



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELO DE PROPAGAÇÃO *INDOOR* MULTI-ANDAR EM
2.4 GHz COM ESTIMATIVA DE PARAMÊTROS DE QOS EM
CHAMADAS VoIP**

IGOR RUIZ GOMES

DM – 06/2010

UFPA / ITEC / PPGEE
BELÉM - PARÁ
2010

**MODELO DE PROPAGAÇÃO *INDOOR* MULTI-ANDAR EM
2.4 GHz COM ESTIMATIVA DE PARAMÊTROS DE QOS EM
CHAMADAS VoIP**

IGOR RUIZ GOMES

Trabalho submetido à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

DM – 06/2010

UFPA / ITEC / PPGEE

BELÉM - PARÁ

2010



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE PROPAGAÇÃO INDOOR MULTI-ANDAR EM 2.4 GHz COM ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE QOS EM CHAMADAS VoIP

AUTOR: IGOR RUIZ GOMES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante - UFPA
Orientador

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes - UFPA
Membro

Prof. Dr. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz- UFPA
Membro Externo

Prof. Dr. Adaildo Gomes d'Assunção – UFRN
Membro Externo

Visto:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

A meus pais Herminio e Marta e a minha noiva Lais.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela dedicação e paciência com que me orientou na elaboração desta dissertação;

A Simone Fraiha e Herminio Gomes, por toda a ajuda nesse trabalho, pois sem as suas ajudas este trabalho não seria possível;

Ao meu amigo e parceiro de mestrado Bruno Lyra, por toda ajuda incentivo e risadas na minha passagem pelo mestrado;

A minha noiva Lais Quaresma pela paciência pela minha ausência enquanto desenvolvia este trabalho.

A Universidade Federal do Pará, mais especificamente ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de estudo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro em forma de bolsa;

Ao LEA, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado, pela excelente infraestrutura, tornando possível este trabalho;

A todos os colegas do LEA pelo apoio e ajuda prestados durante a elaboração desta tese;

Aos professores do PPGEE que com seus ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho;

E a todos aqueles que sem precisarem ser citados, que sempre estiveram presentes na elaboração desta dissertação.

SUMÁRIO

LISTA DE ACRÔNIMOS	viii
LISTA DE FIGURAS	Ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO	1
1.2 – OBJETIVOS	2
1.3 - CONTRIBUIÇÕES	2
1.4 – ORGANIZAÇÃO DA TESE	2
CAPÍTULO 2 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO E SOFTWARES DE PROJETOS DE WLANS	4
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
2.2 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO INDOOR	4
2.2.1 - Modelos Empíricos e Semi-Empíricos	5
2.2.1.1 - Modelo Logarítmico de Perda (Log- Distance)	5
2.2.1.2 - Modelo do fator Piso e Parede	7
2.2.1.3 – Modelo Fator de Atenuação	7
2.2.1 - Modelos Determinísticos	7
2.2.1.1 – Modelo de traçado de Raios	8
2.2.1.2 – Modelo das Diferenças Finitas no Domínio Tempo (FDTD)	8
2.3 SOFTWARES SIMULADORES PARA PROJETOS DE WLANS	9
2.3.1 – OMNeT++ e OMNEST	9
2.3.1 – OPNET	10
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	11
CAPÍTULO 3 – QUALIDADE DE SERVIÇO EM CHAMADAS VOIP E CAMPANHA DE MEDIÇÕES	12
3.1 – QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)	12
3.1.1 - Considerações iniciais	12
3.1.2 - MOS e PMOS	12
3.1.3 – Jitter e Atraso	12
3.1.4 – Perda de Pacotes e Throughput	13
3.2 – CAMPANHA DE MEDIÇÕES	13
3.2.1 Considerações iniciais	13
3.2.2 Medições em ambientes indoor	13
3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	17
CAPÍTULO 4 – MODELO DE PROPAGAÇÃO PROPOSTO	18
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
4.2 – APROXIMAÇÕES DE PADÉ	18
4.3 – GEOMETRIA ANALÍTICA ESPACIAL PARA AUXÍLIO AO MODELO	19
4.3.1 – Equação do segmento de reta	19
4.3.2 – Interceptação entre dois segmentos	19
4.3.3 – Determinação da interceptação do raio de propagação com uma parede	20
4.4 – MODELO PROPOSTO	22
4.4.1 – Perda devido à distância	22
4.4.2 – Termo referente à perda	22
4.4.3 – Termo dos parâmetros de QoS	23
4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	25

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS	26
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	26
5.2 – RESULTADOS	26
5.2.1 - Validação do modelo proposto nos ambientes selecionados	26
5.2.2 - Comparação com os resultados da literatura e mapas de recebimentos de QoS	32
5.2.3 – Simulação do terceiro andar	39
5.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	46
ANEXO A – MAPAS DE PROBABILIDADE DO ANDAR TÉRREO	48

LISTA DE ACRÔNIMOS

CPU	<i>Central Process Unit</i>
FDTD	<i>Finite-difference time-domain</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
http	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union Radiocommunication Sector</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LEEC	Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
PA	Ponto de Acesso
PMOS	<i>Personal Mean Opinion Score</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
TXT	Extensão de arquivo texto
UFPA	Universidade Federal do Pará
VoIP	<i>Voz sobre protocolo de internet</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Exemplo de uma rede wireless na interface do OMNeT++	10
Figura 2.2	Exemplo de uma rede wireless na interface do OPNET	11
Figura3.1	Fotos do prédio de Laboratórios: corredores do andar superior e inferior e sala de laboratório	14
Figura 3.2	Planta baixa com a localização do ponto de acesso (PA) e dos pontos medidos do andar térreo do prédio de laboratórios	14
Figura 3.3	Planta baixa com a localização dos pontos medidos do andar superior do prédio de laboratórios	15
Figura 3.4	Redes em estudo	15
Figura 3.5	O carrinho com o notebook usando Network NetStumbler (na parte esquerda da foto) e o notebook que gerava chamadas VoIP (na parte direita da foto).	16
Figura4.1	Exemplo da determinação de um ponto em um segmento de reta	19
Figura4.2.	Visualização de um interceptação	21
Figura4.3.	Traçado da reta em um modelo 3D	21
Figura 5.1.	Planta com as radiais do andar térreo do prédio de laboratórios	26
Figura 5.2	Planta com as radiais do andar superior do prédio de laboratórios	26
Figura 5.3	Potência vs Distância (radiais) Andar Superior	28
Figura 5.4	Perda de Pacotes vs Distância (radiais) Andar Superior	29
Figura 5.5	PMOS vs Distância (radiais) Andar Superior	30
Figura 5.6	Jitter vs Distância (radiais) Andar Superior	31
Figura 5.7	Dada expandidos (potência)	33
Figura 5.8	Mapa de recebimento de potência (Sidel-Rappaport)	34
Figura 5.9	Mapa de recebimento de potência (Modelo proposto)	34
Figura 5.10	Mapa dos dados interpolados (Jitter)	36
Figura 5.11	Mapa do jitter (Modelo proposto)	36
Figura 5.12	Mapa dos dados interpolados (perda de pacotes)	37
Figura 5.13	Mapa da perda de pacotes (Modelo proposto)	37
Figura 5.14	Mapa dos dados interpolados (PMOS)	38
Figura 5.15	Mapa do PMOS (Modelo proposto)	38
Figura 5.16	Planta baixa do terceiro andar (simulado)	39
Figura 5.17	Terceiro andar (simulado) com o modelo proposto	40
Figura 5.18	Terceiro andar (simulado) com o modelo fator de atenuação	41
Figura 5.19	Terceiro andar (simulado), jitter	42
Figura 5.20	Terceiro andar (simulado), perda de pacotes	42
Figura 5.21	Terceiro andar (simulado), PMOS	43
Figura A.1	Dados expandidos de potência (andar térreo).	48
Figura A.2	Mapa de potência pelo modelo de Sidel-Rappaport (andar térreo).	49
Figura A.3	Mapa de potência pelo modelo proposto (andar térreo).	49
Figura A.4	Dados expandidos de PMOS (andar térreo).	50
Figura A.5	Mapa de PMOS pelo modelo proposto (andar térreo).	50
Figura A.6	Dados expandidos de perda de pacotes (andar térreo).	51
Figura A.7	Mapa de perda de pacotes pelo modelo proposto (andar térreo).	51
Figura A.8	Dados expandidos de jitter (andar térreo).	52
Figura A.9	Mapa do jitter pelo modelo proposto (andar térreo).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores da constante γ para diferentes ambientes	5
Tabela 4.1	Exemplos das aproximações de Padé	18
Tabela 4.2	Valores de perdas em cada tipo de parede	23
Tabela 4.3	Valores de referência segundo as recomendações IEEE e ITU-T	24
Tabela 5.1	Erro RMS referente ao andar térreo	27
Tabela 5.2	Erro RMS referente ao andar superior	27
Tabela 5.3	Comparação dos erros RMS (dB) dos modelos	35

RESUMO

O advento de novas formas multimídia tem atraído uma clientela exigente, onde a preocupação não é somente com o serviço, mas também, com a qualidade que esse serviço pode ser oferecido. As WLAN (*Wireless Local Area Networks*) tornaram-se a forma mais comum de roteamento de Internet, devido ao seu baixo custo e facilidade de implementação. Para realizar um bom roteamento é necessário um planejamento, utilizando-se modelos. Os modelos de propagação existentes na literatura fazem a predição da intensidade do sinal, mas algumas vezes não contemplam a previsão de um bom serviço. Nesse sentido a presente dissertação propõe-se a elaborar um modelo de propagação empírico *indoor* multi-andar que não só prediz a potência recebida, mas também faz uma previsão para algumas métricas de QoS (*Quality of Service*) de chamadas VoIP (*Voice over Internet Protocol*). Para a elaboração do modelo proposto foram feitas campanhas de medição, em um prédio de dois andares, em pisos distintos mantendo-se a posição do ponto de acesso (PA) fixa. Estudos de geometria analítica para a contagem e agregação de perdas em pisos e paredes. Os resultados do modelo proposto foram comparados com um modelo da literatura que tem um comportamento similar, onde é possível verificar o melhor desempenho do modelo proposto, e para efeito de estudo um andar completamente simulado foi introduzido para avaliação.

Palavras-chaves: WLAN, modelo de propagação multi-andar, QoS.

ABSTRACT

The advent of new multimedia forms has attracted many customers, concerns not only with the service, but also with the quality of service that can be offered. The WLAN have become the most common form of Internet routing, this is because of its low cost and ease implementation. To achieve a good routing planning it's necessary to use propagation models. In the literature many propagation models make the prediction of signal strength but do not include the provision of quality of service metrics (parameters). In this sense this work proposes to develop an empirical propagation model indoor multi-floor that not only predicts the received power, but also makes a prediction for some metrics of QoS for VoIP (Voice over Internet Protocol). To develop the proposed model, measurement campaigns were performed on separate floors of a building while maintaining the position of the access point (AP) fixed in one floor. Studies of analytical geometry were taken for counting and aggregation of losses on floors/walls. The results of the proposed model were compared with a model of literature which has similar propagation behavior. To improve a comparison, a test with a simulated floor was introduced using the proposed model.

Keywords: WLAN, propagation model multi-floors, QoS.

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

As novas tecnologias e serviços de redes vêm renovando-se com maior velocidade a cada ano, esse crescimento faz com que haja uma maior exigência de seus usuários que não querem somente os serviços e tecnologias, mas também querem que tudo funcione da melhor maneira possível.

As WLAN's (*Wireless Local Area Network*) ganharam uma popularidade grande nos últimos anos devido a facilitação do uso dos dispositivos *Wireless*, pois seu custo vem caindo progressivamente e os novos serviços tem ganhado destaque pelos usuários tais como VoIP (Voz sobre o protocolo IP) e IPTV (televisão sobre o protocolo IP)[1].

Para garantir a potência mínima do sinal no receptor, são necessários, por exemplo, estudos sobre o comportamento do sinal, tipo de ambiente e espaço percorrido. Modelos de predições são elaborados para que se possa estimar até aonde o sinal alcança. Existem vários modelos para predição tanto para ambientes *indoor* quanto para ambientes *outdoor*. Os modelos mais utilizados hoje foram concebidos para atender uma necessidade imediata de predição, estes, muitas vezes, não conseguem prever as particularidades de cada região (*outdoor*) ou mesmo o comportamento do sinal dentro de um ambiente com diferentes tipos materiais de construção (*indoor*).

1.1 - MOTIVAÇÃO

Atualmente na literatura existem poucos modelos de propagação multi-andares [2], e menos ainda, modelos que fazem predição de QoS. A verticalização das grandes cidades e o barateamento dos dispositivos WiFi [3], implicam em uma crescente necessidade deste tipo de modelo para garantir não apenas conectividade mas também qualidade do sinal.

A migração dos sistemas cabeados para os não cabeados tem motivado empresas, universidade e institutos a buscar uma forma adequada de implementar as novas redes sem perder a conectividade, manter (ou mesmo aumentar) a velocidade de transmissão de dados e manter o custo dessas redes o mais baixo possível.

1.2 - OBJETIVOS

Com a tendência da diminuição de projetos com dispositivos cabeados, os projetos de WLAN's são cada vez mais necessários. Grandes corporações fazem utilização das redes sem fio sem muito planejamento, provocando um aumento os gastos e, por vezes, não garantem a boa qualidade do recebimento do sinal.

A verticalização das grandes cidades gera a necessidade de que o sinal propagado chegue aos andares desejados para que haja interoperabilidade entre os diferentes setores das grandes corporações ou mesmo para uso residencial.

Baseado no contexto explicado, o presente trabalho mostra uma alternativa para a predição da propagação do sinal de WLAN's, onde essa predição leva em consideração as paredes e pisos atravessados pelo sinal para que a estimativa seja a mais próxima do real possível. Além da predição de potência este trabalho mostra o comportamento dos parâmetros de QoS de uma aplicação VoIP pra que se possa fazer um estudo de aonde é possível fazer as chamadas com qualidade[4].

Para a realização deste trabalho foram necessárias campanhas de medição para coleta dos dados necessários para a elaboração do modelo, seguindo a metodologia proposta em [5].

Um simulação é proposta para que se possa explorar mais andares e estimar as perdas com varias penetrações de pisos.

1.3 – CONTRIBUIÇÕES

Como principais contribuições dessa dissertação destacam-se:

- Obter um modelo empírico para a descrição da propagação do sinal em um ambiente *indoor* multi-andares.
- Modo de agregação específica de perdas em tipos de paredes e pisos tanto para potência do sinal quando para parâmetros de QoS.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são abordados alguns modelos de propagação e *softwares* de projetos de WLAN's.

- No Capítulo 3 são abordadas as métricas de QoS e a campanha de medição para a coleta dos dados a serem estudados, destacando a forma de coleta, programas e equipamentos utilizados.
- No Capítulo 4, são apresentados os detalhes do modelo proposto.
- No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com o modelo proposto, além de uma comparação com um modelo da literatura e realizada uma simulação de um ambiente.

CAPÍTULO 2 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO E SOFTWARES DE PROJETOS DE WLANS

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para descrever as características rádio em um ambiente são utilizadas expressões matemáticas e algoritmos de predição. Os modelos de propagação têm como principal objetivo prever a potência mínima necessária para que se possa garantir a comunicação entre o transmissor e o receptor em uma área pré-determinada.

Com o crescimento do uso de redes sem fio, os pesquisadores têm procurado uma forma eficiente de descrever as perdas que o sinal experimenta durante a propagação [6]-[2]. Vários trabalhos apresentam metodologias para predizer quantos pontos de acesso são necessários para cobrir uma determinada área com algum serviço [2]-[7]-[8].

Os serviços vinculados a redes de comunicações estão muito presentes a tal ponto que os estudos não podem ignorá-los. Em serviços VOIP, que exigem especificações de QoS rígidas [9], as WLAN's, por exemplo, devem ser capazes de suportar tais especificações.

Existem também *softwares* que fazem simulação da propagação do sinal em um ambiente, contudo muitos desses *softwares* são de alto custos, não permitem que os modelos sejam ajustados para as singularidades de um ambiente, ou são especializados em ver o comportamento da rede a nível de funcionamento (camada de transporte) e não a nível de propagação (camada física). Alguns desses *softwares* são descritos nesse trabalho.

Os modelos de propagação podem ser classificados como: empíricos, que são baseados em medidas; determinísticos que são baseados em, principalmente, fenômenos físicos; e semi-empíricos que são uma mistura dos dois primeiros. Alguns modelos de cada tipo são abordados nas seções seguintes.

2.2 – MODELOS DE PROPAGAÇÃO *INDOOR*

Os fenômenos físicos associado à propagação eletromagnética como a reflexão, espalhamento ou difração estão presentes em uma propagação *indoor*. Em propagação em ambiente *indoor* as distancias radio a serem percorridas são consideravelmente menores e a sua variabilidade é muito maior que nos ambientes *outdoor*. Devido ao grande numero de

objetos em um ambiente *indoor* o sinal torna-se muito flutuante o que gera uma dificuldade em fazer um modelo para esse tipo de ambiente.

2.2.1 – Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

Dentro dessa categoria de modelos pode-se destacar: o modelo logarítmico de perdas (*log distance*), o modelo do fator de piso e parede e o modelo do fator de atenuação.

2.2.1.1 – Modelo Logarítmico de Perda (*Log- Distance*)

O modelo Logarítmico de perda foi baseado em resultados experimentais. Esse modelo independe da frequência do sinal transmitido e do ganho das antenas transmissora e receptora. Esse modelo é descrito por [10]:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma \quad (2.1)$$

Onde:

$PL(d_0)$ é a potência recebida no ponto de referencia d_0 ;

γ é o valor da constante de propagação que difere para cada tipo de ambiente conforme a tabela 2.1;

χ_σ representa a variável aleatória normal em dB;

O $PL(d_0)$ é calculado pela formula do espaço livre, e γ possui um desvio padrão σ também em dB.

Tipo de Ambiente	Valor de γ
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana pouco obstruída	3 a 5
Indoor com a linha de visada	1,6 a 1,8
Indoor com obstrução	4 a 6

Tabela 2.1 – Valores da constante γ para diferentes ambientes.

2.2.1.2 - Modelo do fator Piso e Parede

O modelo do fator piso e parede leva em consideração os obstáculos grandes no percurso da propagação do sinal. O expoente de perda no percurso é fixado em 2 (como o do espaço livre) e são adicionadas perdas ao modelo para cada parede e piso atravessados. O modelo é expresso por [11]:

$$L = L_1 + 20 \log d + n_f a_f + n_w a_w \quad (2.2)$$

Onde:

L_1 é a perda em $d = 1$ m;

a_f é a atenuação em dB por piso;

a_w é a atenuação em dB por parede;

Esse modelo foi idealizado para que se pudesse estimar a potência recebida em um determinado ambiente, por exemplo, se o receptor estivesse a 3 salas de distância o modelo pode prever, se na sala em que o receptor está, o sinal chegará, porém esse modelo não prevê de forma meticulosa (pontual) a potência recebida.

Vale destacar também que esse modelo não difere as paredes umas das outras, logo nesse modelo é considerado uma atenuação única para todas as paredes, o que na prática não acontece uma vez que temos vários tipos de parede como paredes de alvenaria, divisórias, paredes de concreto etc.

Um modelo aproximado, do modelo do fator piso e parede, é o Modelo ITU-R que difere apenas no fato de que as perdas são consideradas em piso. Quando a perda tem que ser calculada em pontos do mesmo andar essas perdas são incluídas pelo expoente de perda do percurso. O modelo é expresso por [11]:

$$L_T = 20 \log f_c + 10 \gamma \log d + L_f(n_f) - 28 \quad (2.3)$$

Onde:

γ é o expoente da perda de percurso (que pode variar para incluir paredes);

$L_f(n_f)$ é a perda de penetração no piso;

2.2.1.3 – Modelo Fator de Atenuação

Esse modelo de propagação foi desenvolvido para ambientes *indoors* com muitos andares. Ele possui uma componente que mede a perda do sinal ao atravessar os andares, assim como a variação do sinal por obstáculos atravessados [2]. De forma tabelada é indicado à perda em cada parede dependendo o seu tipo. Originalmente foi desenvolvido considerando sempre que as paredes e os pisos seriam constituídos de concreto. O modelo é expresso por:

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10\gamma_{sf} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF[dB] + \sum PAF[dB] \quad (2.4)$$

Onde:

PL é a perda no espaço livre em dB;

γ_{sf} é o coeficiente de atenuação em um mesmo andar;

d distância transmissor-receptor em metros;

d_0 distancia de referencia em metros;

FAF é o fator de atenuação em pisos (troca de andares);

PAF é o fator atenuação em paredes atravessadas;

Para fins de estudo esse modelo é utilizado para comparar e validar os resultados obtidos em ralação ao modelo proposto nesse trabalho, isso ocorre devido suas similaridades em relação a propagação com pisos e paredes.

2.2.1 - Modelos Determinísticos

Nos modelos determinísticos são destacados os modelos de traçado de raio (*Ray tracing*) e o modelo das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD - *Finite-difference time-domain*).

2.2.1.1 – Modelo de traçado de Raios

O modelo de traçado de raios faz todos os raios em todas as direções possíveis do receptor ao transmissor, onde esses raios utilizam os princípios da óptica geométrica. Da mesma forma que os sistemas de realidade virtual utilizam o traçado de raios para tornar visível todos os objetos de um ambiente virtual, na propagação todos os objetos e percurso são levados em consideração dessa forma a reflexão, o espalhamento entre outros fenômenos físicos são calculados [12].

Com esse nível de detalhamento o modelo de traçado de raios pode prever a intensidade do sinal em qualquer ponto do percurso, contudo tal detalhamento vem acompanhado de um alto custo computacional, o tempo de processamento tem um crescimento exponencial com a complexidade do ambiente em estudo.

O traçado de raio é considerado um modelo de predição de intensidade campo mais confiável, entretanto os dados necessários para que seja satisfatório, o *layout* do local analisado deve ser também detalhado.

Normalmente o traçado de raios é utilizado em ambientes *indoors* devido sua complexidade, contudo já existem trabalhos que utilizam o traçado de raio para ambientes *outdoors*, mas sempre em pequenas áreas.

2.2.1.2 – Modelo das Diferenças Finitas no Domínio Tempo (FDTD)

O método das diferenças finitas no domínio do tempo é baseado em cálculos de diferenças algébricas obtidas a partir de equações diferenciais. Quando o método FDTD é aplicado com o objetivo de simular propagação de ondas eletromagnéticas, essas diferenças algébricas vêm das equações de Maxwell [13]. Essas diferenças baseiam-se na expansão de funções em série de Taylor, com dependência espacial e temporal.

Para o funcionamento do modelo deve-se, inicialmente, definir sobre a área que se está estudando, um *grid* (regular ou irregular). Após isso o método FDTD utiliza diferenças centrais para aproximar ambas as derivadas temporal e espacial. Em cada *grid* as soluções são encontradas iterativamente, logo as equações de Maxwell são resolvidas diretamente.

Sua principal vantagem é ser fundamentado na solução discreta das equações de Maxwell. Isso significa dizer que os resultados obtidos através de sua aplicação são soluções de onda completa, e, portanto, são automaticamente considerados os efeitos da reflexão, da

refração e da difração em cenários simples ou complexos. Isso caracteriza a simplicidade do método FDTD em relação, por exemplo, ao método de traçado de raios [12].

A principal desvantagem do método FDTD é a grande quantidade de memória e longo tempo de processamento necessários para analisar grandes ambientes.

2.3 – SOFTWARES SIMULADORES PARA PROJETOS DE WLANS

Devido às grandes dificuldades de se aferir dados em redes computacionais e de telecomunicação vários *softwares* estão disponíveis na internet para simular uma rede em varias condições de funcionamento, contudo nem todos esses softwares são *freeware* ou mesmo atendem as necessidades por completo de alguma camada. Nas subseções seguintes são descrito alguns desses *softwares*.

2.3.1 – OMNeT++ e OMNEST

O OMNeT++(<http://www.omnetpp.org/>) é um simulador de redes *open source*, orientado a objeto todo escrito em C++, que possui uma interface para a sua manipulação, como mostrado na Figura 2.1. Em sua programação o OMNeT++ inclui vários aspectos da camada de redes e transporte[14], para que a simulação seja a mias próxima do real.

As principais vantagens são: o OMNeT++ por possuir o código aberto pode-se incluir novos protocolos ou modelos de propagação com uma razoável facilidade; Ele trabalha com diversos sistemas operacionais como *Linux* e *MS Windows*®; Sua instalação é fácil se comparada ao popular *Network simulator2*® (ns-2) [14]; Pode-se conectar o OMNeT++ com vários outros programas uma vez que seu código está escrito em C++; Pode-se verificar os parâmetros das simulações a qualquer instante t para entender a evolução do processo.

As principais desvantagens são: As simulações são excessivamente demoradas [Sarkar1]; o consumo de memória é alto, fazendo com que o computador utilizado para a simulação possua um alto poder de processamento; O desenvolvimento em OMNeT++ não é via componentes de um *workspace*, logo a montagem tem que ser no código fonte; Modelos novos de simulação precisam ser desenvolvidos em duas aplicações diferentes e ser configurado em um arquivo .TXT o que torna inconveniente para usuários fora da área ou mesmo iniciantes; A inclusão de modelos de propagação é necessária uma vez que o OMNeT++ suporta mas não possui modelos internos, partindo do pressuposto que as redes possuem conectividade sempre, o que na prática não acontece.

Existe também uma versão licenciada do OMNeT++, é o OMNEST. O OMNEST é uma versão mais completa que já possui alguns dos modelos de propagação clássicos (inclusive alguns discutidos nesse trabalho), é mais estável e tem uma interface com o usuário ainda mais simples que a do OMNeT++, mais isso vem acompanhado com um alto custo da licença anual.

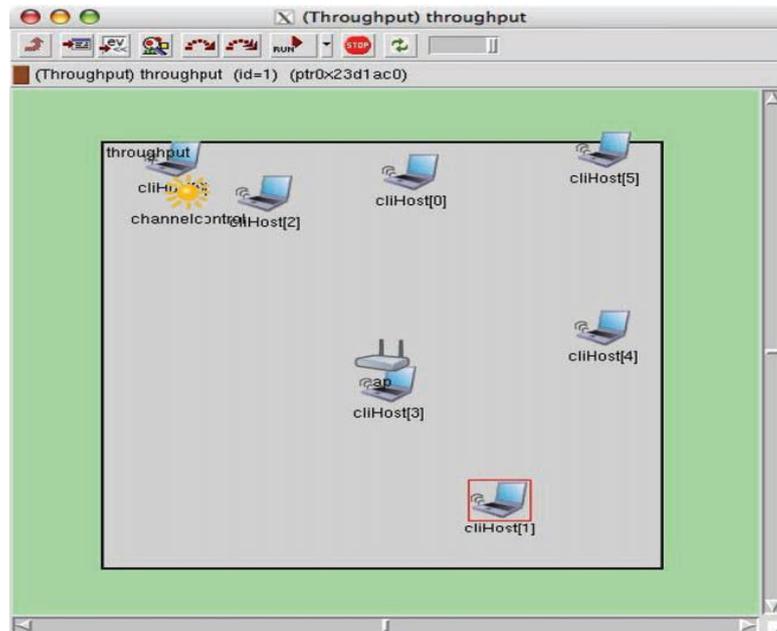


Figura 2.1 – Exemplo de uma rede *wireless* na interface do OMNeT++.

2.3.1 – OPNET

O OPNET(www.opnet.com), assim como o OMNeT++, é um programa simulador de redes, que possui uma interface de desenvolvimento não tão simples como a do OMNeT++(um exemplo da organização da interface pode ser vista na Figura 2.2) contudo ele permite a inserção de modelos complexos contendo diferentes camadas de hierarquia, além de permitir a interoperabilidade em diferentes tipos de redes como uma WAN e uma LAN. Sua interface possui funções limitadas, mas possui especificações de vários roteadores, servidores e outros dispositivos de redes[15].

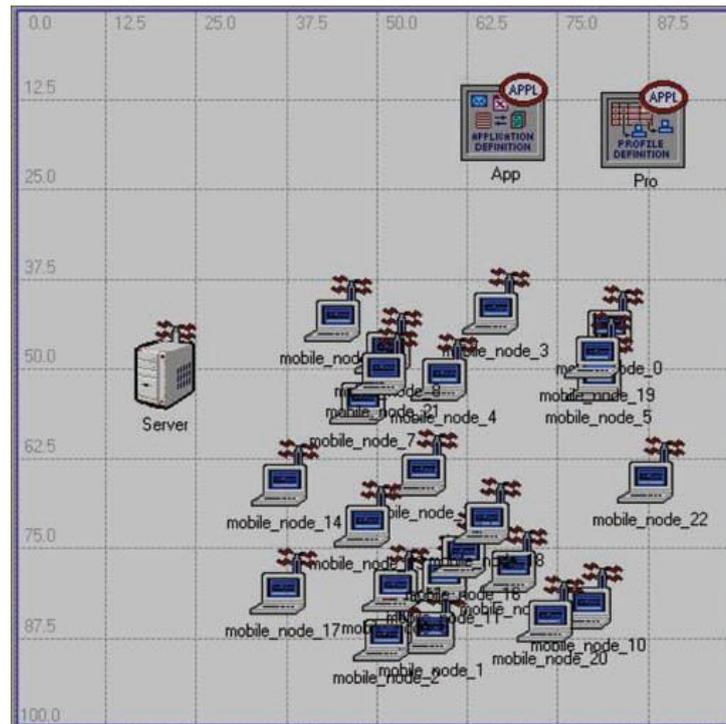


Figura 2.2 - Exemplo de uma rede *wireless* na interface do OPNET.

Dentro do OPNET encontram-se varias bibliotecas de protocolos e modelos. Ele permite um bom de detalhamento de baixo nível, onde pode-se destacar a velocidade da CPU do servidor, número de núcleos, taxa de utilização da CPU entre outro, contudo essas mudanças não são facilmente percebidas na simulação.

O OPNET tem melhor desempenho nas simulações de alto nível [referencia do artigo] porque o nível de detalhamento exigido para propagação em baixo nível, é muito alto para que o seu desempenho seja próximo do satisfatório. Para propagação do sinal em *WLAN's* existem alguns modelos internos que admitem apenas propagação em pequenos ambientes e com poucas obstruções, quando o nível de detalhamento do ambiente em estudo aumenta a simulação fica com respostas insatisfatórias.

2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capitulo foram apresentados alguns modelos de propagação existentes na literatura, destacando-se modelos que possuem similaridades ao modelo proposto nesse trabalho. Além desses modelos foram apresentados *softwares* atuais que fazem simulações sobre redes e propagação, destacando que mesmo com as disponibilidades eles não atendem certas demandas reforçando a importância do estudo proposto nesse trabalho.

CAPÍTULO 3 – QUALIDADE DE SERVIÇO EM CHAMADAS VOIP E CAMPANHA DE MEDIÇÕES

3.1 – QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)

3.1.1 - Considerações iniciais

Com o crescimento do uso das redes de comunicação e a popularização do serviço de conexão a internet, começou a ser necessário não somente a disponibilidade para a conexão, mas também garantir que essa conexão seja capaz de ter qualidade. Com essa necessidade de garantir essa qualidade alguns parâmetros para análise ganharam destaque ou foram criados, nas subseções seguintes é abordado de maneira simples alguns parâmetros de QoS para o serviço VOIP.

3.1.2 - MOS e PMOS

O MOS é a opinião média do usuário sobre a qualidade da chamada. O MOS é uma métrica criada a partir de um banco de dados feito pelas prestadoras de serviços telefônicos, onde após cada chamada feita a prestadora liga para o usuário e pede uma nota de 1 a 5 para a qualidade da chamada, sendo 1 a pior nota e 5 a melhor. Com isso foi criado um mapeamento das chamadas com a opinião do usuário.

O PMOS é o pseudo-MOS que é uma forma automática de verificação do MOS sem a necessidade da pergunta, logo é uma derivação analítica do MOS. O PMOS é um dos parâmetros de QoS abordados nesse trabalho.

3.1.3 – Jitter e Atraso

A tradução de *jitter* para o português seria trêmulo, contudo para o QoS o *jitter* na verdade é a variação do atraso entre dois pacotes consecutivos, é uma métrica puramente temporal, mas como a propagação do sinal sofre atraso com a distância existe uma influência espacial logo existem alguns modelos para a medição de *jitter* espaciais. Nesse trabalho o *jitter* é temporal e é medido em ms.

O atraso é o tempo gasto de transmissor ao receptor, o atraso sempre existe em uma comunicação qualquer, contudo existem níveis aceitáveis para esse atraso. O atraso acontece

não somente pela distância a ser percorrida pelo sinal, o excesso de tráfego na rede, problemas de conectividade, problemas na transmissão ou na recepção são fatores que contribuem no aumento do atraso, mas o atraso sofre influências físicas também, como um ambiente com muita umidade, cabos deteriorados entre outros.

3.1.4 – Perda de Pacotes e *Throughput*

Dentro de uma transferência de dados, sempre existe alguns pacotes que não chegam ao destinatário, por perda na rede ou por pacotes corrompidos que são descartados. A porcentagem de pacotes perdido é um dos parâmetros de QoS, e em uma chamada VOIP essa porcentagem não pode ser muito elevada para que a comunicação não fique “gaga” prejudicando o entendimento da conversa.

A vazão dos dados dentro da rede é chamada de *throughput*, a sua taxa quanto maior significa que uma maior quantidade de dados passam pela rede. O *throughput* representa a velocidade na qual os dados trafegam nivelado pelo menor valor de transferência.

3.2 – CAMPANHA DE MEDIÇÕES

3.2.1 - Considerações iniciais

As medições para este trabalho foram realizadas em um prédio da UFPA onde o tanto o primeiro andar quanto o segundo são destinados aos laboratórios e as salas dos professores.

Para as medições foi feita uma WLAN para estudo com os seguintes equipamentos: Um PA, computadores do tipo *notebooks* e *desktops*, um analisador de protocolos e programas livres para geração de tráfego na rede e para a geração da chamada VOIP.

3.2.2 - Medições em ambientes *indoor*

O prédio escolhido para a realização das medições foi o anexo do Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação (LEEC) da UFPA. O prédio possui 2 andares, com algumas paredes de tijolo e outras são divisórias, janelas de vidro e esquadria de alumínio, como mostra a Figura 3.1.



Figura3.1 - Fotos do prédio de Laboratórios: corredores do andar superior e inferior e sala de laboratório.

As etapas seguidas para as medições são [16]:

- a) Determinação da localização dos pontos de medição e do ponto de acesso – Para cada andar são fixados pontos para medições, no andar térreo foram fixados 25 pontos de medição além da localização do ponto de acesso, a Figura 3.2 mostra a planta baixa do andar térreo com a localização dos pontos e do PA. Para o andar superior foram distribuídos 21 pontos, como o estudo desse trabalho se considera as perdas no piso o andar superior não possui um PA, logo as medições são realizadas considerando o sinal do PA posicionado no andar térreo. A planta baixa do andar superior com a marcação dos pontos medidos pode ser visualizada na Figura 3.3. O PA utilizado foi um 802.11g Linksys[®] WRT54G Router Speed Booster, onde a potência transmitida foi de 18 dBm.

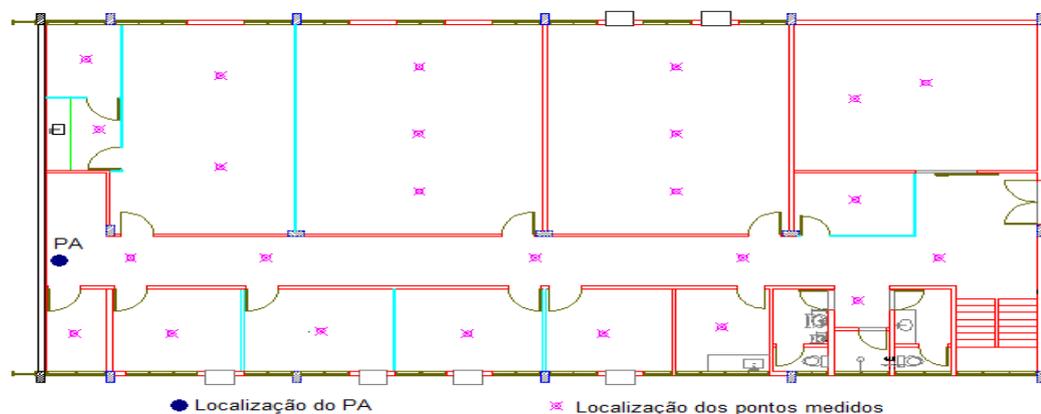


Figura 3.2 – Planta baixa com a localização do ponto de acesso (PA) e dos pontos medidos do andar térreo do prédio de laboratórios.

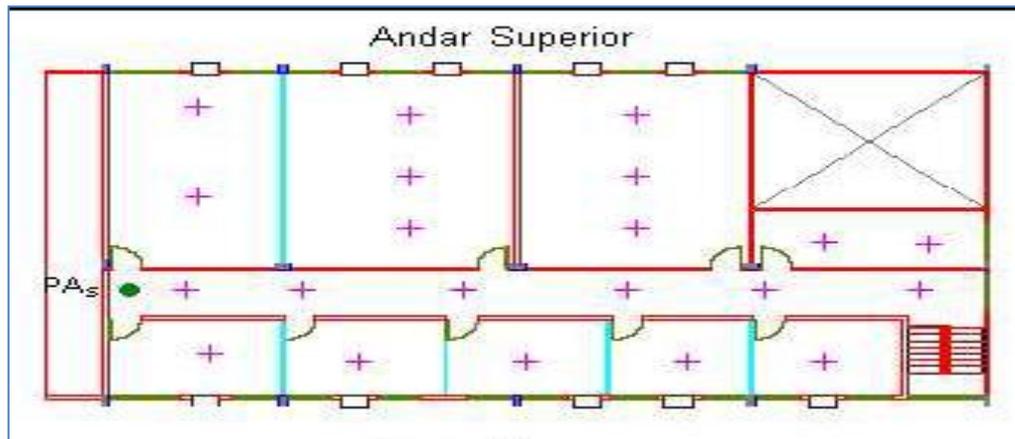


Figura 3.3 – Planta baixa com a localização dos pontos medidos do andar superior do prédio de laboratórios.

- b) Conexão da Rede em Estudo - A arquitetura da rede em estudo é mostrada na Figura 3.4 (que utiliza o canal 7, frequência central de 2,442GHz), onde o respectivo PA está conectado, através de um cabo de rede a uma das portas, de um analisador de protocolos RADCOM[®] [17] que, por sua vez, está conectado pela sua outra porta, a um computador *desktop*. Esse computador foi usado como receptor de chamadas VoIP (R-VoIP) no qual foi utilizado o programa Openphone [19].

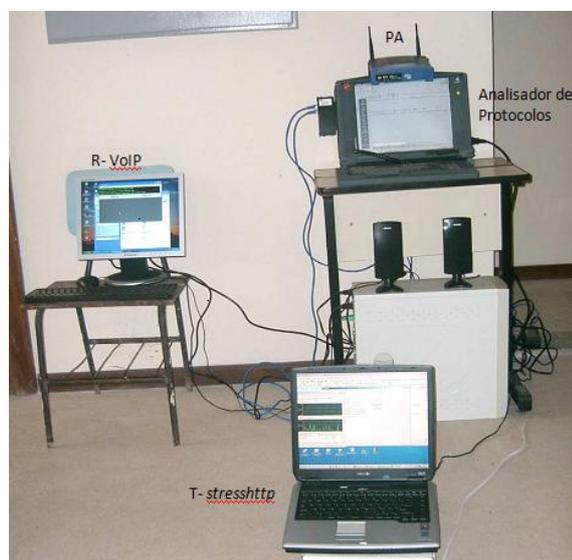


Figura 3.4 - Redes em estudo.

- c) Geração de tráfego na rede em estudo - Para compartilhar a banda junto com a aplicação VoIP foi feita uma aplicação em Delphi de transferência de arquivo onde uma estação, pertencente a rede em estudos, transferia um arquivo para um servidor

localizado em outro prédio por meio cabeado. A aplicação foi chamada de *stresshttp* gerava 4 sessões de transferência *http* utilizando *threads* no intervalo de 10 microssegundos. O arquivo transferido tinha o tamanho de 149 Kbytes.

- d) Transmissor VoIP – A transmissão da chamada VoIP foi feita através do programa CallGen [19], onde eram feitas, para cada ponto, 3 chamadas de duração de 1 minuto. No ponto a se fazer a medição um carrinho foi utilizado para segurar dois *notebooks*, onde um é o transmissor VoIP (T-VoIP) e o outro o medidor de potência do sinal. A Figura 3.6 mostra a disposição dos *notebooks*.

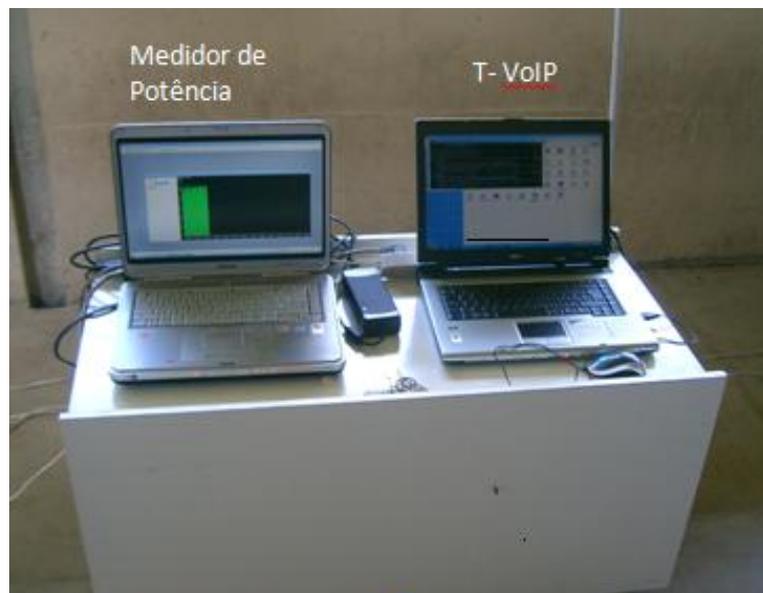


Figura 3.5 - O carrinho com o notebook usando Network NetStumbler (na parte esquerda da foto) e o notebook que gerava chamadas VoIP (na parte direita da foto).

- e) Medição de Potência – Para medir a potência do sinal foi utilizado outro *notebook* com o programa *Network Stumbler*[®] [20]. Esse programa mede a potência dos sinais que estiverem ao alcance, bem como indica a frequência dos sinais (canal de atuação). O programa permite que seja salvo tanto as informações de potência em formato .TXT (para tratamento facilitado dos dados) como em forma de gráfico. Um segundo *notebook* foi necessário devido o *Network Stumbler*, para fazer a análise, não permitir que a estação esteja conectada a qualquer rede. O *notebook* pode ser visualizado também na Figura 3.5.

3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na campanha de medições, foram coletados os seguintes parâmetros sobre o sinal: potência recebida; distância entre o transmissor e o receptor; os parâmetros de QoS (*jitter*, perda de pacotes, PMOS, atraso de pacotes) com o auxílio do analisador de protocolos.

Os resultados obtidos com os dados para o modelo proposto são discutidos no capítulo 5.

CAPÍTULO 4 – MODELO DE PROPAGAÇÃO PROPOSTO

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para o entendimento do modelo proposto a seguir deve-se primeiro levar em consideração alguns aspectos importantes. Foram utilizadas as aproximações de Padé[] para as equações do modelo e conceitos de geometria analítica espacial.

O modelo proposto leva em consideração as perdas devidas aos pisos e paredes do prédio em questão, para os cálculos de potência e parâmetros de QoS. As subseções seguintes exploram cada parte necessária para a elaboração do modelo.

4.2 – APROXIMAÇÕES DE PADÉ

As aproximações de Padé[20] são funções racionais, ou seja, são polinômios divididos por polinômios, que aproximam uma função num intervalo dado, onde se deseja um comportamento específico, uma tendência, em uma extremidade de um intervalo.

Costumeiramente os modelos de propagação contam com termos que envolvem funções exponenciais ou funções logarítmicas. As aproximações destas funções por aproximações de Padé permitem fazer ajustes e extrapolações próximas as extremidades dos intervalos considerados com estabilidade numérica e ajustes satisfatórios nas extremidades. De fato, as aproximações de Padé são compensações numéricas das funções originais, onde se pretende conseguir um melhor comportamento. As aproximações de Padé utilizadas, para o modelo proposto, foram as da função exponencial. Apenas para exemplificar são mostrados algumas aproximações de Padé na Tabela 4.1:

$exp_{1/1}(x) = \frac{2+x}{2-x}$	$exp_{1/2}(x) = \frac{6+2x}{6-4x+x^2}$
$exp_{2/1}(x) = \frac{6+4x+x^2}{6-2x}$	$exp_{2/2}(x) = \frac{12+6x+x^2}{12-6x+x^2}$

Tabela 4.1 - exemplos das aproximações de Padé.

4.3 – GEOMETRIA ANALITICA ESPACIAL PARA AUXILIO AO MODELO

A implementação do modelo proposto requer os cálculos das perdas nas paredes e nos pisos. Portanto é necessário fazer uma rotina capaz de contar cada perda em cada parede atravessada pelo raio de propagação.

4.3.1 – Equação do segmento de reta

Para fazer uma rotina para a interceptação das paredes primeiro deve-se associar o raio propagado à uma semi-reta e associar uma parede ao segmento retangular de plano. Este estudo é feito a seguir.

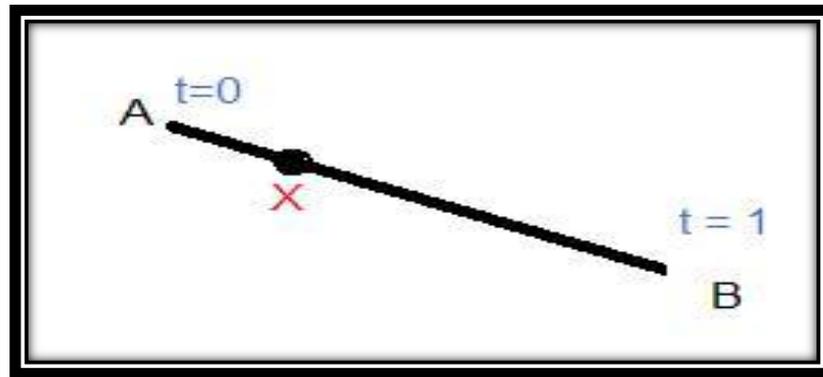


Figura4.1 – Exemplo da determinação de um ponto em um segmento de reta.

A equação do segmento de reta que une dois pontos A e B é dada por:

$$X = (1 - t)A + tB \quad ; \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.1)$$

A Figura 4.1 mostra um segmento com um ponto genérico X, dessa forma quando $t = 0$ o ponto X é o ponto A, e à medida que t cresce o ponto “caminha” no segmento de reta, assim quando $t = 1$ o ponto X é o ponto B.

4.3.2 – Interceptação entre dois segmentos.

Considere dois segmentos AB e CD dados pelas seguintes equações:

$$X_1 = (1 - t)A + tB, \quad X_2 = (1 - u)C + uD, \quad t, u \in [0,1] \quad (4.2)$$

Um ponto em comum com os segmentos pode ser encontrado igualando-se X_1 a X_2 , obtendo-se assim um sistema linear nas incógnitas u e t , como segue:

$$(1 - t)A + tB = (1 - u)C + uD \quad (4.3)$$

$$[B - A \quad C - D] \begin{bmatrix} t \\ u \end{bmatrix} = [C - A] \quad (4.4)$$

A solução deste sistema pode ser dividida em 4 casos:

i) O sistema é incompatível. Isto significa que os segmentos são paralelos e não há interseção.

ii) O sistema é compatível e indeterminado, isto significa que os segmentos tem a mesma reta suporte, a interseção ocorre se for possível encontrar t ou u no intervalo $[0,1]$.

iii) O sistema é compatível, mas ou t não pertence ao intervalo $[0,1]$ ou u não pertence ao intervalo $[0,1]$, ou ambos não pertencem. Neste caso os segmentos são reversos e não paralelos.

iv) O sistema é compatível e ambos t e u estão dentro do intervalo $[0,1]$. Neste caso os segmentos se interceptam em um ponto.

4.3.3 – Determinação da interseção do raio de propagação com uma parede

A determinação é feita considerando a parede como sendo um segmento retangular de plano vertical. O raciocínio é feito considerando-se a projeção canônica do raio e do plano sobre o plano base ($Z=0$), que é o pé da parede (Z_{pe}), as únicas partes importantes a serem consideradas são: o ponto inicial e o ponto final do traço do segmento do plano com o plano $Z=0$, ou seja a projeção canônica produz um segmento em \mathbb{R}^2 . Portanto o único fato adicional a ser considerado são as alturas (cotas) do pé do plano (Z_{pe} = pé da parede) e do teto (Z_{teto} = altura do teto).

Para verificar a interseção, primeiro verifica-se a interseção na projeção canônica, se afirmativo é verificado se a cota (altura) esta entre o pé da parede e o teto, se for o caso a parede em questão é considerada um obstáculo e a sua perda é considerada no cálculo. A projeção canônica do plano que resulta no segmento CD pode ser vista juntamente com outros detalhes na Figura 4.2.

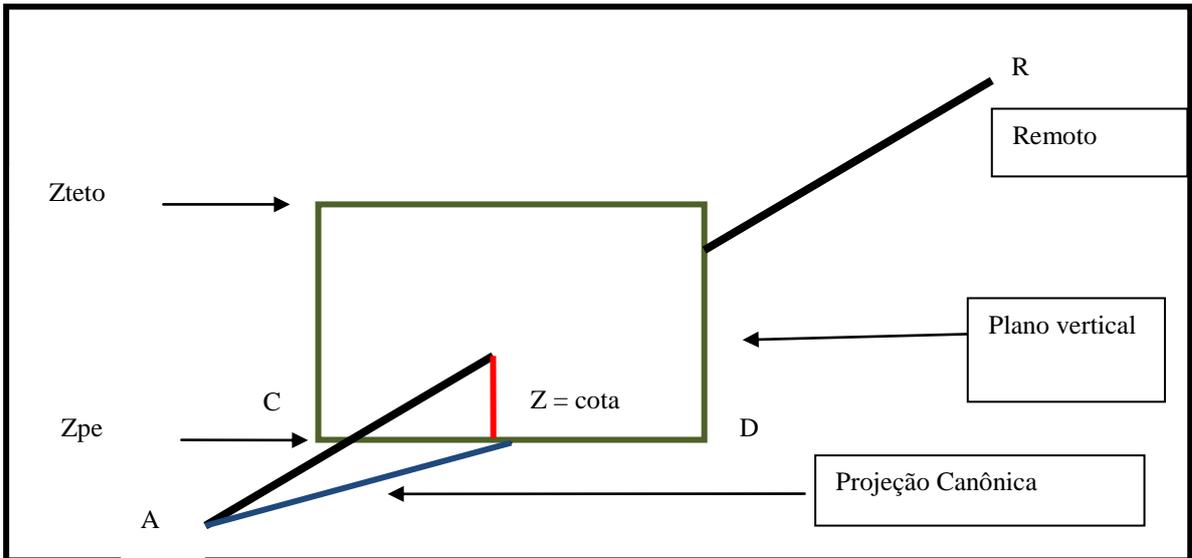


Figura4.2 - Visualização de um interceptação.

Para contar o número de paredes/pisos atravessados é escolhido um ponto remoto R, fora do prédio, para se traçar um raio a partir do transmissor até R. Isto é feito para que se possa garantir que o raio passe por todas as paredes e que se possa identificar quantas e quais paredes foram atravessadas por cada raio. A figura 4.3 mostra o segmento do transmissor ao ponto remoto em um modelo 3D multi-andar.

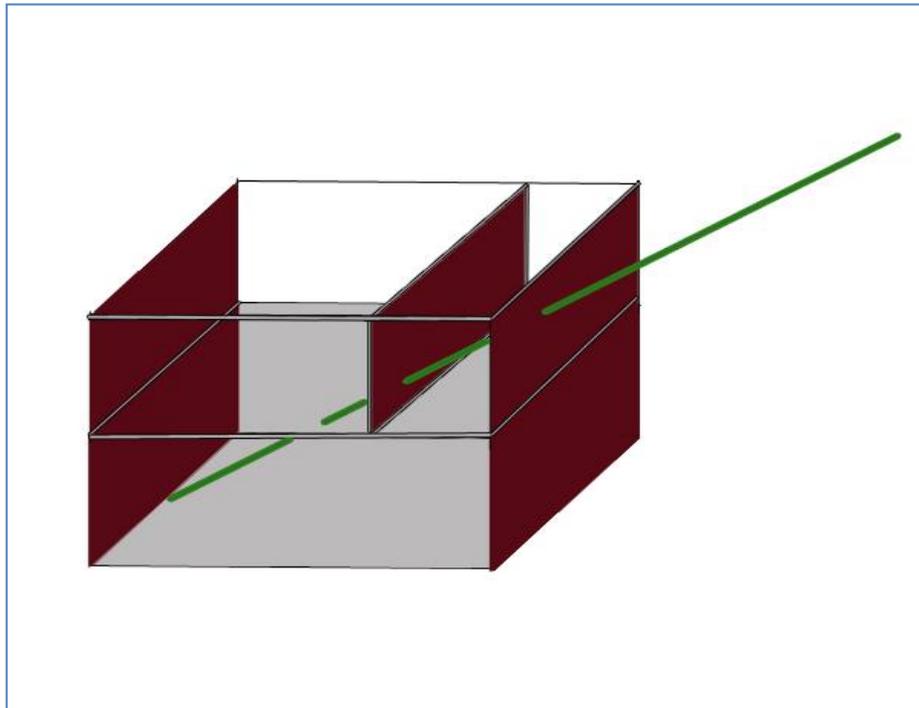


Figura4.3 - Traçado da reta em um modelo 3D.

4.4 – MODELO PROPOSTO

A equação do modelo proposto constitui-se de três parcelas fundamentais: perda devido à distância; componente de perda em paredes e pisos atravessados; e uma componente de degradação para os parâmetros de QoS.

4.4.1 – Perda devido à distância

A perda do espaço livre não caracteriza bem a propagação devido a complexidade dos ambientes *indoor*, logo faz-se necessário a inclusão de um expoente de perda (γ) relacionado a uma distância de referencia (d_0) e a distância transmissor/receptor (d). A formula é dada por[46]:

$$PL = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

PL_0 é a perda do espaço livre e d_0 é a distância de referencia e é igual a 1m.

4.4.2 – Termo referente à perda

Este modelo baseado em [4], possui um termo empírico $f(n_p; a, b)$, que é a associação das perdas de cada tipo de parede e os parâmetros da função de Padé que devem ser ajustados. A expressão final para o tratamento dos dados de potência é dada por:

$$PL = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + f(n_p; a, b) \quad (4.6)$$

Onde:

PL_0 = perda no espaço livre;

γ = coeficiente de atenuação;

d = distância entre transmissor e receptor (m);

d_0 = distância de referência (m);

$f(n_p; a, b)$ = uma aproximação de Padé.

A expressão de Padé utilizada nesse trabalho foi a 2/1, ou seja, um polinômio de segundo grau dividido por um polinômio do primeiro grau e é expressa por:

$$f(n_p; a, b) = \frac{a*(6+b*n_p*(4+b*n_p))}{2*b*n_p-6} \quad (4.7)$$

Os parâmetros a serem ajustados são **a** e **b**, e a componente **n_p** associa as perdas em cada parede/piso, levando em consideração o seu tipo. A contagem das paredes e pisos junto com suas respectivas perdas é dada por:

$$n_p = \sum_{i=0}^N L_{fi} n_{fi} + \sum_{j=0}^M L_{wj} n_{wj} \quad (4.8)$$

Onde:

L_{fi} = a perda no piso do tipo i;

n_{fi} = número de pisos do tipo i;

L_{wi} = a perda na parede do tipo i;

n_{wi} = número de paredes do tipo i.

O programa desenvolvido nesse trabalho associa as perdas de cada tipo de parede pela planta baixa do ambiente em questão. O *software AutoCAD*[21] permite agregar esse tipo de especificação em seus projetos, logo a extração das informações podem ser obtidas de um arquivo do *AutoCAD*. A perda em cada tipo de parede ou piso é mostrado na Tabela 4.2[22].

Tipo de Parede	Perda Associada
Divisória	0.43
Tijolo	3.66
Esquadilha	0.4
Pisos - Concreto	4

Tabela 4.2 - Valores de perdas em cada tipo de parede.

4.4.3 – Termo dos parâmetros de QoS

Do mesmo modo que é analisada as perdas em paredes/pisos para o nível de potência, os parâmetros de QoS possuem uma componente de perda para paredes/pisos. Neste trabalho as métricas de QoS utilizadas foram o *jitter*, perda de pacotes e PMOS. O termo utilizado para o cálculo da degradação dos parâmetros de QoS é dado a seguir:

$$\begin{aligned}
 QoS(n_p; a', b') &= a' \text{ distm} + b', & \text{para } n_p = 0 \\
 QoS(n_p; a', b', c', e') &= a' n_p^2 + b' n_p + c' \text{ distm} + e', & \text{para } n_p \neq 0 \\
 e &= QoS \text{ min}; a', b' \text{ e } c' \text{ estimados.}
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

Onde:

$a', b' \text{ e } c' =$ parâmetros estimados;

$\text{distm} = d/d_0$

$d =$ distância entre transmissor e receptor (m);

$d_0 =$ distância de referência (m);

$e' =$ valor mínimo da métrica de QoS segundo ITU-T.

As formulas utilizadas para as estimativas são no máximo quadráticas, evitando-se ao máximo o excesso de parâmetros. Sabe-se que o aumento na quantidade de parâmetros provoca um aumento na incerteza dos parâmetros.

A recomendação do ITU-T para aplicações VoIP são: perda de pacotes - ITU-T G.114; *jitter* - ITU-T Y1540; perda de pacotes - ITU-T Y.1541 e PMOS (padrão de qualidade de voz). A Tabela 4.3 mostra os valores aceitáveis pelo ITU-T para VoIP.

Parâmetros	Valores de referência
Potência Recebida	Maior que -80 dBm
Atraso	Menor que 400ms
<i>Jitter</i>	Menor que 50ms
Perda de Pacotes	Menor que 3%
PMOS	Entre 1 e 5

Tabela 4.3 - Valores de referência segundo as recomendações IEEE e ITU-T.

Agregando todos os termos, obteremos a formula geral do modelo para os QoS:

$$PL = PL_0 + 10 \gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + QoS(n_p; a', b', c', e') \quad (4.10)$$

4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram analisados os principais aspectos para a obtenção do modelo, como o programa desenvolvido funciona e a formulação geral do modelo. Os aspectos da contagem de pisos/paredes foram abordados bem com as respectivas perdas em cada tipo de piso/parede. No capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos com o modelo e uma comparação com um modelo da literatura (modelo fator de atenuação) já descrito neste trabalho.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na campanha de medição, para cada ponto medido, foram feitas três chamadas VoIP, obtendo-se a média para cada ponto, foi então obtida uma matriz com a distância entre o transmissor e o receptor, potência recebida, *jitter*, perda de pacote e PMOS.

Os dados foram estendidos para criar o mapa de recebimento, para tal utilizou-se a função **newgrnn** que é um regressor generalizado e para o cálculo do ajuste dos parâmetros de Padé utilizou-se a função **lsqnonlin**, que faz uma rotina de mínimos quadrados não-lineares, ambas do *software* Matlab@[23]. Este procedimento foi feito tanto para os parâmetros de potência quanto para os parâmetros de QoS.

5.2 – RESULTADOS

5.2.1 - Validação do modelo proposto nos ambientes selecionados

A validação do modelo proposto foi realizada a partir de dois ambientes do mesmo prédio, mas para o estudo foram separadas 3 radiais para destacar o comportamento dos parâmetros com a distância. A Figura 5.1 mostra o andar térreo com as suas radiais e a Figura 5.2 mostra as radiais para o andar superior, vale ressaltar que as radiais do andar superior são originadas no térreo e se propagam até o andar superior.

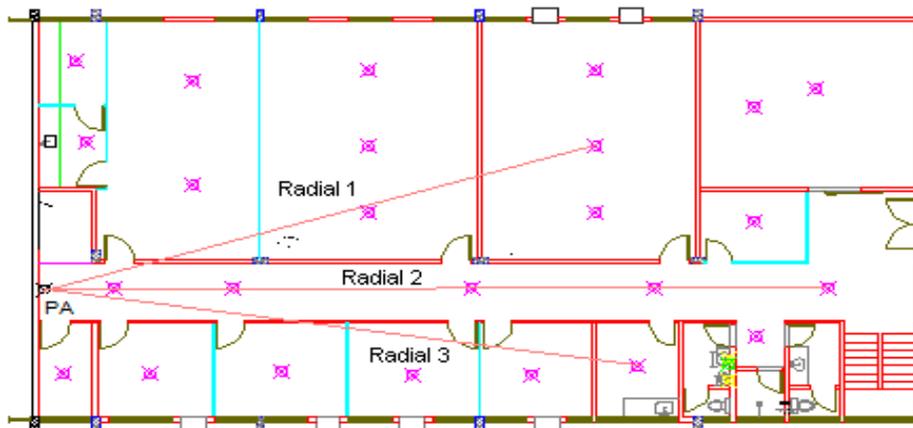


Figura 5.1. Planta com as radiais do andar térreo do prédio de laboratórios.

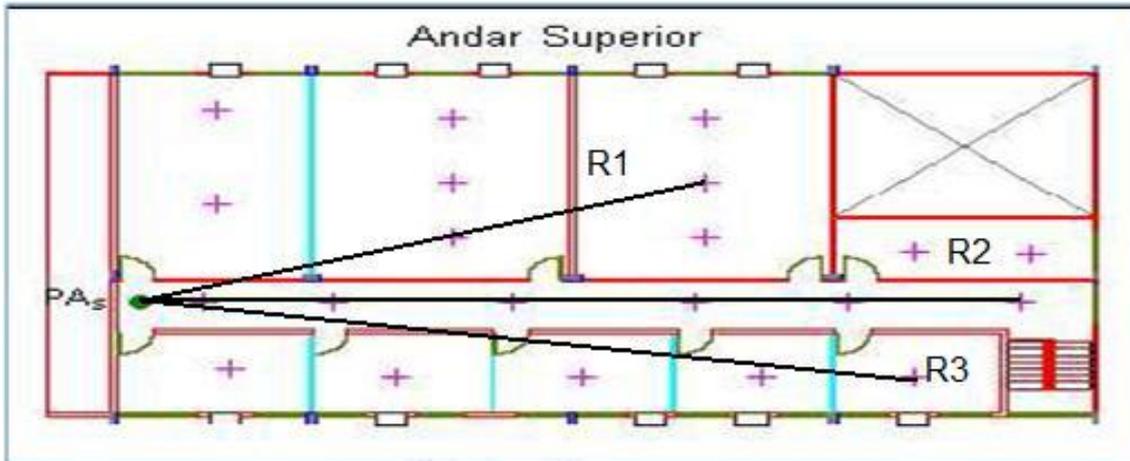


Figura 5.2 – Planta com as radiais do andar superior do prédio de laboratórios.

Para cada uma dessas radiais verificou-se o comportamento do modelo proposto em relação aos dados medidos e os expandidos pelo regressor. Os resultados mostrados na Fig. 5.3 até a Fig.5.6 indicam os ajustes entre o modelo proposto e as medidas interpoladas e as respectivas médias bem como os erros RMS para o andar superior.

Para fins de apresentação, o andar térreo não é representado pelas figuras, pelo fato de não atravessar nenhum piso, ainda assim os valores do erro RMS das radiais do térreo são mostrados na Tabela 5.1. Os erros RMS do andar superior são mostrados na Tabela 5.2.

Parâmetro	RMS (dB) - Potência Recebida	RMS (ms) - <i>Jitter</i>	RMS (%) - Perda de Pacotes	RMS - PMOS
Radial 1	5,1270	0,2553	0,0808	0,0690
Radial 2	4,4755	0,8655	0,3138	0,0997
Radial 3	4,5375	1,1692	0,6670	0,2180

Tabela 5.2 - Erro RMS do andar térreo.

Parâmetro	RMS (dB) - Potência Recebida	RMS (ms) - <i>Jitter</i>	RMS (%) - Perda de Pacotes	RMS - PMOS
Radial 1	3,7600	0,1647	2,7295	0,3153
Radial 2	4,8316	0,9642	0,6407	0,1485
Radial 3	6,0961	1,3209	1,7794	0,2760

Tabela 5.2 - Erro RMS do andar superior.

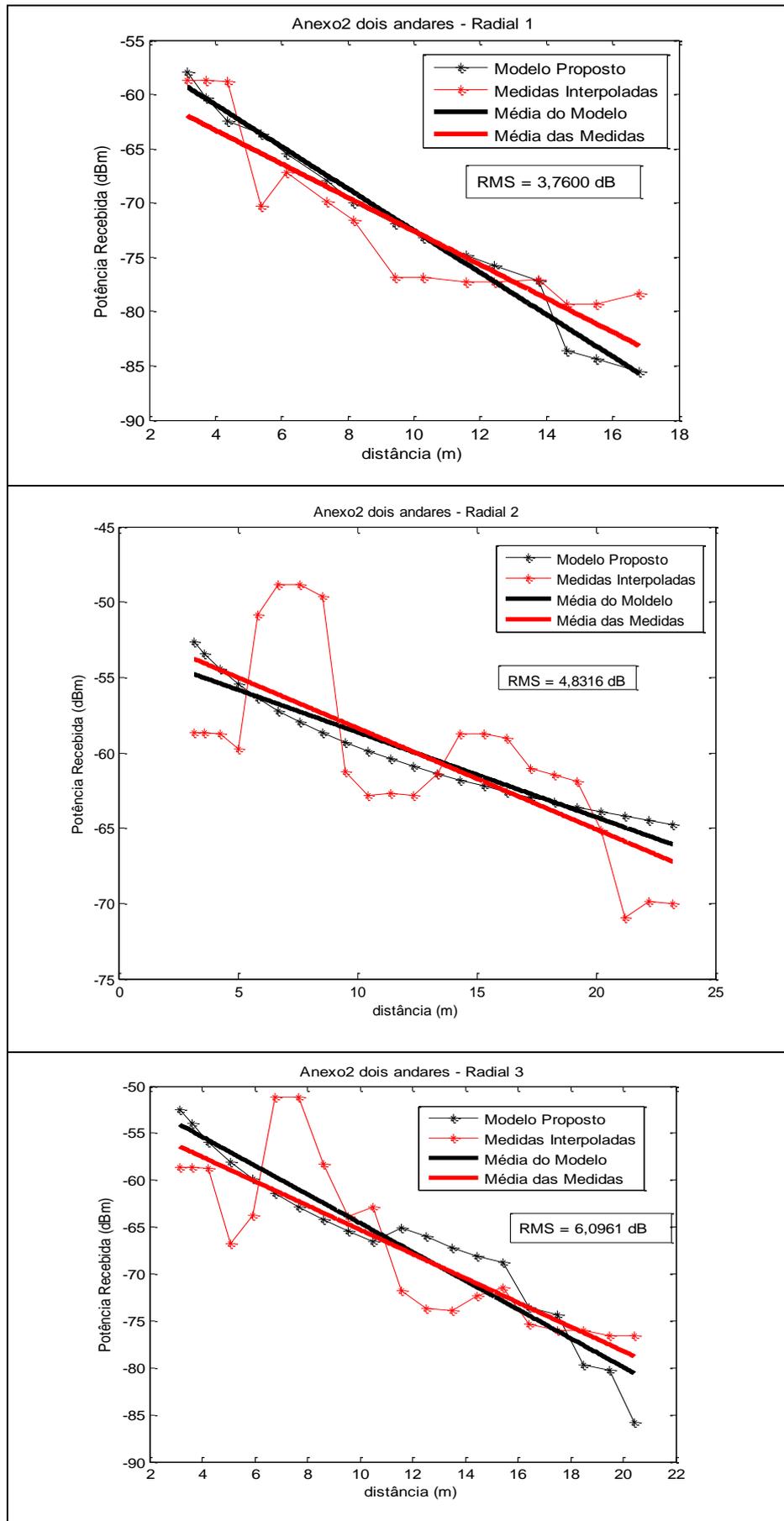


Figura 5.3 – Potência X Distância (radiais) Andar Superior.

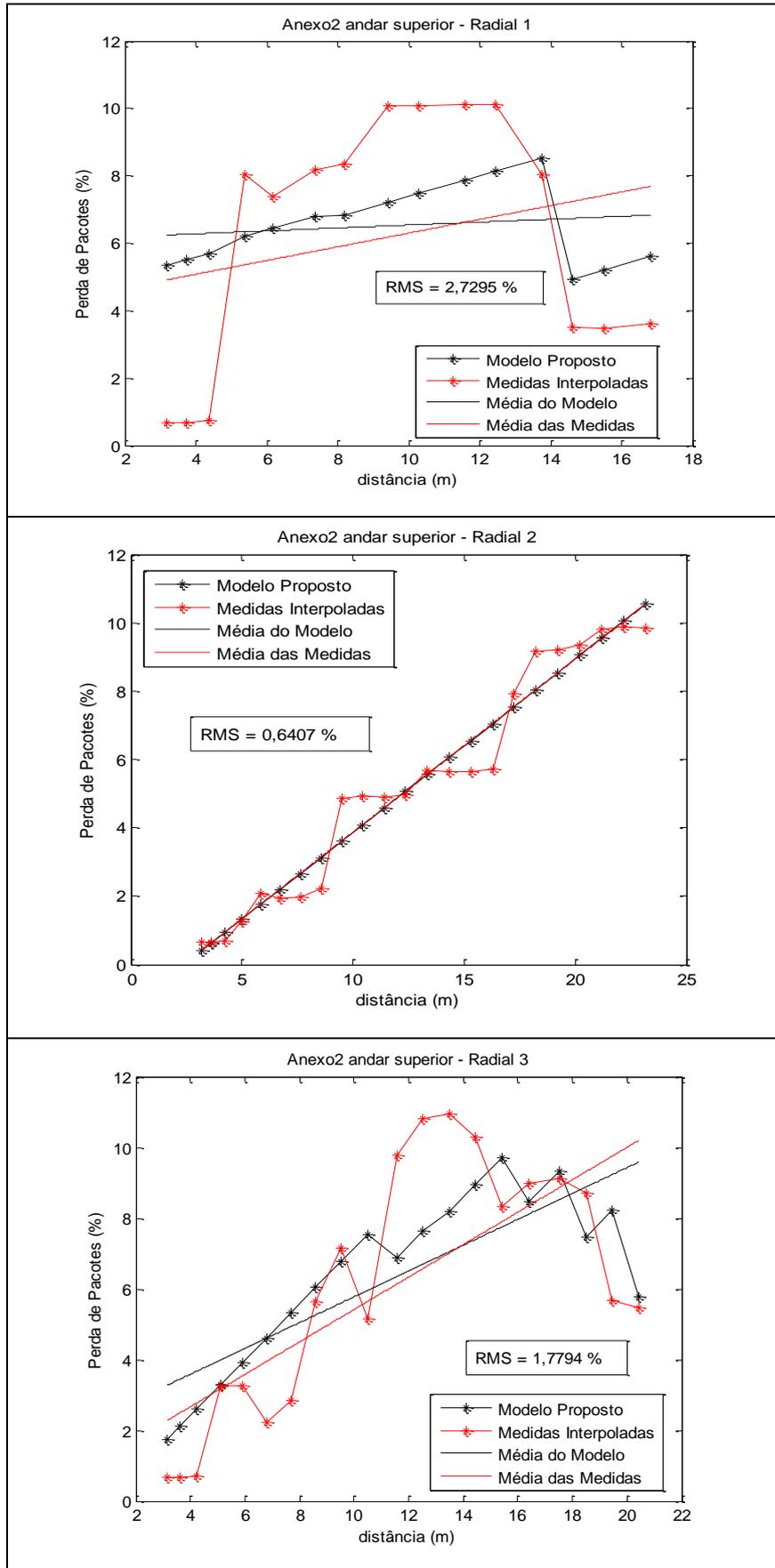


Figura 5.4 – Perda de Pacotes X Distância (radiais) Andar Superior.

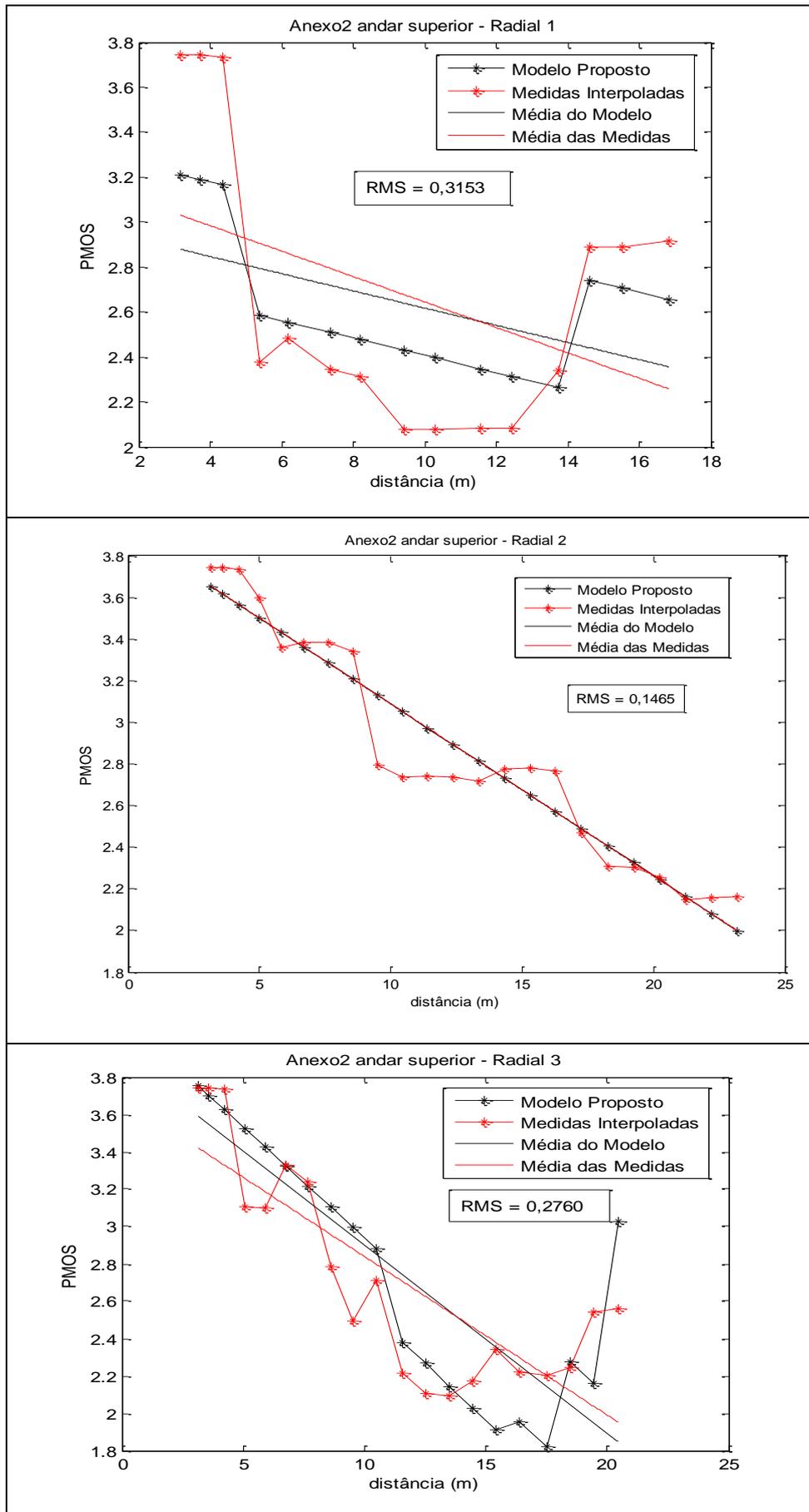


Figura 5.5 – PMOS X Distância (radiais) Andar Superior.

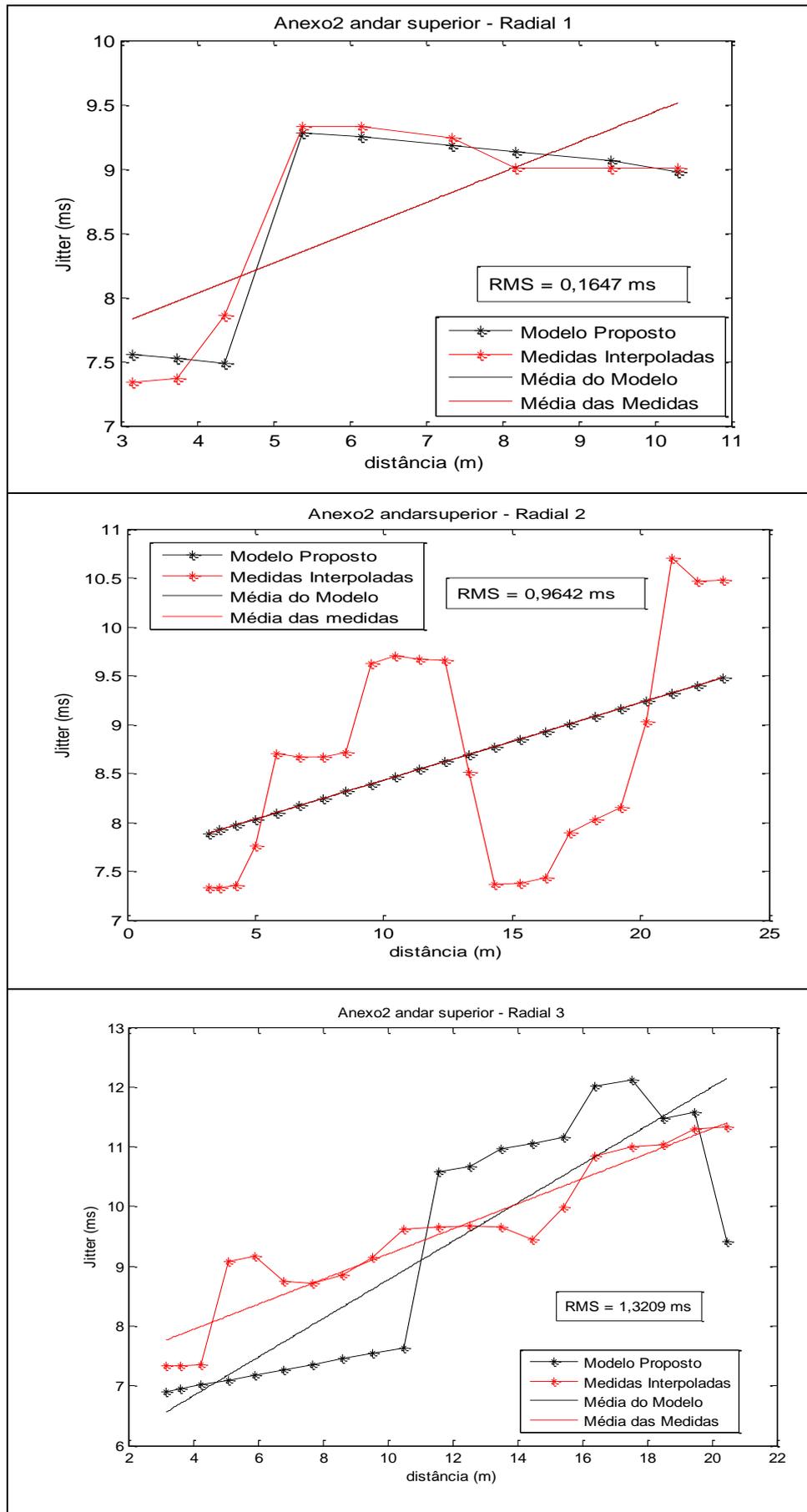


Figura 5.6 – Jitter X Distância (radiais) Andar Superior.

Para ambos os andares o erro RMS está dentro do aceitável e portanto o modelo conseguiu descrever o ambiente de forma satisfatória.

5.2.2 - Comparação com os resultados da literatura e mapas de recebimentos de QoS.

Para um estudo comparativo, foi feito um mapa de probabilidade de recebimento. As linhas cheias em amarelo representam as paredes de tijolos e as linhas tracejadas em branco representam divisórias, a fim de simplificar o estudo não foram consideradas portas ou janelas.

O cálculo da probabilidade de recebimento, tanto para a potência quanto para os parâmetros de QoS, em cada ponto do prédio é dada pela relação clássica a seguir:

$$\text{Prob}(P_r) = \begin{cases} \alpha \left(1 - \frac{P_r}{P_L}\right)^\beta & P_r > P_L \\ 0 & P_r \leq P_L \end{cases} \quad (5.1)$$

Onde:

α = parâmetro de magnitude (positivo);

β = parâmetro de forma (positivo);

P_r = potência recebida ou métrica de QoS;

P_L = potência de limiar [20] ou métricas limiaries segundo ITU-T;

Quando β é pequeno, a probabilidade cai lentamente a partir de 100% e de forma mais rápida nas proximidades de 0%. Valores maiores de β faz a situação se inverte. À medida que a potência recebida P_r se aproxima de P_L a probabilidade tende a zero. Os parâmetros α e β dependem da frequência transmitida, dos parâmetros transmitidos e recebidos (potência e QoS), e de forma implícita a distância. Os valores de α e β podem ser obtidos de forma experimental, já que próximo ao transmissor a probabilidade de recebimento é de 100% e com o distanciamento podem ser calculados pelas medidas.

O modelo para comparação foi o modelo de Sidel e Rappaport [10]-[2] conhecido como modelo fator de atenuação, já explicado anteriormente neste trabalho. A Figura 5.7 mostra o mapa da potência expandida pelos dados coletados, a Figura 5.8 e 5.9 mostram os mapas de recebimento de potência do modelo de Sidel-Rappaport e do modelo proposto respectivamente.

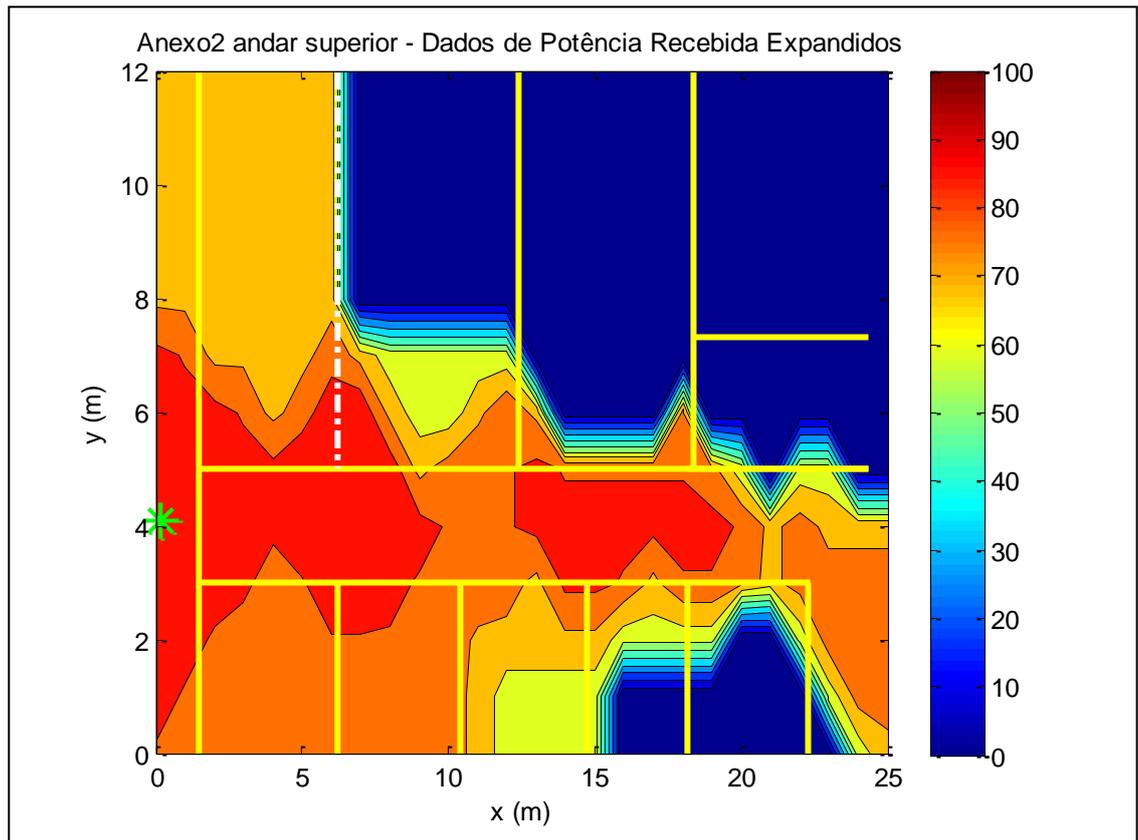


Figura 5.7 – Dada expandidos (potência).

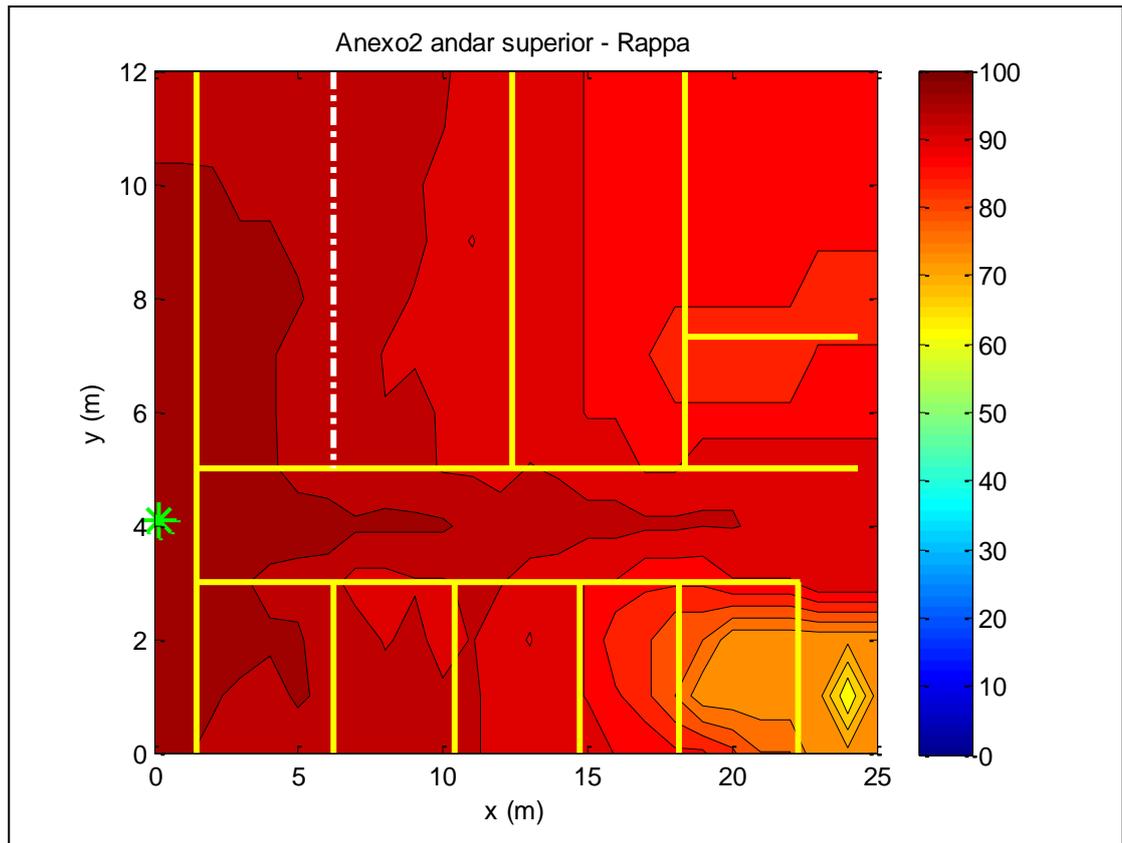


Figura 5.8 – Mapa de recebimento de potência (Sidel-Rappaport).

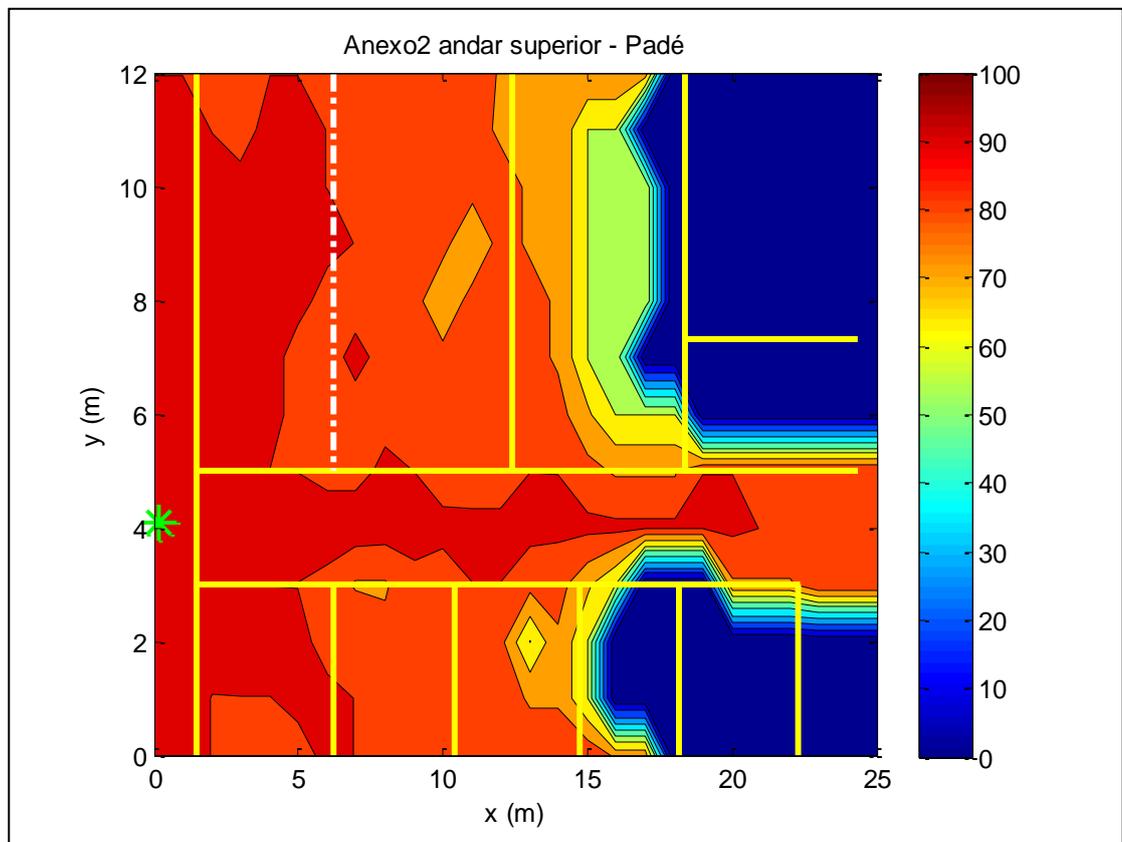


Figura 5.9 – Mapa de recebimento de potência (Modelo proposto).

Para a melhor visualização a Tabela 5.3 mostra os erros RMS do modelo proposto e do modelo de Sidel-Rappaport para 3 radiais.

Radial/Modelo	Modelo proposto	Modelo de Sidel-Rappaport
Radial 1	6,0961	10,1839
Radial 2	4,8316	6,5441
Radial 3	3,7600	9,3088

Tabela 5.3 – Comparação dos erros RMS (dB) dos modelos.

Nota-se que o erro RMS para a potência para as 3 radiais é consideravelmente menor para modelo proposto em relação ao modelo fator de atenuação, caracterizando uma melhor adequação ao ambiente.

Observa-se nos gráficos que de maneira geral, o comportamento do modelo proposto é mais similar aos dados medidos do que o apresentado pelo modelo fator de atenuação. Fica evidenciado também que a contagem e a agregação de perdas por pisos e paredes esta dentro do esperado, pode ser visto na Figura 5.9 que o sinal continua bom no corredor uma vez que este só atravessou um piso e nenhuma parede.

Os mapas de recebimento das métricas de QoS, através do modelo, são apresentados nas Figuras 5.10 até 5.15.

O modelo proposto foi adaptado para usar métricas de QoS e o modelo de Sidel-Rappaport não, logo, não cabe a comparação entre os modelos no quesito QoS, isto mostra um diferencial a favor do modelo proposto.

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os mapas referentes ao jitter, as Figuras 5.12 e 5.13 exibem os mapas referentes às perdas de pacotes e por ultimo as Figuras 5.14 e 5.15 mostram os mapas referentes os PMOS.

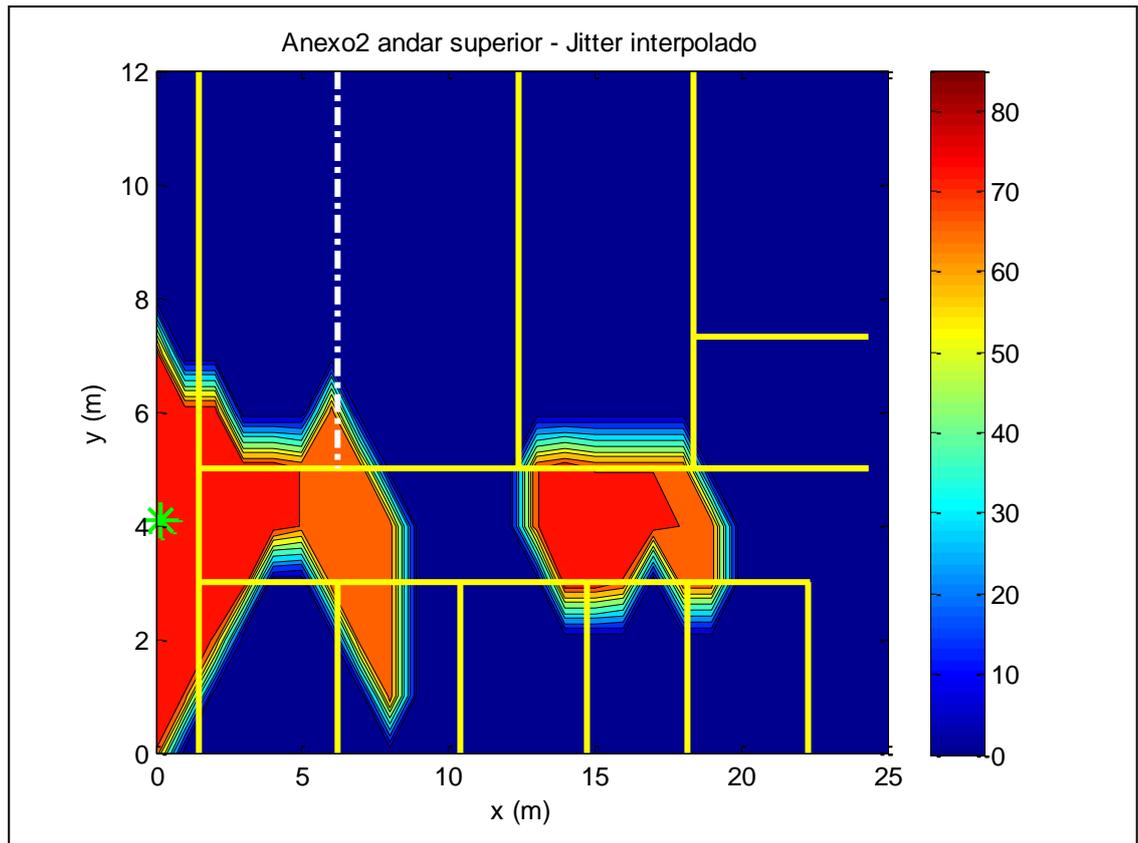


Figura 5.10 – Mapa dos dados interpolados (*Jitter*).

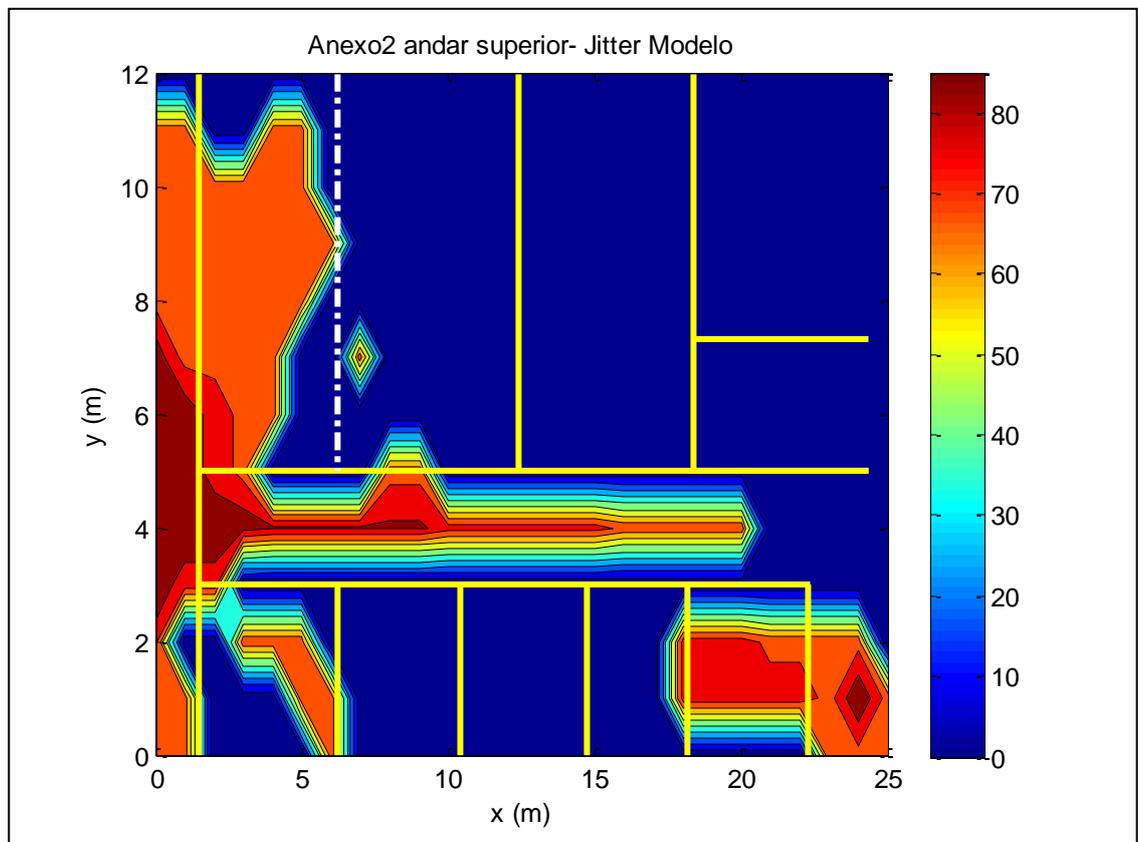


Figura 5.11 – Mapa do *jitter* (Modelo proposto).

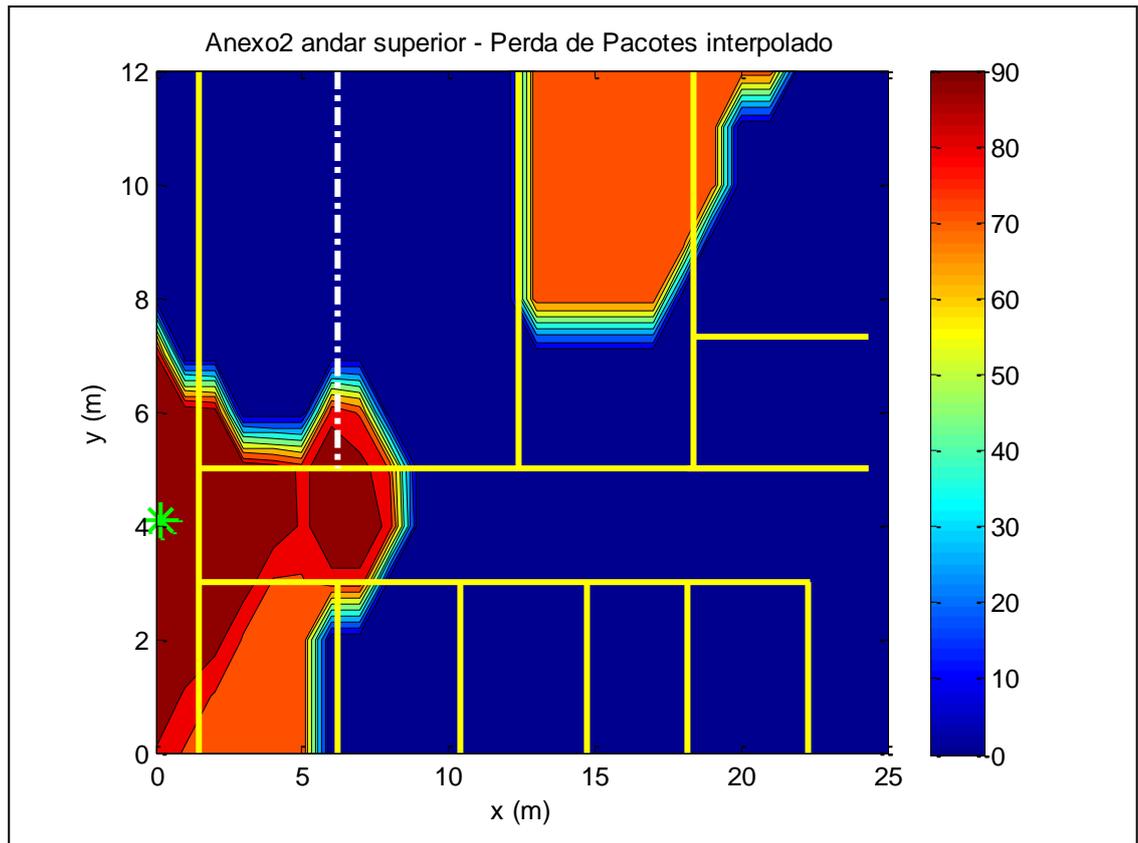


Figura 5.12 – Mapa dos dados interpolados (perda de pacotes).

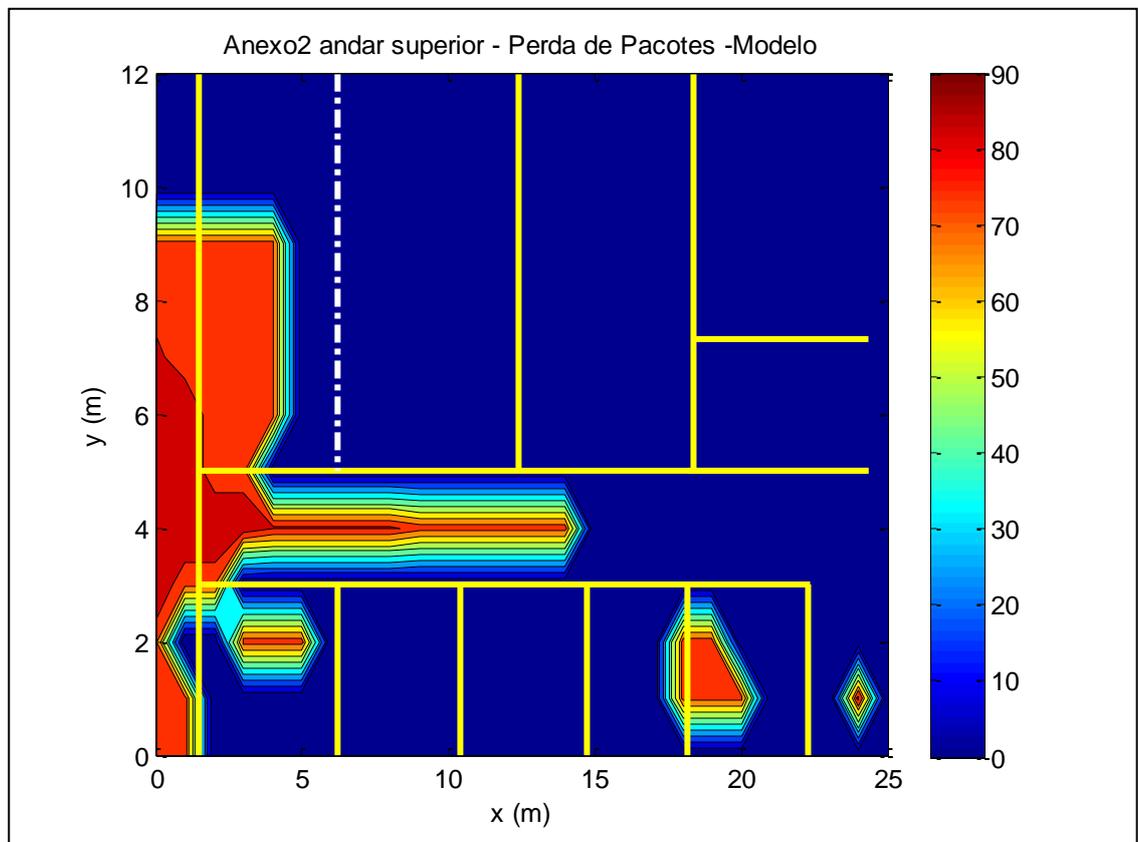


Figura 5.13 – Mapa da perda de pacotes (Modelo proposto).

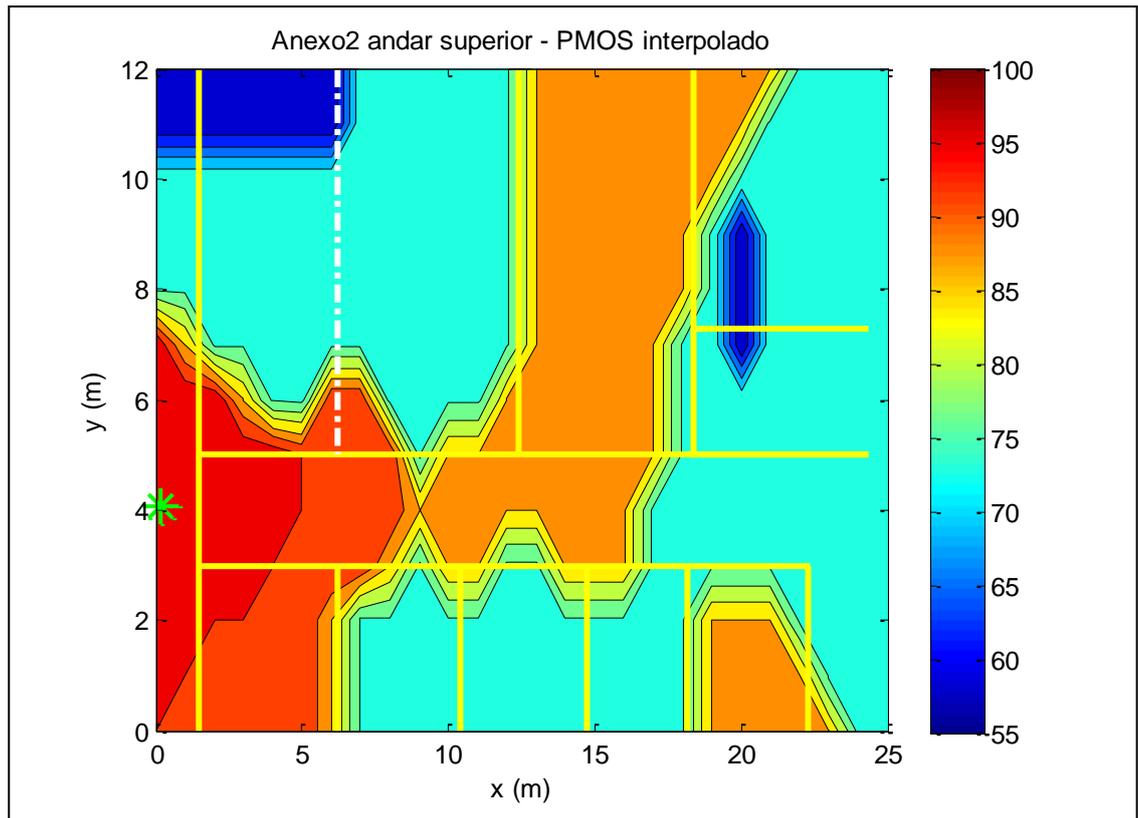


Figura 5.14 – Mapa dos dados interpolados (PMOS).

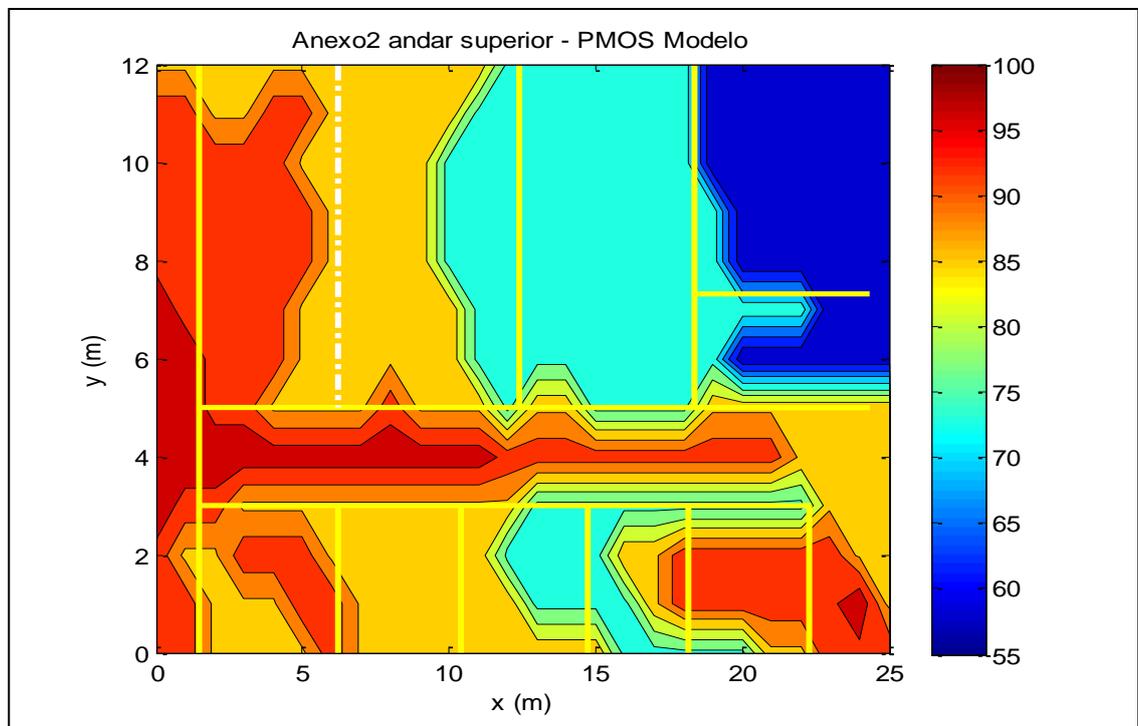


Figura 5.15 – Mapa do PMOS (Modelo proposto).

Para os parâmetros de QoS, mais especificamente o *jitter* e a perda de pacotes, os mapas mostram uma degradação considerável, mostrando a influência das paredes e pisos nessas métricas, contudo, mesmo com a degradação evidenciada, o modelo consegue seguir a tendência vista nos dados expandidos.

O PMOS acompanha a tendência dos dados medidos, a sua degradação é mais branda em comparação com as demais métricas de QoS.

O comportamento diferenciado do PMOS em relação aos outros parâmetros deve-se ao fato de que mesmo que a chamada tenha alguns entrecortados, o usuário consegue entender a informação que está sendo transmitida. Esse aspecto é uma característica própria de como o PMOS foi desenvolvido.

5.2.3 – Simulação do terceiro andar

Para ilustrar o funcionamento multi-andar do modelo proposto foi simulada a presença de um terceiro andar[24], com uma planta baixa própria. Como não existem dados reais de um terceiro andar (este andar não existe na verdade), o modelo foi aplicado diretamente para se observar o comportamento, verificando-se assim se os resultados continuam satisfatórios.

A planta baixa desenhada para a simulação é constituída apenas de paredes de tijolos e possui uma morfologia similar ao do andar superior (segundo andar). A planta baixa pode ser vista na Figura 5.16.

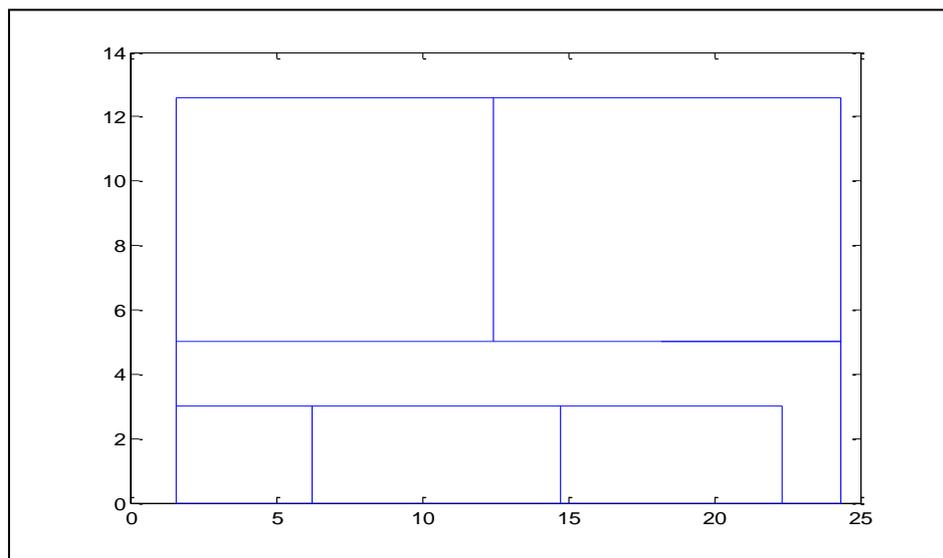


Figura 5.16 – Planta baixa do terceiro andar (simulado).

Para potência é possível comparar novamente o modelo proposto com o modelo de Sidel-Rappaport. As Figuras 5.17 e 5.18 mostram o mapa de recebimento da potência pelo modelo proposto e pelo modelo de Sidel-Rappaport respectivamente. Um caso a ser comentado é o fato do modelo de Sidel-Rappaport no terceiro andar (simulado) continuar com uma média de recebimento entre 80% e 90%, o que é uma previsão muito otimista para o sinal. Ao comparar a Figura 5.7, que representa os dados expandidos do andar superior, com a Figura 5.18 nota-se que nos dados medidos existem áreas que o sinal já está muito baixo (ou mesmo inexistente), o que não é representado pelo modelo fator de atenuação.

No comportamento do modelo proposto pode-se ver claramente que existem áreas com sinal baixo (ou inexistente) distribuída na mesma área sem cobertura da Figura 5.7, caracterizando uma melhor previsão (mais próxima do real) que o modelo fator de atenuação.

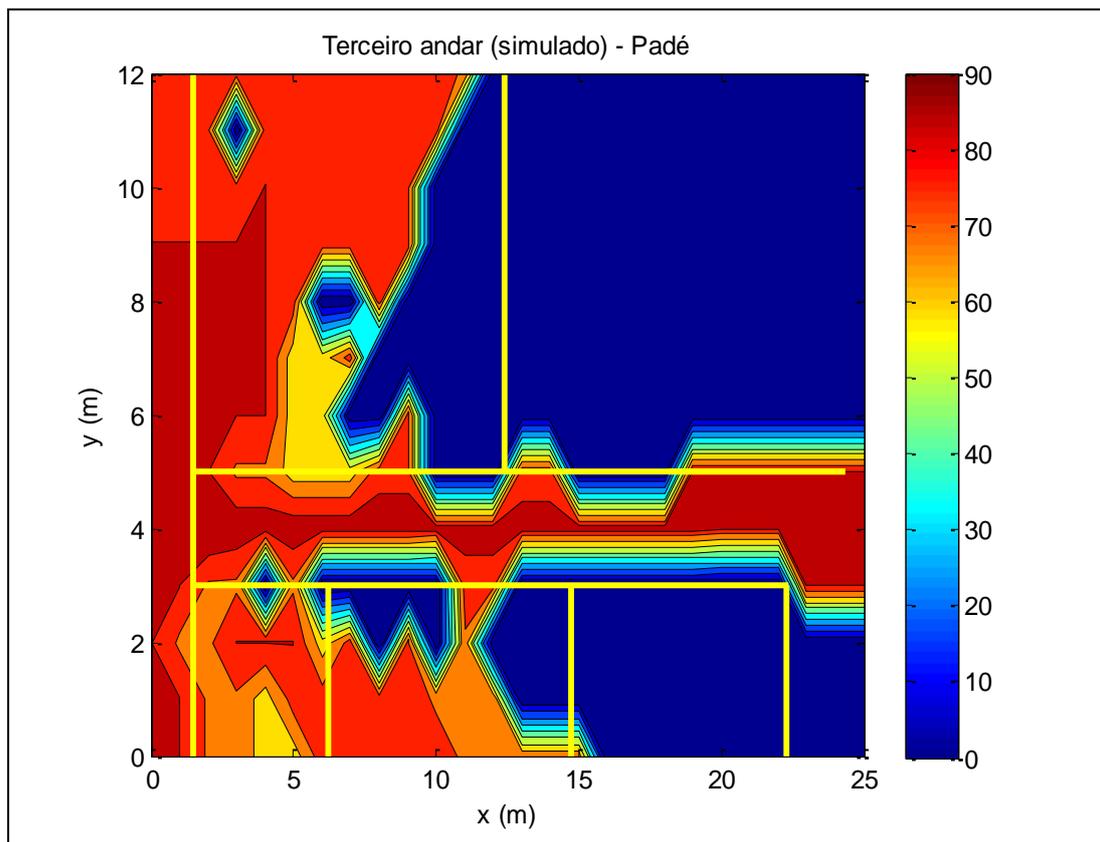


Figura 5.17 – Terceiro andar (simulado) com o modelo proposto.

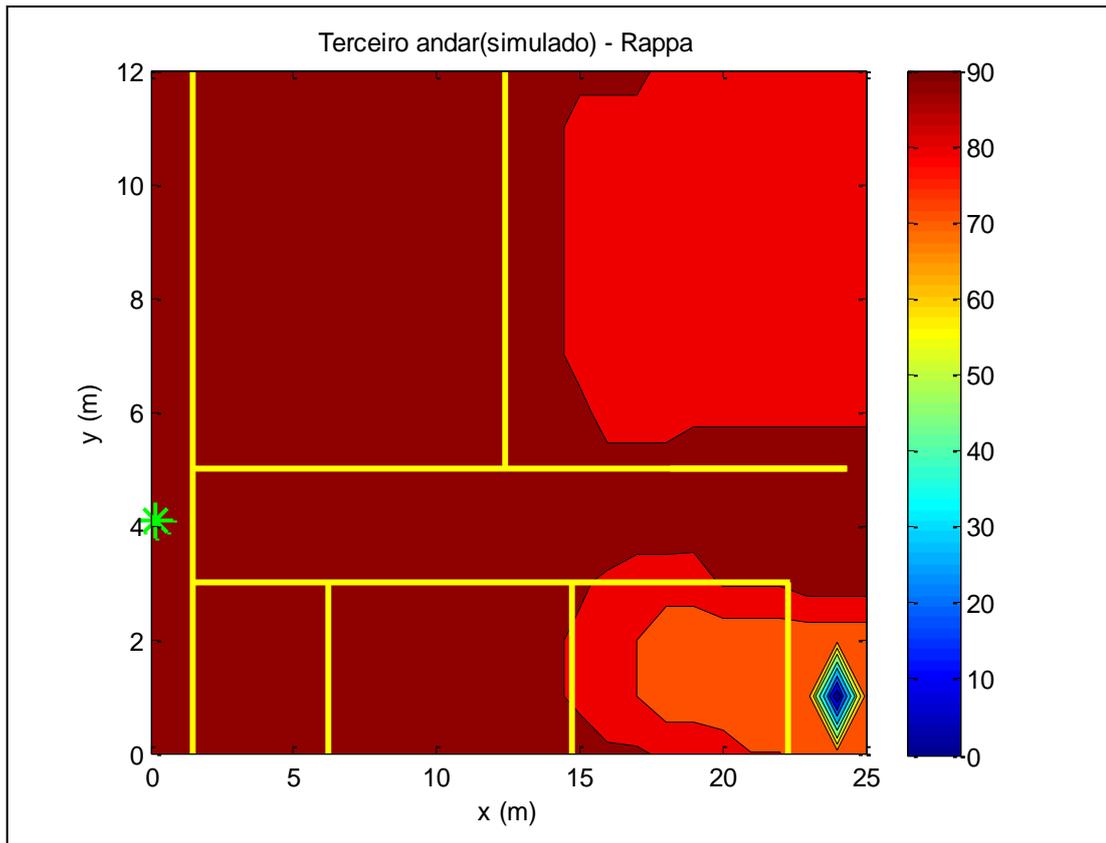


Figura 5.18 – Terceiro andar (simulado) com o modelo fator de atenuação.

O comportamento dos QoS continuam acompanhado a degradação do andar superior, mostrando que praticamente só funcionariam no corredor, uma vez que é o local que menos atravessou obstáculos (apenas dois pisos).

O comportamento do terceiro andar induz o projetista de WLAN a escolher um repetidor para 2 andares de diferença, ou mesmo escolher um posicionamento mais adequado, no andar intermediário, para poder atender mais andares.

O PMOS mais uma vez degrada mais lentamente, mas para o terceiro andar já fica evidenciado, no canto superior direito da Figura 5.21, por exemplo, que existem locais onde o PMOS não mais está dentro do aceitável.

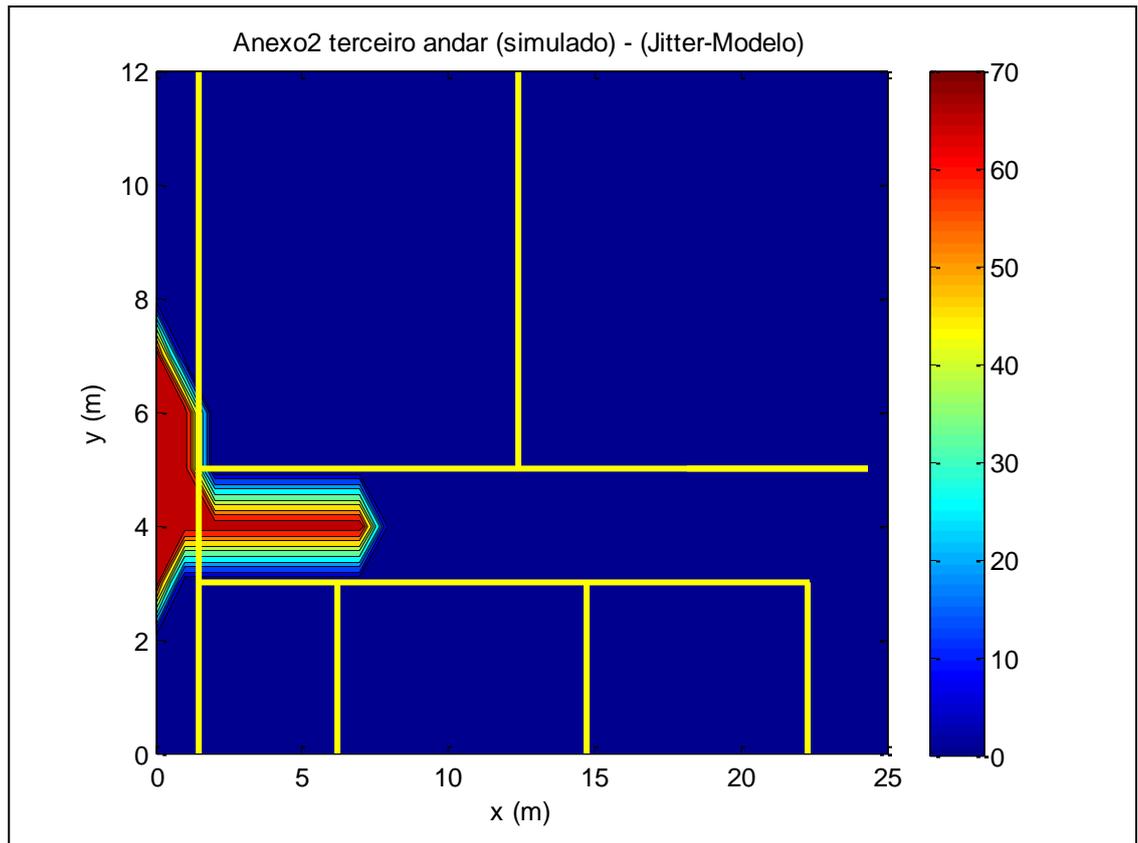


Figura 5.19 – Terceiro andar (simulado), jitter.

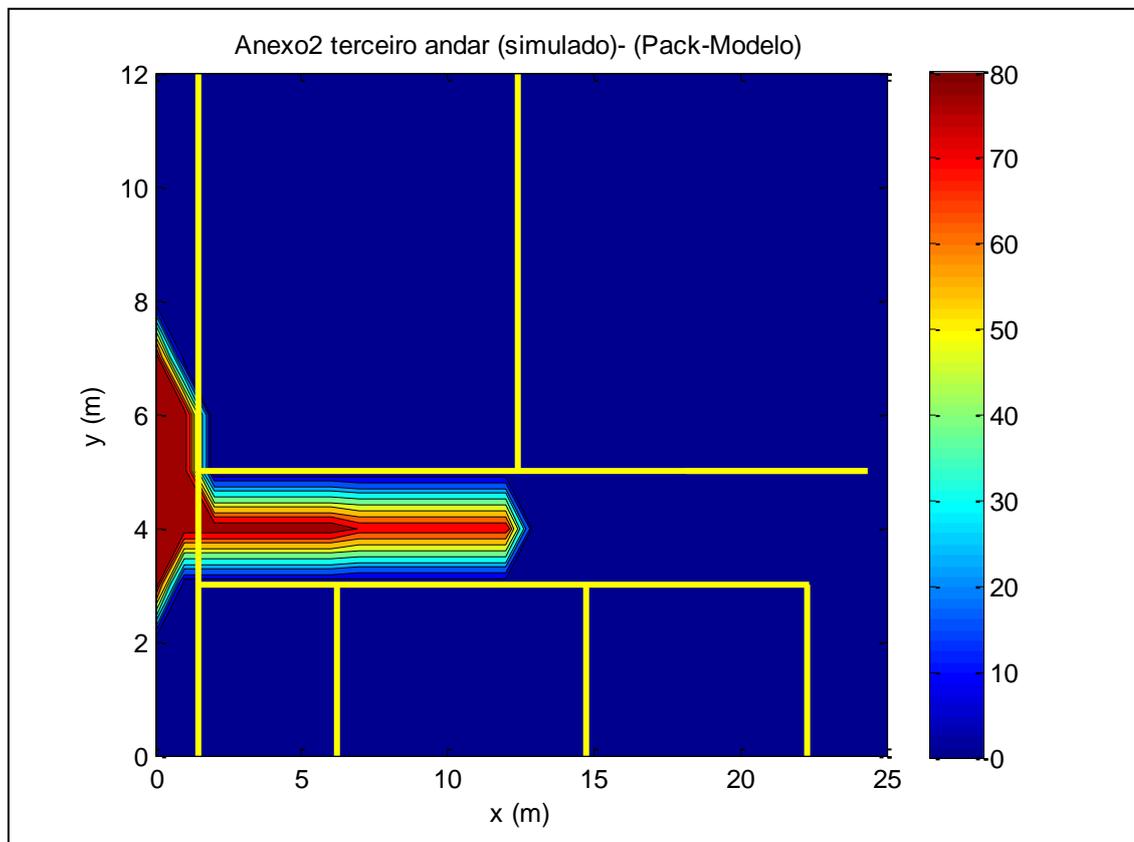


Figura 5.20 – Terceiro andar (simulado), perda de pacotes.

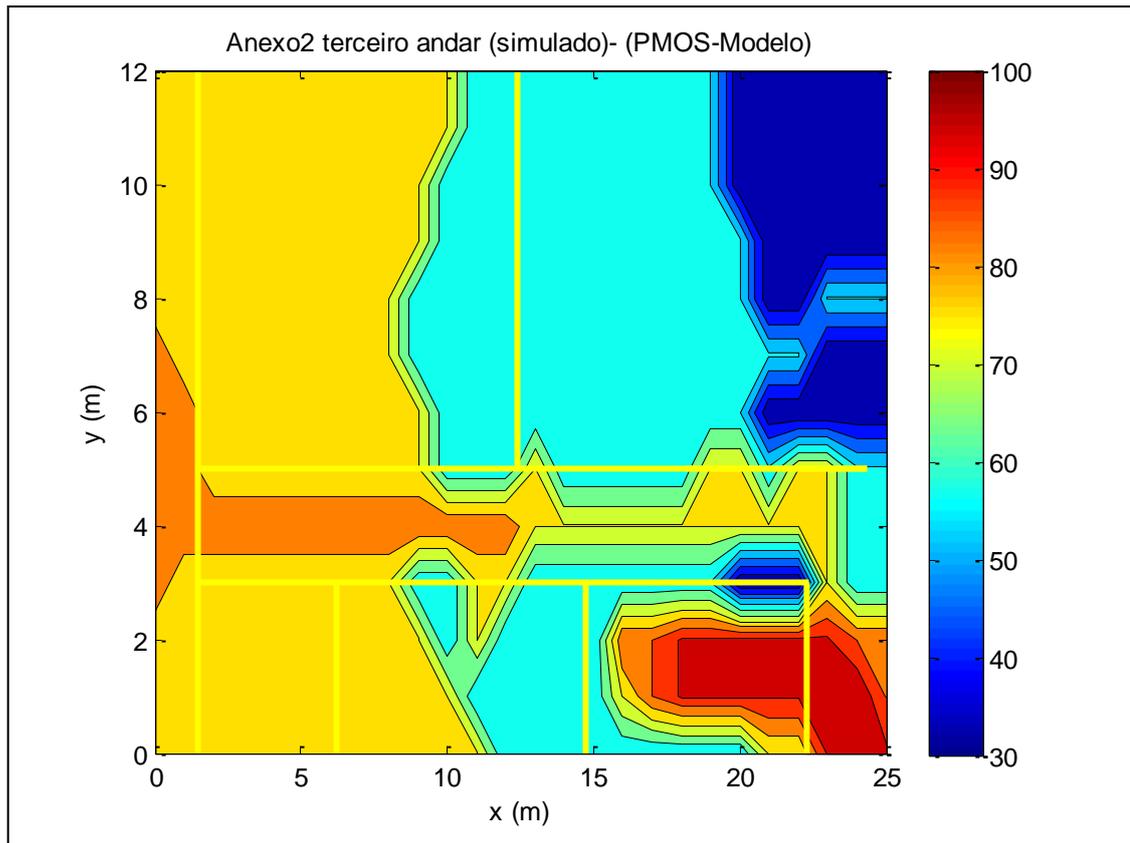


Figura 5.21 – Terceiro andar (simulado), PMOS.

5.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

As campanhas de medição realizadas coletaram dados de dois andares de um mesmo prédio da UFPA, esses dados serviram para moldar e validar o modelo proposto. Na comparação com o modelo fator de atenuação, que possui um comportamento similar ao modelo proposto, evidenciou-se a superioridade do modelo proposto, em prever o ambiente de forma mais próxima dos dados medidos. Os erros RMS para as radiais traçadas foram mais baixos para o modelo proposto, e este último ainda mostra que a predição dos QoS (um de seus diferenciais), é bem adequado uma vez que os mapas de probabilidade são mais realísticos com a morfologia do prédio estudado.

A simulação do terceiro andar mostra o acompanhamento da tendência de degradação tanto da potência quanto dos parâmetros de QoS. Quando, mais uma vez comparado com o modelo fator de atenuação, o modelo proposto mostra-se mais próximo do esperado do que seria o real, uma vez que o modelo da literatura previu um cenário mais otimista contrastando com os dados medidos no segundo piso.

CONCLUSÃO

A presente dissertação buscou caracterizar, através de medidas e de um modelo, as propriedades de radio-propagação em um ambiente indoor considerando a potência de um sinal e mediadas QoS de chamadas VoIP. Neste sentido buscou-se elaborar um modelo de propagação adequado a ambientes multi-andares que não leve apenas em consideração o número de paredes ou pisos que foram atravessados pelo sinal, mas também que levasse em consideração as perdas em cada tipo de parede ou piso, além disso as métricas de QoS foram levadas em consideração pra salientar mais ainda o diferencial entre o modelo proposto e um modelo da literatura.

Devido às tendências atuais de crescimento das cidades com relação às novas tecnologias de comunicação, o modelo proposto torna-se uma ferramenta muito útil para o projetista no sentido de poder garantir o bom funcionamento de uma rede.

O ambiente escolhido para aplicação do modelo possui 4 tipos distintos de obstáculos (parede, divisória, esquadria e piso) e possuía dois andares para a caracterização da perda em piso. A automatização do processo de contagem de obstáculos e do processo de agregação de perda foi realizado para efetuar os cálculos das perdas, que são necessários para a aplicação do modelo.

Foram utilizadas as Aproximações de Padé como funções base para os ajustes do modelo, estas já estão consolidadas na literatura para ajuste de modelos de propagação. O modelo proposto foi ajustado utilizando uma função de Padé do tipo 2/1.

Foram apresentados também, para o modelo proposto, resultados para cada radial escolhida, os erros RMS aceitável para os parâmetros estudados (potência, *jitter*, PMOS e perda de pacotes), e se comparado com o modelo fator de atenuação (somente potência) mostra a melhor adequação do modelo proposto já que os erros nas mesmas radiais foram mais altos para o modelo fator de atenuação. A diferença entre os erros dos modelos variam de 1.7 dBs até 4.6 dBs em favor do modelo proposto.

Os mapas de probabilidade de recebimento ilustram o acompanhamento do modelo proposto com os dados coletados nas campanhas de medição.

Para teste, em condições similares, um terceiro andar foi simulado para a visualização do comportamento do modelo. Em contraste com o modelo de fator de atenuação, que obteve uma previsão que não acompanhou nem mesmo a degradação do segundo andar (andar superior), o modelo proposto mostrou uma degradação do sinal, não somente para a potência

mas também para todos os parâmetros de QoS. O modelo proposto caracterizou bem a passagem do sinal por 2 pisos (3 andares).

De maneira geral o modelo proposto comportou-se bem, sendo assim adequado para a utilização em ambientes *indoor* multi-andar que necessitem de serviços VoIP com qualidade assegurada.

Como trabalhos futuros pode-se incluir no modelo a sensibilidade de troca de pisos, porque quando o raio propagado atravessa um piso é incluída uma componente complexa para o desvio do raio, o que aumenta muito a complexidade do problema. Além disso pode-se também fazer um estudo de chamada VoIP, visando os QoS, para sistemas banda larga *outdoor* como WIMAX, tudo isso com a extensão do modelo proposto para ambientes *outdoor*.

REFERÊNCIAS

- [1] N. I. Sarkar, E. Lo; “Indoor propagation measurements for performance evaluation of IEEE 802.11g”. Paper presented at the IEEE Australasian Telecommunications Networks and Applications Conference (ATNAC’08), Adelaide, Australia (pp. 163-168), 2008.
- [2] S.Y. Seidel, T. S. Rappaport; “914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 40, no. 2, pp. 207-217, Feb. 1992.
- [3] R. Kwok; “802.11b Wireless Technology Senior Design Project”, Spring 2004.
- [4] E. H. Ong; J. Y. Khan, “QoS provisioning for VoIP over wireless local area networks”, Communication Systems, 2008. ICCS 2008. 11th IEEE Singapore International Conference on, pp. 906 – 911, Nov. 2008.
- [5] S.G.C Fraiha; “Localização de pontos de acesso em ambientes indoor em projetos de sistemas wireless”, Tese de doutorado apresentado a Universidade Federal do Pará, 2009.
- [6] J. D. Parsons, “Mobile Radio Propagation Channel” New York: Wiley, 2000.
- [7] A. Eisenblätter, H-F Geerdes, “Wireless Network Design: Solution-Oriented Modeling and Mathematic Optimization”, IEEE Wireless Communications, vol. 13, no 6, p. 8-14, December, 2006.
- [8] K. Jaffrès-Runser, J-M Gorce, S Ubéda, “QoS Constrained Wireless LAN Optimization within a Multiobjective Framework”, IEEE Wireless Communications, vol. 13, no 6, p. 26-33, December, 2006.
- [9] H. Zhai, J. Wang and Y. Fang, “Providing Statistical QoS Guarantee for Voice over IP in the IEEE 802.11 Wireless LANs”, IEEE Wireless Communications, February 2006.
- [10] T. S. Rappaport; “Wireless Communications Principles and Practice”. USA: Prentice Hall, 2nd Edition, 2002.
- [11] S.R. Saunders; “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”- New York: John Wiley e Sons, LTD, 1st Edition, 1999.
- [12] R. Valenzuela, “A ray tracing approach for predicting indoor wireless transmission”, in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC1993, May, 1993.
- [13] G.D. Kondylis, F. De Flaviis, G.J. Pottie, and T. Itoh, “A memory-efficient formulation of the finitedifference time-domain method for the solution of Maxwell equations,” IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, vol. 49, no. 7, Jul. 2001.
- [14] N. I. Sarkar, R. Membarth; “Modeling and Simulation of IEEE 802.11g using OMNeT++”, Discrete Event Simulation, vol 1, 2009.

- [15] N. I. Sarkar; “Performance Modeling of IEEE 802.11 WLAN using OPNET”, Discrete Event Simulation, vol 1, 2009.
- [16] S. G. C. Fraiha, J. C. Rodrigues, J. P. Araújo, H. S. Gomes, C. R. L. Francês, G. P. S. Cavalcante, “Metodologia para Projeto de Redes Sem Fio Baseada em Medidas de Potência e QoS”, MOMAG 2008, Florianópolis - Santa Catarina, Nov. 2008.
- [17] RADCOM© <http://www.radcom.com/> acessado em 02/03/2010.
- [18] <http://www.openh323.org/> acessado em 02/03/2010.
- [19] <http://www.netstumbler.com/> acessado em 02/03/2010.
- [20] S. G. C. Fraiha, J. C. Rodrigues, H. S. Gomes, G. P. S. Cavalcante, “Methodology for Analysis of the Coverage Probability of WLAN Using the Padé Approximant”, IMOC 2007, Salvador - Bahia 2007.
- [21] <http://usa.autodesk.com/> acessado em 02/03/2010.
- [22] R. M. Buehrer, A. Safaai-Jazi, W. Davis, D. Sweeney “Ultra-Wideband Propagation Measurements and Modeling: Final Report”, DARPA NETEX Program Virginia Tech, January 2004.
- [23] Matlab version 7.0. In Technical Documentation.
- [24] N. I. Sarkar, S. A. Halim; “Simulation of computer networks: simulators, methodologies and recommendations. Paper presented at the 5th IEEE International Conference on Information Technology and Applications (ICITA’08), Cairns, Queensland, Australia (pp.420-425). 2008.

ANEXO A – MAPAS DE PROBABILIDADE DO ANDAR TÉRREO

As Figuras a seguir mostram os dados expandidos e os mapas de probabilidade de recebimento do andar térreo (primeiro andar), para potência e os parâmetros de QoS bem como o mapa para o modelo fato de atenuação.

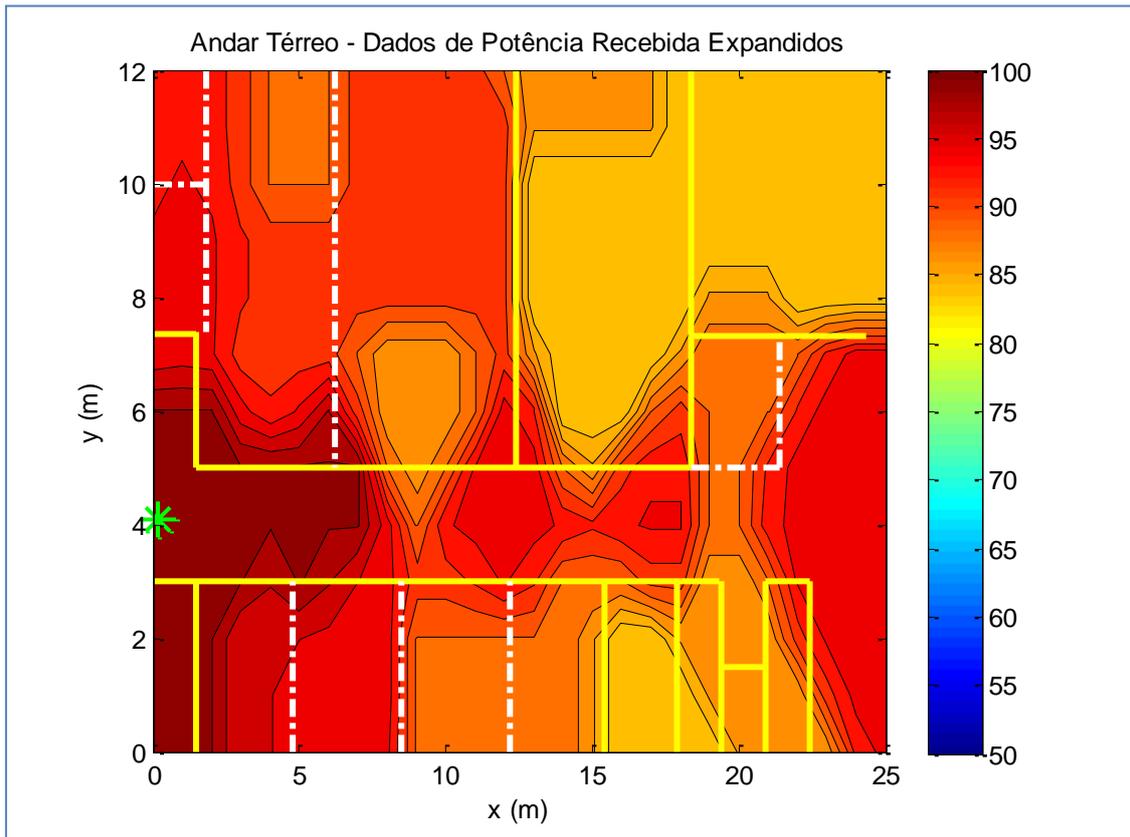


Figura A.1 – Dados expandidos de potência (andar térreo).

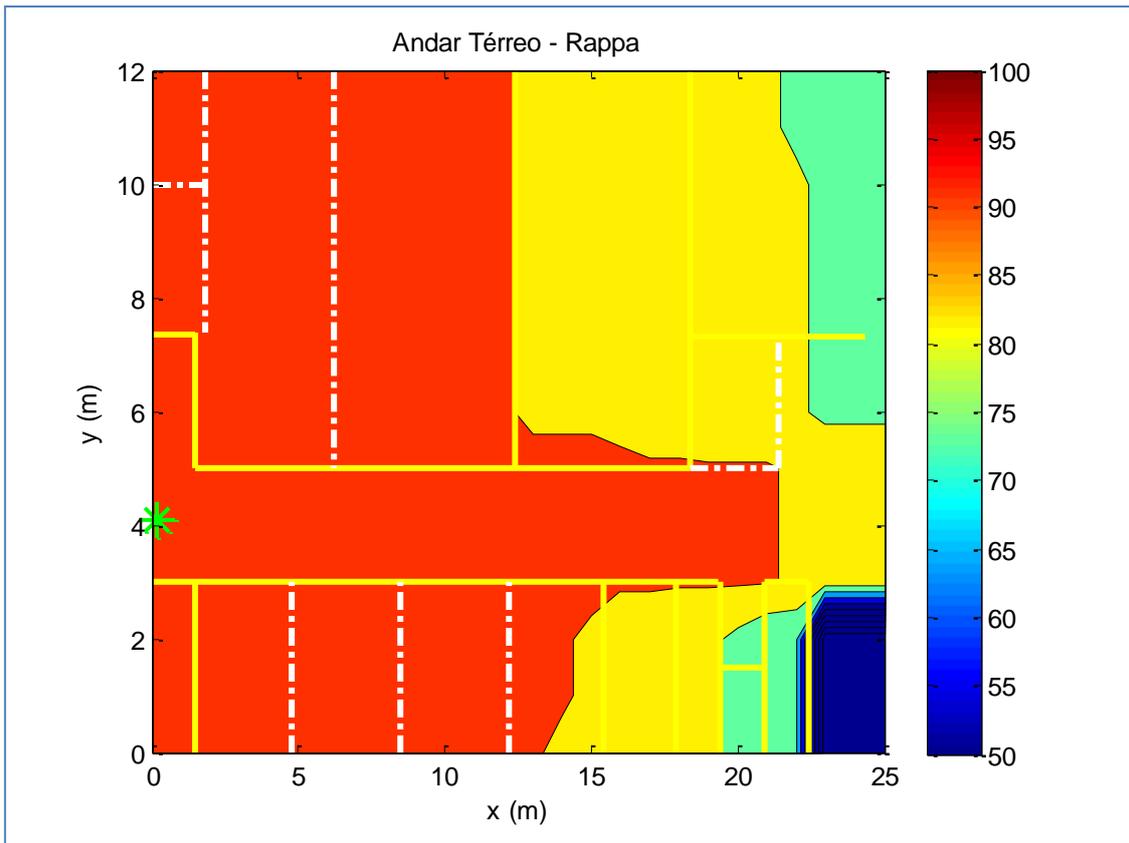


Figura A.2 – Mapa de potência pelo modelo de Sidel-Rappaport (andar térreo).

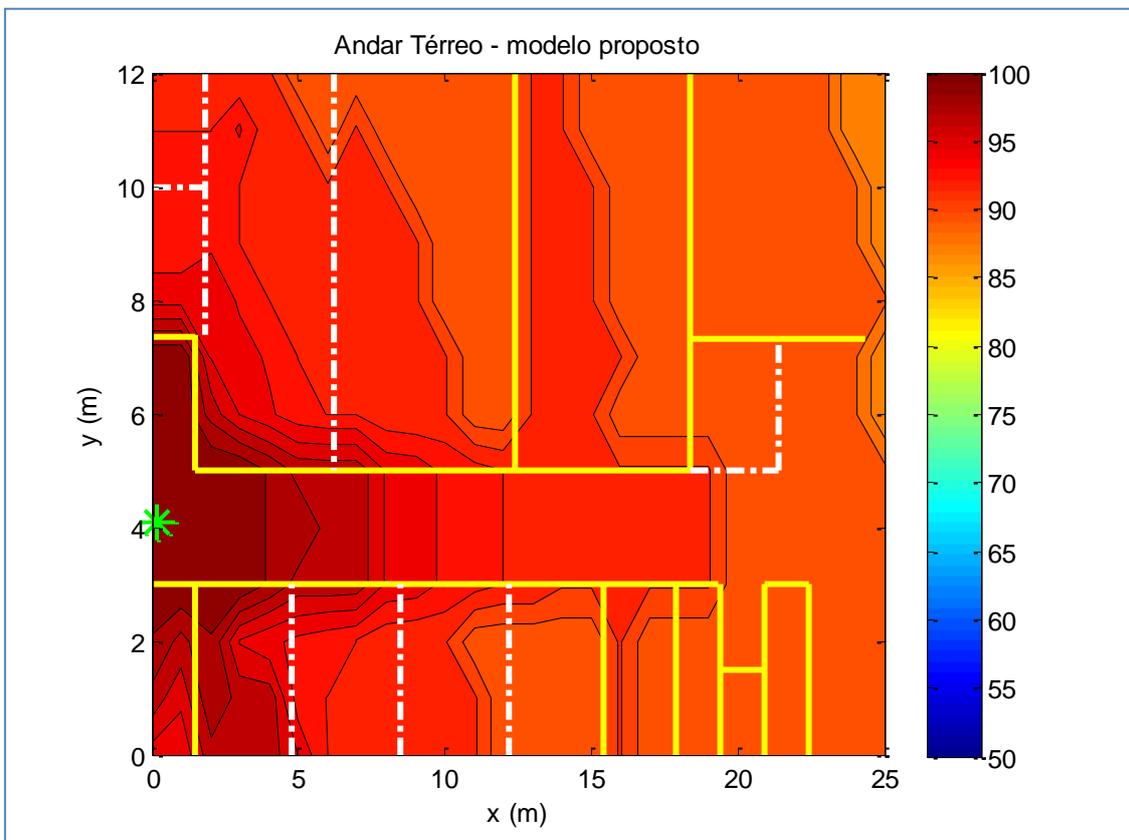


Figura A.3 – Mapa de potência pelo modelo proposto (andar térreo).

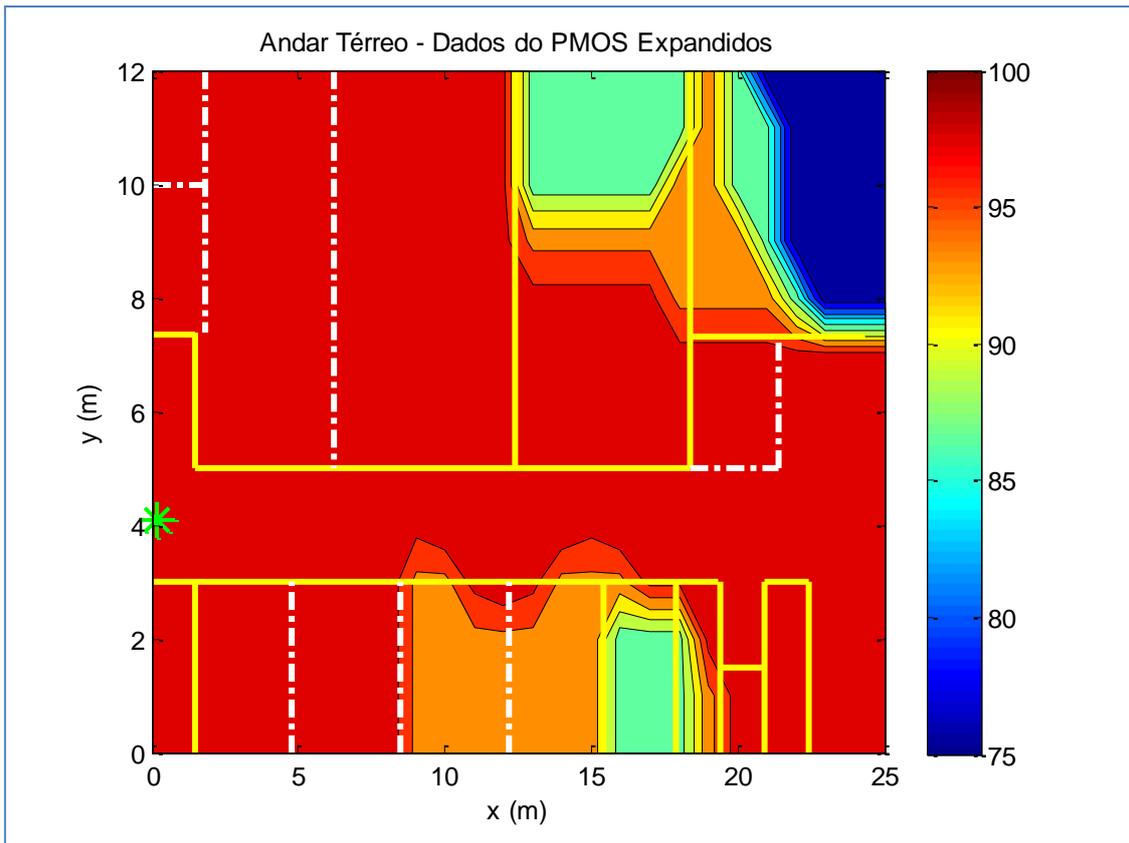


Figura A.4 – Dados expandidos de PMOS (andar térreo).

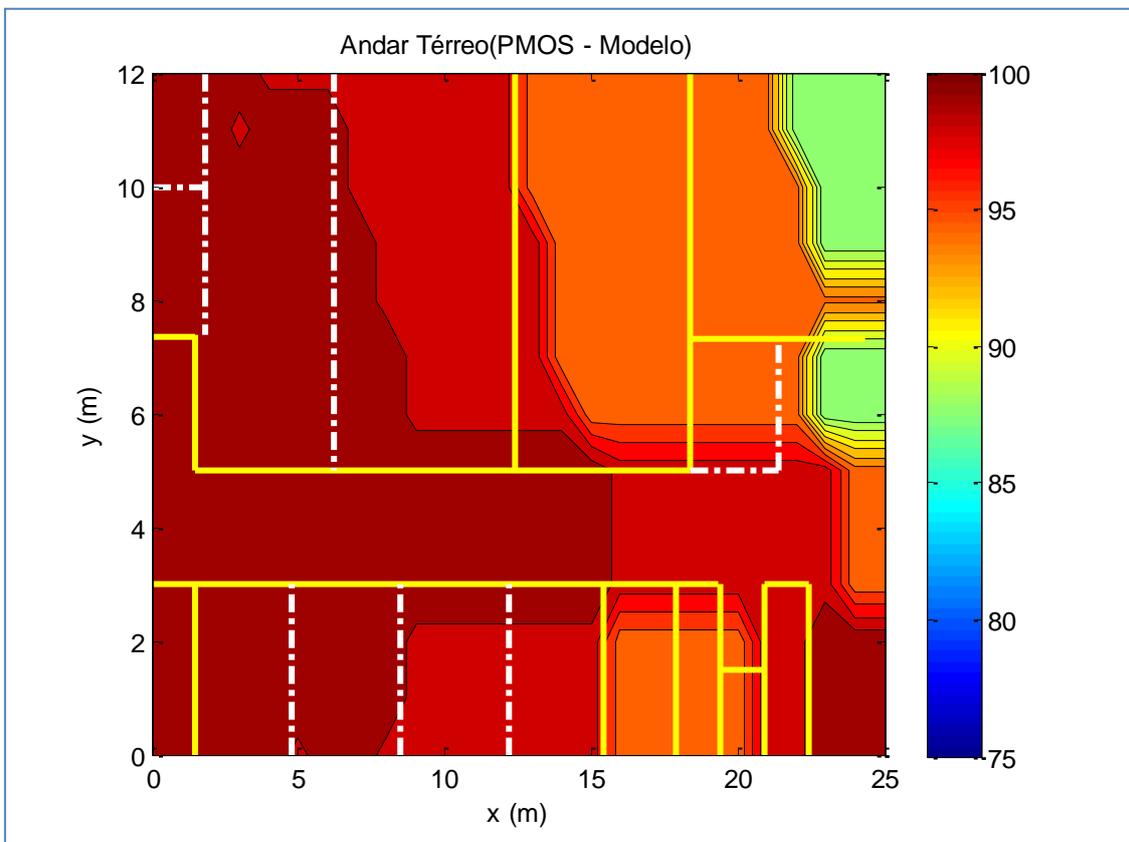


Figura A.5 – Mapa de PMOS pelo modelo proposto (andar térreo).

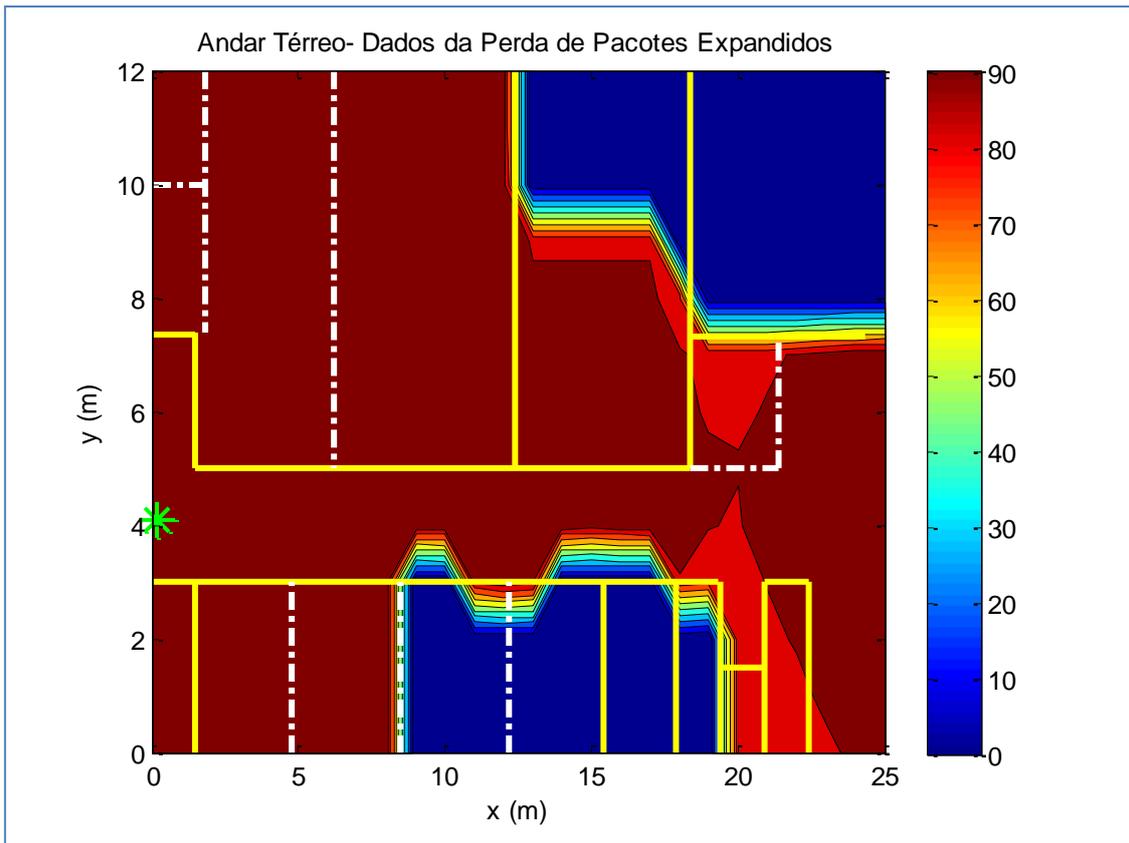


Figura A.6 – Dados expandidos de perda de pacotes (andar térreo).

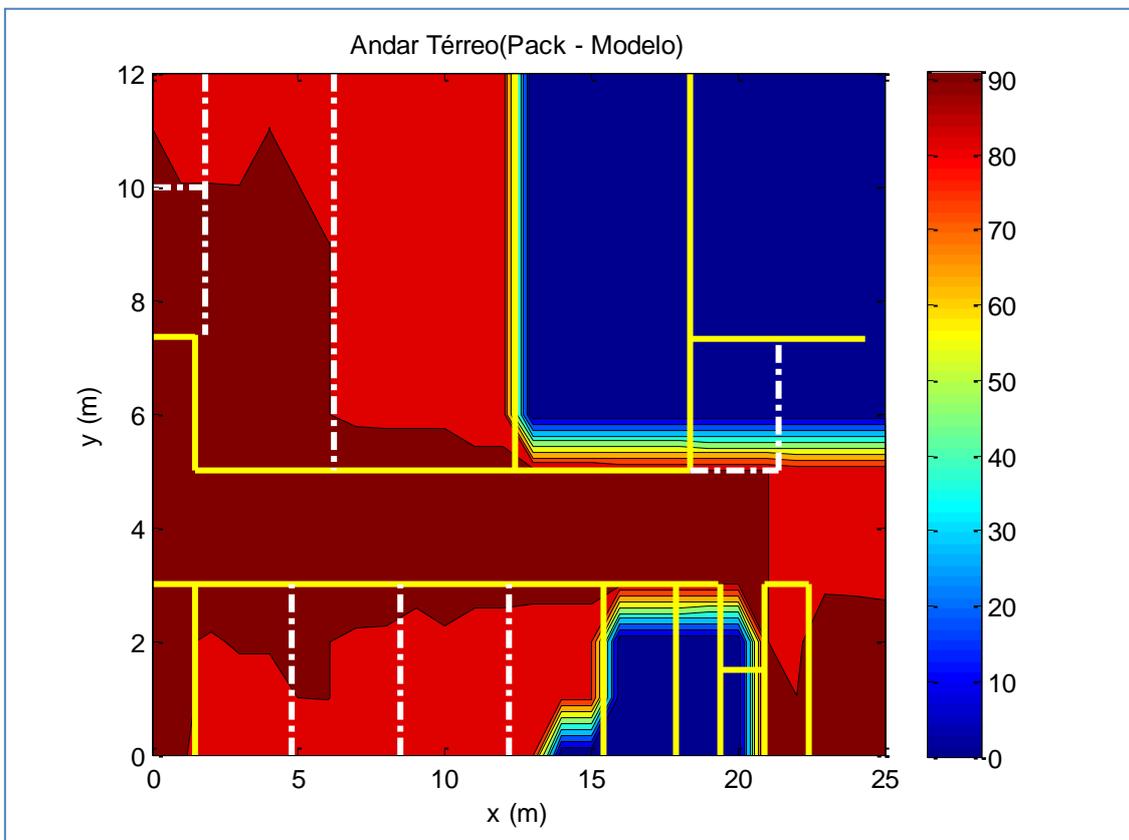


Figura A.7 – Mapa de perda de pacotes pelo modelo proposto (andar térreo).

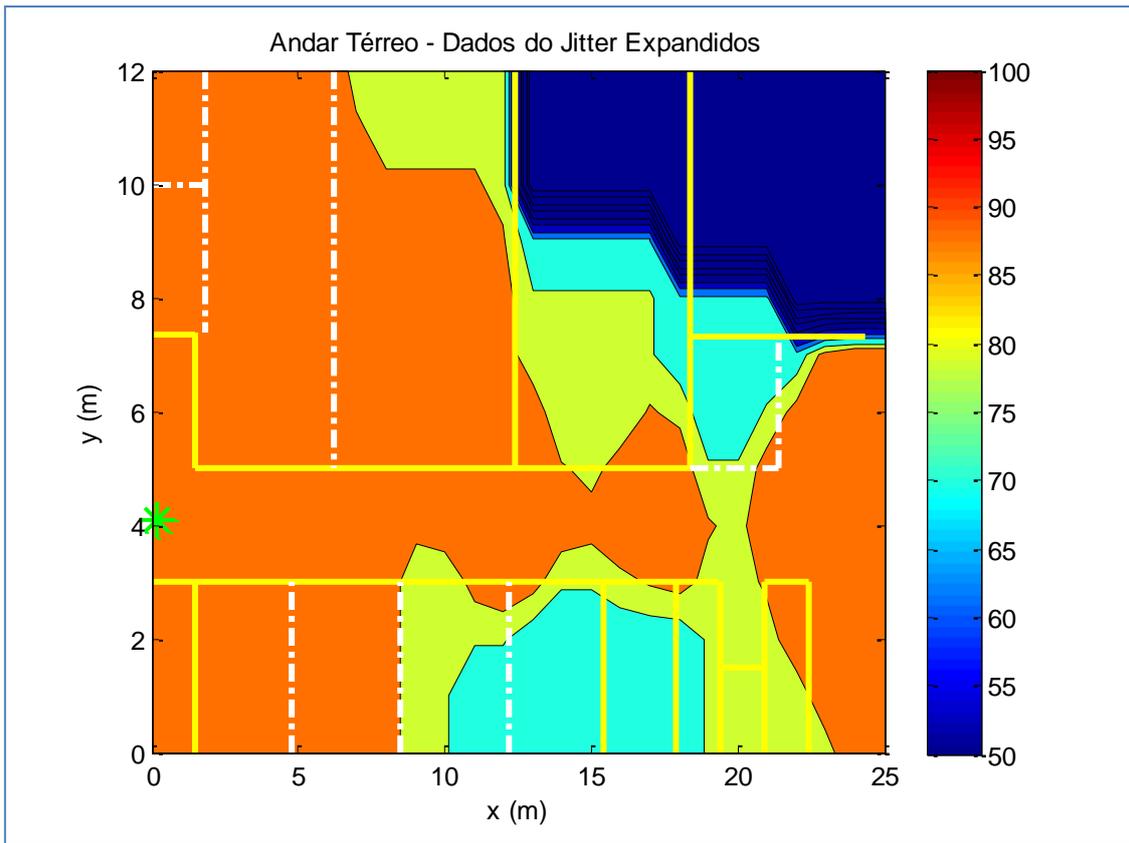


Figura A.8 – Dados expandidos de *jitter* (andar térreo).

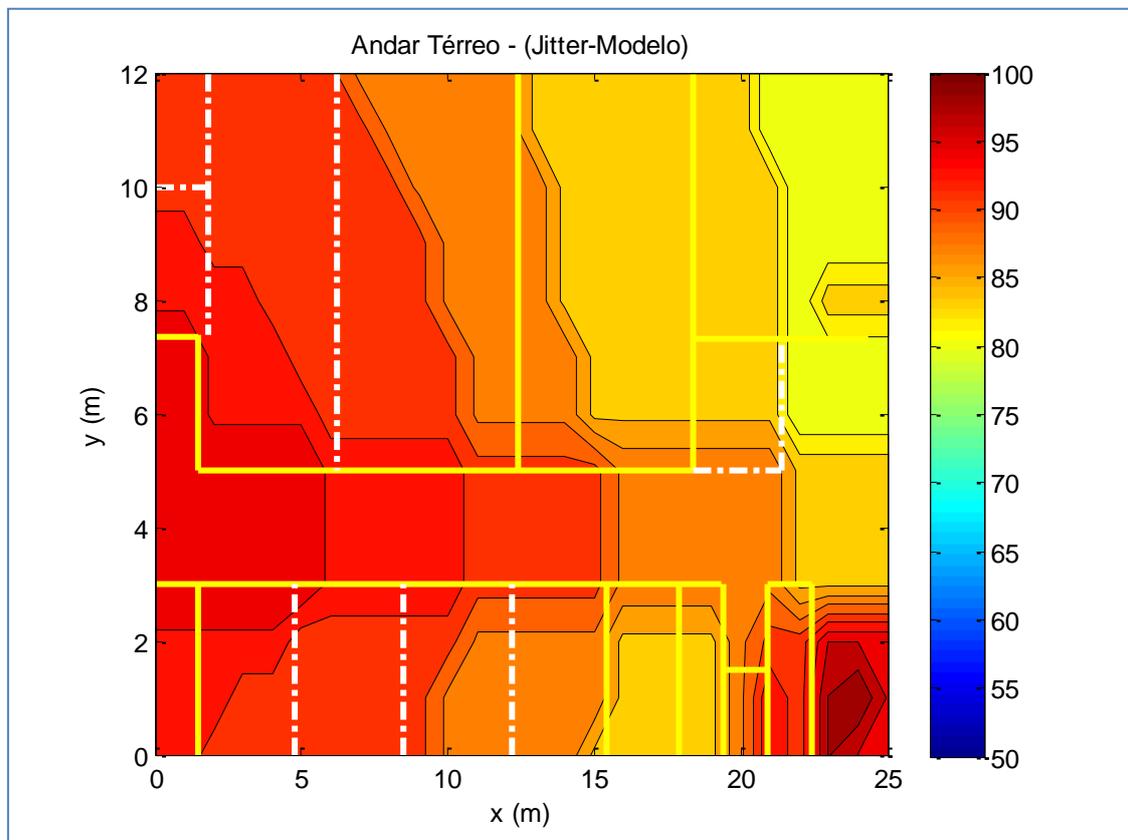


Figura A.10 – Mapa do *jitter* pelo modelo proposto (andar térreo).