# 4. Campanhas de medidas e equipamentos de medição

Esta pesquisa teve como objetivo analisar o sinal propagado na faixa de frequência de 3,5 GHz, uma vez que esta é uma das faixas de grande interesse da tecnologia WiMAX. Esta tecnologia é considerada como uma forte concorrente para os sistemas de comunicações de quarta geração (4G). Para alcançar tal análise, foram realizados experimentos em campo, onde o sinal foi transmitido de uma estação rádio base fixa e recebido por uma unidade móvel que se deslocava ao longo de um percurso pré-determinado. Este capítulo visa descrever as campanhas de medições realizadas e os equipamentos utilizados.

Foram realizadas medições em ambientes externos, ao longo de ruas dos bairros da Gávea e Alto Leblon, localizados na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, como mostra a Figura 4.1



Figura 4.1: Percurso realizado ao longo das medições.

Na Figura 4.1, a área sombreada representa a abrangência do feixe de meia potência da antena transmissora que, por sua vez, está sendo representada pelo símbolo da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - Rio). As rotas percorridas estão representadas pelo sombreamento de cor alaranjada das ruas, ou seja, todas as medições foram realizadas dentro da

cobertura do lóbulo de -3 dB da antena transmissora.

Foram realizadas três campanhas de medições: a primeira, com o objetivo de se determinar a faixa de frequência com menos sinais interferentes no espectro de 3,4GHz a 3,6GHz; a segunda, com o intuito de verificar a cobertura da antena transmissora e, por fim, a terceira medição, que coleta a informação de fase e quadratura (I e Q) do sinal ao longo de um setor e cria um banco de dados que armazena essas informações. Com base neste banco de dados, foram processadas as informações de I e Q para as análises realizadas ao longo desta pesquisa. As duas primeiras campanhas servem de base para conhecer a melhor frequência central a ser transmitida e os pontos de medição com satisfatório nível de sinal.

Ao longo deste capítulo são descritos os equipamentos e parâmetros utilizados durante as medições em campo. As seções 4.2, 4.3 e 4.4 descrevem, respectivamente, a primeira, a segunda e a terceira campanha de medição. Na seção 4.4.2 é realizado o balanço de potência do sistema, onde é possível determinar as margens de operação do sistema de medidas. Por fim, é tratado o parâmetro da frequência de amostragem.

#### 4.1. Sistema de medidas

O sistema de medidas montado foi composto de dois blocos, sendo eles classificados como bloco de transmissão e recepção. O primeiro foi responsável pela geração e emissão do sinal eletromagnético. O segundo, bloco de recepção, foi responsável por captar o sinal transmitido ao canal de rádio propagação móvel, controlar sua aquisição e armazená-lo em disco rígido. Após as campanhas de medição, os dados obtidos foram pós-processados em laboratório.

A etapa de pós-processamento consistiu em determinar os sinais I e Q referentes a cada subportadora do símbolo OFDM e gerar os dados estatísticos necessários para a análise da variabilidade do sinal e determinação da banda de coerência do canal.

Ao longo das medições, foram utilizados os equipamentos: gerador de sinal vetorial, modelo MG3700A, fabricado pela empresa Anritsu; amplificador de potência Milmega, modelo AS0204-7B; antena setorial. Estes equipamentos compõem o bloco de transmissão do sistema de medidas, mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2: Bloco de transmissão do sistema de medidas.

O bloco de recepção foi composto pelos seguintes equipamentos: amplificador de baixo ruído (LNA – *Low Noise Amplifier*), modelo DB97-1794, fabricado por *Narda Microwave-West*; analisador de sinal vetorial, modelo MS2781B Signature, fabricado pela Anritsu Coorporation; sistema de posicionamento global (GPS), modelo GPSMAP 60CSX, fabricação Garmin [20]; inversor de tensão DC/AC com potência nominal de saída de 800 Watts; fonte de energia e antena omni direcional. Os equipamentos foram dispostos de acordo com a Figura 4.3:



Figura 4.3: Bloco de recepção do sistema de medidas.

Percebe-se, na Figura 4.3, que o amplificador de baixo ruído (LNA) está localizado logo após a antena, isto se dá pelo fato de a figura de ruído final do sistema ter maior dependência com o ganho e a figura de ruído do primeiro estágio do sistema.

67

O gerador de sinal MG3700A [37] é capaz de transmitir sinais no espectro de 250 KHz a 6 GHz, tem capacidade de armazenamento de 40 Gb, possui arquivos, pré instalados, que geram sinais do padrão W-CDMA, GSM/EDGE, AWG, entre outros, e a facilidade de transmitir qualquer sinal gerado em diversas linguagens de programação (MatLab, C, etc) também utiliza o software IQ *producer* [40] para transformar o arquivo com as informações de I e Q em um arquivo compatível com o gerador de sinal e transmiti-los para o equipamento. Este método de geração de sinal em MatLab foi utilizado neste trabalho para o sinal transmitido ao longo das medições realizadas.

O analisador vetorial Signature–MS2781B possui a característica de detectar sinais entre 100 MHz e 8 GHz, capacidade de armazenamento de 40 GB, além de portas USB e gravador de DVD [54]. Este equipamento possui a facilidade de receber os dados referentes aos sinais I e Q e transmiti-los para o *software* MatLab [55]. Tal facilidade foi utilizada em paralelo com um *script* de controle de aquisição de dados [12].

O amplificador de potência Milmega possui potência máxima de saída de 7 W (38,5 dBm) e intervalo de frequências de operação de 2 GHz a 4 GHz [16]. A curva de amplificação deste equipamento é mostrada na Figura 4.4. O LNA DB97-1794 é caracterizado pela frequência de operação de 3,5 GHz, amplificação de 30 dB, figura de ruído de 1 dB e tensão de entrada de 15 Vcc [15].



Figura 4.4: Reta de amplificação do equipamento Milmega.

Foi utilizada, na transmissão do sinal, a antena painel HG3515P-120, Figura 4.5, fabricada pela empresa *HyperLink Technologies*. Tal antena possui frequência de operação no intervalo de 3,4 GHz a 3,7 GHz, 15 dBi de ganho, polarização vertical, 120° de abertura horizontal e 8° de abertura vertical [13]. O diagrama de irradiação desta antena pode ser visualizado na Figura 4.6.



Figura 4.5: Antena painel, modelo HG3515P-120.



Figura 4.6: Diagrama de irradiação da antena painel modelo HG3515P-120: (a) plano horizontal; (b) plano vertical.

No setup de recepção foi utilizada a antena *omni* direcional, modelo HG3505RD-RSP fabricada por HyperLink Technologies, Figura 4.7. Algumas características técnicas desta antena são: frequência de operação entre 3,4 GHz a 3,6 GHz; ganho de 5 dBi, abertura horizontal de 360°; polarização vertical [14]. O diagrama de irradiação desta antena pode ser visualizado na Figura 4.8



Figura 4.7: Antena omni direcional, modelo HG3505RD-RSP.



Figura 4.8: Diagrama de irradiação da antena omni direcional (a) plano horizontal (b) plano vertical.

A antena transmissora foi instalada no décimo segundo andar do prédio Leme, nas dependências da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - Rio), a uma altura de, aproximadamente, quarenta metros, inclinação de 0º e azimute de 118º em relação ao norte magnético. Por outro lado, a antena receptora foi fixada no teto da unidade móvel com o auxílio de uma base magnética. Os equipamentos do bloco de recepção foram alocados nos bancos da viatura e alimentados pela bateria da mesma. Para alimentar os equipamentos foi necessário utilizar um alternador de 65 Ampères e bateria de 30 A/h.

Os blocos de transmissão e recepção, montados em laboratório, podem ser visualizados na Figura 4.9.



Figura 4.9: Fotografia dos blocos de transmissão e recepção em ambiente laboratorial.

## 4.2. Primeira campanha de medição: varredura de espectro

Ao longo da primeira campanha de medição foi utilizado apenas o bloco de recepção previamente descrito, uma vez que o objetivo foi verificar a existência de sinais sendo propagados por outras fontes na faixa de frequências de interesse desta pesquisa (3,4 GHz a 3,6 GHz). O trajeto percorrido foi o mesmo mostrado na Figura 4.1.

De posse das informações coletadas ao longo desta campanha de medição, foi calculada a média do nível dos sinais detectados e plotados, em função da frequência, na Figura 4.10



Figura 4.10: Varredura do espectro entre 3,4 GHz a 3,6 GHz.

Por meio de análise da Figura 4.10, decidiu-se transmitir o sinal de medição, utilizando a frequência central de 3,410 GHz.

#### 4.3.

#### Segunda campanha de medição: determinação do raio de cobertura da antena transmissora

Uma vez determinada a frequência central a ser utilizada, partiu-se para determinação do raio de cobertura da antena transmissora para um sinal de largura de banda útil de 3,25 MHz e frequência central em 3,410 GHz.

Com base na reta de linearidade do amplificador, optou-se por configurar no gerador uma potência de -7 dBm. Considerando que o cabo que realiza a conexão entre o gerador MG3700A e o amplificador Milmega possui perda de 2 dB tem-se, na entrada do amplificador, a potência de -9 dBm, garantindo que esta esteja na região de linearidade do amplificador.

Na recepção do sinal, os seguintes parâmetros e valores foram utilizados: frequência de amostragem $(f_{a_{RX}})$  de 25 MSPS; tempo de captura  $(T_{capt})$  igual a 262  $\mu$ s; unidade móvel com velocidade 11,1 m/s (40 Km/h).

A partir desta campanha de medição, concluiu-se que as Avenidas Borges de Medeiros e Epitácio Pessoa e a Rua Jardim Botânico apresentavam nível de sinal abaixo do limiar detectável (-105 dBm), logo, estas regiões foram excluídas da terceira campanha de medição, permanecendo apenas as ruas descritas na Figura 4.11.



Figura 4.11: Região abrangida pela terceira campanha de medição.

#### 4.4. Terceira campanha de medição: aquisição da informação de fase e quadratura do sinal transmitido

A terceira campanha de medição teve como objetivo coletar informações para posterior análise de variabilidade do sinal, taxa de cruzamento de nível, duração média de desvanecimento e banda de coerência do canal.

Esta campanha de medição consiste em coletar informações de fase e quadratura (I e Q) do sinal transmitido ao longo de 217 ms, velocidade média de 16,6 m/s (60 km/h) e frequência de amostragem de recepção de 25 MSPS (*Mega Samples per Second*).

A frequência de amostragem utilizada na recepção é de 25 MSPS. Logo, é necessário que a frequência de amostragem de transmissão seja um múltiplo inteiro deste valor para que cada amostra transmitida tenha um número inteiro de amostras capturadas na recepção. Foi selecionada a frequência de amostragem de 8,3333 MHz.

A variabilidade do sinal deve ser analisada, utilizando informações de um mesmo setor, como visto no capítulo 3. O tempo máximo de captura de dados permitido no equipamento de recepção Anritsu é de 400 ms para uma frequência de amostragem de 25 MSPS (previamente determinada). Quanto maior o tempo

de captura, maior o arquivo de armazenamento e maior o intervalo de tempo que o equipamento necessitava entre o término de uma medição e o início da seguinte. O intervalo entre medições, utilizando tempo de captura de 400 ms, é tal que inviabiliza duas medições consecutivas a uma velocidade de 16,6 m/s. Com base no tamanho máximo do setor, nas distâncias disponíveis para alcançar a velocidade de medição, no tamanho do arquivo de armazenamento dos dados, e no intervalo entre uma medição e outra, foi escolhido o tempo de captura de dados de 217 ms e velocidade média de 16,6 m/s.

### 4.4.1. Características do sinal, parâmetros de transmissão e recepção

O sinal transmitido nas campanhas de medição foi gerado na linguagem de programação MatLab e pode ser visualizado no domínio da frequência, na Figura 4.12. Com o auxílio do *software* IQ-*Producer* este sinal foi convertido em um arquivo de extensão específica para o uso do MG3700 e transmitido, via cabo UDP, para o gerador de sinal MG3700A. O analisador de espectro *Signature* recebe o sinal de rádio frequência e envia para o MatLab as informações I e Q do sinal capturado, utilizando o volt como unidade de medida [59]. Ao longo da recepção do sinal, é executado um programa no *Signature*, desenvolvido em MatLab, que controla o tempo de aquisição dos dados I e Q e a gravação dos mesmos.



Figura 4.12: Sinal OFDM, no domínio da frequência, transmitido ao longo das medições.

As características do sinal transmitido são:

- » Número de subportadoras úteis: 200
- » Número de subportadoras nulas: 56
- » Número de subportadoras nulas adicionadas para evitar aliasing: 256
- » Sinal OFDM-256;
- » Modulação QASK;
- » Frequência central  $(f_c)$ : 3,411 GHz
- » Largura de banda útil (B): 3,25 MHz;
- » Frequência de amostragem  $\left(f_{a_{TX}}
  ight)$  de transmissão: 8,33333 MHz;
- » Prefixo cíclico:  $\frac{1}{16}$ ;
- » Tempo útil do símbolo OFDM: 61,44  $\mu s$ ;
- » Período do prefixo cíclico: 3,84  $\mu s$ ;
- » Duração total do símbolo OFDM: 65,26  $\mu s$ ;
- » Gap de transmissão: 32,625 μs (tempo de gap consiste na transmissão de um nível DC e ruído, com o objetivo de realizar o sincronismo);
- » Potência de saída do gerador de sinal  $(P_{Gerador})$ : -7 dBm;

A alocação das subportadoras transmitidas pode ser visualizada na Figura 4.13.



Figura 4.13: Disposição das subportadoras do sinal transmitido (domínio da frequência).

As informações de fase e quadratura obtidas pelo analisador de espectro *Signature* são gravadas em seu disco rígido interno e depois exportadas para um computador, onde o pós processamento é realizado. O primeiro passo do pós processamento é identificar cada símbolo OFDM capturado e organizar as informações de cada setor em uma matriz. Cada linha desta matriz contém informações I e Q de um símbolo OFDM. Em síntese, este primeiro passo consiste na entrada das informações I e Q, coletadas ao longo do tempo, realização do *downsample* das informações (frequência de amostragem de recepção é o triplo da frequência de amostragem de transmissão), em seguida realização da correlação entre as informações resultantes do processo de *downsample* e o prefixo cíclico do sinal transmitido. Ao final deste processo os pontos de maior correlação indicam o início e o final de cada símbolo OFDM recebido. Uma vez conhecido o início e o final dos símbolos OFDM, cada um deles forma uma linha de uma matriz que resulta na informação de cada setor.

Os passos seguintes consistiram em utilizar esta matriz para analisar: a variabilidade do sinal; taxa de cruzamento de nível; tempo médio de desvanecimento; e banda de coerência do canal.

#### 4.4.2. Balanço de potência

Com base na reta de amplificação do equipamento Milmega, foi determinado que o gerador vetorial fosse configurado com uma potência de saída de -7 dBm. O cabo utilizado para conectar o gerador ao amplificador Milmega possui perda total de 2 dB, consequentemente tem-se potência de -9 dBm na entrada do amplificador e 37,5 dBm na saída do mesmo. Por fim, na

entrada da antena, tem-se uma potência de 35,4 dBm, devido à perda de 2,1 dB no cabo conectado entre o amplificador e a antena. De posse dessas informações e supondo perda ômica nula no ambiente, é possível calcular a potência isotrópica efetivamente irradiada (EIRP), conforme apresenta a Equação 4.1.

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx}$$
 Equação 4.1

onde,  $P_{Tx}$  e  $G_{Tx}$  são, respectivamente, a potência de entrada na antena, em dBm, e ganho desta, em dB.

Utilizando a Equação 4.1 tem-se que a EIRP do sistema é de 50,4 dBm.

O limite de desvanecimento  $(L_D)$ , na Equação 4.2, determina a atenuação máxima que o sinal pode ter para que, ainda assim seja detectável pelo receptor [63].

$$L_D = EIRP - L_P - MSD$$
; [dB] Equação 4.2

onde,  $L_p$  e *MSD* são, respectivamente, a perda de propagação determinística do enlace e a mínima potência do sinal detectável pelo receptor. O primeiro parâmetro é dado pela Equação 4.3. A mínima potência do sinal detectável pelo receptor é definida pela potência do sinal que se iguala ao nível do ruído do receptor e definida, matematicamente, pela Equação 4.4. O nível de ruído do receptor é diretamente proporcional à largura de banda do sinal.

$$L_{P} = 32,44 + 20\log f_{[MHz]} + 20\log d_{[Km]} \quad ; \quad [dB] \qquad \qquad \text{Equação 4.3}$$

$$MSD = 10\log(KTB) + NF$$
  

$$MSD = -174_{[dBm/Hz]} + 10\log B_{[Hz]} + NF_{[dB]}; \quad [dBm]$$
  
Equação 4.4

onde:

- f é a frequência;
- d é a distância;
- B é a largura de banda;
- NF é a figura de ruído;
- *K* é a constante de Boltzmann, em Joule/Kelvin  $(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$ ;

*T* é a temperatura ambiente em Kelvin.

Com base nas equações Equação 4.1, Equação 4.4 e nas informações fornecidas ao longo deste texto calcula-se que no ponto de medição mais próximo do transmissor tem-se um valor de 74,15 dB de limite de desvanecimento e 50,35 dB no ponto de medição mais distante da antena transmissora, ou seja, é possível detectar desvanecimentos tão profundos quanto as magnitude citadas.

A Figura 4.14 da melhor visualização dos pontos em que são aplicados alguns parâmetros citados nesta seção.



Figura 4.14: Pontos de referência de parâmetros do balanço de potência.

Percebe-se que o limite de desvanecimento definido até o momento tem como ponto de detecção a entrada da antena de recepção. Entretanto, pode ser de interesse obter o limite de desvanecimento na entrada do analisador vetorial  $(L_d)$ . Para isto, basta somar à  $L_D$  os ganhos da antena  $(G_{Rx})$  e do LNA  $(G_{LNA})$  e subtrair as perdas nos cabos  $(L_C)$ , como mostra a Equação 4.5.

#### 4.4.3. Frequência de amostragem

Segundo [51], o intervalo apropriado de medição entre duas amostras para realização de medição de desvanecimento rápido deve ser de tal forma que as amostras sejam altamente correlatas no tempo. Para isso [51], sugere que o intervalo entre duas amostras seja a metade do tempo de coerência. Parsons [46] afirma que, para que sejam detectados desvanecimentos abaixo de 30 dB do nível mediano do sinal, devem ser obtidas amostras a cada  $0,01 \lambda$ , supondo ambiente Rayleigh.

Segundo Lee [32], para que seja realizada a estimativa da média local, é suficiente o quantitativo de 36 amostras.

O princípio de Nyquist determina que a frequência de amostragem tem que ser maior ou igual a duas vezes a largura de banda do sinal (B), como está na Equação 4.6.

$$f_a = 2 \cdot B$$
 Equação 4.6