

# Caracterização experimental da rádio-propagação em 3,5GHz no interior de edifícios.

Andréa Duarte Carvalho, Luiz Cezar Trintinalia e Antonio Fischer de Toledo

*Resumo* — Este artigo apresenta a caracterização do nível do sinal rádio-propagado recebido no prédio de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo através de medidas em 3,5GHz. As medidas são detalhadas e seus parâmetros estatísticos apresentados cômodo a cômodo. A campanha de medidas foi feita utilizando um transmissor fixo e um receptor móvel capaz de percorrer toda a extensão do edifício. Os dados obtidos referem-se a duas campanhas distintas: uma com o transmissor posicionado internamente ao edifício e outra com o transmissor posicionado externamente.

*Palavras-Chave* — Rádio-propagação; desvanecimento rápido; desvanecimento lento; distribuição Rayleigh; distribuição Rice; distribuição log-normal.

*Abstract* — *This paper presents experimental characterization of the radio-propagated signal strength received in Electrical Engineering building at University of São Paulo, at 3,5GHz. These measures are detailed and their statistical parameters presented at individual rooms. The measurement campaign was carried out using a fixed transmitter and a mobile receiver able to move around the whole building extension. The collected data refers to two distinct measurements: with the transmitter located inside and with the transmitter located outside the building.*

*Keywords* — *Radio-propagation; fast fading; Rayleigh distribution; Rice distribution; lognormal distribution.*

## I. INTRODUÇÃO

O interesse nas comunicações sem fio em interiores tem crescido rapidamente nos últimos anos em consequência do advento da transmissão de dados através da rede celular ou redes de computadores sem fio.

Num típico sistema de rádio-comunicação em interiores, uma antena fixa (base), instalada numa posição elevada, se comunica com um certo número de rádios fixos ou portáteis dentro de uma construção. E, é através da reflexão, refração e espalhamento das ondas de rádio, que ocorrem devido às estruturas, móveis e pessoas que se movem dentro do edifício, que o sinal transmitido pode atingir o receptor por mais de um percurso (*path*), resultando num fenômeno conhecido como desvanecimento de multipercursos (*multipath fading*).

Assim, os componentes do sinal provenientes do transmissor que chegam por caminhos de visada direta (*line-of-sight, LOS*) e sem visada direta (*non line-of-sight, NLOS*), se somam de maneira a produzir uma versão distorcida do sinal transmitido. Por isso, a análise detalhada do canal de rádio é de grande importância para o desenvolvimento de sistemas de comunicação móvel futuros, assim como para a otimização dos já existentes.

Devido a esta importância, e também devido à ausência de trabalhos que relatem experiências com medidas em edifícios com construções e plantas brasileiras, uma extensa campanha de medidas foi realizada nos blocos C e D do prédio de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, em cômodos com características bem diferentes entre si, como escritórios, laboratórios e salas de aula.

O objetivo deste trabalho, não é apenas mostrar o comportamento da rádio-propagação no ambiente de estudo, mas sim, validar para o local, o método de caracterização utilizado com sucesso em países do hemisfério norte, apresentando as semelhanças e diferenças, a fim de facilitar os estudos, projetos e desenvolvimentos de redes de transmissão de dados sem fio, levando em consideração as características estatísticas para cada tipo de cômodo.

As sessões subseqüentes deste trabalho apresentam uma descrição detalhada da caracterização desse ambiente, realizadas na faixa de frequência do WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), 3,5GHz

## II – CAMPANHA DE MEDIDAS

Tendo como finalidade observar os diferentes níveis de sinal e suas características de variação ao longo dos blocos, a campanha foi realizada em duas etapas: num primeiro momento, o transmissor foi instalado numa sala central do bloco C, a fim de se obter dados de propagação com transmissor e receptor dentro do edifício (*within building*), como ocorre numa rede sem fio de computadores; e, num segundo momento, o transmissor foi instalado no topo de um prédio vizinho, com linha de visada direta para algumas salas, localizado a cerca de 200m do bloco D (figura 1), a fim de obter dados de propagação com transmissor externo e receptor interno (*into building*), ambas realizadas na mesma faixa de frequências.

Já para a parte receptora, utilizou-se um aparato móvel,

capaz de percorrer as diversas salas analisadas, nos dois blocos do edifício.

A vantagem de se utilizar o receptor móvel, é que esta configuração permite uma taxa de amostragem espacial constante, que é importante na verificação de um dos efeitos mais importantes da comunicação em interiores, o desvanecimento rápido que será discutido mais a frente.



Fig. 1 – Ambiente de propagação para medidas *Into Building*. A faixa escura indica o caminho dos componentes de visada direta.

Em ambas as etapas, as medidas foram feitas respeitando-se as divisões das salas e, em cada uma delas, o receptor era levado de maneira a traçar rotas circulares de 1,5 a 2,5m de raio a fim de se obter de 10000 a 20000 amostras de nível por arquivo (cada arquivo correspondendo a uma rota).

As medidas foram realizadas durante o período de férias escolares ou durante períodos em que os corredores e cômodos encontravam-se relativamente vazios, fazendo assim com que o efeito da circulação das pessoas fosse minimizado.

### III – APARATO DE MEDIDAS

#### A. Receptor

Na parte receptora foi utilizado um carrinho de mão (Figura 2a) equipado com 5 rodas, sendo a central, de 12cm de diâmetro, acoplada a um tacômetro de precisão com 500 pulsos por volta, um receptor Freshfield Com. Ltd., modelo SigLevFRA versão 1.0x, esquematizado na figura 3, sintonizado no canal 17 (3,484262GHz) e uma antena monopolo omni-direcional com um plano de terra em forma de disco, polarizada verticalmente, e localizada a 1,5m acima do solo, além de um computador pessoal responsável pelo armazenamento dos dados coletados, [1]. O carrinho também estava equipado com duas baterias automotivas de 12V, que permitiam autonomia ao aparato, além de um voltímetro, um amperímetro ligado à bateria e um medidor de sinal de vídeo ligado à saída de sinal do equipamento para diagnóstico de funcionamento.

A utilização do tacômetro na roda central se deu com o intuito de fornecer o passo constante da amostragem espacial, de maneira que o nível do sinal fosse amostrado a cada  $0,01\lambda$ , aproximadamente, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora do sinal recebido.

Como a faixa de operação linear do receptor, segundo o fabricante, é de -130dBm até -50dBm, e o conversor analógico digital permite uma digitalização em 8 bits para indicar cada um dos valores intermediários, o passo do

equipamento foi calculado como 0,31dBm entre dois níveis digitalizados. Esses níveis são expressos entre 0 e 255mV que são fornecidos ao aparelho. Cada mV corresponde a um bit.

Atenuadores decádicos (HP8495B), com passos de 1dB e 10dB, e faixa de 0 a 11dB e 0 a 70dB respectivamente, foram colocados entre a antena e a entrada do receptor, possibilitando que os valores de atenuação necessários, para cada medida, fossem ajustados de maneira que o sinal incidente permanecesse dentro da faixa linear do conversor analógico digital, principalmente nos casos onde transmissor e receptor encontravam-se próximos (até cerca de 30m), de maneira a permitir uma variação de pelo menos 20dB para a interferência construtiva.

#### B. Transmissor

Na parte transmissora foi utilizado um equipamento de rádio (figura 2b), composto de uma fonte estável de tensão, um sintetizador e um amplificador de potência ligado, a uma antena monopolo vertical com um plano de terra em forma de disco, [1].

Somente uma portadora, centrada em 3,484262GHz, que corresponde ao canal 20 do transmissor, também Freshfield Com. Ltd., de potência 5W, ou 37dBm, era transmitida. Para o caso do transmissor interno ao edifício, atenuadores de 7 dB foram colocados na saída do transmissor, a fim de baixar a potência transmitida para 1W, ou 30 dBm.

Foi utilizada a transmissão em banda estreita para minimizar os efeitos das interferências dos canais adjacentes e permitir uma medida mais exata do nível do sinal recebido.



Fig. 2: a) Aparato de recepção e b) de transmissão

### IV – AMBIENTE DE PROPAGAÇÃO

O ambiente analisado consiste em dois blocos, C e D (para medidas *within building*, somente o prédio C foi analisado), que são interligados por corredores laterais, conforme a figura 4. Ambos os prédios construídos de concreto armado, tanto nas paredes externas, quanto internas.

Geralmente as salas, de ambos os blocos, são separadas por essas paredes, porém, em algumas situações, a divisão é feita por divisórias de madeira recobertas por placas de fórmica.

O bloco C é um prédio de dois andares, térreo e superior, cada andar com área de aproximadamente 9.500m<sup>2</sup> e interligando estes pisos encontra-se uma rampa.

Cada piso possui um corredor que o atravessa longitudinalmente e possui janelas para o exterior do bloco somente na região da rampa.

No piso térreo as salas são bem diversificadas, todas com janelas altas, que ocupam toda a parede voltada para o exterior do prédio, e janelas mais baixas voltadas para o corredor.

No andar superior, as salas são relativamente menores do que no térreo, também possuem janelas altas com vista para a parte exterior do prédio e para o corredor, com exceção da sala C2-07, que não possui janelas.

O bloco D é uma construção de 3 andares interligados por escadas. Somente o primeiro andar e o piso térreo possuem ligação através de corredores com o bloco C. Estes corredores possuem janelas com vista para o exterior dos blocos. Cada um dos andares possui uma área de aproximadamente 750 m<sup>2</sup> e, um corredor que os atravessa longitudinalmente para dar acesso a todas as salas.

O piso térreo deste bloco é composto por salas de aula com janelas voltadas para a parte externa, com vista para o prédio do transmissor em toda a extensão. O corredor que atravessa o bloco longitudinalmente, também possui janelas com vista para o bloco C em toda a sua extensão.

Já o primeiro piso não possui janelas no corredor que dá acesso às salas, e possui apenas salas de professores com móveis de escritório em geral.

Quanto ao local onde o transmissor foi instalado para transmissão interna, consiste de um mezanino, feito de chapa de metal, da sala (C1-18) do piso térreo do bloco C. A janela exterior desse laboratório possui visada para o bloco D, que serve como refletor para que o sinal chegue ao andar superior.

## V – PÓS-PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados obtidos tem como objetivo validar a campanha de medidas e encontrar alguns dos mais importantes parâmetros relacionados ao canal de propagação estudado.

### A. Desvanecimento Rápido (*Fast Fading*)

O desvanecimento rápido ocorre quando a resposta impulsiva do canal muda rapidamente dentro de um pequeno intervalo de tempo. A causa do desvanecimento rápido é a propagação de multi-percurso. Em um ambiente complexo, como interiores de edifícios, a parte móvel recebe muitas cópias do sinal transmitido, cada uma proveniente de um percurso diferente.

Na transmissão de uma onda de 3,484262GHz, a transição entre a interferência destrutiva para a interferência construtiva é de aproximadamente 4cm, ou seja, meio comprimento de onda. Por isso, é considerado um desvanecimento de pequena escala.

Para cada um dos ambientes medidos, o desvanecimento rápido é normalizado através da subtração da média móvel do sinal original encontrado durante a campanha de medidas, de acordo com a equação 1:

$$y_{DR_i} = y_i(s) - \sum_{s=-N/2}^{N/2} \frac{y_i(s)}{N} \quad (1)$$

onde  $y_i(s)$  é o sinal medido,  $y_{DR_i(s)}$  é o sinal de desvanecimento rápido obtido e N a quantidade de amostras da janela.

O valor ótimo de N pode ser obtido pelo método  $\chi^2$  quadrado, [2], através da comparação entre o histograma dos dados e a distribuição estatística parametrizada em que eles se encaixam. Neste trabalho, N corresponde a 4 comprimentos de onda, correspondente ao valor de menor erro.

De acordo com [3] e [4], a variação da amplitude do sinal devido ao desvanecimento rápido pode ser modelado estatisticamente, como sendo uma distribuição Rayleigh.

Porém, [5] mostra que o desvanecimento rápido é Rayleigh somente para casos onde não existe visada direta entre transmissor e receptor. Para os outros casos, a distribuição de Rice, é a que melhor descreve a variação do nível do sinal.

A distribuição estatística é obtida através do histograma do nível do sinal e do cálculo de seus parâmetros,  $\sigma$  e  $v$ , que indicam a influência do componente de visada direta na somatória dos componentes, obtidos através dos dados experimentais pelas equações 2 e 3:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\mu_2 - \sqrt{2\mu_2^2 - \mu_4}}{2}} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\mu_2 - 2\sigma^2} \quad (3)$$

onde  $\mu_2$  é o momento de segunda ordem, e  $\mu_4$  é o momento de quarta ordem, obtidos através dos dados experimentais.

O fator de Rice é dado pela relação entre estas duas variáveis.

### B. Desvanecimento Lento (*Slow Fading*)

O desvanecimento lento é o resultado do somreamento de grandes (relativo ao comprimento de onda) objetos. Este tipo de desvanecimento ocorre quando o receptor passa atrás de obstáculos que bloqueiam, parcialmente, o sinal recebido do transmissor, e por isso é considerado um desvanecimento de grande escala.

É obtido através da normalização pela subtração da sua média, do sinal obtido empiricamente, já subtraído dos efeitos do desvanecimento rápido:

$$y_{DL_i} = y_i(s) - \sum_{s=-M/2}^{M/2} \frac{y_i(s)}{M} \quad (4)$$

onde  $y_{DL_i(s)}$  é o sinal do desvanecimento lento, e M a quantidade de amostras da janela, obtida também pelo

método do  $X_{\text{quadrado}}$ , [2], e que, para este caso deve ser de 15 comprimentos de onda.

Segundo [6], e [7] a distribuição da variação do nível do sinal resultante do desvanecimento lento, dado em dB, é tipicamente normal, e, desta maneira, seu parâmetros como desvio padrão e média, também, foram obtidos a partir dos dados empíricos.

A figura 5 mostra o resultado do processamento dos dados descritos acima, do arquivo correspondente a sala marcada com um círculo na figura 4.

## VI – RESULTADOS

### A. Medidas com o transmissor interno

As medidas com o transmissor posicionado internamente ao edifício foram realizadas somente no bloco C, devido à grande perda ocasionada quando receptor e transmissor estavam com mais de 50m de distância, como pode ser visto na figura 6. Os pequenos círculos pretos indicam o ponto médio de cada rota traçada. A cor vermelha representa o sinal mais forte, nas redondezas do transmissor, enquanto a cor azul escura, nos cantos superiores da mesma figura, representa o sinal recebido fraco, com valores de nível de sinal abaixo do limiar do conversor analógico digital. Dessa maneira, o processamento dos parâmetros obtidos através das medidas, como os desvios padrão das distribuições Rice e Normal, e, conseqüentemente, o fator de Rice, foram prejudicados, tornando os resultados, para esta área do edifício não confiáveis.

O fator de Rice encontrado, para a distribuição estatística do desvanecimento rápido, possui média igual a 1,9 (volt/volt), mostrando que a influência do sinal direto é relativamente forte em alguns pontos, principalmente nas redondezas do transmissor, e, desta maneira, que para o transmissor interno, a distribuição do desvanecimento rápido é tipicamente Rice. Isto é razoável, pois o transmissor estava localizado em um mezanino (representado pela estrela na figura 6), que mesmo não tendo sido visitado em momento algum pelo receptor, exercia um sinal predominante em relação aos outros que eram refletidos mais vezes.

Em relação ao desvanecimento lento, os desvios padrão encontrados, para a distribuição normal do desvanecimento lento, foram encontrados com uma média de 1,3dB, o que mostra que, dentro de um determinado cômodo, o nível do sinal praticamente não é afetado pelos grandes objetos rodeiam o receptor.

Um outro processamento que considerou o prédio como um todo obteve um desvio padrão de aproximadamente 7,7dB, mostrando, desta vez, uma grande interferência da estrutura do prédio.

### B. Medidas com o transmissor externo

Já as medidas realizadas com o transmissor posicionado externamente, foram realizadas em ambos os

blocos, C e D. Neste caso, devido ao ambiente externo, que propiciava a reflexão nos prédios vizinhos, houve, somente, alguns poucos casos em que o sinal recebido estava abaixo do nível de limiar do receptor.

Como pode ser visto na foto das redondezas, figura 1, o transmissor possuía visada direta com algumas salas dos blocos C e D, possibilitando que a média do sinal recebido fosse maior nessas salas. Este efeito pode ser visto na figura 7.

Dessa maneira, o esperado seria que, nestas salas fossem obtidos fatores de Rice significativamente grandes. Porém, devido às barras de concreto que cobrem todas as janelas do edifício, e que causam a difração do sinal recebido, o fator de Rice observado nos pontos com visada direta, estava próximo a média do fator de Rice dos demais pontos, 1,5 (volts/volts), assim como o ocorrido no item anterior. De onde se pode concluir que a distribuição do desvanecimento rápido, também para este caso, é tipicamente Rice.

Para o desvanecimento lento, novamente é notado uma grande diferença entre o desvio padrão médio encontrado, quando se leva em consideração cômodo a cômodo que novamente é 1,3dB, e o desvio padrão do prédio como um todo, 8dB.

## VII – CONCLUSÃO

Os aspectos da caracterização do nível do sinal recebido, como perda e parâmetros de suas distribuições estatísticas foram encontrados com sucesso para este edifício, o que valida, também para este ambiente, os métodos dos trabalhos utilizados como referência.

A distribuição estatística do nível de sinal referente ao desvanecimento rápido foi empiricamente encontrada como sendo Rice tanto para medidas com o transmissor interno quanto para medidas com o transmissor externo ao edifício.

Já os resultados obtidos através do estudo da distribuição estatística do nível de sinal referente ao desvanecimento lento mostram que este pode ser mais bem observado se o processamento dos dados for feito considerando o prédio como um todo, e não mais cômodo a cômodo, uma vez que o percurso percorrido em cada uma das rotas é muito pequeno, resultando em pouca variação decorrente do sombreamento de móveis e paredes. Pode-se concluir também, que o sinal, dentro de um cômodo, praticamente não é afetado por este tipo de desvanecimento.

Com estes resultados, planeja-se para um próximo trabalho, a utilização das características estatísticas de cada sala e das características do desvanecimento lento obtido no processamento com todos os pontos para realizar o agrupamento das salas de acordo com suas características físicas e estatísticas, de maneira a catalogá-las.

### Referências:

[1] Toledo, A.F.; Turkmani A. M.D.; Parsons J.D. Estimating coverage of radio transmission into and within buildings at 900, 1800 e 2300MHz. **IEEE Personal Communication**, p.40-47, abr. 1998

[2] Parsons, J.D.; Turkmani, A.M.D. Characterisation of mobile radio signals: model description”, **IEE Proceedings – I**, v. 138(6), p. 549-556, dez.1991.

[3] Ciccognani, W.; Durantini, A.; Cassioli, D. Time domain propagation measurements of the UWB indoor channel using PN-sequence in the FCC-compliant band 3.6-6GHz. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 53(4), p. 1542-1549, abr. 2005.

[4] Zwick, T.; Beukema, T.J.; Nam, H. Wideband channel sounder with measurements and model for the 60GHz indoor radio channel. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 54(4), p. 1266-1277, jul. 2005

[5] Rappaport, T.S. Characterization of UHF multipath radio propagation inside factory buildings. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 37, p. 1058-1069, ago. 1989.

[6] Babich, F.; Lombardi, G. Statistical analysis and characterization of the indoor propagation channel. **IEEE Transactions on Communications**, v. 48(3), p. 455-464, mar. 2000.

[7] Muqaibel, A.H. et al. Measurement and characterization of indoor ultra-wideband propagation. In: **IEEE UWBST 2003**, Reston, VA, p. 295-299, 2003.

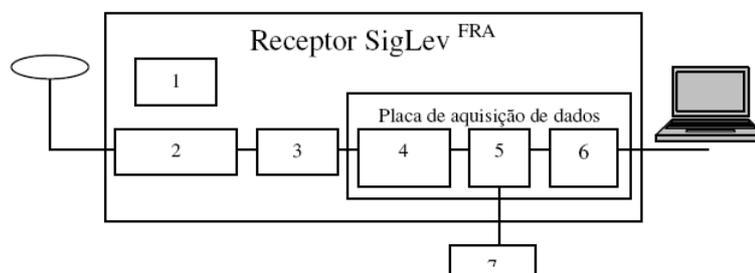


Fig. 3 – Diagrama de blocos do receptor, sendo: 1- Sintetizador, 2- Filtros e Misturador, 3- Amplificador Logarítmico, 4- Deslocador de nível e ganho, 5- Conversor analógico digital, 6- Lógica de Controlo e 7- Roda com tacômetro.



Fig. 4 – Planta do pavimento superior dos blocos C (parte superior da figura) e D (parte inferior)

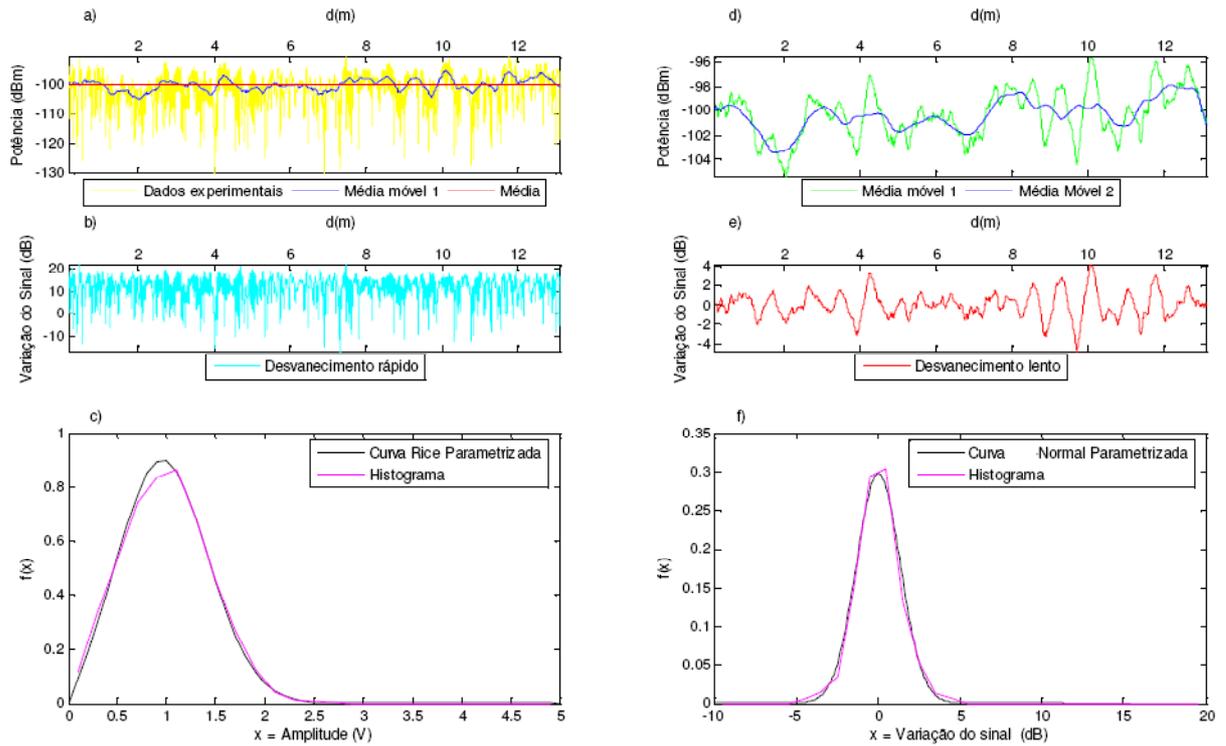


Fig.5 – Exemplo de processamento: a)Dados experimentais e sua média móvel com janela estreita. b) Desvanecimento rápido normalizado. c) Histograma e distribuição Rice parametrizada. d) Média móvel com janela estreita e média móvel com janela larga. e) Desvanecimento lento normalizado. f) Histograma e distribuição normal parametrizada.

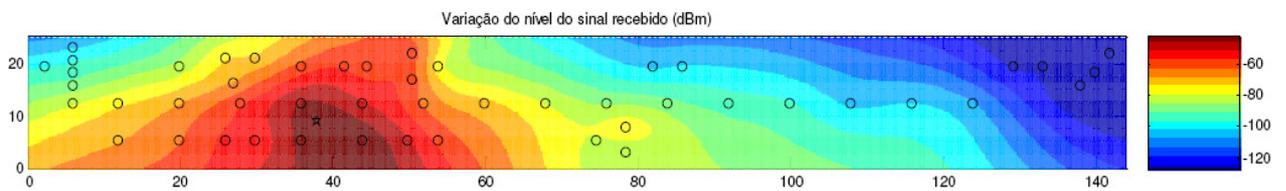


Fig.6 – Valor médio do sinal recebido no bloco C. Os círculos indicam os pontos médios de cada rota e a estrela a posição do transmissor.

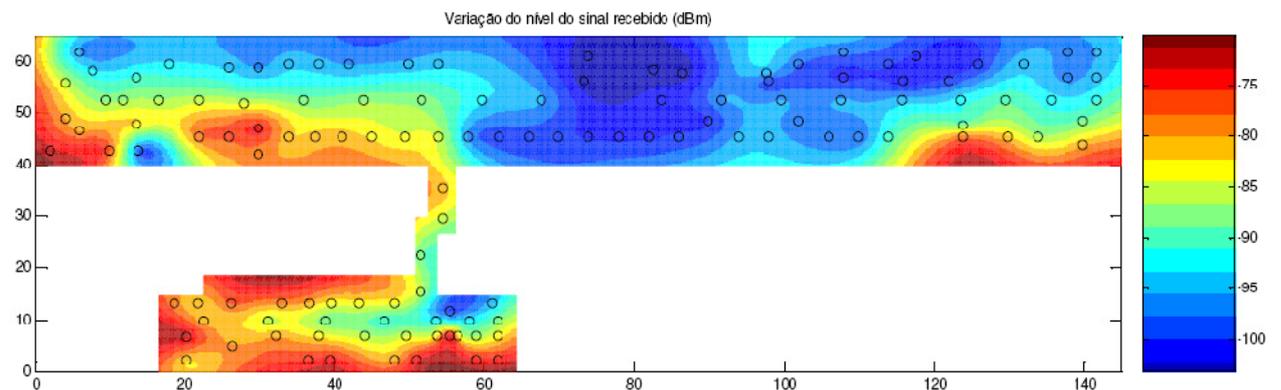


Fig. 7 – Valor médio do sinal recebido nos blocos C e D para transmissor externo. Os círculos representam os pontos médios de cada rota.