transferência de dados dos AP utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas.

## 5.2 Teste de Robustez

Esta seção apresenta os resultados e discussão dos testes de robustez executados em cada AP.

### 5.2.1 AP RouterBoard

O AP RouterBoard não suportou o número de usuários que tentavam se conectar ao mesmo tempo, com isso, o AP reiniciava sempre que atingia 30 usuários, que foi o máximo de usuários suportados pelo AP. A Figura 5.9 mostra um momento em que o AP reinicia, nela é possível verificar que assim que o AP atingiu 30 usuários ele desliga e reinicia. Esse limite de 30 usuários foi o máximo que o AP RouterBoard conseguiu suportar, com isso, não foi possível conectar ao AP e manter-se conectado para a execução de teste, já que o AP reinicia a todo instante.

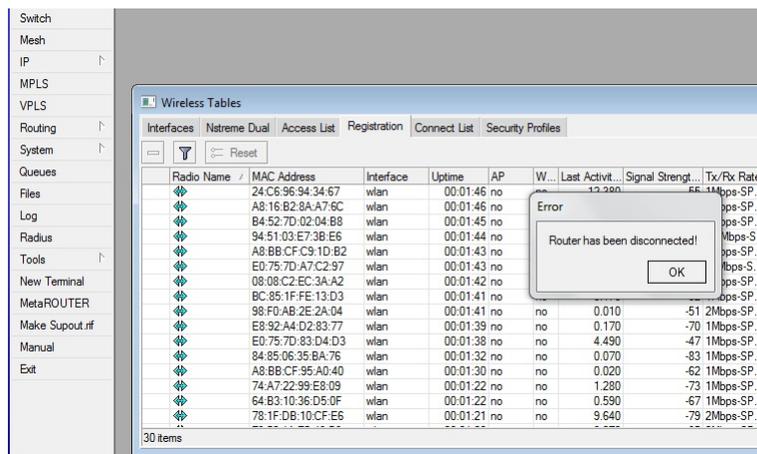


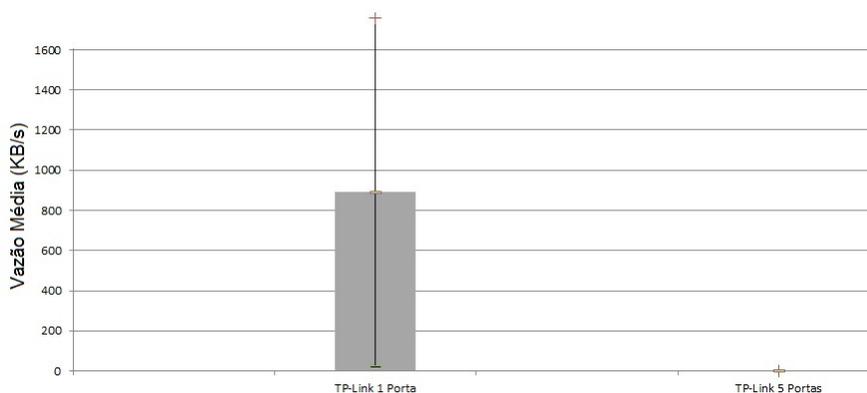
Figura 5.9: Tentativa de Teste com AP RouterBoard em ambiente externo.

### 5.2.2 AP TP-Link

O AP TP-Link diferente do AP RouterBoard, inicialmente conseguiu suportar o número de clientes conectados, com isso foi possível fazer um teste à 25 metros de distância do AP, transferindo dados pelo protocolo TCP com uma porta, em seguida o AP reiniciou e não mais foi possível conectar ao mesmo.

A Figura 5.10 mostra o desempenho do AP TP-Link, o resultado do teste mostra que apesar de o AP ter conseguido ficar conectado no início do teste, o desempenho do mesmo está muito abaixo do esperado. No teste com uma porta a

média da vazão ficou em 890 KBytes e o IC  $\pm 97,69\%$ . No teste com cinco portas o AP desligou, não conseguindo executar o teste.



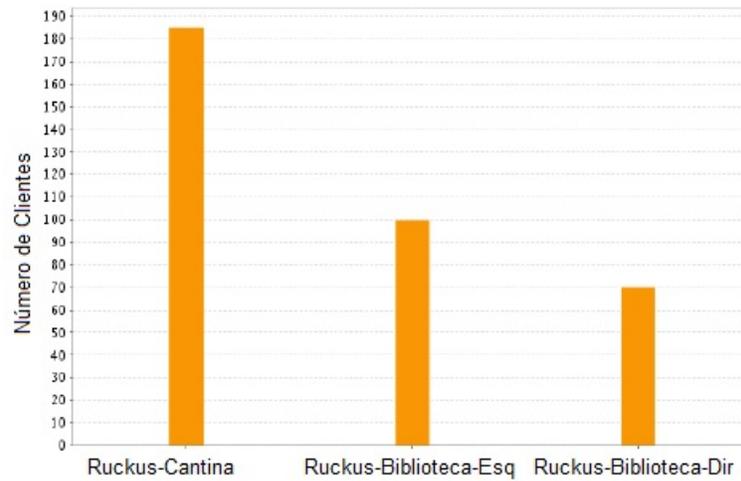
**Figura 5.10:** Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP TP-Link no teste de robustez.

### 5.2.3 AP Ruckus

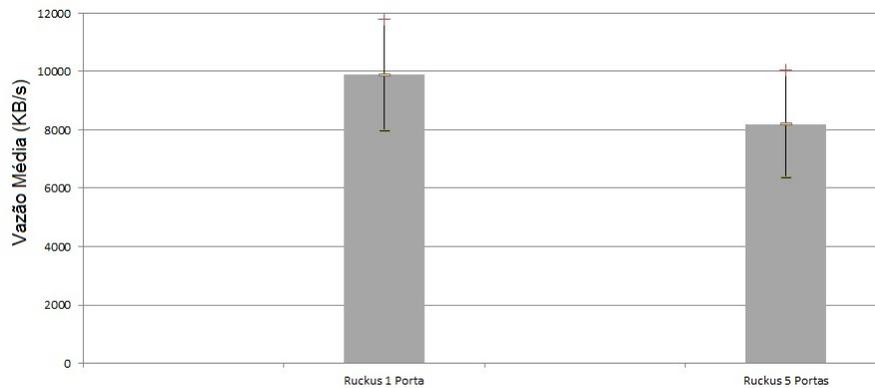
O AP Ruckus diferente dos APs testados, não teve dificuldades no teste de Robustez. O AP suportou bem o número de usuários conectados no momento dos testes, chegando a ter 185 usuários conectados. A Figura 5.11 mostra os AP da Ruckus que estavam sendo monitorados no momento dos testes, o AP Ruckus-Cantina foi o AP utilizado. No momento dos testes tinha uma média de 185 usuários conectados aos AP. Os testes foram realizados a 25 metros de distância e a transferência de dados foi feita pelos protocolos TCP e UDP com uma e cinco portas.

A Figura 5.12 mostra o resultado dos testes de transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas. No teste com uma porta a média da vazão ficou em 9881 KBytes, com o IC  $\pm 19,33\%$ . No teste com cinco portas o desempenho do AP diminuiu, a média da vazão ficou em 8199 KBytes e o IC  $\pm 22,57\%$ .

A Figura 5.13 mostra o resultado dos testes de transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas. No teste com uma porta a média



**Figura 5.11:** Teste de capacidade de usuários AP Ruckus.

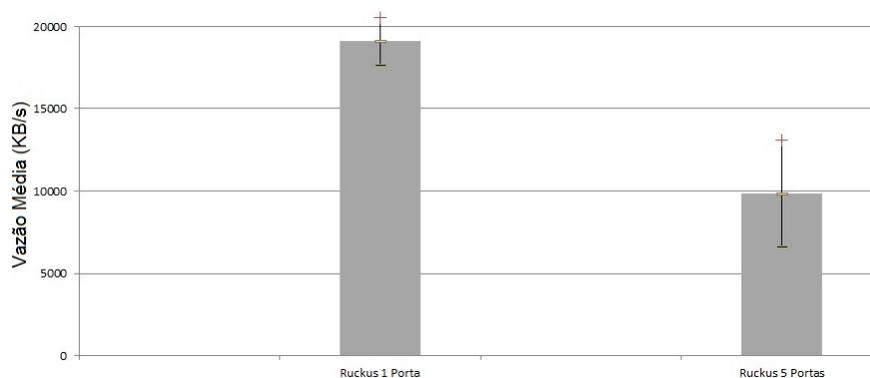


**Figura 5.12:** Transferência de dados utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no AP Ruckus no teste de robustez.

da vazão ficou em 19093 KBytes, com o IC  $\pm 7,55\%$ . No teste com cinco portas o desempenho do AP diminuiu, a média da vazão ficou em 9828 KBytes e o IC  $\pm 32,91\%$ .

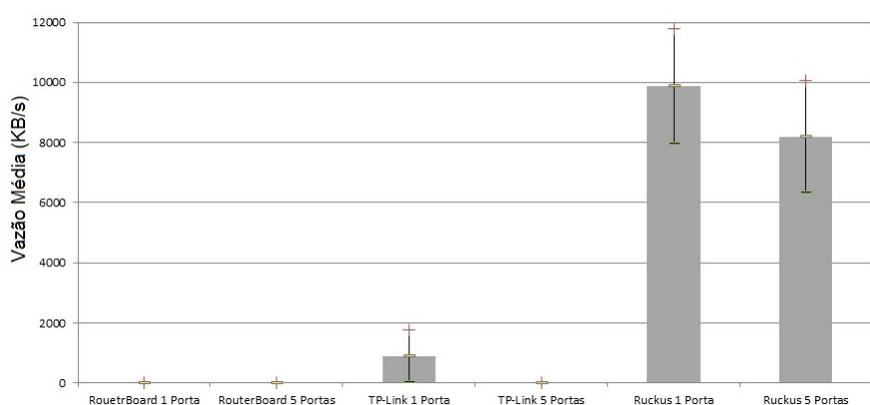
## 5.2.4 Discussão

A Figura 5.14 mostra o desempenho dos AP nos testes em ambiente externo. Como já foi dito anteriormente, o AP RouterBoard não conseguiu suportar o fluxo



**Figura 5.13:** Transferência de dados utilizando o protocolo UDP com uma e cinco portas no AP Ruckus no teste de robustez.

de usuários, com isso, não foi possível realizar os testes. O AP TP-Link chegou a inicializar o teste, mas com o tempo também não suportou o fluxo de usuários, finalizando os testes. Como nenhum dos dois AP conseguiu completar os testes, e o AP TP-Link conseguiu inicializar os testes com uma porta com o protocolo TCP, foi colocado no gráfico somente os dados dos testes deste protocolo. O AP Ruckus no momento do teste estava com 185 usuários conectados, e suportou muito bem o teste, obtendo um ótimo desempenho. A seguir será apresentado o teste de alcance, que foi executado somente com o AP Ruckus que obteve o melhor resultado no teste de robustez.



**Figura 5.14:** Transferência de dados dos AP utilizando o protocolo TCP com uma e cinco portas no teste de robustez.

### 5.3 Teste de Alcance

Esta seção apresenta os resultados e discussão dos testes de alcance executado no AP Ruckus.

No primeiro teste, conectado ao AP na cantina, distanciou-se o máximo possível até encontrar o limite de distância que o AP atendia as solicitações de transferência de dados. A Figura 5.15 mostra os resultados do primeiro teste, a distância que o teste ocorreu foi de 125 metros do AP Ruckus, foram transferidos 5.41 MBytes em 60 segundos, utilizando um *Bandwidth* de 741 KBits/s. A variação do atraso na entrega dos pacotes foi de 6.751 ms em um total de 3907 pacotes transferidos com perda de 47 pacotes (1.2%).

```

-----
Server listening on UDP port 5001
Receiving 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 64.0 KByte (default)
-----
[ 3] local 177.105.54.4 port 5001 connected with 177.105.54.106 port 63151

[ ID] Interval  Transferência  Bandwidth  Jitter  Lost/Total Datagrams
[ 3] 0.0-60.0 sec 5.41 MBytes  757 Kbits/sec  6.751 ms  47/ 3907 (1.2%)

Distância: 125 Metros
-----

```

**Figura 5.15:** Teste de limite de distância com AP Ruckus (*Smart Antenna*). Conectando e distanciando do AP.

No segundo teste, procurou acessar o AP Ruckus o mais distante possível do ponto de acesso na cantina para executar o teste. A Figura 5.16 mostra os resultados do segundo teste, a distância que o teste ocorreu foi de 85 metros do AP, foram transferidos 7.50 MBytes em 60 segundos, utilizando um *Bandwidth* de 1.05 MBits/s. A variação do atraso na entrega dos pacotes foi de 6.160 ms em um total de 5351 pacotes transferidos com perda de 1 pacote (0.019%).

```

-----
Server listening on UDP port 5001
Receiving 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 64.0 KByte (default)
-----
[ 3] local 177.105.54.4 port 5001 connected with 177.105.54.106 port 57470

[ ID] Interval  Transferencia  Bandwidth  Jitter  Lost/Total Datagrams
[ 3] 0.0-60.0 sec 7.50 MBytes  1.05 Mbits/sec  6.160 ms  1/ 5351 (0.019%)

Distância: 85 Metros
-----

```

**Figura 5.16:** Teste de limite de distância com AP Ruckus (*Smart Antenna*). Conectando no limite de acesso do AP.

### 5.3.1 Discussão

Uma observação importante que deve ser feita antes de iniciar a discussão dos resultados, é a necessidade de levar em conta o dispositivo que responde ao sinal do AP Ruckus, podendo haver diferença nos resultados de um dispositivo para outro. A Figura 5.17 mostra a comparação entre os testes de alcance. O resultado do teste de alcance mostra que o segundo teste obteve os melhores resultados. Porém, se levarmos em consideração que no momento dos testes havia uma média de 185 usuários utilizando o AP Ruckus, e que o primeiro teste estava a uma distância de 125 metros do AP Ruckus, podemos considerar os resultados satisfatórios.

	Teste 1	Teste 2
Distância	125 Metros	85 Metros
Transferência	5.41 MBytes	7.50 MBytes
Vazão	757 Mbps	1.05 Mbps
Jitter	6.751 ms	6.160 ms
Perda/Total	47/3907 (1.2%)	1/5351 (0,019%)
Tempo de Execução	60 segundos	60 segundos

**Figura 5.17:** Comparação dos testes do AP Ruckus em ambiente externo utilizando o protocolo UDP.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões sobre o Estudo da Tecnologia das Antenas Inteligentes (*Smart Antennas - SA*).

### 6.1 Conclusões sobre a tecnologia *Smart Antennas*

Com base nos testes realizados, foi possível constatar melhoras na qualidade dos serviços de transferência de dados nos AP que utilizam a tecnologia das SA. Os resultados mostram que além de melhorar o desempenho das tecnologias atuais, a tecnologia empregada no AP Ruckus atendeu uma média de 185 usuários no momento dos testes, um número superior a cinco vezes a quantidade de usuários suportados pelos AP que utilizam as tecnologias atuais. No teste de desempenho, em ambiente interno, as SA, obteve um desempenho superior aos AP concorrentes em média de 65%. Nos testes de desempenho em ambiente externo, o desempenho das SA foi mantido, mesmo com uma média de 185 usuários conectados no momento dos testes. Já no teste de alcance, que foi executado somente com o AP Ruckus, os resultados são satisfatórios, atingindo uma distância de 125 metros no primeiro teste e 85 metros no segundo. Com esses resultados obtidos, pode-se concluir que a tecnologia das SA tem tudo para solucionar os problemas de capacidade de comunicação e melhorar a qualidade dos serviços de redes sem fio. Os resultados deste trabalho podem ser aplicados em organizações/instituições que sofrem com interferência e perda da qualidade do sinal da conexão de rádio sem fio, devido ao alto número de usuários de dispositivos móveis que utilizam diferentes tipos de tecnologias de rede sem fio, com isso, sofrendo com problemas causados pela propagação *Multipath*.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros pode-se apontar:

- Avaliar os algoritmos que fazem as SA serem inteligentes.
- Fazer projetos de implementação de AP com SA na Universidade Federal de Lavras - UFLA.
- Estudar como a tecnologia das SA transferem clientes de um AP sobrecarregado para outro que não está sobrecarregado.
- Estudar como a tecnologia das SA mandam sinais nulos para evitar interferência de outro sinal transmitido por outra antena.
- Avaliar o desempenho das SA no padrão 802.11 AC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXIOU, A.; HAARDT, M. Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges. *Communications Magazine, IEEE*, v. 42, n. 9, p. 90–97, Sept 2004.

BASHA, T.; ALOYSIUS, G.; RAJAKUMAR, B.; PRASAD, M.; SRIDEVI, P. A constructive smart antenna beam-forming technique with spatial diversity. *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, v. 6, n. 7, p. 773–780, May 2012.

BATTISTI, J. *Artigos de Redes Wireless? Parte XIII*. 2014. Acessado em: 19/04/2014. Disponível em: <<http://juliobattisti.com.br/artigos/wireless/013.asp>>.

BATTISTI, J. *Redes Wireless? Parte VI*. 2014. Acessado em: 18/04/2014. Disponível em: <<http://www.juliobattisti.com.br/tutoriais/paulocfarias/redeswireless006.asp>>.

BATTISTI, J. *Redes Wireless? Parte XXI*. 2014. Acessado em: 19/04/2014. Disponível em: <<http://www.juliobattisti.com.br/tutoriais/paulocfarias/redeswireless031.asp>>.

BLASZCZYSZYN, B.; KARRAY, M. K.; KLEPPER, F. X. Impact of the geometry, path-loss exponent and random shadowing on the mean interference factor in wireless cellular networks. In: *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2010 Third Joint IFIP*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

CHANG, D.; HU, C. Smart antennas for advanced communication systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 7, p. 2233–2249, July 2012. ISSN 0018-9219.

CHRIST, P. *Mobile Television and Innovative Receivers*. 2014. Acessado em: 02/04/2014. Disponível em: <<http://cordis.europa.eu/infowin/acts/rus/projects/ac318.htm>>.

CONNIQ. *LOS versus NLOS*. 2013. Acessado em: 18/04/2014. Disponível em: <<http://www.conniq.com/WiMAX/nlos-los.htm>>.

CORREIA, L. *Tópicos em tecnologias de comunicação sem fio*. 1 edição. ed. [S.l.], 2007.

FERREIRA, Q. d. S. *Difração de luz com momento angular orbital por uma fenda*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas-Instituto de Física Maceió, 2011.

FREITAS, N. *Uma análise da utilização de antenas direcionais e múltiplos caminhos em redes ad hoc sem fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

- FRENZEL, L. E. *Smarter Antennas Breed Success In Wireless Arena*. 2005. Acessado em: 20/04/2014. Disponível em: <[http://electronicdesign.com/site-files/electronicdesign.com/files/archive/electronicdesign.com/files/29/9987/figure\\_06.gif](http://electronicdesign.com/site-files/electronicdesign.com/files/archive/electronicdesign.com/files/29/9987/figure_06.gif)>.
- GATES, M.; TIRUMALA, A.; FERGUSON, J.; DUGAN, J.; QIN, F.; GIBBS, K.; ESTABROOK, J. 2014. Acessado em: 08/05/2014. Disponível em: <<http://iperf.fr/>>.
- GIL, A. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. [S.l.]: Editora Atlas, 2002.
- HOREWICZ, M. *Estimação da direção de chegada (DOA) de sinais eletromagnéticos em canais reversos CDMA utilizando antenas inteligentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília-UNB, 2006.
- JUNIOR, H. *O efeito Doppler ? física pura!* 2011. Acessado em: 17/04/2014. Disponível em: <<http://py1wx.wordpress.com/2011/06/22/o-efeito-doppler-fisica-pura/>>.
- KONAK, A. Estimating path loss in wireless local area networks using ordinary kriging. In: *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2888–2896.
- LAVATE, T. B.; KOKATE, V. K.; SAPKAL, A. Performance analysis of music and esprit doa estimation algorithms for adaptive array smart antenna in mobile communication. In: *Computer and Network Technology (ICCNT), 2010 Second International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 308–311.
- MIKROTIK. 2014. Acessado em: 17/06/2014. Disponível em: <<http://routerboard.com/RB433AH>>.
- NICOLAESCU, I.; STOICA, D. Smart antennas for wireless communications systems. In: *ICECom, 2010 Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–4.
- ORTEGA, A. *Testando a rede com Iperf (gerador de tráfego)*. 2010. Acessado em: 08/05/2014. Disponível em: <<http://www.brainwork.com.br/2010/06/21/testando-a-rede-com-o-iperf-gerador-de-trfego/>>.
- RAMELLA, I. *A interferência em redes ad hoc com antenas direcionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- RAPPAPORT, T. *Comunicação sem fios: princípios e práticas*. [S.l.: s.n.], 2009.
- RUCKUS WIRELESS. 2014. Acessado em: 14/06/2014. Disponível em: <<http://pt.ruckuswireless.com/>>.

SOUZA, E.; CAVALCANTE, H.; DIAS, P. d. C.; SAMPAIO, R.; MENDES, R.; PRADA, T. *Ondulatória*. 2001. Acessado em: 17/04/2014. Disponível em: <<http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/index.htm>>.

SUNDARESAN, K.; SIVAKUMAR, R. Cooperating with smartness: Using heterogeneous smart antennas in multihop wireless networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 12, p. 1666–1680, Dec 2011.

SUNXU, Y.; WEN, C. Z.; HONG, X. X.; GANG, W. Doppler shift correcting in high rate digital receiver. In: *Computational Problem-Solving (ICCP), 2010 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 250–255.

TECHTUDO. 2014. Acessado em: 15/06/2014. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2013/05/como-funciona-um-roteador-e-saiba-quais-os-tipos-existent.html>>.

TIL, P. *Difração de ondas*. 2013. Acessado em: 17/04/2014. Disponível em: <<http://www.abytes.com.br/a-difracao-das-ondas-eletromagneticas-devido-a-obstaculos/>>

TP-LINK. 2014. Acessado em: 14/06/2014. Disponível em: <<http://www.tp-link.com.br/>>.

WANG, X.; GAO, F.; LIU, Q. Design of antenna array used as smart antenna for td-scdma systems. In: *Communications, Circuits and Systems, 2004. ICCAS 2004. 2004 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 176–180 Vol.1.

YOU, K. *Smart Antenna Beamforming Technique and DOA estimation*. 2014. Acessado em: 17-04-2014. Disponível em: <<http://optima.skku.ac.kr/research/research-3.htm>>.