

# Caracterização de Terminais Móveis Multi-Antena

Gonzalo Bulnes, Marcos Patricio dos Santos Jr. e A. Judson Braga

**Resumo**—Este trabalho apresenta resultados de medições de parâmetros S e de radiação de terminais móveis multi-antenas, realizadas na *École Nationale Supérieure de Techniques Avancées* (ENSTA) em Paris, para o estudo da influência de espalhadores em campo próximo – cabeça e mão do usuário – sobre seus desempenhos. Foram produzidos, na Universidade de Brasília (UnB), dados utilizando um simulador eletromagnético e modelos antropomórficos para determinação de características dos terminais, como correlação cruzada e ganho de diversidade; e de aspectos de seus comportamentos na presença de espalhadores como: modificação dos diagramas de radiação, redução do ganho, e, em determinadas situações, decorrelação das antenas.

**Palavras-Chave**— Terminais multi-antena, espalhador em campo próximo, modelo antropomórfico padrão, ganho de diversidade, correlação cruzada.

**Abstract**—This paper presents measurements made at *École Nationale Supérieure de Techniques Avancées* (ENSTA) in Paris, to study the influence of close scatterers –the user’s head and hand– towards multi-antenna terminals (cell-phones and PDA). Afterwards, using an electromagnetic simulation environment and standard anthropomorphic models, a reduced set of data was produced and analyzed at Universidade de Brasília (UnB) in order to study some multi-antenna metrics like cross-correlation coefficient and diversity gain, as well as some aspects of their behaviour in the presence of close scatterers: radiation pattern modifications, gain drop, and in some case decorrelation of the terminal antennas.

**Keywords**— Multi-antenna terminal, close scatterer, standard anthropomorphic models, diversity gain, cross-correlation.

## I. INTRODUÇÃO

As tecnologias que usam múltiplas antenas permitem aumentos significativos das taxas de transmissão de dados e/ou da qualidade do enlace, sem a necessidade de maior banda ou potência de transmissão. A qualidade de enlace, por exemplo, pode ser alcançada pelo uso de diversidade espacial em determinadas condições do canal de propagação. Porém, as propriedades de radiação, as perdas de retorno dessas antenas e a capacidade dos canais, podem ser modificadas por diversos fatores. Como exemplo, os espalhadores em campo próximo, ou o acoplamento mútuo entre as antenas. Por isso, estudos que buscam caracterizar o comportamento desses terminais na presença de espalhadores tornam-se importantes para que se obtenham terminais móveis de melhor desempenho.

A característica aleatória do canal classicamente estudada e modelada por distribuições amplamente conhecidas deve ser aprofundada em termos da influência de fatores como acoplamento mútuo e interferência de objetos próximos ao terminal, por exemplo. Para as frequências de operação utilizadas

em nosso trabalho, a mínima alteração de posicionamento de espalhadores altera a configuração do canal de propagação na proporção do comprimento de onda. A variabilidade do canal em associação com a variabilidade do posicionamento dos espalhadores é a chave de um modelo mais completo do canal. Neste trabalho, formatamos um banco de medições e simulações cujos dados poderão servir de base para um modelo estocástico. Aqui, damos apenas alguns passos na observação deste fenômeno.

O objetivo do presente estudo foi caracterizar e avaliar o comportamento de alguns protótipos de terminais móveis com múltiplas-antenas [1], [2], [3] na presença de espalhadores em campo próximo relativo as antenas. A maioria desses arranjos de antenas foram desenvolvidas para trabalhar nas bandas WLAN 2.5/5.2/5.8 GHz e WiMAX 2.5/3.5/5.5 GHz e são fabricados em circuitos impressos de  $114 \times 64$  mm<sup>2</sup>, dimensões média de PDAs disponíveis no mercado; e o principal espalhador estudado foi o corpo humano: cabeça e mão do usuário. Foram realizadas medidas em câmara anecóica e simulações eletromagnéticas. Na seção II, os terminais utilizados são apresentados, seguido pelos procedimentos de medida e simulação para cada cenário nas seções III e IV, respectivamente. Na seção V, resultados e análises são descritas, seguido por uma breve conclusão na seção VI.

## II. TERMINAIS

Todos os terminais estudados nesta pesquisa têm as mesmas dimensões ( $114 \times 64$  mm<sup>2</sup>). A distância entre as antenas adjacentes é menor do que  $\lambda/2$  para frequências abaixo de 3 GHz em todos os terminais.

Os terminais bi- e quadri-antenas têm respectivamente um e dois planos de simetria conforme mostra as figura 1, 2 e 3.

### A. Terminal de 4 monopolos circulares

Uma antena monopolo circular [2] para tecnologia microfta é utilizada como base de nosso primeiro terminal. A adaptação do monopolo circular ao terminal com 4 elementos sobre o mesmo substrato proposto neste trabalho é projetado e impresso sobre FR4. A figura 1 apresenta a imagem do terminal no simulador de antenas.

Diferentemente de monopolos clássicos, esta antena não possui radiação uniforme em azimute, nem polarização linear. Além do mais, o formato circular do elemento garante a repetitividade de ressonância garantindo um casamento de impedância ultra banda larga (UWB).

### B. Terminal de 4 antenas slot

O segundo terminal se baseia na antena proposta em [3]. As correntes dispostas nas bordas da fenda da antena *slot* e

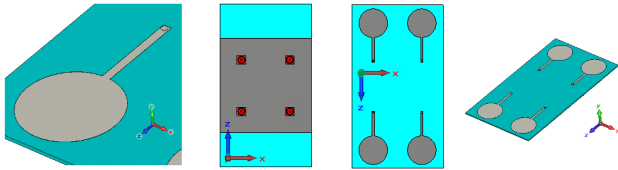


Fig. 1. Terminal de monopolos circulares.

nas bordas do plano de massa (paralela a fenda) ressonam em diferentes frequências, garantindo banda larga. A adaptação para o terminal proposto levou a muitas modificações comparadas à [3] de forma a garantir bom desempenho de radiação e perda de retorno nas bandas de interesse tanto em simulação quanto em medidas. O terminal também foi impresso em FR4. A figura 2 mostra o modelo do terminal em simulador de antenas.

Em respeito ao terminal original, duas lâminas presentes na fenda foram retiradas. Essas lâminas faziam o efeito de descasamento proposital para frequências específicas, o que não nos interessava. Assim como no modelo circular, o uso do terminal multi-antena com maior plano de massa, comparado ao modelo original, favoreceu o casamento de impedância em frequências mais baixas sem a necessidade de aumento das dimensões dos elementos radiantes. Entre as especificidades do modelo estão o corte de separação de plano de massa dos elementos superiores e inferiores que diminui o acoplamento mútuo, e a linha de conexão entre os mesmos para garantir a mesma referência para todos os elementos. Observe que não foi feito qualquer corte do plano de massa separando os elementos da esquerda e da direita. Isto não foi necessário, pois uma maior concentração de corrente no plano de massa foi observada na fenda ao longo do eixo  $x$ . Por este motivo, uma segunda fenda, disposta no artigo original no eixo  $z$  foi retirada, garantindo relativo desacoplamento entre os elementos da esquerda e da direita.

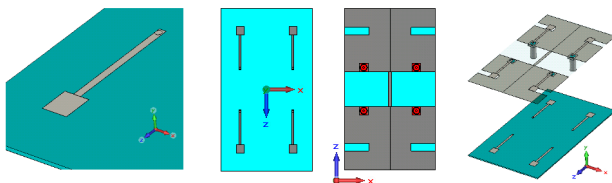


Fig. 2. Terminal de antenas slot.

### C. Terminal de duas antenas PIFA

O terminal PIFA utilizado (ver Fig. 3) é idêntico ao descrito em [1]. Diferentemente dos terminais anteriores, a antena PIFA não possui características UWB e suas frequências de ressonância dependem do formato e comprimento dos radiadores metálicos. Outra diferença importante é que o plano de massa

encoberta o contato dos radiadores com metade do espaço de radiação. Como visto nas figuras 1 e 2, os planos de massa são vazados, para terminais monopolo e slot, permitindo radiação em ambas as metades do espaço.

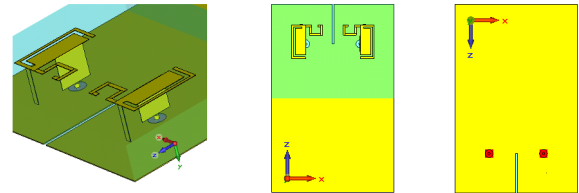


Fig. 3. Terminal de duas antenas PIFA.

## III. MEDIÇÕES

As medidas foram realizadas na câmara anecóica da *Unité Électronique et Informatique* (UEI) da ENSTA como parte de uma campanha cujo objetivo era criar uma quantidade de dados suficiente para estudo estatístico da influência dos espalhadores em campo próximo sobre diversos terminais móveis multi-antenas.

Utilizou-se os analisadores de rede vetorial *Rhode & Schwarz ZVA 40* e *Agilent HP8510*, em uma faixa de frequência entre 1.5 GHz e 6.0 GHz. Como antena de referência para as medições de radiação, foi utilizada uma antena Lindgren modelo 3117 [6] e como espalhadores, dois modelos antropomórficos padrão (SAM) - cabeça e mão direita. O SAM da cabeça foi preenchido com o líquido *CTIA Liquid 835 - 1900 MHz*, criado para modelar as características eletromagnéticas dos tecidos humanos. O uso de uma antena de referência conhecida e de SAM tem o objetivo de garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Os terminais foram caracterizados, pela medição dos seus parâmetros de espalhamento, isoladamente e na presença dos espalhadores, para tal, utilizou-se dois cenários distintos nomeado de: *telefone móvel* e *PDA*.

Além disso, foi obtido o diagrama de radiação para as antenas pertencentes a cada terminal na presença de espalhadores pela rotação do cenário completo segundo o eixo vertical que passa pelo centro do terminal na posição zero, com uma medição cada 5° de 5° até 355°. O valor usado para o ângulo 0° é a média dos valores em 3° e 357°.

### A. Cenário telefone móvel

No cenário *telefone móvel*, na posição zero, o terminal está sujeito verticalmente pela mão contra a orelha do SAM, conforme mostra figura 4, e a face está voltada para a antena de referência.

O cenário varia segundo quatro parâmetros determinados na seguinte ordem:

- 1) *Polarização*: rotação da antena de referência ao redor da linha de visada. [vertical, horizontal]



Fig. 4. Os modelos antropomórficos padrão (SAM) em cenário telefone móvel.

- 2) *Orientação*: rotação do terminal e da mão segundo o eixo que passa pelo centro do terminal e ortogonalmente ao seu plano na posição *zero*<sup>1</sup>. [0°, 30°, 60°]
- 3) *Tilt*: rotação do terminal e da mão segundo o eixo vertical que contém a borda vertical do terminal que fica nas costas do usuário na posição *zero*<sup>1</sup> (ver Fig. 6). [15°, 30°]
- 4) *Inclinação*: rotação do cenário completo segundo o eixo ortogonal ao plano do terminal e que passa pelo centro do mesmo (ver Fig. 7). [0°, 20°]

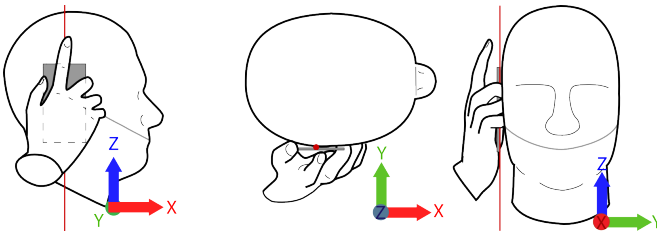


Fig. 5. Eixo de rotação para mudança de *orientação*.

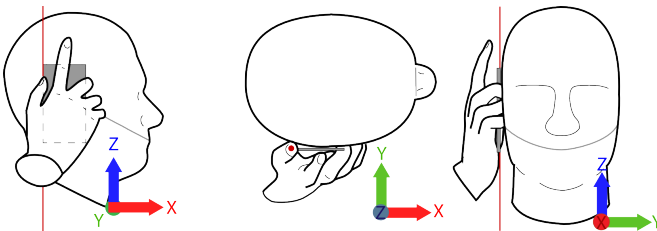


Fig. 6. Eixo de *tilt*.

### B. Cenário PDA

No cenário *PDA*, somente o SAM da mão está presente (ver Fig. 9), e o terminal na posição *zero* fica na mesma posição em respeito à antena de referência que no cenário *telefone móvel* (ver Seção III-A).

<sup>1</sup>O eixo é definido pela posição *zero* (ver Fig. 5) do terminal, mas é independente do terminal quando esse muda de posição.

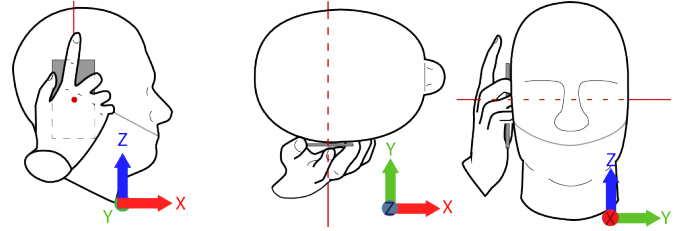


Fig. 7. Eixo de *inclinação*.

Os parâmetros deste cenário são:

- 1) *Polarização*: rotação da antena de referência ao redor da linha de visada. [*vertical, horizontal*]
- 2) *Orientação*: rotação do terminal e da mão segundo o eixo que passa pelo centro do terminal e ortogonalmente ao seu plano na posição *zero*. [0°, 30°, 60°]
- 3) *Inclinação*: rotação do cenário completo segundo o eixo usado para determinar a *orientação*. [0°, 20°]

## IV. SIMULAÇÃO

Conjuntamente com as medidas realizadas na câmara anecóica, foi utilizado um programa de simulação eletromagnética, com o propósito de prover ferramentas para facilitar e acelerar a produção de dados requerida para realizar o estudo estatístico em questão.

Os modelos computacionais foram criados com base nos modelos de terminais descritos na Seção II, e para modelar os espalhadores usou-se os modelos fornecidos pelo próprio simulador, com base nos parâmetros dos SAMs utilizados.

A simulação permitiu o cálculo de diagramas de radiação tridimensionais (mais completo que os diagramas de radiação bidimensionais (inclinação 0° e 20°), que foram medidos para cada antena dos terminais). Durante a simulação foi utilizado um *script* para automatizar a configuração dos cenários no CST. Este *script* era responsável por posicionar os elementos do cenário (os SAMs e o terminal), iniciar a simulação, armazenar os resultados, e repetir o processo para cada antena e variação dos parâmetros de cada cenário.

### A. Cenário telefone móvel

A fim de reduzir o custo computacional para as simulações dos cenários de interesse, as definições dos parâmetros *orientação* e *tilt* foram modificadas e são as seguintes:

- 1) *Orientação*: rotação do terminal e da mão segundo o eixo que contém a borda vertical do terminal na posição *zero*<sup>1</sup>. [0°, 30°, 60°]
- 2) *Tilt*: rotação do terminal e da mão segundo o eixo que contém a borda horizontal superior do terminal na posição *zero*<sup>1</sup>. [15°, 30°]

<sup>1</sup>O eixo é definido pela posição *zero* (ver Figuras 8 e 9) do terminal, mas é independente do terminal quando este muda de posição.

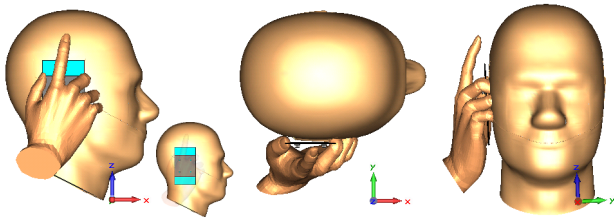


Fig. 8. Cenário *telefone móvel* no simulador eletromagnético *CST Microwave Studio* (posição zero).

**B. Cenário PDA**

Neste cenário os parâmetros são:

- 1) *Polarização*: rotação da antena de referência ao redor da linha de visada. [*vertical, horizontal*]
- 2) *Orientação*: rotação do terminal e da mão segundo o eixo que contém a borda vertical do terminal na posição zero<sup>1</sup>. [*0°, 30°, 60°*]

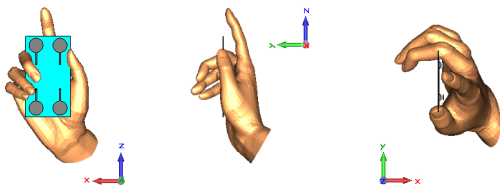


Fig. 9. Cenário *PDA* no *CST MWS* (posição zero).

**V. RESULTADOS**

**A. Simulação versus medições**

A figura 10 apresenta o parâmetro de espalhamento  $S_{11}$ , de uma antena *slot* do terminal, medido e o resultado obtido por meio de simulação. Na primeira parte da banda, os resultados são similares, mas para as frequências mais altas, diferem. Isso ocorre devido à sensibilidade do canal de propagação às variações milimétricas de posição entre os elementos do cenário, real e simulado, devido à banda de frequências escolhida (1.5 GHz - 6.0 GHz).

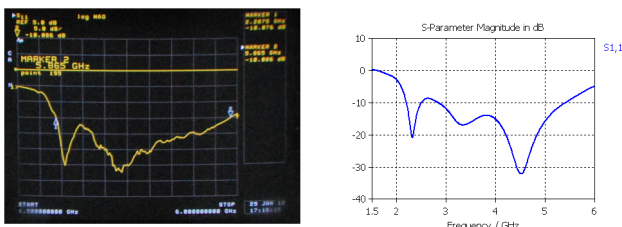


Fig. 10. Perda de retorno de uma antena do terminal *slot* medido por um *VNA HP8510* e calculado por *CST MWS*.

**B. Efeitos da diversidade sobre a radiação.**

A figura 11 apresenta os efeitos da multiplicidade das antenas, *diversidade*, sobre o diagrama de radiação de um monopolo circular.

No diagrama de radiação da antena isolada, observa-se que a radiação é nula na direção do eixo *z* (porque a antena é um monopolo), e que é simétrica em relação ao plano (0, *x*, *z*).

Olhando para o diagrama de radiação do terminal multi-antenas, primeiro se observa que globalmente é similar ao diagrama de radiação da antena isolada, mas também que foi lateralizado: a radiação é mais forte na direção oposta à origem da perturbação. O acoplamento entre as antenas é a principal causa desse fenômeno para este caso.

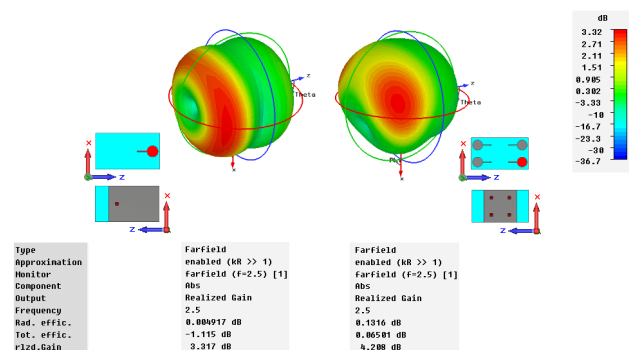


Fig. 11. Efeitos da *diversidade* sobre o diagrama de radiação de um monopolo circular.

**C. Ganho de diversidade**

A figura 12 representa a probabilidade que a potência do sinal recebido pelo terminal de duas antenas PIFA seja inferior ao limiar de funcionamento do terminal em função desse limiar em três casos:

- um terminal de duas antenas PIFA (simulado no *CST MWS*)
- um terminal com uma antena PIFA isolada (simulado no *CST MWS*)
- o caso teórico de um terminal de duas antenas decorrelacionadas (melhor caso).

O ganho de diversidade é a diferença (em dB) entre o valor limiar da intensidade do sinal recebido para se obter uma determinada probabilidade de *outage* quando se utilizam múltiplas antenas e quando se utiliza apenas um. Quanto menor for o limiar para garantir a probabilidade de funcionamento, mais robusta a transmissão. Por exemplo, um receptor associado ao terminal multi-PIFA pode ser 9.1 dB menos sensível com relação ao terminal mono-PIFA e ainda assim garantir a mesma probabilidade de *outage* de 1%<sup>1</sup>.

**D. Descasamento de impedância**

Na presença de espalhadores em campo próximo, pode acontecer *descasamento* das antenas: na figura 13 pode-se

<sup>1</sup>M. Mouhamadou fez a mesma curva com um método que usa a combinação dos sinais das antenas (MRC) [1]. É uma forma diferente de aproveitar a diversidade espacial das várias antenas.

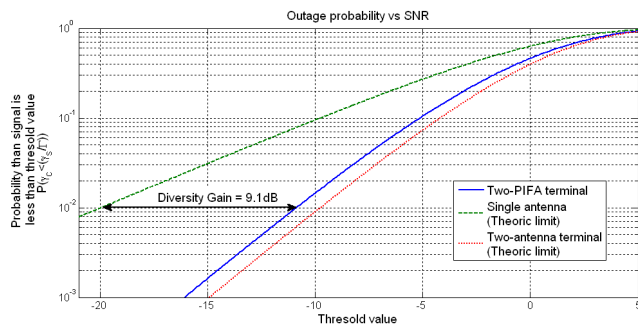
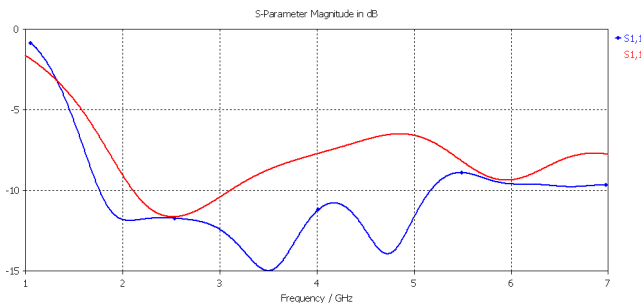


Fig. 12. Ganho de diversidade de um terminal de duas antenas PIFA.

observar uma queda do ganho e uma redução da banda de 1.7 GHz - 5.1 GHz à 2.1 GHz-3.1 GHz (limiar fixo à  $-10$  dB). A explicação disso é que as antenas foram otimizadas para trabalharem isoladas. O interesse de estudar o seu comportamento na presença de espalhadores em campo próximo é precisamente de poder propor soluções de maior rendimento nessas situações.

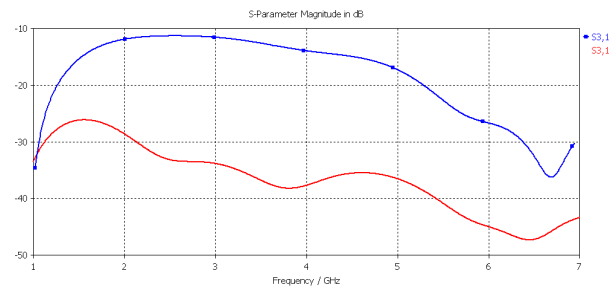
Fig. 13.  $S_{11}$  de um terminal quadri-monopolo circulares isolado (pontos sobre a linha) e em presença de espalhadores próximos (cenário *telefone móvel*).

### E. Diminuição do acoplamento

A presença de espalhadores em campo próximo nem sempre significa uma degradação do desempenho do terminal, algumas vezes provoca um desacoplamento das antenas dos terminais multi-antenas. Na figura 14, observa-se que a influência da antena 3 sobre a antena 2 do terminal de monopolo circulares é menor no cenário *telefone móvel* que quando está isolado. Uma diminuição do acoplamento deste tipo pode provocar uma diminuição da correlação entre os sinais que chegam às antenas, o que melhora a transmissão por permitir maior eficiência na utilização das técnicas de diversidade.

## VI. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu produzir resultados de simulação de terminais móveis multi-antenas na presença de espalhadores em campo próximo, graças ao uso de modelos antropomórficos standard (SAM), da cabeça e da mão direita do usuário, e à

Fig. 14.  $S_{31}$  de um terminal de 4 monopolos circulares isolado (pontos sobre a linha) e em presença de espalhadores próximos (cenário *telefone móvel*).

modelização dos terminais e dos cenários de medição num simulador eletromagnético (*CST Microwave Studio*).

Esses resultados mostram que os terminais multi-antenas possuem características próprias que melhoram globalmente o desempenho de comunicação com relação aos terminais mono-antena, e que se traduzem na existência de um ganho de diversidade espacial. Foi mostrado que o ganho de diversidade depende não apenas das características do canal, mas também de propriedades da antena como o acoplamento mútuo.

Além disso, verificamos como as características dos terminais móveis multi-antenas são modificadas pela presença de espalhadores em campo próximo, e que nem todos os efeitos desses espalhadores são negativos para o desempenho dos terminais. Os espalhadores podem provocar uma diminuição do acoplamento entre as antenas e assim aumentar o ganho de diversidade do terminal. Por outro lado, podem provocar descasamento de impedância nas antenas pelos perturbadores próximos. Assim, o conjunto dos seus efeitos pode ser positivo ou negativo para a comunicação.

Ferramentas de automatização foram criadas para garantir a produção de dados em quantidade suficiente para um estudo estatístico no contexto do projeto de pesquisa do qual este estudo faz parte. Este estudo buscará encontrar modelos generalizados do comportamento do “canal mais antena” em presença de espalhadores próximos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Mouhamadou, M. and Koubeissi, M. and Tounou, C. and Decroze, C. and Carsenat, D. and Reynaud, S. and Monediere, T., *Antennas and Propagation*. EuCAP 2009. 3rd European Conference on Multi-band diversity antenna performances evaluation for multi-standard compact wireless terminal, pp. 1603–1607, Março 2009
- [2] Allen, B. and Dolher, M. and Okon, E. E. and Malik, W. Q. and Brown, A. K. and Edwards, D. J., *Ultra-wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*. John Wiley and Sons, 2007.
- [3] W.-S. Chen and K.-Y. Ku, “Band-Rejected Design of the Printed Open Slot Antenna for WLAN/WiMAX Operation”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Vol. 56, Num. 4, pp. 1163–1169, April 2008.
- [4] Mellah, M. A., *Antenna Systems for Handsets*. PhD Thesis, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées. ENSTA, 2008.
- [5] de Mur e Prior, E., *Study of multi-antenna terminals in the presence of close scatterers*. Master Thesis, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées. ENSTA, 2009.
- [6] www.ets-lindgren.com/3117, *Double Ridged Waveguide Horn model 3117*. Datasheet. ETS-Lindgren, 2008.