

# Um Novo Modelo de Propagação para Redes Wi-Fi em 2,4GHz

Rafael S. de Souza e Rafael D. Lins

**Resumo**— Este artigo apresenta um estudo aprofundado sobre o macro-comportamento da propagação de sinais em redes sem fio operando de acordo com o padrão IEEE 802.11g na faixa de frequência de 2,4 GHz e, a partir de dados coletados em ambientes *outdoor* e *indoor*, são feitas análises comparativas entre o desempenho de modelos encontrados na literatura e um estudo sobre os efeitos de fatores climáticos (temperatura e umidade relativa do ar) sobre a atenuação imposta ao sinal. Um novo modelo é proposto considerando os efeitos da umidade relativa do ar e seu desempenho é comparado ao dos demais modelos.

**Palavras-Chave**— redes sem fio, propagação, modelagem, fatores climáticos.

**Abstract**— This article presents a detailed study of large-scale path loss on wireless networks operating in accordance with the standard IEEE 802.11g at 2.4 GHz frequency. Using data collected from indoor and outdoor environments, a comparative analysis of the performance of some models found at the literature and the effects of climatic factors (temperature and relative humidity) on the attenuation imposed to the signal is made. A new empirical model is proposed considering the effects of relative humidity and its performance is compared with other models.

**Keywords**— WLAN, propagation, modeling, humidity.

## I. INTRODUÇÃO

Redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11, popularmente conhecidas como redes Wi-Fi, tornaram-se um meio freqüentemente utilizado para acesso à Internet em residências, escritórios e locais públicos. Para aqueles que trabalham com implantação de redes Wi-Fi existe um grande desafio relacionado ao planejamento de tais redes: determinar adequadamente o local onde serão instalados os pontos de acesso da rede, ou roteadores sem fio, de forma a minimizar custos e garantir um bom desempenho da rede na área que ela se propõe a cobrir. Essa necessidade conduz a um problema bastante abordado na literatura que é o estudo do comportamento da propagação de ondas eletromagnéticas, um fenômeno físico complexo e dotado de inúmeros mecanismos que dificultam sua perfeita determinação.

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo acerca de modelos encontrados na literatura para a previsão do comportamento da propagação de sinal em redes sem fio operando de acordo com o padrão IEEE 802.11 na faixa de frequências de 2,4 GHz. Por meio dos resultados de medições de campo, em ambientes *outdoor* e *indoor*, é

comparado o desempenho dos modelos em análise e são avaliados os efeitos de fatores climáticos (umidade relativa do ar e temperatura) sobre a atenuação do sinal. Com base nos resultados das medições e na análise dos efeitos dos fatores climáticos um novo modelo é proposto e tem seu desempenho comparado com o dos demais modelos.

## II. MODELOS PARA PROPAGAÇÃO DE SINAL EM REDES SEM FIO NA FAIXA DE 2,4GHz

O problema de modelar a propagação de sinal em redes sem fio é uma tentativa de prever as variações da atenuação imposta ao sinal, em decibéis, quando ocorrem incrementos significativos na distância entre transmissor e receptor [1]. Assim, os modelos estabelecem uma relação entre a atenuação do sinal, ou perda, e a distância entre transmissor e receptor. Distinções entre os modelos podem ser feitas pelo tipo de abordagem, determinística ou empírica, e o ambiente de aplicação, *outdoor* ou *indoor*. Os modelos considerados neste trabalho são apresentados a seguir.

### A. Modelo de Young

O modelo de Young foi proposto com base em dados de medições *outdoor* realizadas em Nova Iorque na faixa de frequências entre 150MHz e 3,7GHz [2]. Seu uso na modelagem da propagação de sinal em redes Wi-Fi não é freqüente, mas o fato de seus parâmetros serem comuns a esse tipo de aplicação e o modelo estar baseado em dados coletados em uma faixa que engloba a frequência de 2,4GHz motivaram sua consideração neste trabalho.

A fórmula proposta pelo modelo de Young é:

$$PL(d) = \frac{d^4}{G_t G_r (h_t h_r)^2 \beta} \quad (1)$$

onde:  $PL$  representa a perda ou atenuação do sinal (derivada do termo *path-loss*);  $G_t$ ,  $G_r$ ,  $h_t$  e  $h_r$  representam o ganho da antena transmissora, o ganho da antena receptora, a altura da antena transmissora e a altura da antena receptora, respectivamente. O parâmetro  $\beta$  é chamado de fator de interferência e  $d$  é a distância entre transmissor e receptor.

A fórmula (1) pode ser simplificada considerando que as mesmas antenas, a uma mesma altura, sejam sempre utilizadas. Assim, ter-se-ia:

$$PL(d) = \frac{d^4}{\beta'} \quad (2)$$

ou, em decibéis,

$$PL(d)[dB] = 40 \log(d) - 10 \log(\beta'). \quad (3)$$

### B. Modelo logaritmo da distância

O modelo logaritmo da distância é, provavelmente, o mais citado em trabalhos científicos sobre modelagem de propagação de sinal em redes Wi-Fi [3-9]. O modelo supõe uma relação exponencial entre atenuação e distância [10], ditada por um fator de atenuação  $n$ , como indicado em

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (4)$$

A relação expressa em (4) pode ser vista, em decibéis, como:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5)$$

onde  $PL(d_0)$  representa a perda na distância de referência. Tipicamente o valor assumido para  $d_0$  é de 1m enquanto o fator de atenuação  $n$  é obtido através de dados de medições.

### C. Modelo multi-inclinações

Derivado do modelo logaritmo da distância, o modelo multi-inclinações parte do princípio de que, ao invés de um único fator de atenuação válido em todo o intervalo de distâncias considerado, a perda imposta ao sinal depende de diversos fatores de atenuação em diferentes trechos [11].

Na prática esse modelo é frequentemente utilizado em uma forma particular, que considera apenas dois trechos, conhecida como modelo *dual-slope*. Segundo ele a perda pode ser calculada por meio do sistema de fórmulas

$$PL(d)[dB] = \begin{cases} PL(d_0) + 10n_1 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) & \text{se } d_0 < d < d_c \\ PL(d_0) + 10n_1 \log\left(\frac{d_c}{d_0}\right) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_c}\right) & \text{se } d > d_c \end{cases} \quad (6)$$

onde:  $n_1$  representa o fator de atenuação do primeiro trecho;  $d_c$  é a distância crítica, a qual separa o primeiro do segundo trecho;  $n_2$  é o fator de atenuação do segundo trecho; e  $PL(d_0)$ , assim como no modelo logaritmo da distância, representa a perda na distância de referência  $d_0$ .

Em [7] é apresentado um meio para cálculo da distância crítica (que conduz ao valor de 50m em 2,4GHz) e são sugeridos para os parâmetros  $n_1$  e  $n_2$  os valores 2 e 4.

### D. Modelo de Oliveira et al.

Apresentado em [12], o modelo de Oliveira *et. al* foi desenvolvido para aplicação no planejamento de redes de telefonia móvel. Entretanto, a abordagem proposta, considerando o incremento da atenuação, em decibéis, como uma função não apenas logarítmica da distância, mas também com uma contribuição linear da distância, chamou a atenção.

A fórmula proposta pelo modelo, em decibéis, é:

$$PL(d)[dB] = P_0 - 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 10 \cdot m \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (7)$$

onde  $P_0$  e  $m$  são parâmetros de ajuste que devem ser calculados a partir de dados de medições, de forma a minimizar o erro médio quadrático cometido pelo modelo. Ou seja, o modelo de Oliveira *et al.* representa uma abordagem empírica com dois fatores de ajuste cujo desenvolvimento sugere a aplicação em ambiente *outdoor*.

### E. Modelo da ITU

O modelo da ITU (*International Telecommunication Union*) é recomendado para aplicação em redes locais sem fio operando entre 900 MHz e 100GHz [13]. A fórmula proposta é:

$$PL(d)[dB] = 20 \cdot \log(f) + N \cdot \log(d) + Lf(m) - 28 \quad (8)$$

onde  $f$  indica a frequência de operação em MHz,  $N$  é o fator de perda do modelo e  $Lf(m)$  representa uma função de incremento da perda em decorrência da existência de pisos entre transmissor e receptor (o número de pisos corresponde ao valor do parâmetro  $m$ ). Em seu documento [13], a ITU recomenda algumas expressões para a função  $Lf(m)$  em função da faixa de frequência de operação e do tipo de ambiente considerado (todos do tipo *indoor*).

### F. Modelo logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos

Esse modelo representa uma modificação do modelo logaritmo da distância para ambiente *indoor*, onde passam a ser considerados na previsão da atenuação imposta ao sinal o efeito de três tipos de obstáculos: pisos, divisórias e paredes [10]. O fator de atenuação pode ser igualado a 2, como se a propagação ocorresse no espaço livre, e os ajustes na curva de atenuação prevista pelo modelo passam a ser função da presença de obstáculos. A fórmula definida para o modelo é:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF[dB] + p \cdot SPAF[dB] + q \cdot WAF[dB] \quad (9)$$

onde  $FAF$ ,  $SPAF$  e  $WAF$  representam o incremento de atenuação por piso, divisória e parede, respectivamente. As variáveis  $p$  e  $q$  indicam o número de divisórias e paredes entre transmissor e receptor.

### G. Modelo de Cheung, Sau e Murch

Proposto em [4], o modelo de Cheung, Sau e Murch incorpora idéias dos modelos *dual-slope* e logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculos. A inovação proposta pelo modelo diz respeito aos efeitos de obstáculos. Ao invés de considerar que esse efeito independe da direção de propagação, o modelo sugere que o incremento da atenuação seja função do ângulo de incidência da direção de propagação do sinal sobre o obstáculo. Tal como em [4], o sistema de fórmulas proposto pelo modelo é:

$$\begin{aligned}
 PL(d)[dB] = & PL(d_0)[dB] + 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)^{n_1} \cdot U(d_c - d) \\
 & + 10 \cdot \left[ \log\left(\frac{d_c}{d_0}\right)^{n_1} + \log\left(\frac{d}{d_c}\right)^{n_2} \right] \cdot U(d - d_c) \\
 & + \sum_{p=1}^P \frac{WAF(p)}{\cos \theta_p} + \sum_{q=1}^Q \frac{FAF(q)}{\cos \theta_q} \quad (10)
 \end{aligned}$$

onde:

- $n_1$  e  $n_2$  representam os fatores de atenuação do primeiro e segundo trecho, respectivamente;
- $U(d)$  é a função degrau unitário ( $U(d) = 0$  p/  $d < 0$ );
- $d_c$  indica a distância crítica que separa o primeiro do segundo trecho;
- $WAF(p)$  e  $FAF(q)$  indicam o incremento da atenuação por parede e piso, respectivamente;
- $P$  e  $Q$  indicam o total de paredes e pisos, respectivamente, entre transmissor e receptor;
- $\theta_p$  e  $\theta_q$  indicam, respectivamente, o ângulo de incidência da direção de propagação sobre a parede  $p$  e o piso  $q$ .

Também em [4] os autores do modelo sugerem que a distância crítica seja da ordem de 10m, o fator de atenuação do primeiro trecho igual a 2 e para o segundo trecho 2,5.

### III. MEDIÇÕES DE CAMPO

Nesta seção serão apresentados a metodologia utilizada nas medições de campo e seus resultados.

#### A. Metodologia

As medições de campo foram realizadas utilizando os seguintes equipamentos e softwares:

- Laptop Toshiba, Satellite A105, com sistema operacional Windows XP Professional e adaptador wireless Intel PRO 3945ABG;
- Roteador wireless Linksys WRT54G (configurado no modo 802.11g – OFDM, canal 3  $\approx$  2.422MHz);
- Software WirelessMon Professional versão 2.0, da Passmark ([www.passmark.com](http://www.passmark.com));
- Termo-higrômetro MT-241, fabricante Minipa.

Foram realizadas medições em 4 ambientes: 2 *outdoor* e 2 *indoor*. Para cada ambiente foram determinados pontos de medição buscando distanciar pontos subseqüentes em pelos menos 10m (*outdoor*) ou 1,5m (*indoor*). Laptop e roteador wireless foram sempre posicionados a altura de 1m do solo, e o registro do valor da atenuação do sinal obtido através do software WirelessMon Professional. O programa gerava um arquivo texto com os valores de atenuação lidos a cada intervalo de 2s. Em cada ponto de medição passou-se um total de 60s, gerando 30 amostras por medição.

As medições em ambiente *outdoor* foram realizadas no estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE (*Outdoor 1*), em dias de semana com razoável movimento de alunos e carros, e em uma rua sem saída localizada na região metropolitana de Recife, com pouco movimento de pessoas e veículos (*Outdoor 2*). Para as

medições *indoor* dois imóveis foram utilizados, ambos com piso único e situados na região metropolitana de Recife. No primeiro deles foram feitas medições em duas direções distintas (raia 1 vertical e raia 2 inclinada)<sup>†</sup>. A tabela I indica o número de pontos de medição em cada local e o total de baterias de medições realizadas.

TABELA I  
DADOS DOS LOCAIS ONDE FORAM REALIZADAS AS MEDIÇÕES.

Local	Nº. de pontos de medição	Nº. de baterias de medições
<i>Outdoor 1</i>	9	35
<i>Outdoor 2</i>	5	20
<i>Indoor 1, raia 1</i>	6	30
<i>Indoor 1, raia 2</i>	6	30
<i>Indoor 2</i>	6	20

Em cada bateria de medição registrou-se o valor médio da umidade relativa do ar e temperatura observados. Desta forma, a cada bateria correspondem um valor médio de atenuação por ponto e os valores médios observados da umidade relativa do ar e da temperatura. As tabelas II e III apontam as distâncias dos pontos de medição tomadas a partir do roteador wireless. As medições foram sempre realizadas a partir do ponto mais próximo ao roteador, retornando a ele após o término de cada bateria de medição.

TABELA II  
DISTÂNCIA DOS PONTOS DE MEDIÇÃO *OUTDOOR*

Pontos	<i>Outdoor 1</i>	<i>Outdoor 2</i>
1	1m	1m
2	15m	10m
3	30m	20m
4	45m	30m
5	60m	40m
6	75m	-
7	90m	-
8	105m	-
9	120m	-

TABELA III  
DISTÂNCIA DOS PONTOS DE MEDIÇÃO *INDOOR*

Pontos	<i>Indoor 1, raia 1</i>	<i>Indoor 1, raia 2</i>	<i>Indoor 2</i>
1	1m	1m	1m
2	2,6m	2,6m	3m
3	4,3m	5,3m	6m
4	6,3m	7,9m	9m
5	8,3m	10,3m	12m
6	10,3m	12,3m	15m

#### B. Resultados

As tabelas IV e V indicam os valores médios da atenuação nos pontos de medição de cada um dos cinco locais onde elas foram realizadas e seus respectivos desvios padrão. Para cada um dos locais de medições também foram observados valores mínimos e máximos de temperatura e umidade relativa do ar conforme indicado na tabela VI.

<sup>†</sup> As plantas baixas dos 2 imóveis utilizados nas medições encontram-se ilustradas nas figuras 1 e 2, situadas no final deste artigo.

TABELA IV  
RESULTADO DAS MEDIÇÕES *OUTDOOR*

Pontos	Valor médio da atenuação (dB)		Desvio padrão (dB)	
	Out 1	Out 2	Out 1	Out 2
1	37,33	36,89	2,01	1,07
2	52,54	60,58	2,04	1,24
3	60,44	73,74	2,25	2,50
4	71,41	80,03	1,88	1,35
5	78,75	79,60	2,57	1,58
6	76,07	-	2,05	-
7	79,23	-	2,36	-
8	83,30	-	2,05	-
9	84,51	-	1,92	-

TABELA V  
RESULTADO DAS MEDIÇÕES *INDOOR*

Pontos	Valor médio da atenuação (dB)			Desvio padrão (dB)		
	In 1, raia 1	In 1, raia 2	In 2	In 1, raia 1	In 1, raia 2	In 2
1	37,76	37,76	33,48	2,88	2,88	1,80
2	42,51	57,83	47,01	3,00	2,05	2,80
3	50,50	61,82	58,49	1,71	1,53	2,80
4	56,66	70,24	72,31	2,09	2,50	3,09
5	59,78	74,58	84,21	2,27	2,31	1,61
6	63,86	82,46	87,91	2,84	2,37	2,65

TABELA VI  
VALORES MÁXIMO E MÍNIMO DA UMIDADE RELATIVA DO AR E TEMPERATURA OBSERVADOS DURANTE AS MEDIÇÕES

Local	UR		T (°C)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Outdoor 1	40%	77%	28	35
Outdoor 2	48%	72%	29	33
Indoor 1	55%	81%	26	31
Indoor 2	66%	78%	27	30

#### IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados das medições foram divididos em dois grupos. O primeiro, com as medições *outdoor 1* e *indoor 1*, foi usado para análise dos efeitos da umidade relativa do ar e dele derivou o modelo proposto. O segundo grupo, com as medições *outdoor 2* e *indoor 2*, foi utilizado para validação do modelo.

A análise dos efeitos da umidade relativa do ar foi realizada dividindo as baterias de medição dos ambientes *outdoor 1* e *indoor 1* em conjuntos de acordo com o valor observado da umidade relativa do ar. Para cada conjunto foi obtido, com apoio da ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0, o valor do fator de atenuação ( $n$ ) do modelo logaritmo da distância a partir dos valores médios da atenuação. As tabelas VII e VIII indicam os resultados dessa análise, apontando para cada conjunto os valores mínimo e máximo da umidade relativa do ar, o total de baterias de medição do conjunto e seus respectivos fatores de atenuação.

TABELA VII  
ANÁLISE DOS EFEITOS DA UMIDADE RELATIVA DO AR PARA OS DADOS DAS MEDIÇÕES *OUTDOOR 1*

	Conj. 1	Conj. 2	Conj. 3
Nº. de baterias	12	11	12
UR Mín.	40%	57%	71%
UR Máx.	56%	69%	77%
$n$	2,049	2,078	2,154

TABELA VIII  
ANÁLISE DOS EFEITOS DA UMIDADE RELATIVA DO AR PARA OS DADOS DAS MEDIÇÕES *INDOOR 1*

	Conj. 1	Conj. 2	Conj. 3
Nº. de baterias	10	10	10
UR Mín.	55%	65%	72%
UR Máx.	61%	71%	81%
$n$ para raia 1	2,234	2,265	2,491
$n$ para raia 2	3,705	3,702	3,925

Essa primeira análise já indica uma relação direta entre umidade relativa do ar e atenuação do sinal. Como pode ser observado nas tabelas VII e VIII, os maiores valores do fator de atenuação do modelo logaritmo da distância correspondem aos grupos com maior valor médio da umidade relativa do ar.

#### V. NOVO MODELO

Em função da análise acerca dos efeitos da umidade sobre a atenuação do sinal decidiu-se buscar, por meio da aplicação de regressão linear múltipla aos dados das medições *outdoor 1* e *indoor 1*, a combinação de variáveis que melhor explicasse as variações observadas na atenuação do sinal. A idéia era encontrar um modelo da forma

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (11)$$

onde  $Y$  indicaria a atenuação do sinal e os  $X_i$ 's do modelo seriam as variáveis explicativas. As candidatas a variáveis explicativas foram:  $d$ ,  $\log(d)$ ,  $\log(UR)$  e  $\log(T)$ . A tabela IX aponta os resultados do fator  $R^2$  (percentual que indica quão bem o modelo explica as variações da grandeza modelada [14]) obtidos a partir da aplicação de regressão linear múltipla aos dados das medições *outdoor 1* e *indoor 1*. Os pontos relevantes dessa análise são:

1. A primeira combinação registrada na tabela IX, bastante similar ao modelo logaritmo da distância, tem seu fator  $R^2$  significativamente aumentado quando é acrescida a ela a contribuição linear da variável distância;
2. A terceira combinação, acrescentando o  $\log(UR)$ , melhora sensivelmente o fator  $R^2$  em todos os casos;
3. A quarta combinação acrescenta pouco a terceira e com um detalhe: o coeficiente  $\beta_4$ , em todos os casos, teve intervalo de confiança passando pelo zero, o que não permite concluir sobre sua real contribuição [14].

TABELA IX  
APLICAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA AOS DADOS  
DAS MEDIÇÕES *OUTDOOR* 1 E *INDOOR* 1

Modelo	Fator R <sup>2</sup> ( <i>Outdoor</i> 1)	Fator R <sup>2</sup> ( <i>Indoor</i> 1, raia 1)	Fator R <sup>2</sup> ( <i>Indoor</i> 1, raia 2)
$Y = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	89,98%	88,76%	94,16%
$Y = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d$	94,41%	92,08%	94,47%
$Y = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR)$	94,61%	93,11%	94,85%
$Y = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR) + \beta_4 \log(T)$	94,61%	93,19%	94,87%
$Y = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR)$	83,10%	90,50%	87,70%
$Y = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \log(UR) + \beta_3 \log(T)$	83,32%	91,53%	88,08%

As combinações da tabela IX não foram as únicas consideradas. Um número maior delas foi avaliado, usando as variáveis *UR* e *T* com seus valores absolutos e até mesmo considerando o produto das variáveis *d* e *UR*. Mas, a terceira combinação da tabela IX sempre apresentou melhor desempenho e estabilidade para os coeficientes  $\beta$ , ou seja, intervalos de confiança sem passar pelo zero e com os menores comprimentos. Assim, chegou-se ao modelo:

$$PL(d, UR)[dB] = \beta_0 + \beta_1 \log(d) + \beta_2 d + \beta_3 \log(UR). \quad (12)$$

## VI. DESEMPENHO DOS MODELOS

As primeiras comparações foram feitas com dados das medições *outdoor* 1 e *indoor* 1. Para as medições *outdoor* 1 os modelos de Young, logaritmo da distância, *dual-slope*, de Oliveira *et al.* e o modelo proposto foram considerados. A ferramenta *Curve Fitting Tool* do Matlab 7.0 foi usada na determinação dos parâmetros dos dois primeiros, ao passo que, para os demais, foi utilizada a função *regress* do mesmo *software*. A comparação de desempenho foi feita através do cálculo da raiz do erro médio quadrático (RMSE) cometido pelos modelos para  $d > 1m$ . Os resultados encontram-se na tabela X.

TABELA X  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS PARA OS  
DADOS DAS MEDIÇÕES *OUTDOOR* 1

Modelo	Parametrização	RMSE
de Young	$\beta' = 0,1995$	4,791 dB
Log.( <i>d</i> )	$n = 2,093$	5,287 dB
<i>Dual-slope</i>	$n_1 = 2; n_2 = 4; d_c = 50m$	4,553 dB
Oliveira <i>et al.</i>	$P_0 = 55,05dB; m = 0,0497$	7,433 dB
Proposto	$\beta_0 = 37,67; \beta_1 = 15,402; \beta_2 = 0,155; \beta_3 = 7,508; UR = 0,61$	3,277 dB

O comparativo com base nos dados das medições *indoor* 1 utilizou os modelos: logaritmo da distância; da ITU; logaritmo da distância com incremento da atenuação por obstáculo; modelo de Cheung, Sau e Murch; e o modelo proposto. Para os dois primeiros a ferramenta *Curve Fitting Tool* apoiou a determinação dos parâmetros, enquanto a função *regress* do Matlab 7.0 ajudou a encontrar os parâmetros do modelo proposto. Nos demais se utilizou o valor de 6,29dB para o WAF, como sugerido em [3]. Os resultados se encontram nas tabelas XI e XII e também apontam para um melhor desempenho do modelo proposto.

TABELA XI  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS PARA OS  
DADOS DAS MEDIÇÕES *INDOOR* 1, RAIA 1

Modelo	Parametrização	RMSE
ITU	$N = 20,94$	3,535 dB
Log( <i>d</i> )	$n = 2,33$	2,958 dB
Log( <i>d</i> ) c/ WAF	$n = 2; WAF = 6,29 dB$	4,181 dB
Cheung, Sal e Murch.	$n_1 = 2; n_2 = 2,5; d_c = 10m; WAF = 6,29dB; \theta = 0^\circ$	4,183 dB
Proposto	$\beta_0 = 38,63; \beta_1 = 11,157; \beta_2 = 1,724; \beta_3 = 18,417; UR = 0,67$	1,323 dB

TABELA XII  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS PARA OS  
DADOS DAS MEDIÇÕES *INDOOR* 1, RAIA 2

Modelo	Parametrização	RMSE
ITU	$N = 35,65$	3,168 dB
Log( <i>d</i> )	$n = 3,777$	3,293 dB
Log( <i>d</i> ) c/ WAF	$n = 2; WAF = 6,29 dB$	4,267 dB
Cheung, Sau e Murch.	$n_1 = 2; n_2 = 2,5; d_c = 10m; WAF = 6,29dB; \theta_1 = 54^\circ; \theta_2 = 36^\circ$	3,993 dB
Proposto	$\beta_0 = 41,87; \beta_1 = 30,598; \beta_2 = 0,607; \beta_3 = 16,844; UR = 0,67$	2,967 dB

Comparações de desempenho idênticas as já citadas foram realizadas com os dados das medições *outdoor* 2 e *indoor* 2, a fim de validar o modelo proposto uma vez que estes dados não foram utilizados em seu desenvolvimento. As tabelas XIII e XIV apresentam os resultados obtidos e também indicam o melhor desempenho do modelo proposto neste trabalho.

TABELA XIII  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS PARA OS  
DADOS DAS MEDIÇÕES *OUTDOOR* 2

Modelo	Parametrização	RMSE
de Young	$\beta' = 0,01075$	2,815dB
Log( <i>d</i> )	$n = 2,739$	2,810 dB
<i>Dual-slope</i>	$n_1 = 2; n_2 = 4; d_c = 50m$	11,431 dB
Oliveira <i>et al.</i>	$P_0 = 47,98dB; m = 0,1433$	9,642 dB
Proposto	$\beta_0 = 38,88; \beta_1 = 25,849; \beta_2 = 0,099; \beta_3 = 11,56; UR = 0,61$	2,638 dB

TABELA XIV  
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS PARA OS  
DADOS DAS MEDIÇÕES INDOOR 2

Modelo	Parametrização	RMSE
ITU	$N = 35,9$	7,932 dB
Log( $d$ )	$n = 4,235$	6,263 dB
Log( $d$ ) c/ WAF	$n = 2$ ; WAF = 6,29 dB	13,113 dB
Cheung, Sau e Murch.	$n_1 = 2$ ; $n_2 = 2,5$ ; $d_c = 10m$ ; WAF = 6,29dB; $\theta_1 = 30^\circ$ ; $\theta_2 = 60^\circ$	7,138 dB
Proposto	$\beta_0 = 41,17$ ; $\beta_1 = 19,407$ ; $\beta_2 = 2,4527$ ; $\beta_3 = 72,813$ ; UR = 0,72	2,291 dB

## VII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho levaram às seguintes conclusões:

- O modelo proposto, além de simples e inovador, apresentou desempenho superior aos encontrados na literatura;
- Os resultados das medições realizadas indicam certa relevância dos efeitos da umidade relativa do ar sobre a propagação de sinal em redes sem fio operando na faixa de 2,4 GHz de acordo com o padrão 802.11;
- Os resultados das medições também indicam que o incremento da atenuação do sinal com a distância pode ser mais bem explicado pela combinação das contribuições logarítmica e linear dessa grandeza.

E, os seguintes trabalhos futuros foram vislumbrados:

- Avaliar o impacto do aumento da atenuação sobre aspectos de interesse em redes de computadores;
- Estudar o problema da modelagem da propagação de sinais também na faixa de 5 GHz;
- Estudar possíveis efeitos da temperatura em locais onde ocorram variações mais bruscas da mesma;
- Desenvolver um algoritmo para determinação de mapas da atenuação baseado no modelo proposto.

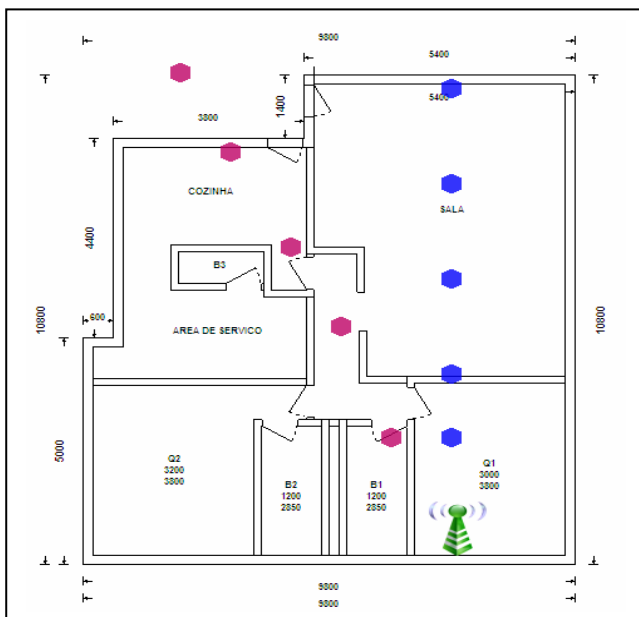


Fig. 1 - Planta baixa do ambiente indoor 1

## REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [2] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] J. Lloret et al., "A fast design model for indoor radio coverage in the 2.4 GHz wireless LAN", em *Proc. 1st International Symposium on Wireless Communications Systems*, Mauritius, 2004, pp. 408-412.
- [4] K.-W. Cheung, J.H.-M. Sau e R. D. Murch, A new empirical model for indoor propagation prediction, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 3, pp. 996-1001, Ago. 1998.
- [5] L. C. Liechty, E. Reifsnider e G. Durgin, Developing the Best 2.4 GHz Propagation Model from Active Network Measurements, *IEEE 66th Vehicular Conference*, Baltimore, 2007, pp. 894-896.
- [6] B. Sujak et al., Indoor propagation channel models for WLAN 802.11b at 2.4 GHz ISM band, em *Proc. Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, Kuala Lumpur, 2005, pp. 373-377.
- [7] J. B. Andersen, T. S. Rappaport e S. Yoshida, Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels, *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, ed. 1, pp. 42-49, Jan.1995.
- [8] G. J. M. Janssen e R. Prasad, Propagation measurements in an indoor radio environment at 2.4 GHz, 4.75 GHz and 11.5 GHz, *IEEE 42nd Vehicular Technology Conference*, Denver, 1992, vol. 2, pp. 617-620.
- [9] R. Akl, D. Tummala e X. Li, Indoor Propagation Modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 Networks, em *Proc. 6th IASTED International Multi-Conference on Wireless and Optical Communications*, Banff, 2006. Disponível em: <http://www.cse.unt.edu/~rakl/ATL06.pdf>.
- [10] S. Y. Seidel e 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, Fev. 1992.
- [11] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [12] J. N. C. de Oliveira, M. S. Alencar, V. C. da Rocha Jr. e W. T. A. Lopes, A New Propagation Model for Cellular Planning, em *Proc. VI International Telecommunications Symposium, Fortaleza*, 2006, pp. 35-37.
- [13] ITU-R Recommendations. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900MHz to 100GHz*, ITU-R P.1238-5, Suíça, Fev. 2007.
- [14] D. G. Kleinbaum et al., *Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*. California: Duxbury Press, 1998.



Fig. 2 - Planta baixa do ambiente indoor 2