

## CAPÍTULO 5

### 5.1 - Introdução

Nos projetos de implantação de sistemas celulares, a primeira etapa a ser realizada é a caracterização da propagação do sinal através medições de atenuação por percurso na região de interesse, sendo que, essas medições devem ser tomadas em diversas distâncias entre transmissor e receptor e diferentes situações de sombreamento.

As medições realizadas na área de cobertura são feitas através de um terminal móvel (TM), onde a antena receptora é instalada, juntamente com a aparelhagem necessária para a recepção sinal, e uma estação rádio base (ERB), onde está instalada a antena transmissora e o equipamento transmissor.

A análise comparativa entre os modelos é realizada através da comparação da perda prevista pelos modelos de propagação e as medidas obtidas.

### 5.2 – Campanha de Medições

As medidas de campo obtidas em uma campanha de medições na área urbana da cidade de Belém do Pará foram utilizadas para a implementação deste trabalho. Para atender ao objetivo desse trabalho, as medidas foram realizadas nas faixas de frequências de 800MHZ e 1,8GHZ.

### 5.2.1 – Medições na Faixa de 800MHZ

Nessa campanha, as medições foram realizadas em áreas distintas do centro da cidade de Belém do Pará. A antena transmissora da estação rádio base ficou a uma altura de 35 metros, localizada em uma torre metálica, a altura da antena receptora do terminal móvel era de 1,6 metros. O ganho da antena base foi de 13 dBi, e da antena receptora 0 dB, a potência de transmissão de 30 dBm e a frequência de operação de 893,67MHZ.

Na campanha o terminal móvel se deslocou, realizando medições, ao longo de duas rotas predefinidas na área central de Belém, chamadas de rota 1 e rota 2, mostradas na Figura 5.1. Na rota 1 foi abrangido um ambiente de propagação mais diversificado, passando por áreas com maior e menor grau de urbanização, enquanto que o ambiente de propagação abrangido na rota 2 caracteriza-se por um elevado grau de urbanização.

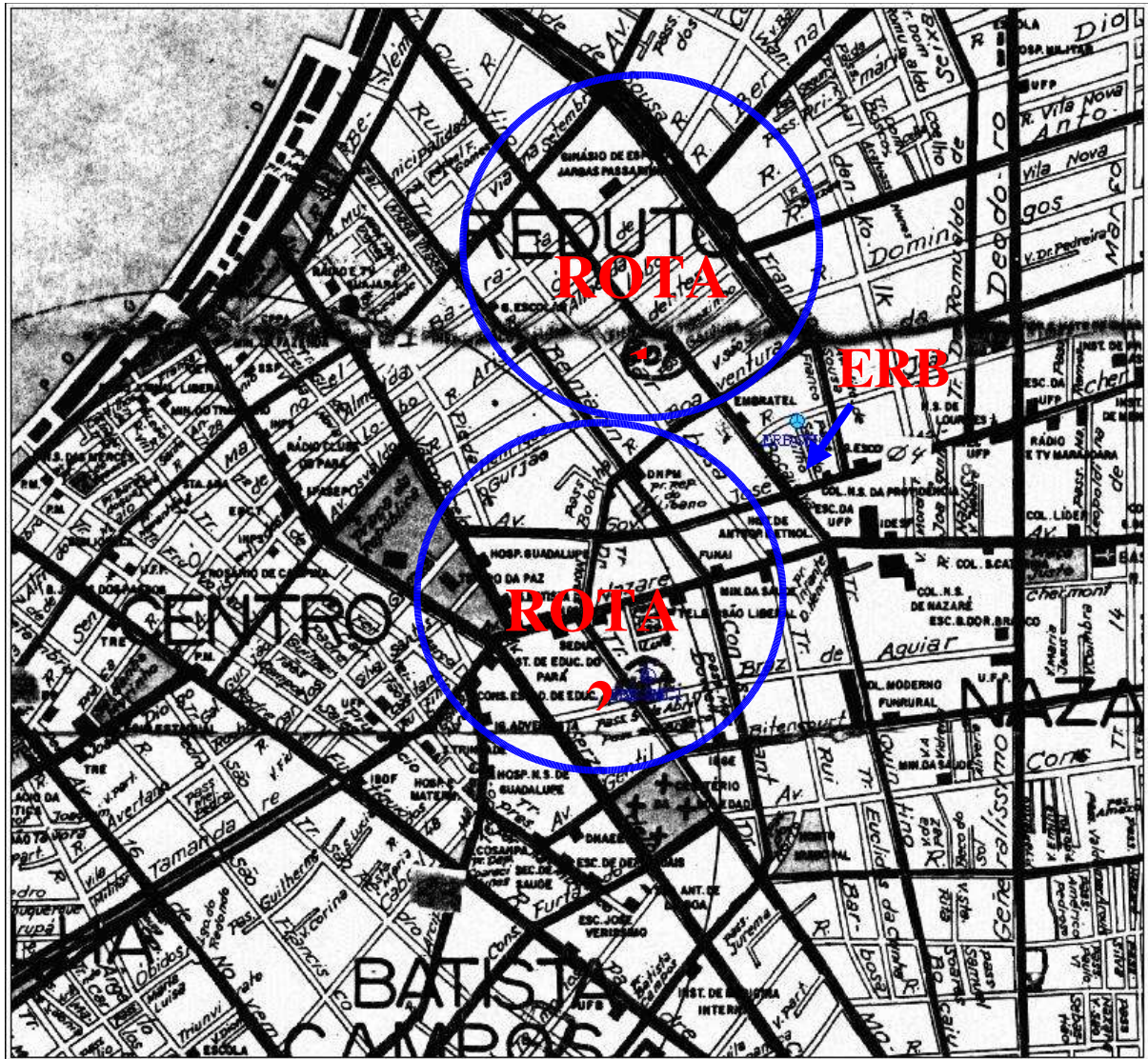


Figura 5.1 – Rotas de medições na faixa de 800MHZ

A Tabela 5.1 mostra os valores dos parâmetros da campanha de medições na faixa de 800MHz utilizados nos modelos empíricos de predição.

PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALOR
Frequência de operação	$f$	893,67 MHz
Altura da antena base (transmissora)	$h_b$	35 m
Altura da antena móvel (receptora)	$h_m$	1,6 m
Altura média dos prédios	$h$	30 m
Diferença entre $h_b$ e $h$	$H$	5 m
Largura média da rua	$s$	20 m
Distância média entre o TM e os prédios	$w$	10 m
Fator da porcentagem de prédios sobre o	$B_1$	30
Potência transmitida	$P_t$	30 dBm
Ganho da antena base	$G_b$	13 dBi
Ganho da antena móvel	$G_m$	0 dBi

Tabela 5.1 – Parâmetros da campanha de medições utilizados nos modelos empíricos de predição para a faixa de 800MHz.

### 5.2.2 – Medições na Faixa de 1,8GHz

Nessa campanha, assim como para as medições realizadas na faixa de 800MHz as medições também foram realizadas em áreas distintas do centro da cidade de Belém do Pará. A antena transmissora da estação rádio base ficou a uma altura de 38 metros, em cima de um edifício, a altura da antena receptora do terminal móvel era de 1,6 metros. O ganho de antena base foi de 16 dBi, e da

antena receptora 0dB, a potência de transmissão de 30dBm e a frequência de operação de 1808,2MHz.

Na campanha o terminal móvel se deslocou, realizando medições, ao longo de duas rotas predefinidas na área central de Belém, chamadas de rota 1 e rota 2, mostradas na Figura 5.2. Na rota 2 foi abrangido um ambiente de propagação mais diversificado, passando por áreas com maior e menor grau de urbanização, enquanto que o ambiente de propagação abrangido na rota 1 caracteriza-se por um elevado grau de urbanização.

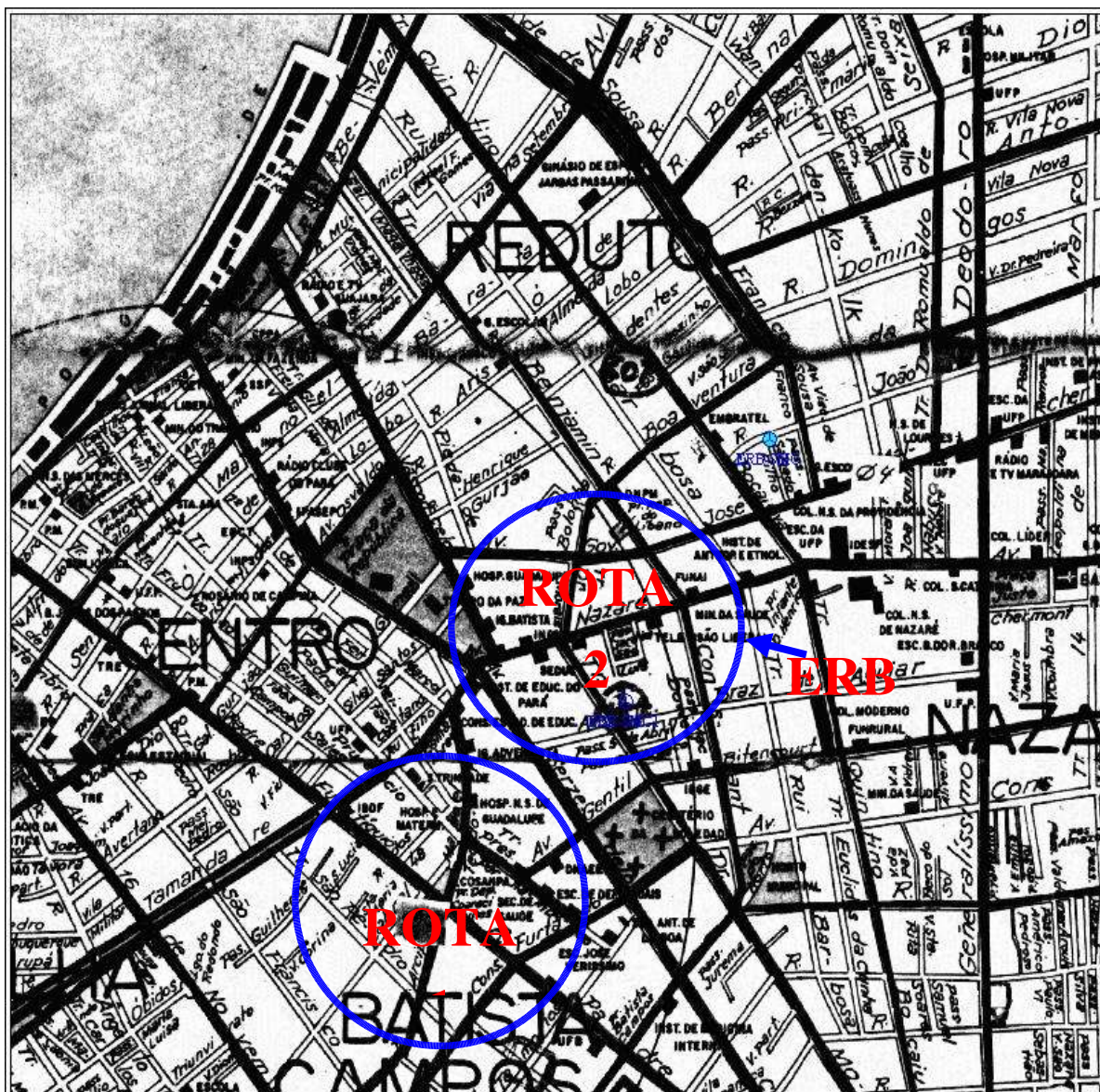


Figura 5.2 – Rotas de medições na faixa de 1,8GHZ

A Tabela 5.2 mostra os valores dos parâmetros da campanha de medições utilizados nos modelos empíricos de predição.

PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALOR
Frequência de operação	$f$	1808,2MHz
Altura da antena base (transmissora)	$h_b$	38 m
Altura da antena móvel (receptora)	$h_m$	4,0 m
Altura média dos prédios	$h$	30 m
Diferença entre $h_b$ e $h$	$H$	20 m
Largura média da rua	$s$	20 m
Distância média entre o TM e os prédios	$w$	10 m
Fator da porcentagem de prédios sobre o terreno	$B_1$	30
Potência transmitida	$P_t$	30 dBm
Ganho da antena base	$G_b$	16 dBi
Ganho da antena móvel	$G_m$	0 dBi

Tabela 5.2 – Parâmetros da campanha de medições utilizados nos modelos empíricos de predição para a faixa de 1,8GHZ.

### 5.3 – Modelos Ponto-área

Os modelos empíricos considerados neste trabalho são modelos ponto-área, ou seja, conforme mencionado no capítulo 3, levam em consideração no cálculo da atenuação fatores, tais como a urbanização e o efeito das edificações, sem se importar com o relevo.

Para analisar esses modelos, o mapa da área percorrida pelo terminal móvel foi dividido em anéis de largura de 100 metros entre um e outro, chamados de faixas, que se encontram centrados no transmissor, conforme mostrado na Figura 5.3. O valor da potência recebida foi observado em cada setor de 100 metros, sendo a distância de cada setor ao transmissor aproximada pela distância da faixa que o mesmo está do transmissor. Em cada faixa foi calculada a média do sinal recebido nos setores que se encontram dentro da faixa, chamada de média da faixa ( $MF_i$ ), obtendo-se dessa forma uma série de pontos (um para cada faixa de distância), que representam um valor médio do sinal recebido.

Foram encontrados 26 valores médios do sinal recebido para a rota 1 e outros 26 para a rota 2 para as medidas obtidas na faixa de frequência de 800MHz e 19 valores médios do sinal recebido para as rotas da campanha de medição na faixa de 1,8GHz, relacionados com as respectivas faixas de distância de cada rota.

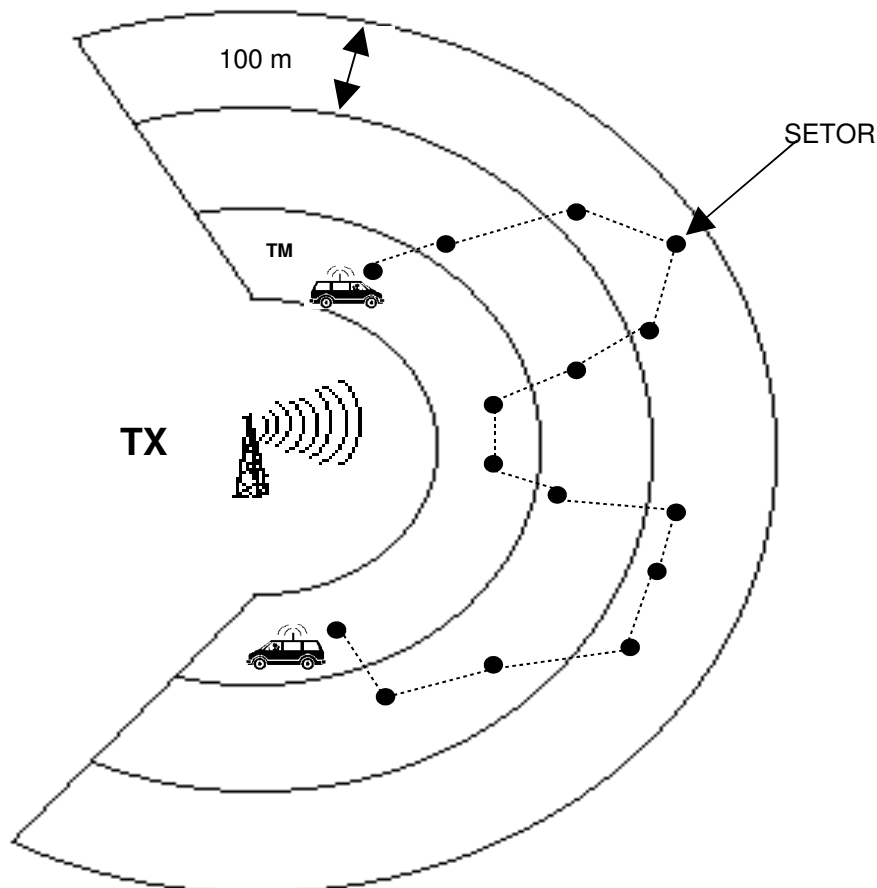


Figura 5.3 – Faixas de 100 m de largura

#### 5.4 – Implementação das RNA's que Comporão os Modelos Híbridos de Predição (MHP)

O conjunto de treinamento das redes será formado pelos valores do erro absoluto do modelo adaptado considerado associados às respectivas faixas de distância estabelecidas para a rota 1.

O conjunto de teste das redes será formado pelos valores do erro absoluto do modelo adaptado considerado associados às respectivas faixas de distância estabelecidas para a rota 2.

A Tabela 5.3 mostra os parâmetros utilizados na fase de treinamento, fase essa que visou o estabelecimento dos pesos e polarizações definitivos e aprovados na fase de teste.

<b>1ª CAMADA</b>	Nº de neurônios	36
	Função de ativação dos neurônios	Sigmóide
<b>2ª CAMADA</b>	Nº de neurônios	6
	Função de ativação dos neurônios	Tangente hiperbólica

<b>3ª CAMADA</b>	Nº de neurônios	1
	Função de ativação dos neurônios	Linear
<b>Número máximo de épocas de treinamento</b>	10.000	
<b>Erro médio quadrático</b>	$5 \times 10^{-4}$	
<b>Taxa de aprendizagem</b>	0,01	
<b>Incremento da taxa de aprendizagem</b>	1,05	
<b>Decremento da taxa de aprendizagem</b>	0,7	
<b>Constante de momento</b>	0,95	

Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados na fase de treinamento das RNA's

## 5.5 – Comparação entre os Modelos

Na análise comparativa desses modelos, conforme já comentado, o enfoque é voltado para a dependência do sinal recebido com a distância. Os modelos empíricos são função da distância e outros fatores constantes como frequência, altura das antenas, tamanho da cidade, altura dos prédios, largura das ruas, etc., (Tabelas 5.1 e 5.2); já os modelos adaptados e híbridos são basicamente função da distância entre transmissor e receptor.

A comparação quantitativa dos modelos é feita analisando-se as estatísticas de erro de cada modelo em relação aos valores medidos. O erro absoluto (E), equação 5.1, entre medidas e previsão é calculado, para cada faixa de distância, por:

$$E_i = |MF_i - K_i| \quad (5.1)$$

onde j é a faixa de distância,  $MF_i$  é a média da faixa i e  $K_i$  é o valor previsto por um determinado modelo para a faixa i.

O erro médio absoluto, equação 5.2, é calculado a partir do erro absoluto (5.1) e dado por:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i \quad (5.2)$$

onde M é o número de faixas medidas e i é a faixa de distância.

O desvio absoluto,  $\sigma$ , equação 5.3, é calculado a partir do erro absoluto (5.1) e do erro médio absoluto (5.2) [18].

$$= \sqrt{\frac{1}{(M-1)} \cdot \left( \sum_{i=1}^M E_i^2 - M \bar{E}^2 \right)}$$

(5.3)

O erro RMS é calculado, pela associação dos erros (5.2) e (5.3)

$$E_{RMS} = \sqrt{\bar{E}^2 + \frac{1}{M-1} \left( \sum_{i=1}^M E_i^2 - M \bar{E}^2 \right)}$$

(5.4)

## 5.6 – Resultados Obtidos

### 5.6.1 – Resultados Obtidos para a Faixa de 800MHZ

A partir dos valores obtidos em campo e das predições obtidas através das simulações dos modelos empíricos de Okumura-Hata (O-H), Walfisch-Bertoni (W-B), Maciel-Bertoni-Xia (M-B-X) e Ibrahim-Parsons (I-P) para a rota 1 (Apêndice A- Tabela A1) pode-se calcular o expoente de perda de propagação de cada modelo. Esses valores foram calculados a partir das equações 3.9 e 3.43 repetidas aqui por conveniência. Os valores calculados são mostrados na Tabela 5.4.

$$1 = \frac{44,9 - 6,55 \cdot \log(h_b)}{10}$$

$$M \cdot \sum_{i=1}^M \left[ \log(d_i) \cdot \text{Pr}_i \right] - \sum_{i=1}^M \log(d) \cdot \frac{\sum_{i=1}^M \text{Pr}_i}{10 \cdot \left\{ M \cdot \sum_{i=1}^M \log^2(d_i) - \left[ \sum_{i=1}^M \log(d_i) \right]^2 \right\}} = 0$$

Dados	Equação	Alfa (α)
Okumura-Hata [O-H]	3.9	3,48
Walfisch-Bertoni [W-B]	3.43	3,85
Maciel-Bertoni-Xia [M-B-X]	3.43	3,80
Ibrahim-Parsons [I-P]	3.43	4,26
Medidas	3.43	3,04

Tabela 5.4 – Valores de α para a rota 1.

Observa-se na Tabela 5.4 que o modelo de Okumura-Hata possui um expoente de perda de propagação mais próximo ao expoente de perdas das medidas obtidas em ambiente real.

Na Tabela 5.5 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo empírico considerado para a rota 1.

<b>Rota 1</b>			
<b>Modelos empíricos tradicionais</b>	<b>Erro médio absoluto (dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Erro rms (dB)</b>
Okumura-Hata [O-H]	3,76	3,02	4,82
Walfisch-Bertoni [W-B]	20,49	4,85	21,06
Maciel-Bertoni-Xia [M-B-X]	6,46	4,75	8,01
Ibrahim-Parsons [I-P]	7,10	3,51	7,92

Tabela 5.5 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos empíricos para a rota 1.

A Figura 5.4 mostra graficamente as previsões dos modelos empíricos de previsão para a rota 1 (Apêndice A-Tabela A1).

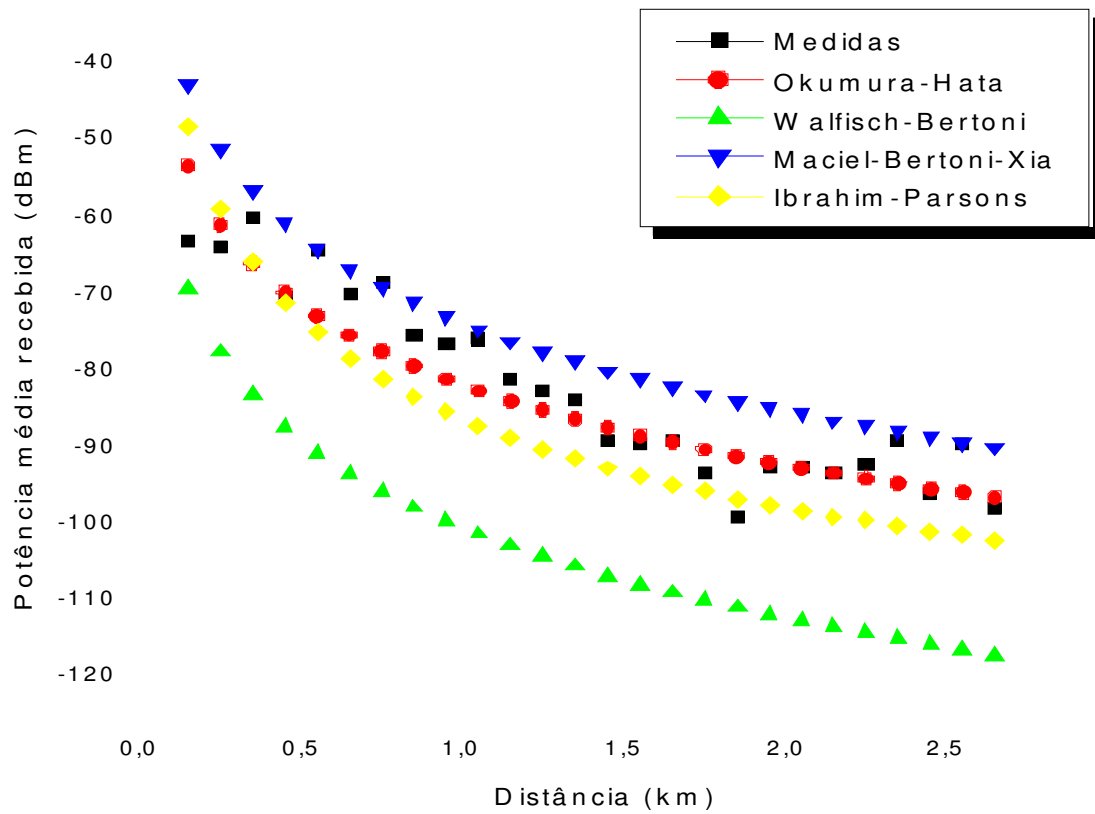


Figura 5.4 – Gráfico da estimativa dos modelos empíricos de predição para a rota 1

Após adaptação dos modelos de Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim-Parsons (I-P) para a rota 1 (Apêndice A-Tabela A2) a partir do método descrito no capítulo 3, obtém-se os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo adaptado.

<b>Rota 1 – Adaptação</b>			
<b>Modelos empíricos adaptados</b>	<b>Erro médio absoluto (dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Erro rms (dB)</b>
Okumura-Hata Adaptado [O-H-A]	3,75	2,63	4,58
Walfisch-Bertoni Adaptado [W-B-A]	3,36	2,75	4,34
Maciel-Bertoni-Xia Adaptado [M-B-X-A]	2,70	2,17	3,46
Ibrahim-Parsons Adaptado [I-P-A]	2,25	1,85	2,91

Tabela 5.6 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos adaptados para a rota 1.

A Figura 5.5 mostra graficamente as previsões dos modelos adaptados de Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim-Parsons, para a rota 1.

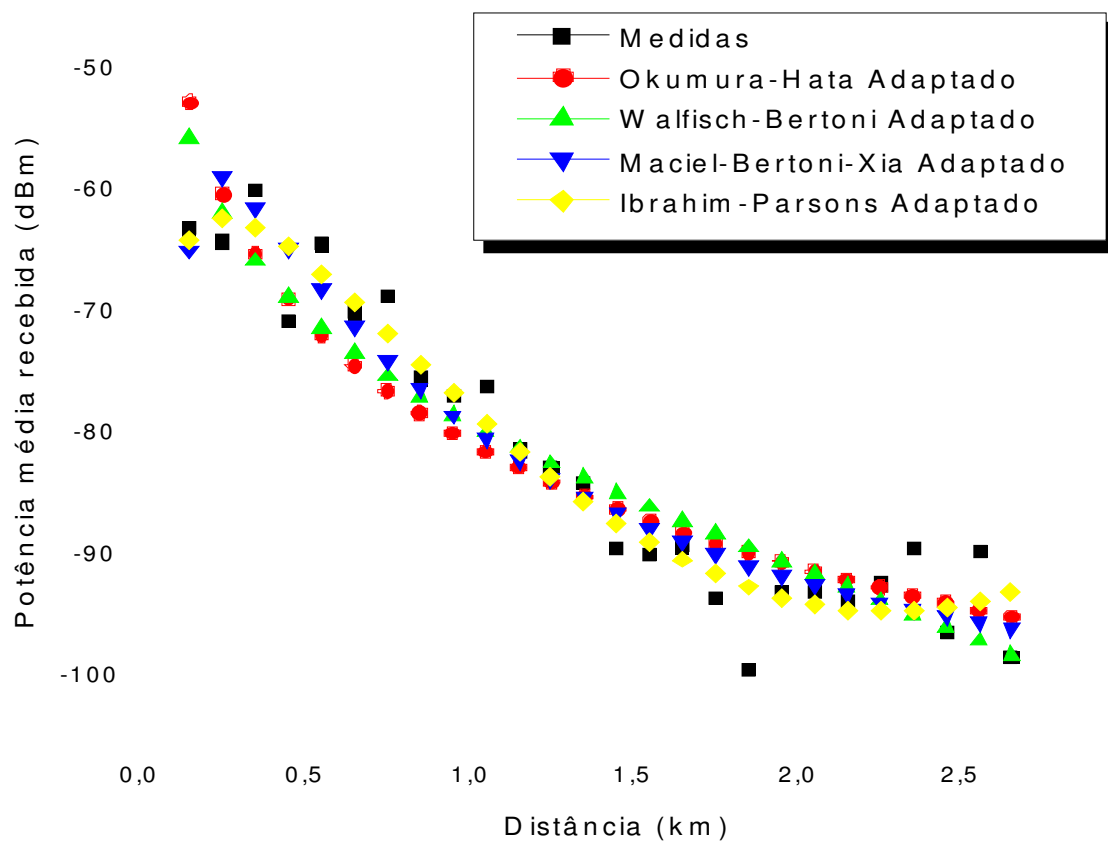


Figura 5.5 – Gráfico da estimativa dos modelos adaptados de predição para a rota 1

Os valores dos erros absolutos da predição de propagação de cada um dos modelos adaptados para a rota 1 (Apêndice A-Tabela A3) em função da distância entre o receptor móvel e a antena transmissora constituirão os pares de treinamento da rede neural artificial que irá compor o respectivo modelo híbrido de predição.

Após o treinamento das RNA's irão compor os modelos híbridos de Okumura-Hata (RNA-O-H), Walfisch-Bertoni (RNA-W-B), Maciel-Bertoni-Xia (RNA-M-B-X) e Ibrahim-Parsons (RNA-I-P) (Apêndice A-Tabela A4), as respectivas RNA's apresentaram os seguintes erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes mostrados na Tabela 5.7. A Na Figura 5.6 a análise estatística desses erros é apresentada graficamente em forma de histograma.

Rota 1 – Treinamento -			
Rede Neural Artificial	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
RNA-Okumura-Hata	0,0209	0,0391	0,0443
RNA-Walfisch-Bertoni	0,0251	0,0366	0,0444
RNA-Maciel-Bertoni-Xia	0,0192	0,0402	0,0445
RNA-Ibrahim-Parsons	0,0144	0,0422	0,0446

Tabela 5.7 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 1.

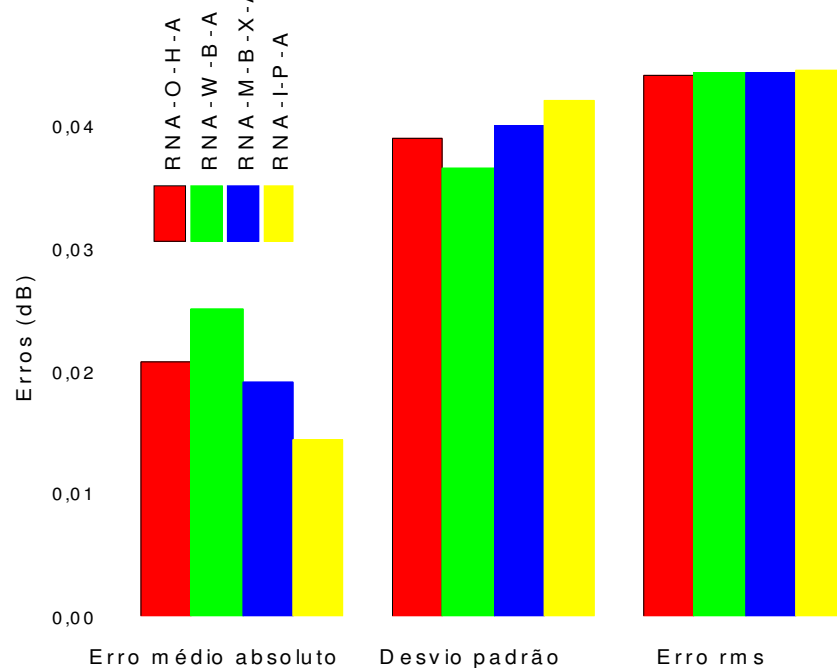


Figura 5.6 – Gráfico comparativo entre os desempenhos das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 1

Na Tabela 5.8 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo híbrido para a rota 1, implementado de acordo com Equação 4.18. As predições dos modelos híbridos para a rota 1 (Apêndice A-Tabela A5) são mostradas graficamente na Figura 5.7.

<b>Rota 1-Treinamento</b>			
<b>Modelos Híbridos de predição</b>	<b>Erro médio absoluto (dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Erro rms (dB)</b>
Okumura-Hata Híbrido [O-H-H]	0,0209	0,0391	0,0443
Walfisch-Bertoni Híbrido [W-B-H]	0,0251	0,0366	0,0444
Maciel-Bertoni-Xia Híbrido [M-B-X-H]	0,0192	0,0402	0,0445
Ibrahim-Parsons Híbrido [I-P-H]	0,0144	0,0422	0,0446

Tabela 5.8 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos híbridos para a rota 1.

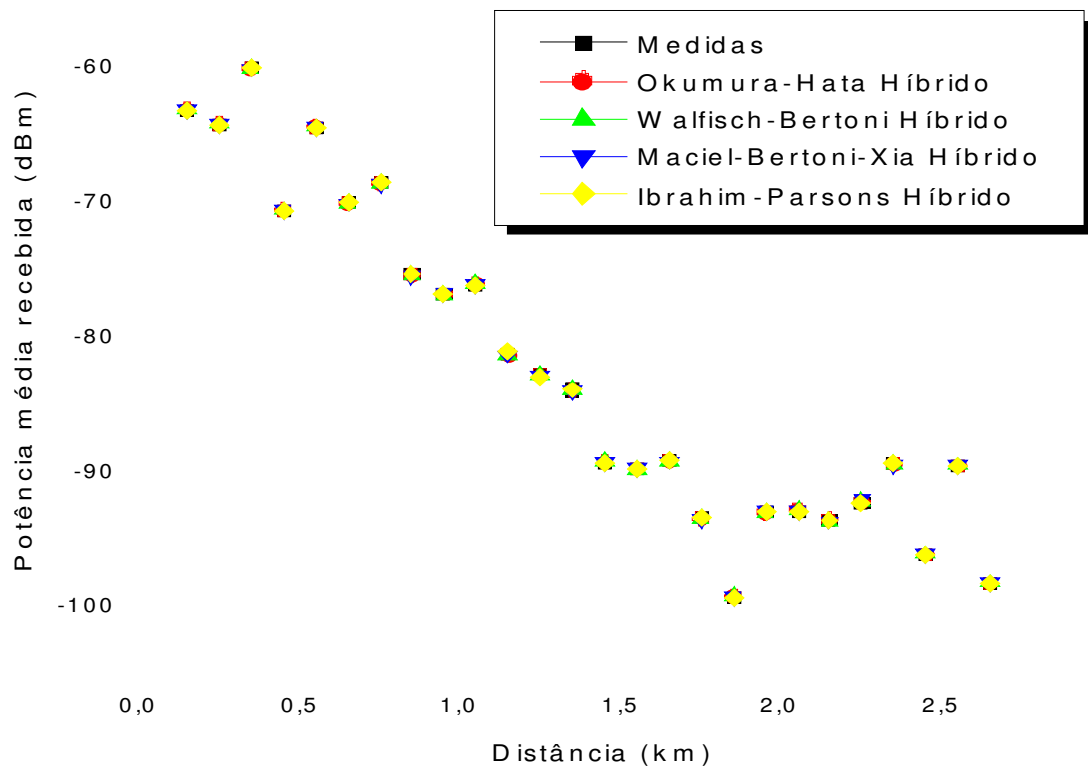


Figura 5.7 – Gráfico da estimativa dos modelos híbridos de predição para a rota 1

A seguir as Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 mostram as fases de adaptação para cada um dos modelos empíricos de Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim-Parsons, ou seja, a comparação gráfica das predições do modelo empírico de propagação tradicional e seu respectivo modelo adaptado e híbrido para a rota 1.

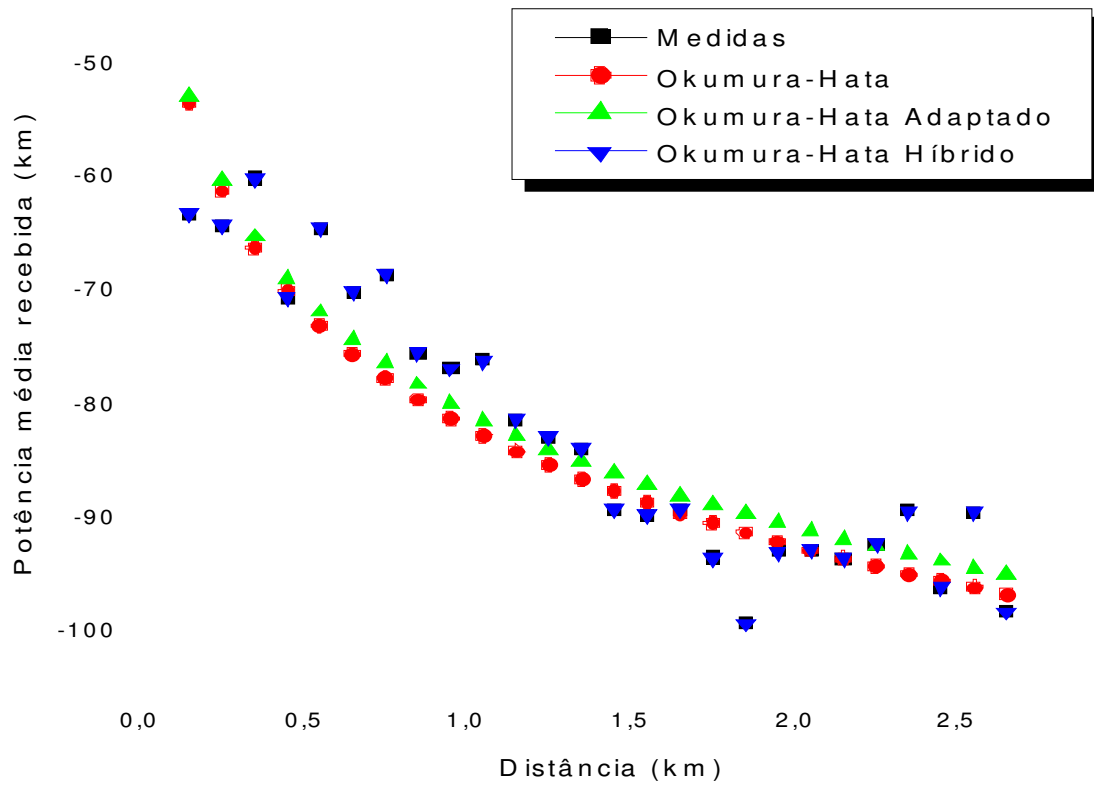


Figura 5.8 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Okumura-Hata para a rota 1

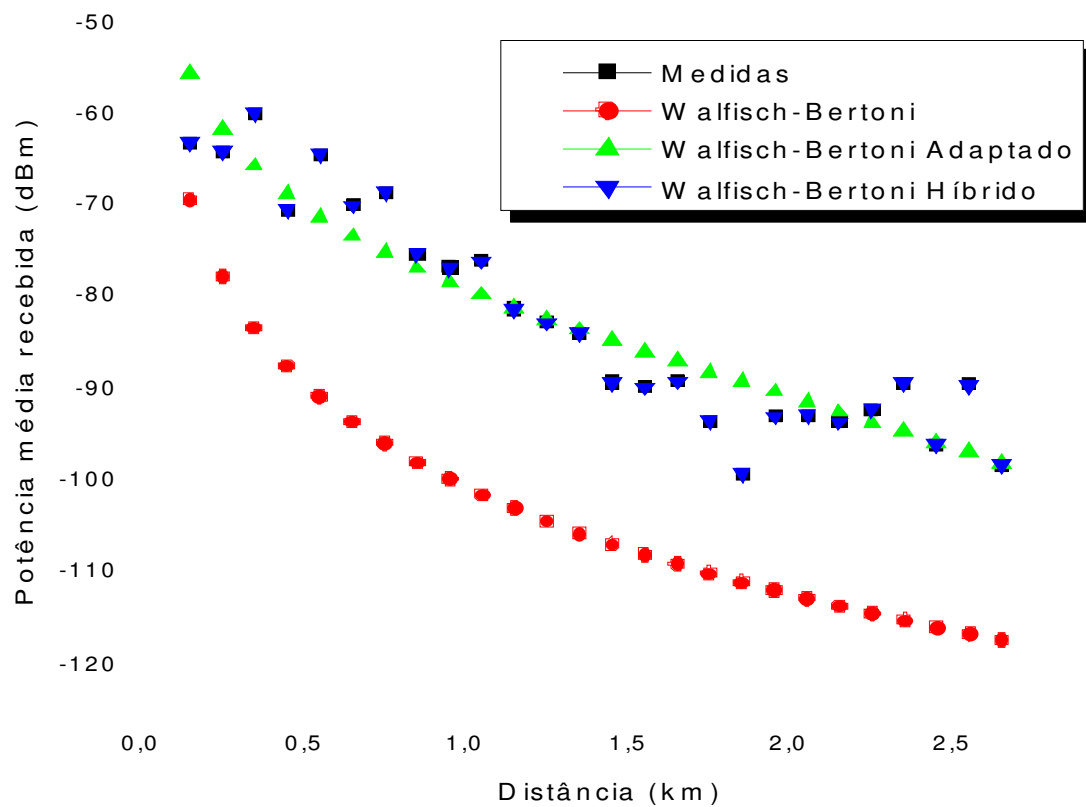


Figura 5.9 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Walfisch-Bertoni para a rota 1

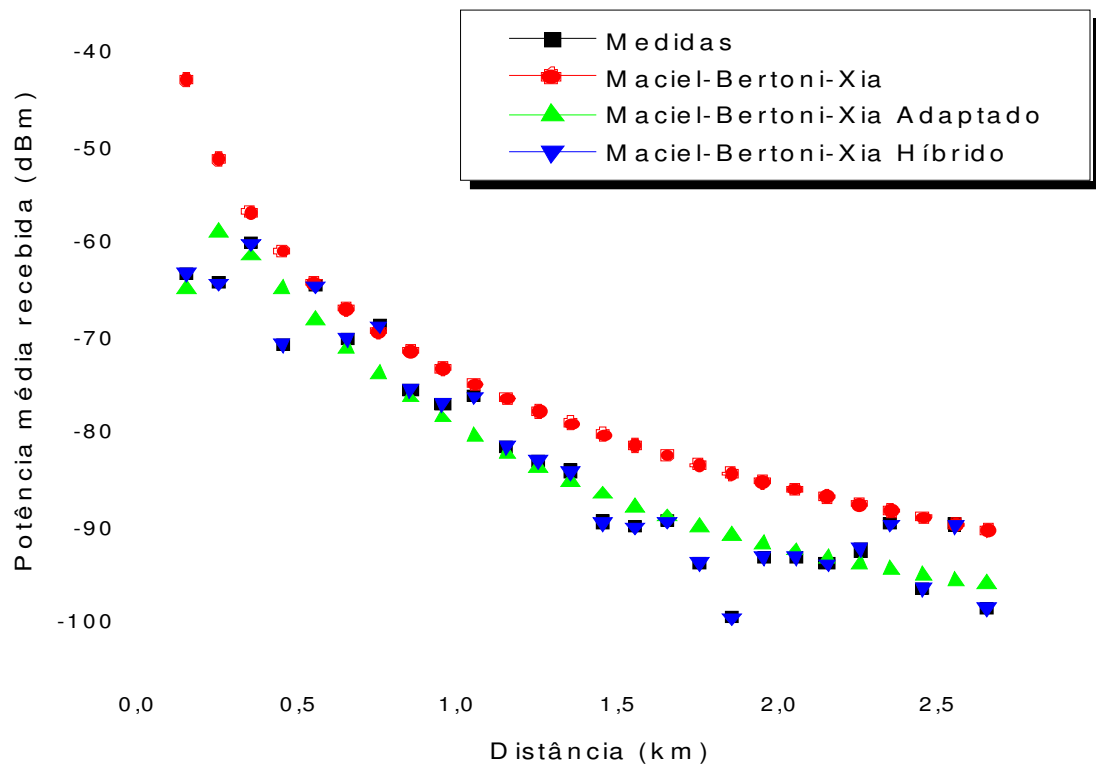


Figura 5.10 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Maciel-Bertoni-Xia para a rota 1

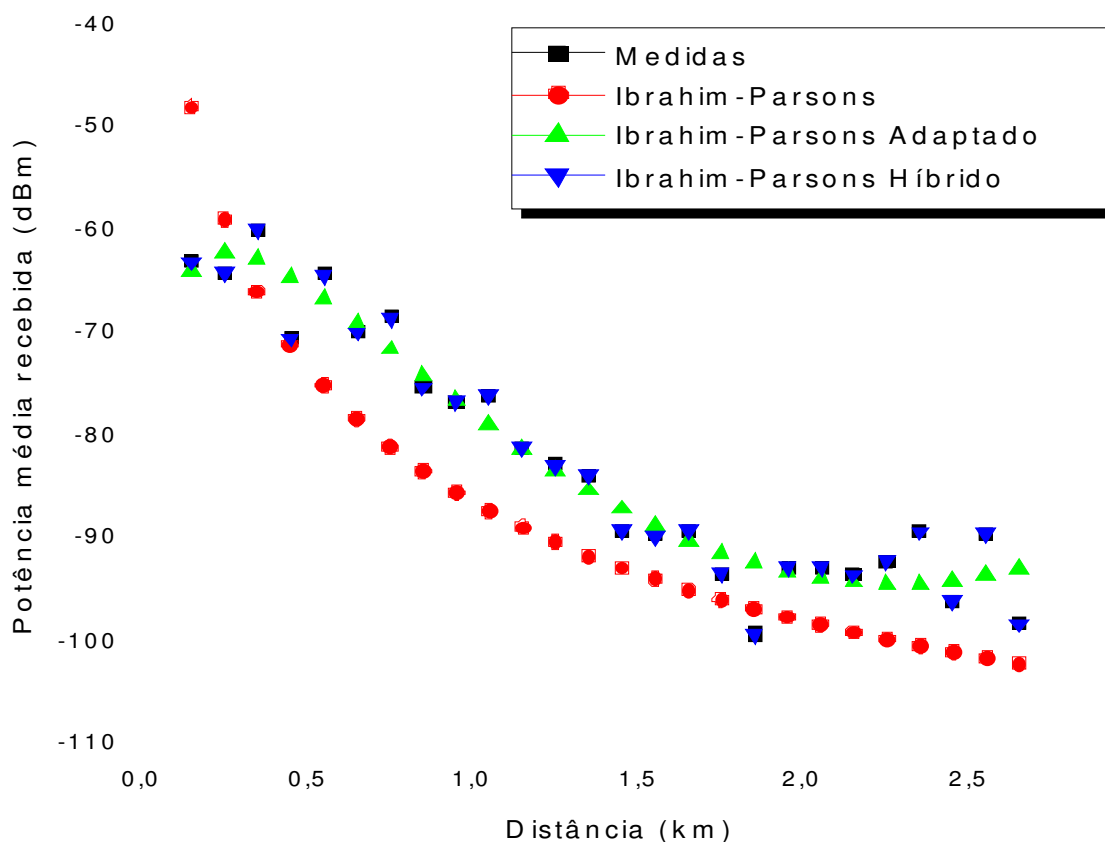


Figura 5.11 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Ibrahim-Parsons para a rota 1

Dentre os modelos empíricos, o modelo de Okumura-Hata teve o melhor desempenho, tendo um erro médio absoluto de 4,82 dB, desvio padrão de 3,02 dB e erro rms de 4,82 dB. Pode-se observar ainda, que o modelo de Walfisch-Bertoni apresentou os maiores erros para a rota 1, tendo um erro médio absoluto de 20,49 dB, desvio padrão de 4,85 dB e erro rms de 21,06 dB.

Quanto aos modelos de Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim Parsons, estes apresentaram resultados bons, suas previsões tiveram um erro médio absoluto de

6,46 dB e 7,10 dB, desvio padrão de 4,75 dB e 3,51dB e erro rms de 8,01 e 7,92 dB, respectivamente.

Dentre os modelos de predição adaptados, o modelo de Ibrahim-Parsons teve o melhor desempenho, tendo erro médio absoluto de 2,25 dB, desvio padrão de 1,85 dB e erro rms de 2,91 dB.

Pode-se observar ainda, que o modelo adaptado de Okumura-Hata apresentou os maiores erros para a rota 1, porém tanto este modelo quanto os modelos de Walfisch-Bertoni, Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim-Parsons apresentaram melhor desempenho em comparação com seus respectivos modelos empíricos.

Quanto aos modelos híbridos de predição, todos os modelos tiveram quase que o mesmo desempenho. Isso se deve ao excelente aprendizado das redes neurais artificiais que compõem esses modelos, e tiveram erro médio absoluto, desvio padrão e erro rms próximos de zero de acordo com a Tabela 5.7. Pode-se observar nas Tabelas nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.8 e através das Figuras 5.8-5.11, que os modelos adaptados e híbridos de predição tiveram melhor desempenho.

Ainda não se pode avaliar os desempenhos dos modelos adaptados e híbridos de predição em relação aos demais modelos empíricos de predição, pois a rota 1 foi utilizada para a modelagem dos modelos adaptados e treinamento das redes neurais que compõem os modelos híbridos de predição.

A avaliação do desempenho desses modelos em relação aos demais modelos tradicionais de predição será feita a partir da rota 2.

A partir da predição dos modelos empíricos de propagação para a rota 2 (Apêndice A-Tabela A6) pode-se calcular o expoente de perda de propagação das medidas obtidas para esta rota. A partir da equação 3.43 obtém-se  $\alpha=3,37$  para as medidas obtidas na rota 2.

Verifica-se que o expoente de perda de propagação do modelo de Okumura-Hata igual a 3,48 é o que mais se aproxima do valor de  $\alpha$  obtido para as medidas obtidas na rota 2. Os valores calculados são mostrados na Tabela 5.9.

Dados	Equação	Alfa ( $\alpha$ )	Alfa ( $\alpha$ )
		Rota 1	Rota 2
Okumura-Hata [O-H]	3.9	3,48	3,48
Walfisch-Bertoni [W-B]	3.43	3,85	3,85
Maciel-Bertoni-Xia [M-B-X]	3.43	3,80	3,80
Ibrahim-Parsons [I-P]	3.43	4,26	4,26
Medidas	3.43	3,04	3,37

Tabela 5.9 – Valores de  $\alpha$  para as rotas 1 e 2.

Na Tabela 5.10 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo empírico considerado para a rota 2.

Rota 2			
Modelos empíricos tradicionais	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata [O-H]	5,57	4,10	6,91
Walfisch-Bertoni [W-B]	18,51	7,14	19,84
Maciel-Bertoni-Xia [M-B-X]	9,46	5,52	10,95
Ibrahim-Parsons [I-P]	6,71	5,89	8,93

Tabela 5.10 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos empíricos para a rota 2

A Figura 5.12 mostra graficamente a predição dos modelos empíricos de predição para a rota 2.

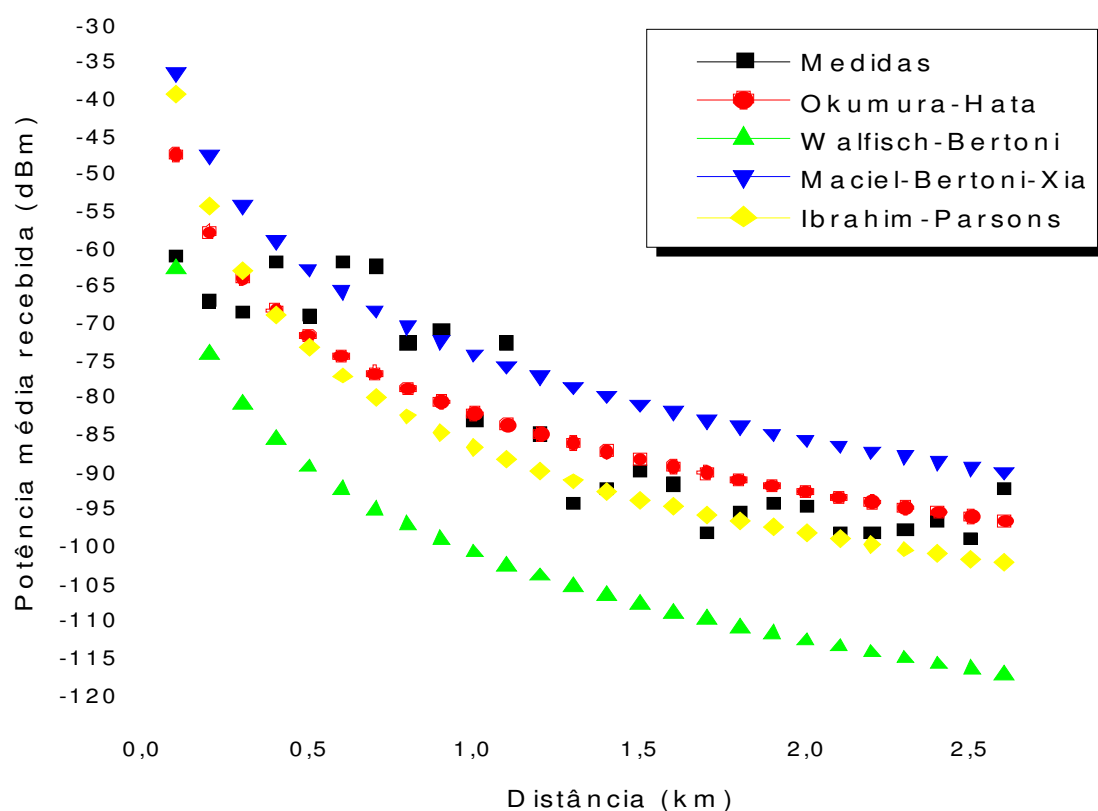


Figura 5.12 – Gráfico da estimativa dos modelos empíricos de predição para a rota 2

A Tabela 5.11 mostra os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo adaptado para a rota 2. A Figura 5.13 mostra graficamente a predição dos modelos adaptados de predição para a rota 2 (Apêndice A-Tabela A7).

Rota 2 – Teste			
Modelos empíricos adaptados	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata Adaptado [O-H-A]	5,52	4,13	6,89
Walfisch-Bertoni Adaptado [W-B-A]	5,17	3,45	6,22
Maciel-Bertoni-Xia Adaptado [M-B-X-A]	4,44	3,52	5,67
Ibrahim-Parsons Adaptado [I-P-A]	3,30	2,77	4,31

Tabela 5.11 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos adaptados para a rota 2

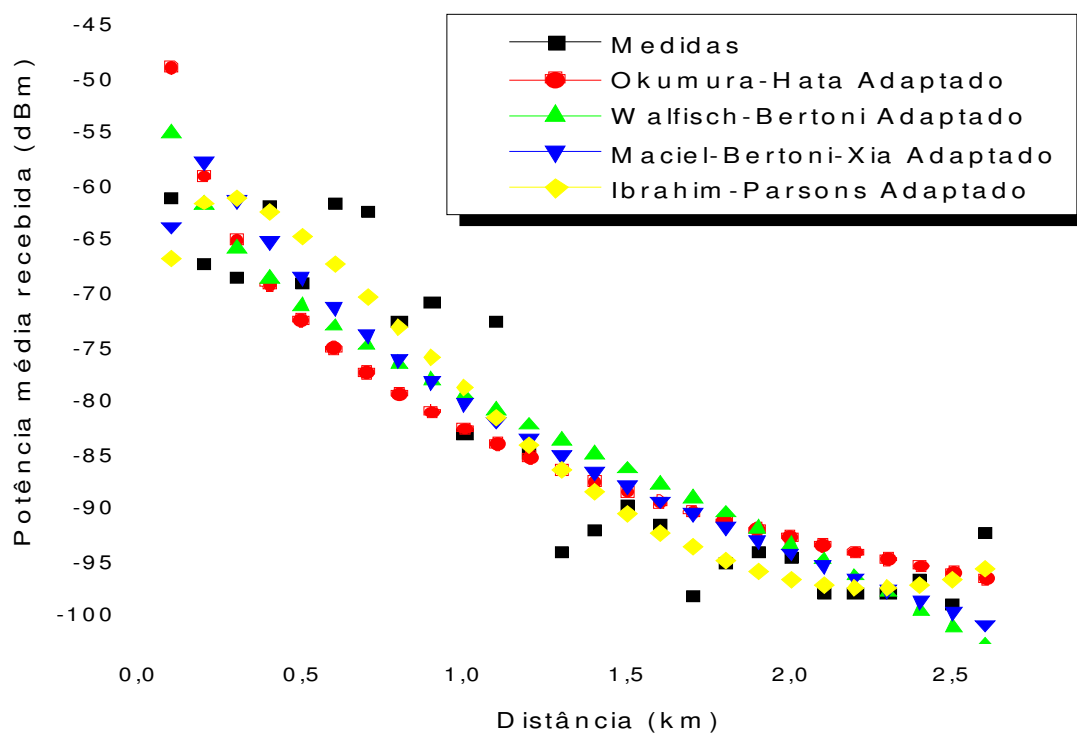


Figura 5.13 – Gráfico da estimativa dos modelos adaptados de predição para a rota 2

A Tabela 5.12 mostra os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes, apresentados pelas saídas das RNA's (Apêndice A-Tabela A8) testadas com os erros absolutos dos modelos adaptados de predição para a rota 2 (Apêndice A-Tabela A9).

Rota 2 – Teste			
Rede Neural Artificial	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
RNA-Okumura-Hata	4,14	3,16	5,21
RNA-Walfisch-Bertoni	3,97	3,00	4,97
RNA-Maciel-Bertoni-Xia	3,86	3,29	5,07
RNA-Ibrahim-Parsons	4,32	2,73	5,10

Tabela 5.12 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 2.

Na Figura 5.14 a análise estatística destes erros é apresentada graficamente em forma de histograma.

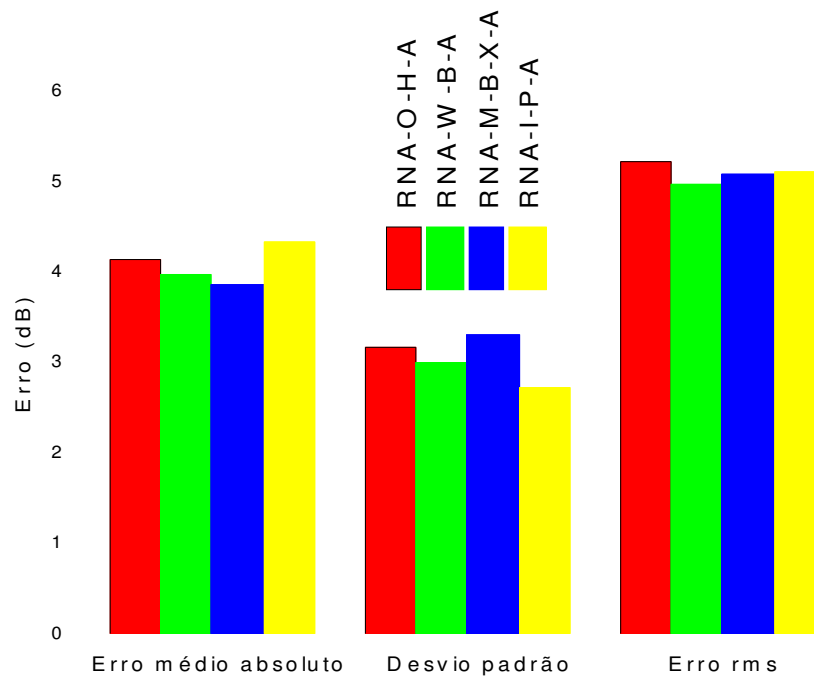


Figura 5.14 – Gráfico comparativo entre os desempenhos das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 2

Na Tabela 5.13 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo híbrido para a rota 2, implementados de acordo com Equação 4.18. As predições dos modelos híbridos para a rota 2 (Apêndice A-Tabela A10) são mostradas graficamente na Figura 5.7.

Rota 2-Teste			
Modelos Híbridos de predição	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata Híbrido [O-H-H]	4,14	3,16	5,21
Walfisch-Bertoni Híbrido [W-B-H]	3,97	3,00	4,97

Maciel-Bertoni-Xia Híbrido [M-B-X-H]	3,86	3,29	5,07
Ibrahim-Parsons Híbrido [I-P-H]	4,32	2,73	5,10

Tabela 5.13 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos híbridos para a rota 2.

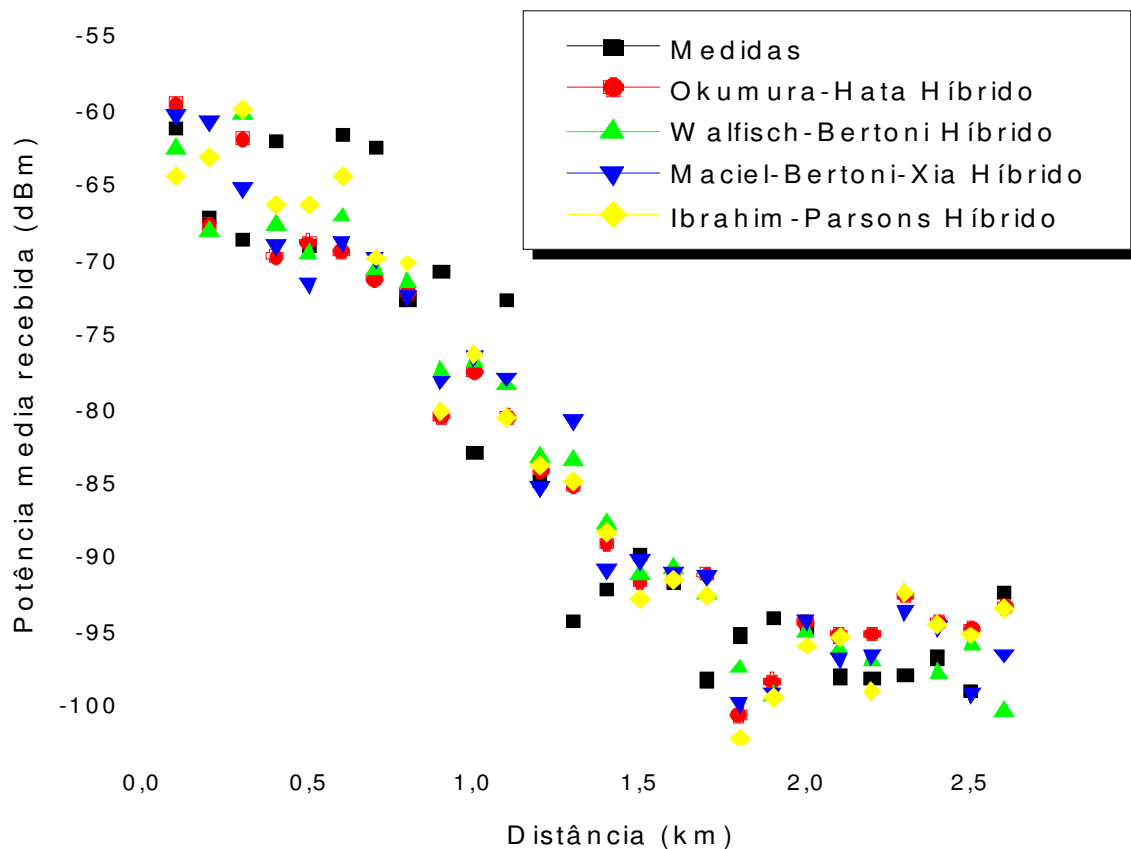


Figura 5.15 – Gráfico da estimativa dos modelos híbridos de predição para a rota 2

A seguir as Figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.18 apresentam uma comparação gráfica entre os modelos empíricos tradicionais de Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni,

Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim-Parsons, e seus respectivos modelos adaptados e híbridos para a rota 2.

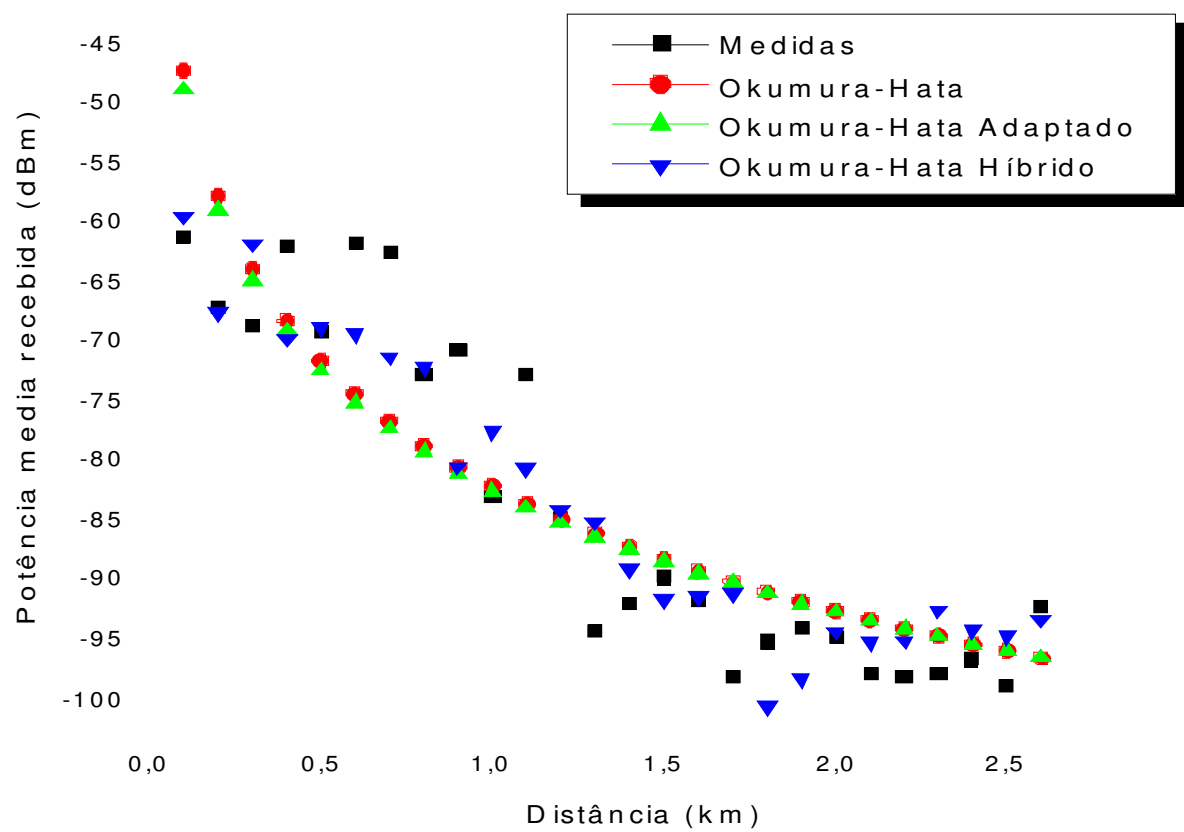


Figura 5.16 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de

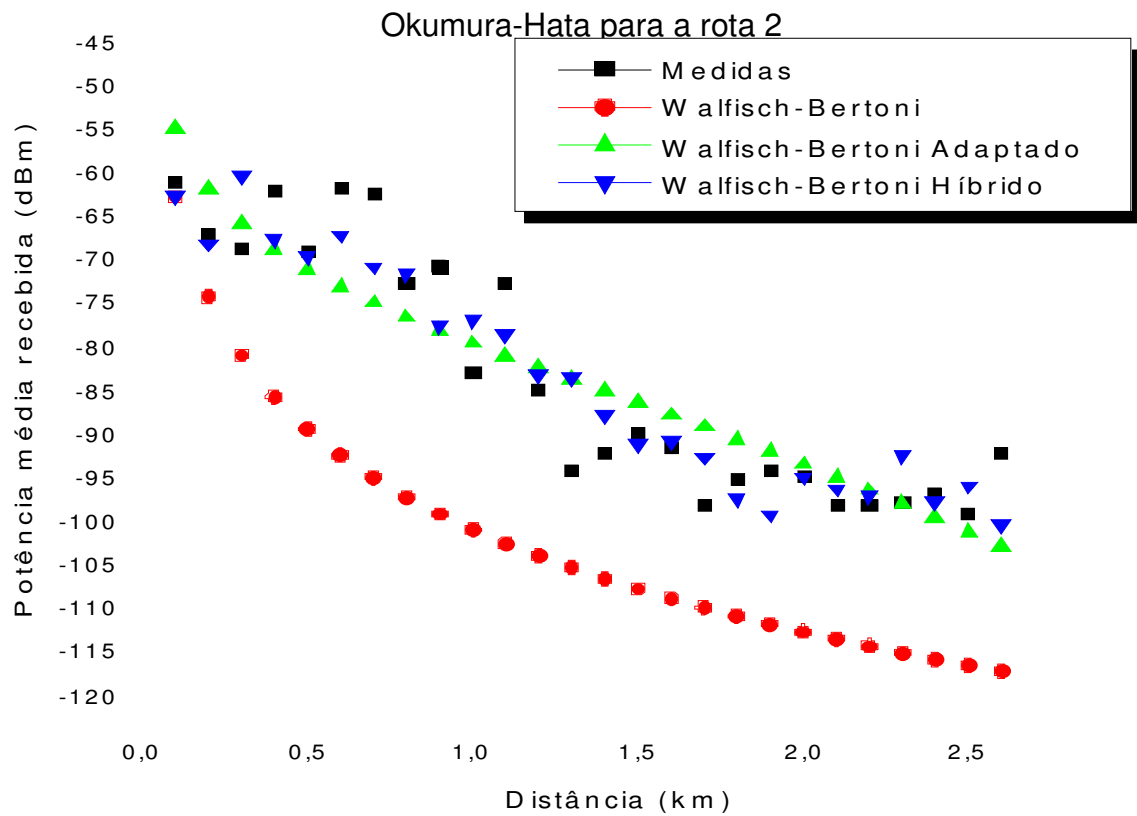


Figura 5.17 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de

Walfisch-Bertoni para a rota 2

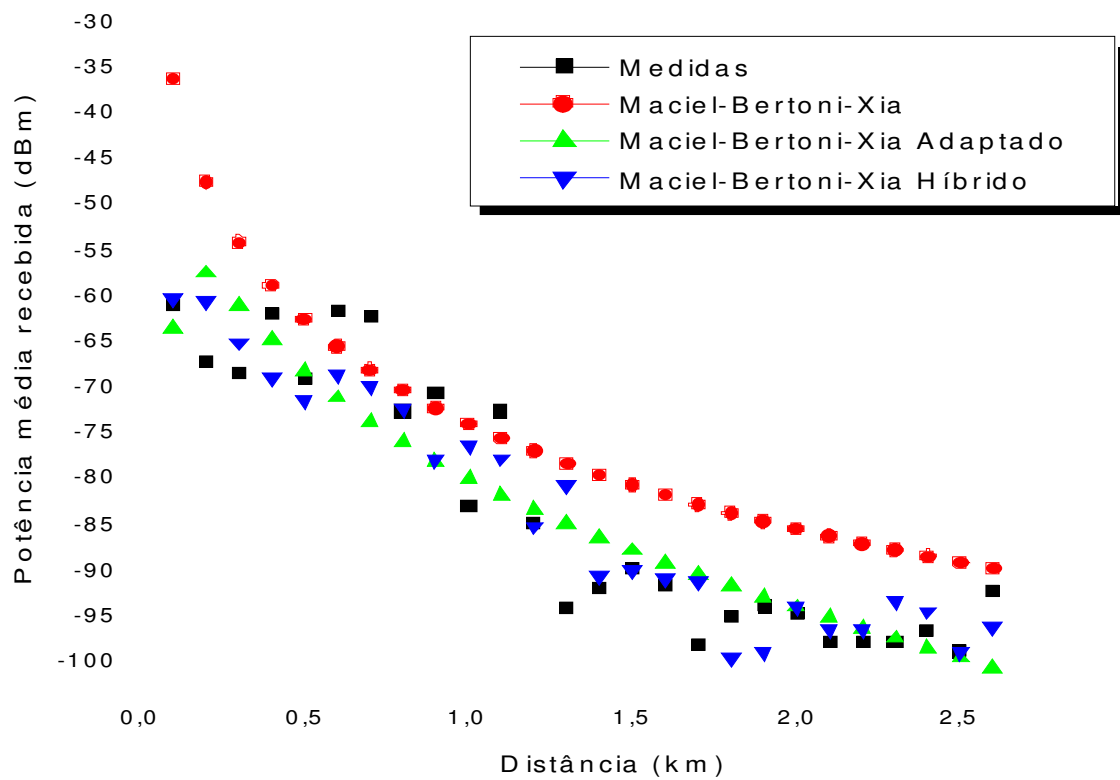


Figura 5.18 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Maciel-Bertoni-Xia para a rota 2

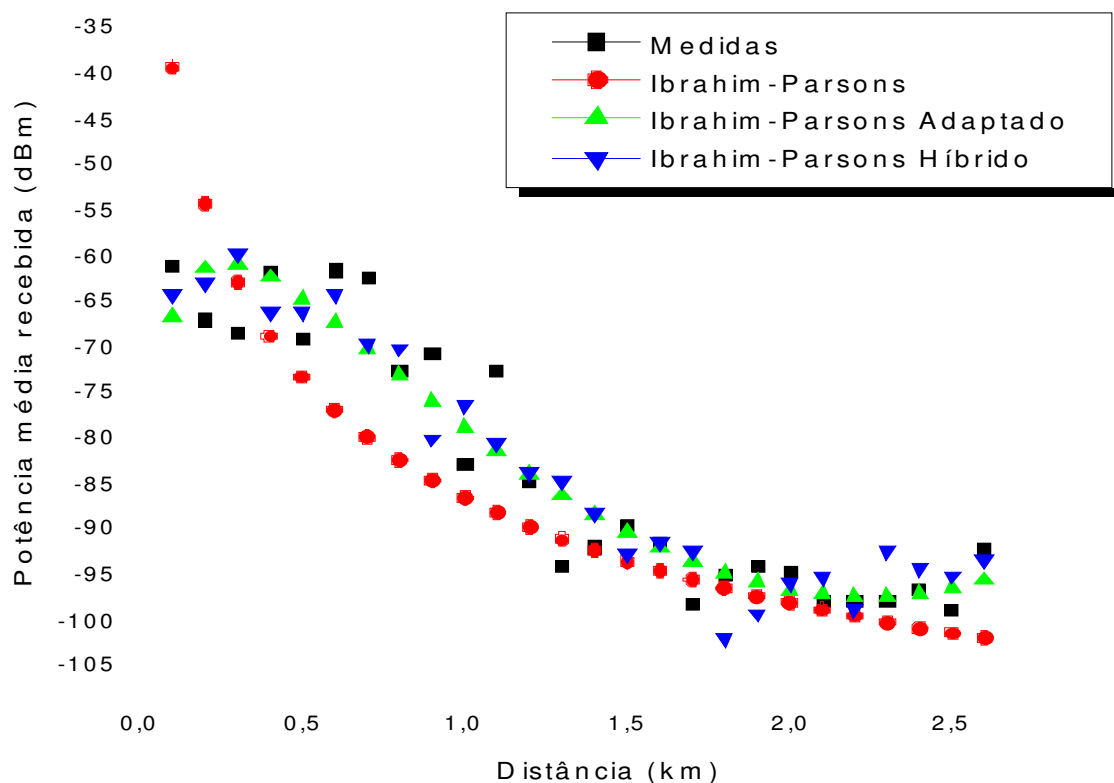


Figura 5.19 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Ibrahim-Parsons para a rota 2

Pode-se observar mais uma vez a partir das Tabelas 5.10, 5.11 e 5.13 e através das Figuras 5.16-5.19, que os modelos adaptados e híbridos de predição foram os que tiveram melhor desempenho em relação aos seus respectivos modelos empíricos convencionais também para o rota 2.

Dentre os modelos empíricos, o modelo de Okumura-Hata teve o melhor desempenho, tendo um erro médio absoluto de 5,57 dB, desvio padrão de 4,10 dB e erro rms de 6,91 dB. Pode-se observar ainda, que o modelo de Walfisch-Bertoni apresentou os maiores erros para a rota 2, tendo um erro médio absoluto de 18,51 dB, desvio padrão de 7,14 dB e erro rms de 19,84 dB.

Quanto aos modelos de Ibrahim-Parsons e Maciel-Bertoni-Xia, estes apresentaram resultados bons, suas previsões tiveram um erro médio absoluto de 6,71 dB e 9,46 dB, desvio padrão de 5,89 dB e 5,52 dB e erro rms de 8,93 e 10,95 dB, respectivamente.

Dentre os modelos de predição adaptados, assim como para a rota 1 os modelos de Ibrahim-Parsons e Maciel-Bertoni-Xia tiveram o melhor desempenho, tendo respectivamente erro médio absoluto de 3,30 dB e 4,44 dB, desvio padrão de 2,77 dB e 3,52 dB erro rms de 4,31 dB e 5,67 dB..

Pode-se observar ainda que o modelo adaptado de Okumura-Hata apresentou os maiores erros para a rota 2, porém tanto este modelo quanto o modelo adaptado de Walfisch-Bertoni apresentaram melhor desempenho em comparação com seus respectivos modelos empíricos.

Quanto aos modelos híbridos de predição, o modelo híbrido de Walfisch-Bertoni apresentou melhor desempenho, tendo erro médio absoluto de 3,97 dB, desvio padrão de 3,00 dB e erro rms 4,97 dB. Pode-se observar que entre esses modelos, o modelo híbrido de Okumura-Hata apresentou pior desempenho, tendo erro médio absoluto de 4,14 dB, desvio padrão de 3,16 dB e erro rms de 5,21 dB.

Pode-se observar ainda que os modelos híbridos de Maciel-Bertoni-Xia e Ibrahim Parsons apresentaram bons desempenhos, tendo respectivamente erro médio absoluto de 3,86 dB e 4,32 dB, desvio padrão de 3,29 dB e 2,73 dB e erro rms de 5,07 e 5,10 dB.

### 5.6.2 – Resultados Obtidos para a Faixa de 1,8GHZ

A partir dos valores das predições modelos empíricos de Okumura-Hata-Modificado (O-H-M), COST231-Hata (C-H), Walfisch-Ikegami (W-I) e Ericsson-Hata (E-H) para a rota 1 (Apêndice B-Tabela B1) pode-se calcular o expoente de perda de propagação de cada modelo. Esses valores foram calculados a partir das equações 3.9 e 3.43 e são mostrados na Tabela 5.14.

Dados	Equação	Alfa ( $\alpha$ )
Okumura-Hata Modificado [O-H-M]	3.9	3,45
COST231-Hata [C-H]	3.43	3,46
Walfisch-Ikegami [W-I]	3.43	3,80
Ericsson-Hata [E-H]	3.43	3,46
Medidas	3.43	4,45

Tabela 5.14 – Valores de  $\alpha$  para a rota 1.

Observa-se na Tabela 5.14 que o modelo de Walfisch-Ikegami possui o expoente de perda de propagação mais próximo ao expoente de perda das medidas obtidas para a rota 1.

Na Tabela 5.15 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo empírico considerado.

Rota 1			
Modelos empíricos tradicionais	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata-Modificado [O-H-M]	3,22	2,34	3,98

COST231-Hata [C-H]	3,64	2,34	4,33
Walfisch-Ikegami [W-I]	18,97	3,26	19,24
Ericsson-Hata [E-H]	5,34	3,58	6,43

Tabela 5.15 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos empíricos para a rota 1.

A Figura 5.20 mostra graficamente a predição dos modelos empíricos de predição para a rota 1.

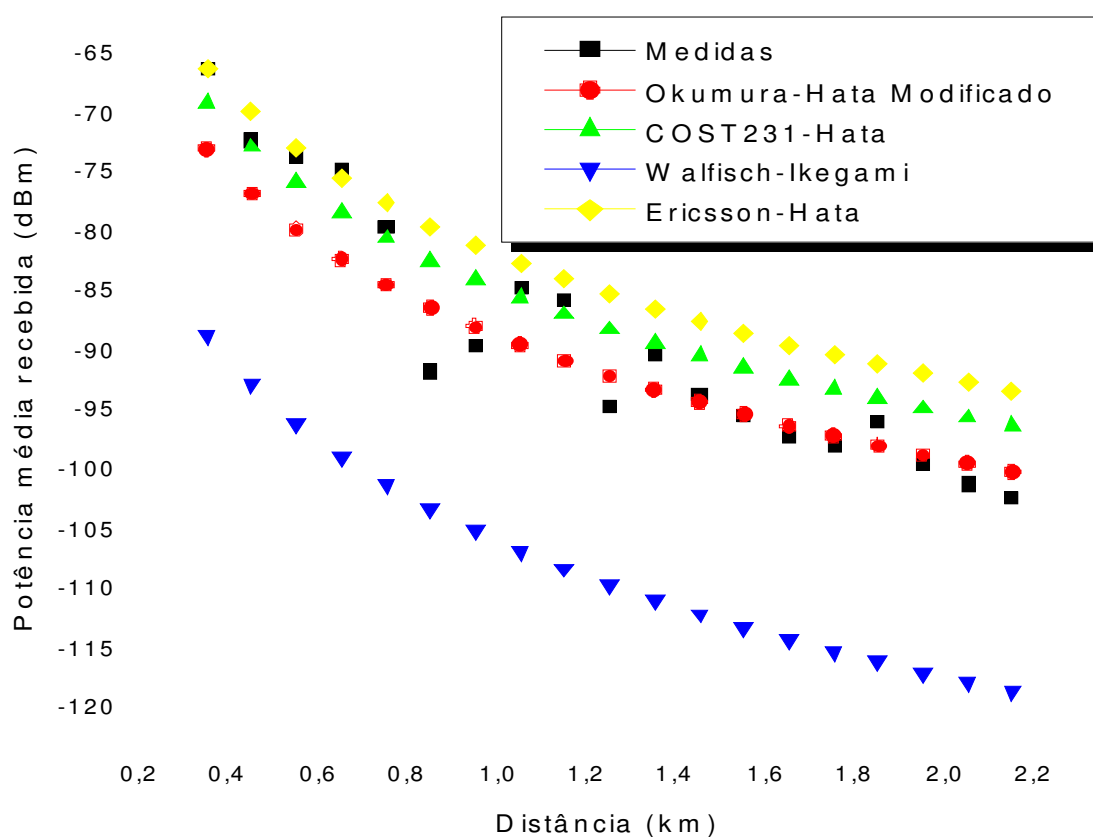


Figura 5.20 – Gráfico da estimativa dos modelos empíricos de predição para a rota 1

Após adaptação dos modelos de Okumura-Hata-Modificado (O-H-M-A), COST231-Hata (C-H-A), Walfisch-Ikegami (W-I-A) e Ericsson-Hata (E-H-A) para a rota 1 (Apêndice B-Tabela B2) a partir do método descrito no capítulo 3, obtém-se os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo adaptado. Esses erros são mostrados na Tabela 5.16.

<b>Rota 1 – Adaptação</b>			
<b>Modelos empíricos adaptados</b>	<b>Erro médio absoluto (dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Erro rms (dB)</b>
Okumura-Hata-Modificado Adaptado [O-H-A]	2,03	1,99	2,84
COST231-Hata Adaptado [C-H-A]	2,01	2,02	2,85
Walfisch-Ikegami Adaptado [W-I-A]	2,01	2,02	2,85
Ericsson-Hata Adaptado [E-H-A]	2,01	2,02	2,85

Tabela 5.16 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos adaptados para a rota 1.

A Figura 5.21 mostra graficamente a predição dos modelos adaptados de Okumura-Hata-Modificado (O-H-M-A), COST231-Hata (C-H-A), Walfisch-Ikegami (W-I-A) e Ericsson-Hata (E-H-A) para a rota 1.

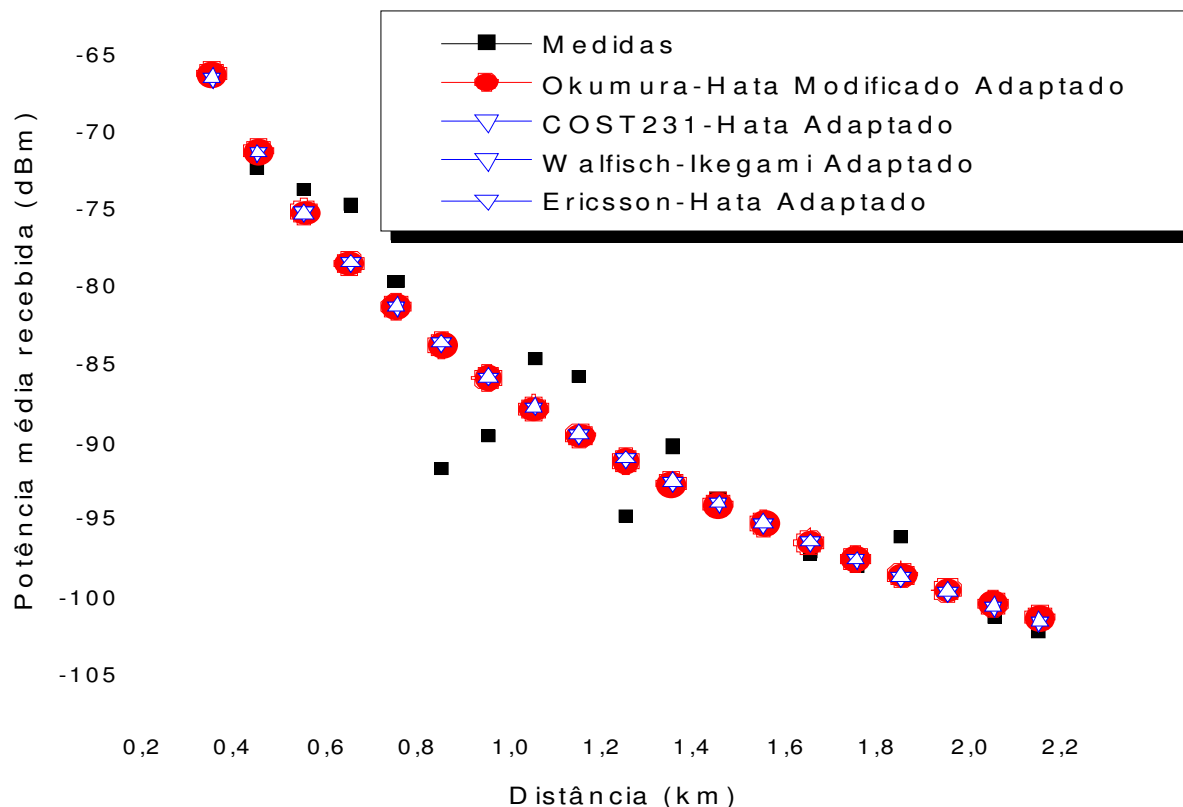


Figura 5.21 – Gráfico da estimativa dos modelos adaptados de predição para a rota 1

Os valores dos erros absolutos da predição (Apêndice B-Tabela B3) de propagação de cada um dos modelos adaptados para a rota 1 em função da distância entre o receptor móvel e a antena transmissora constituirão os pares de treinamento da rede neural artificial que irá compor o respectivo modelo híbrido de predição.

Após o treinamento das RNA's que irão compor os modelos híbridos de Okumura-Hata Modificado (RNA-O-H-M), COST231-Hata (RNA-C-H), Walfisch-Ikegami (RNA-W-I) e Ericsson-Hata (RNA-E-H) (Apêndice B-Tabela B4), as respectivas RNA's apresentaram os seguintes erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes mostrados na Tabela 5.17. Na Figura 5.22 a análise estatística desses erros é apresentada graficamente em forma de histograma.

<b>Rota 1 – Treinamento -</b>			
<b>Rede Neural Artificial</b>	<b>Erro médio absoluto (Db)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Erro rms (dB)</b>
RNA-Okumura-Hata-Modificado	0,0205	0,0483	0,0525
RNA-COST231-Hata	0,1077	0,1160	0,1582
RNA-Walfisch-Ikegami	0,1077	0,1160	0,1582
RNA-Ericsson-Hata	0,1077	0,1160	0,1582

Tabela 5.17 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 1.

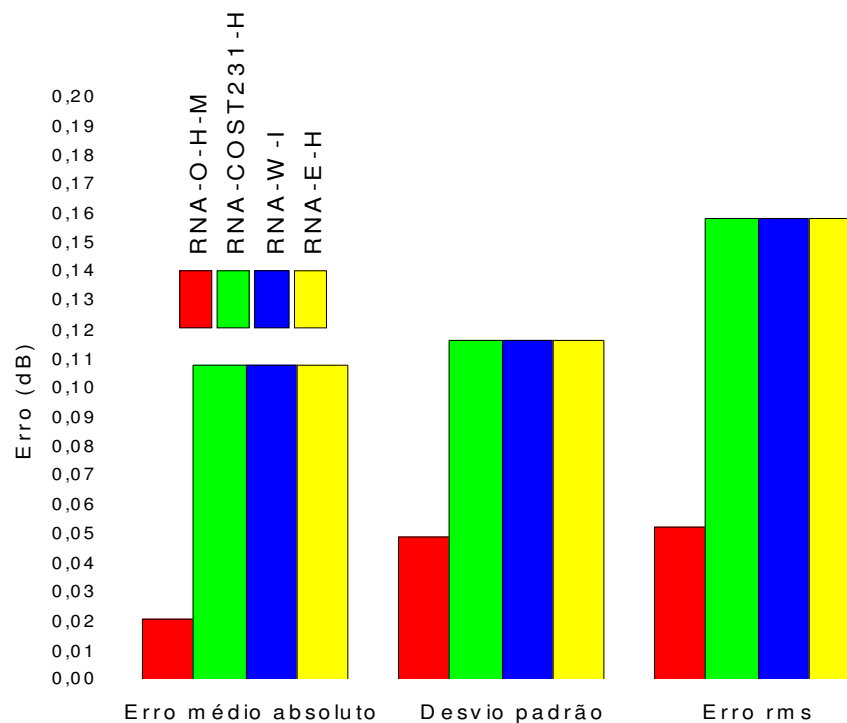


Figura 5.22 – Gráfico comparativo entre os desempenhos das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 1

Na Tabela 5.18 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo híbrido para a rota 1, implementado de acordo com Equação 4.18. As predições dos modelos híbridos para esta rota (Apêndice B-Tabela B5) são mostradas graficamente na Figura 5.23.

Modelos Híbridos de predição	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata-Modificado Híbrido [O-H-M-H]	0,0205	0,0483	0,0525
COST231-Hata Híbrido [C-H-H]	0,1077	0,1160	0,1582
Walfisch-Ikegami Híbrido [W-I-H]	0,1077	0,1160	0,1582
Ericsson-Hata Híbrido [E-H-H]	0,1077	0,1160	0,1582

Tabela 5.18 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos híbridos para a rota 1.

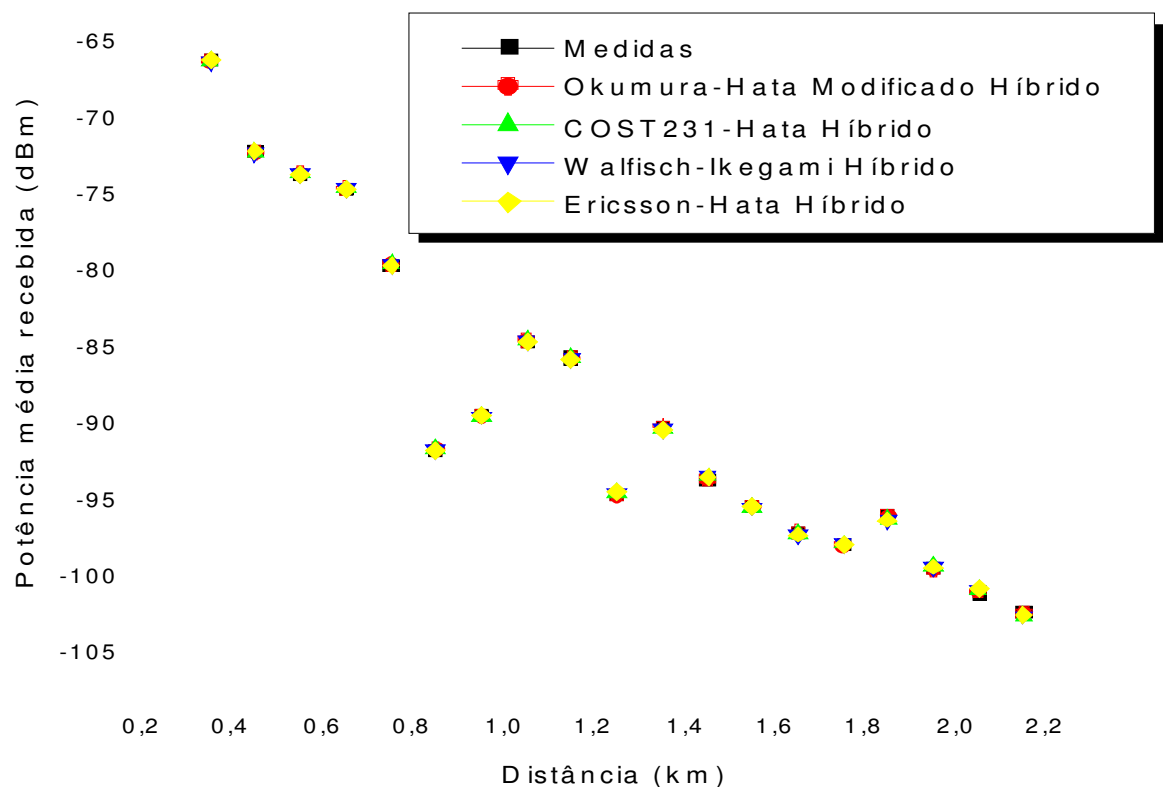


Figura 5.23 – Gráfico da estimativa dos modelos híbridos de predição para a rota 1

A seguir as Figuras 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27 mostram as fases de adaptação para cada um dos modelos empíricos de Okumura-Hata Modificado, COST231-Hata, Walfisch-Ikegami e Ericsson-Hata, ou seja, a comparação gráfica das previsões do modelo empírico de propagação tradicional e seu respectivo modelo adaptado e híbrido para a rota 1.

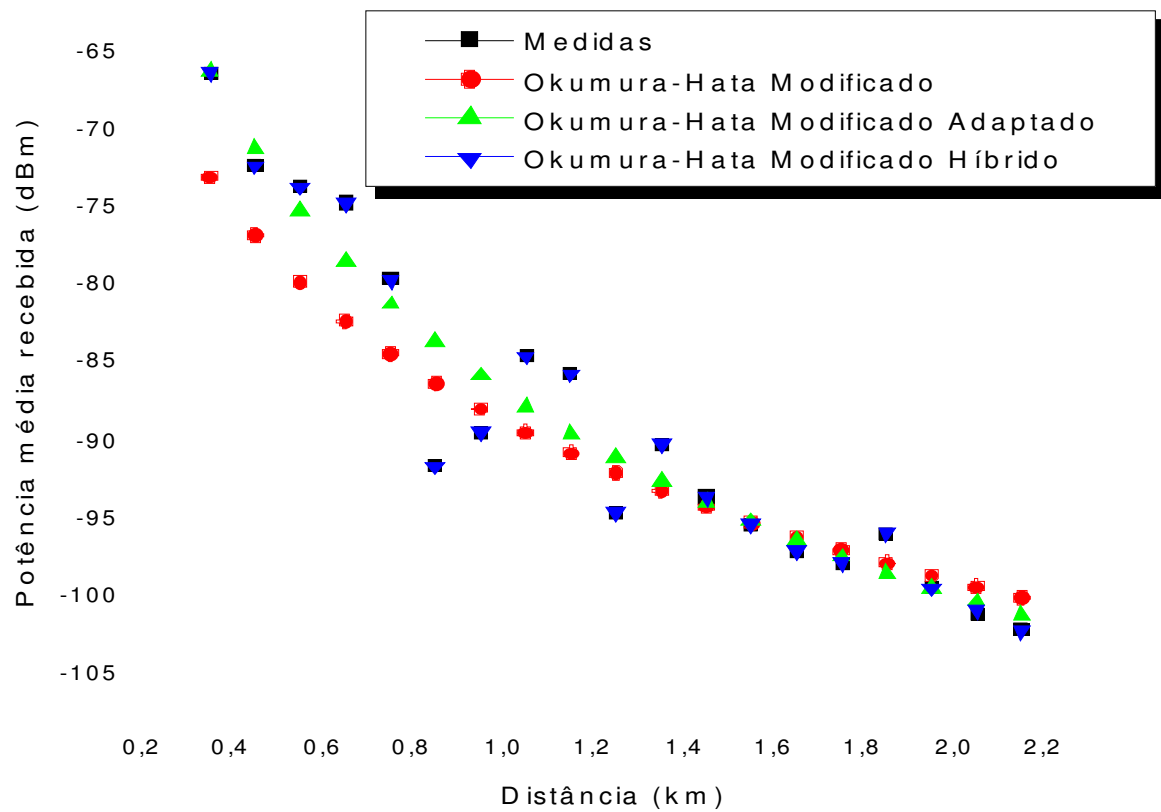


Figura 5.24 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Okumura-Hata Modificado para a rota 1

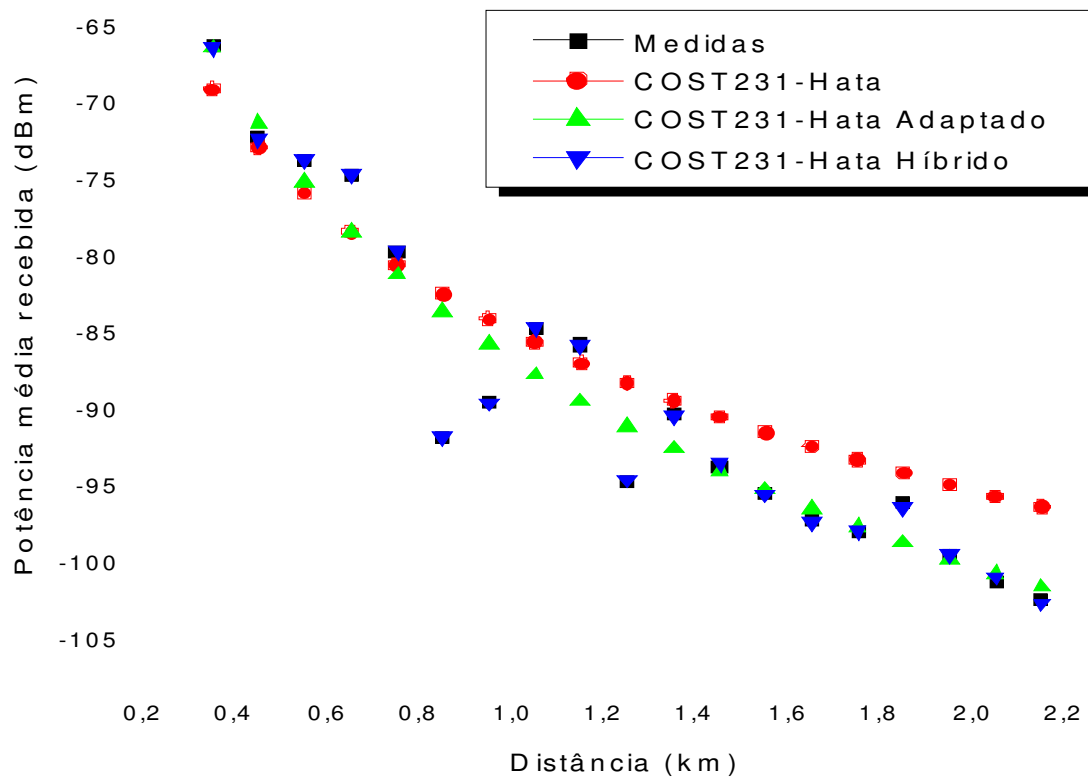


Figura 5.25 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de COST231-Hata para a rota 1

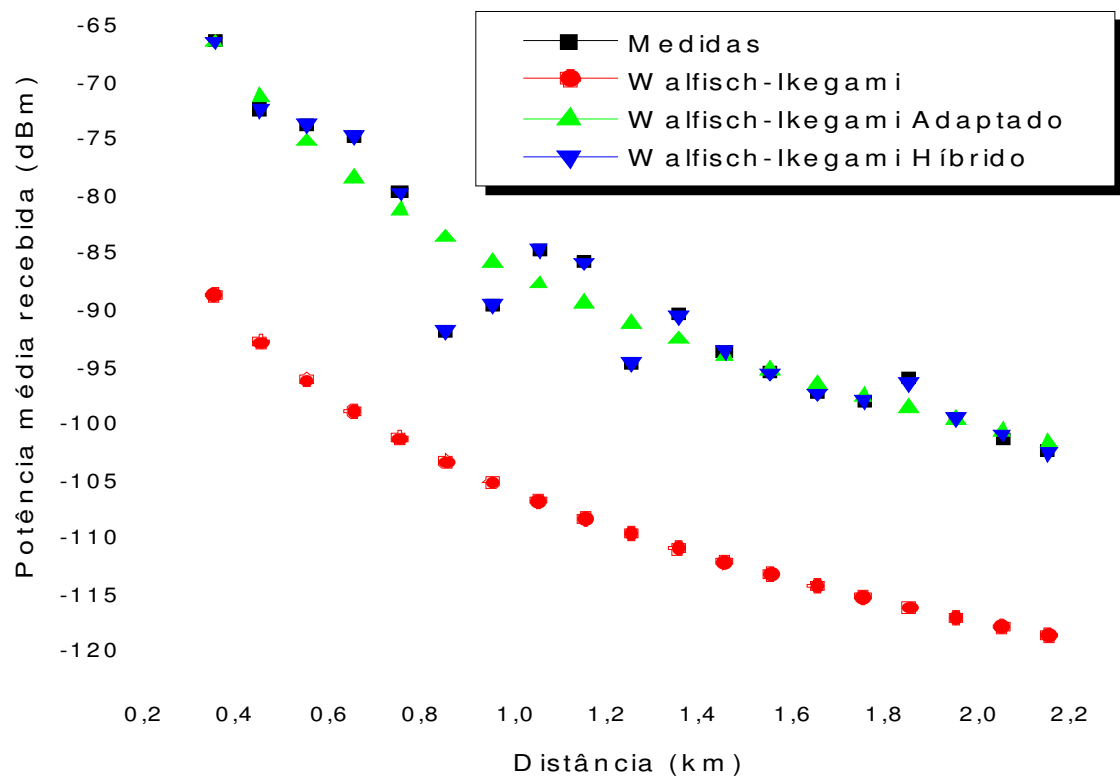


Figura 5.26 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Walfisch-Ikegami para a rota 1

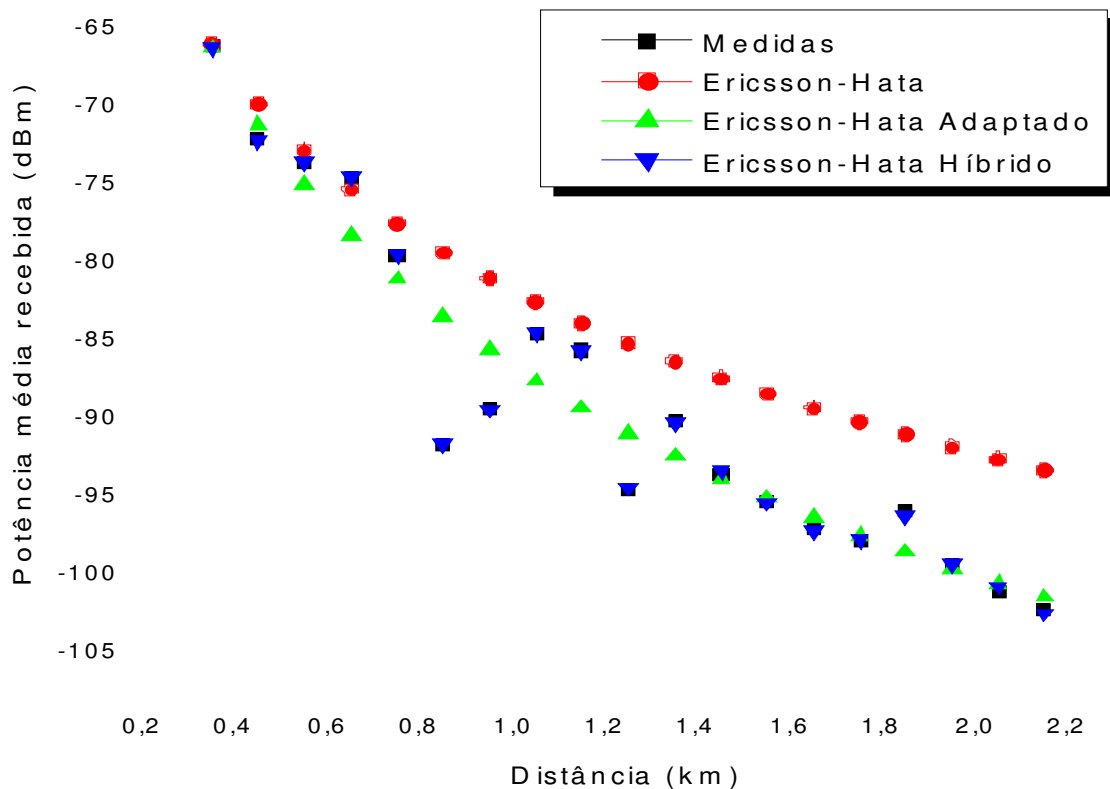


Figura 5.27 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Ericsson-Hata para a rota 1

Pode-se observar nas Tabelas 5.15, 5.16 e 5.18 e através das Figuras 5.24-5.27, que os modelos adaptados e híbridos de predição tiveram melhor desempenho, justamente porque estes modelos são adaptativos e foram modelados a partir das medidas obtidas na rota 1.

Dentre os modelos empíricos, o modelo de Okumura-Hata Modificado teve o melhor desempenho, tendo um erro médio absoluto de 3,22 dB, desvio padrão de 2,34 dB e erro rms de 3,98 dB. Pode-se observar ainda, que o modelo de Walfisch-Ikegami apresentou os maiores erros para a rota 1, tendo um erro médio absoluto de 18,97 dB, desvio padrão de 3,26 dB e erro rms de 19,24 dB.

Quanto aos modelos de Cost231-Hata e Ericsson-Hata, estes apresentaram resultados bons, suas previsões tiveram um erro médio absoluto de 3,64 dB e 5,34 dB, desvio padrão de 2,34 dB e 3,58dB e erro rms de 4,33 dB e 6,43 dB, respectivamente.

Dentre os modelos de predição adaptados, os quatro modelos considerados tiveram quase que o mesmo desempenho. O modelo adaptado de Okumura-Hata Modificado apresentou um erro médio absoluto de 2,03 dB, desvio padrão de 1,99 dB e erro rms de 2,84 dB.

Os modelos de COST231-Hata, Walfisch-Ikegami e Ericsson-Hata tiveram o mesmo desempenho, tendo um erro médio absoluto de 2,01 dB, desvio padrão de 2,02 dB e erro rms de 2,85 dB.

Quanto aos modelos híbridos de predição, todos os modelos tiveram quase que o mesmo desempenho. Isso se deve ao excelente aprendizado das redes neurais artificiais que compõem esses modelos, e tiveram erro médio absoluto, desvio padrão e erro rms próximos de zero de acordo com a Tabela 5.18.

Ainda não se pode avaliar os desempenhos dos modelos adaptados e híbridos de predição em relação aos demais modelos empíricos de predição, pois a rota 1 foi utilizada para a modelagem dos modelos adaptados e treinamento das redes neurais que compõem os modelos híbridos de predição.

A avaliação do desempenho desses modelos em relação aos demais modelos tradicionais de predição será feita a partir da rota 2.

A partir das medidas obtidas para a rota 2 pode-se calcular através da Equação 3.43 o valor do expoente de perda de propagação para esta rota. Obteve-se o valor de  $\alpha=3,49$  para as medidas obtidas na rota 2. Na Tabela 5.19 esse valor é comparado com os valores dos coeficientes de perda apresentados pelos modelos empíricos de predição considerados.

Dados	Equação	Alfa ( $\alpha$ )	Alfa ( $\alpha$ )
		Rota 1	Rota 2
Okumura-Hata-Modificado [O-H-M]	3.9	3,45	3,45
COST231-Hata [C-H]	3.43	3,46	3,46
Walfisch-Ikegami [W-I]	3.43	3,80	3,80
Ericsson-Hata [E-H]	3.43	3,46	3,46
Medidas	3.43	4,45	3,49

Tabela 5.19 – Valores de  $\alpha$  para as rotas 1 e 2.

Observando-se mais uma vez a Tabela 5.19 verifica-se que o expoente de perda de propagação dos modelos de Okumura-Hata-Modificado igual a 3,45 e dos modelos de COST231-Hata e Ericsson-Hata igual a 3,46 são os que mais se aproximam do valor de  $\alpha$  obtido para as medidas obtidas na rota 2.

Na Tabela 5.20 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo empírico considerado.

Rota 2			
Modelos empíricos tradicionais	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata-Modificado [O-H-M]	4,07	1,80	4,45
COST231-Hata [C-H]	3,11	2,57	4,04
Walfisch-Ikegami [W-I]	19,73	3,88	20,11
Ericsson-Hata [E-H]	4,41	3,81	5,82

Tabela 5.20 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos empíricos para a rota 2

A Figura 5.28 mostra graficamente as previsões dos modelos empíricos de Okumura-Hata-Modificado (O-H-M), COST231-Hata (C-H), Walfisch-Ikegami (W-I) e Ericsson-Hata (E-H) para a rota 2 (Apêndice B-Tabela B6).

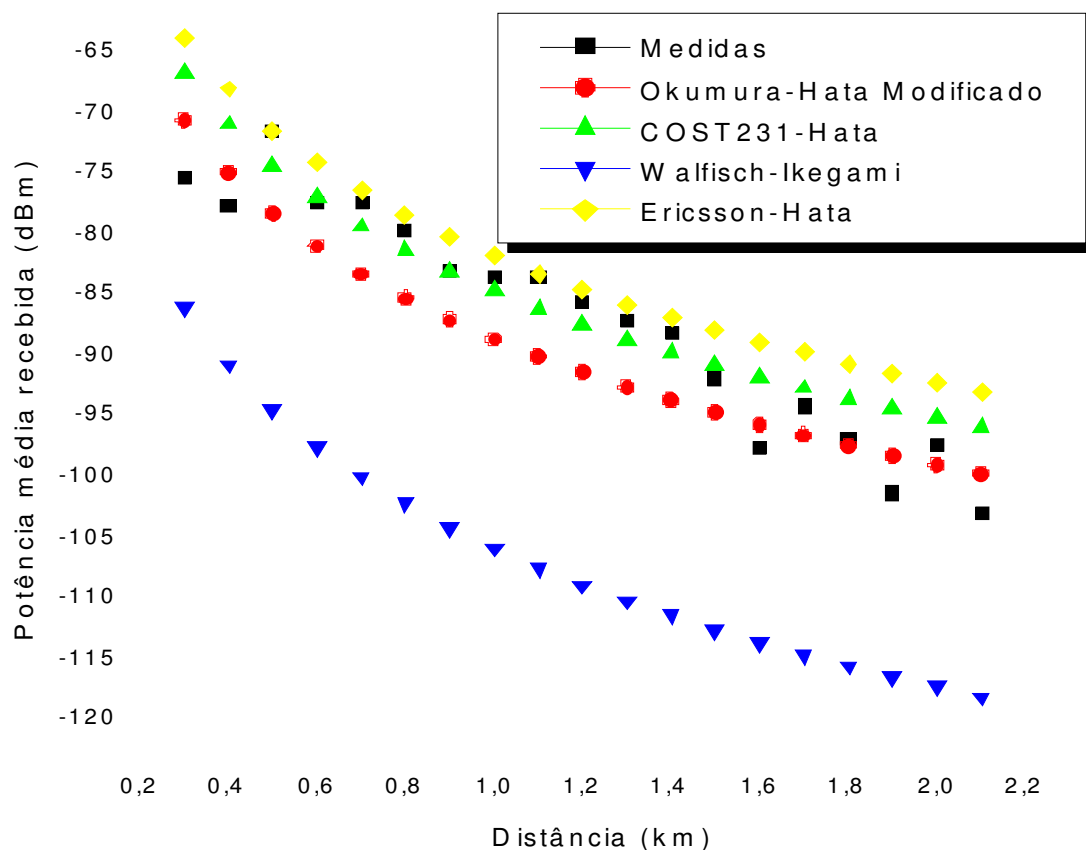


Figura 5.28 – Gráfico da estimativa dos modelos empíricos de previsão para a rota 2

A Tabela 5.21 mostra os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo adaptado para a rota 2. A Figura 5.29 mostra graficamente a previsão dos modelos adaptados de previsão para a rota 2 (Apêndice B-Tabela B7).

Rota 2 – Teste			
Modelos empíricos adaptados	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata-Modificado Adaptado [O-H-M-A]	1,49	1,51	2,12
COST231-Hata Adaptado [C-H-A]	3,19	1,93	3,73
Walfisch-Ikegami Adaptado [W-I-A]	3,19	1,93	3,73
Ericsson-Hata Adaptado [E-H-A]	3,19	1,93	3,73

Tabela 5.21 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos adaptados para a rota 2

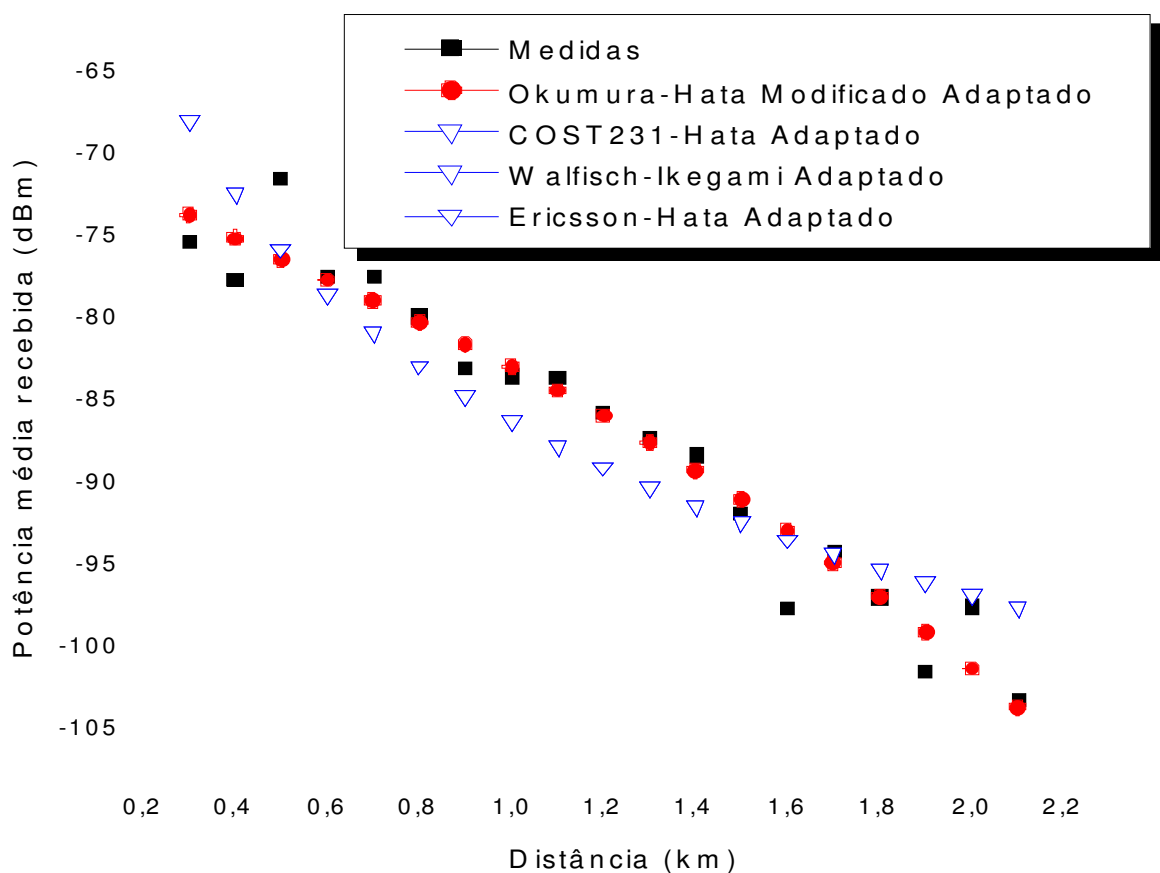


Figura 5.29 – Gráfico da estimativa dos modelos adaptados de predição para a rota 2

A Tabela 5.22 mostra os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes, apresentados pelas saídas das RNA's (Apêndice B-Tabela B8) testadas com os erros absolutos dos modelos adaptados de predição para a rota 2 (Apêndice B-Tabela B9). Na Figura 5.30 a análise estatística desses erros é apresentada graficamente em forma de histograma.

Rota 2 – TESTE			
Rede Neural Artificial	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
RNA-Okumura-Hata-Modificado	2,65	1,36	2,98
RNA-COST231-Hata	3,66	2,82	4,62
RNA-Walfisch-Ikegami	3,66	2,82	4,62
RNA-Ericsson-Hata	3,66	2,82	4,62

Tabela 5.22 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 2.

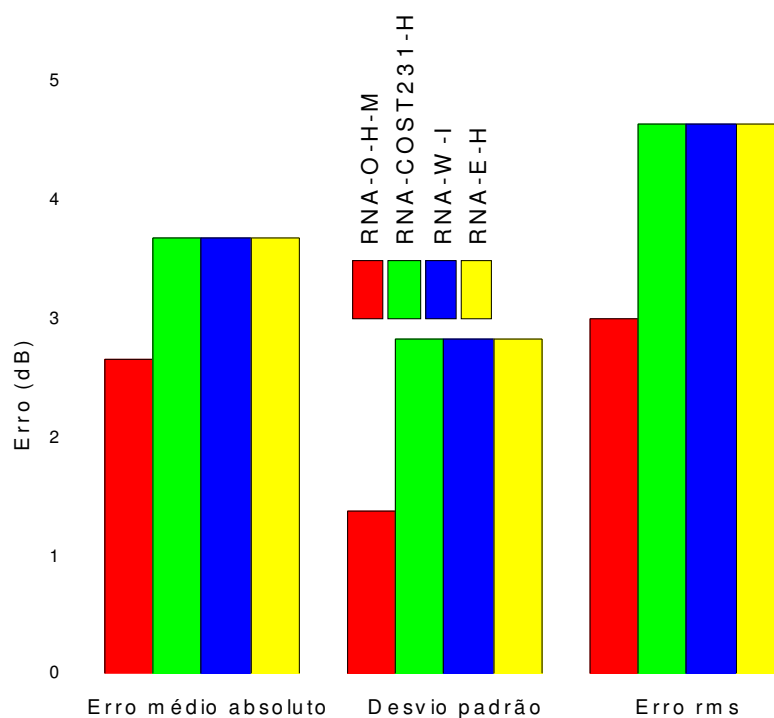


Figura 5.30 – Gráfico comparativo entre os desempenhos das RNA's de cada modelo híbrido de predição para a rota 2

Na Tabela 5.23 são mostrados os respectivos erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes apresentados por cada modelo híbrido para a rota 2, implementados de acordo com Equação 4.18. As predições dos modelos híbridos para a rota 2 (Apêndice B-Tabela B10).são mostradas graficamente na Figura 5.31.

Rota 2-Teste			
Modelos Híbridos de predição	Erro médio absoluto (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro rms (dB)
Okumura-Hata-Modificado Híbrido [O-H-M-H]	2,65	1,36	2,98
COST231-Hata Híbrido [C-H-C]	3,66	2,82	4,62

Walfisch-Ikegami Híbrido [W-I-H]	3,66	2,82	4,62
Ericsson-Hata Híbrido [E-H-H]	3,66	2,82	4,62

Tabela 5.23 – Erros médios absolutos, desvios padrão e erros eficazes dos modelos

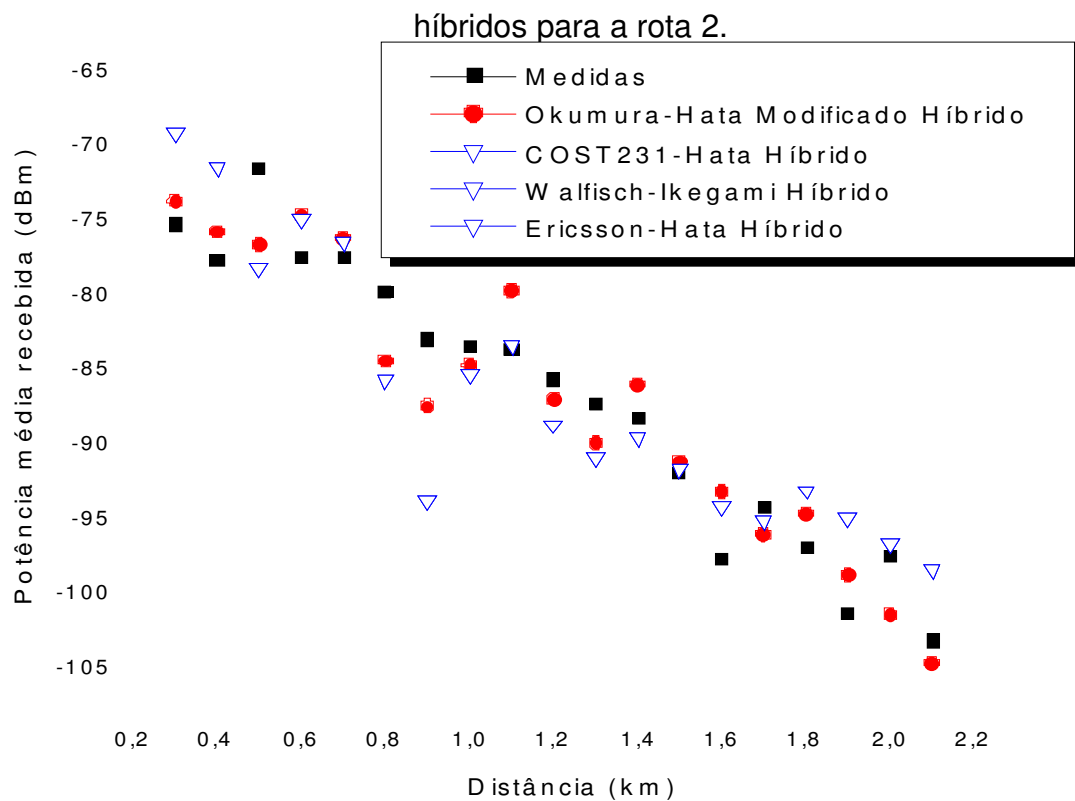


Figura 5.31 – Gráfico da estimativa dos modelos híbridos de predição para a rota 2

A seguir as Figuras 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam uma comparação gráfica entre os modelos empíricos tradicionais de Okumura-Hata Modificado, COST231-Hata, Walfisch-Ikegami e Ericsson-Hata, e seus respectivos modelos adaptados e híbridos para a rota 2.

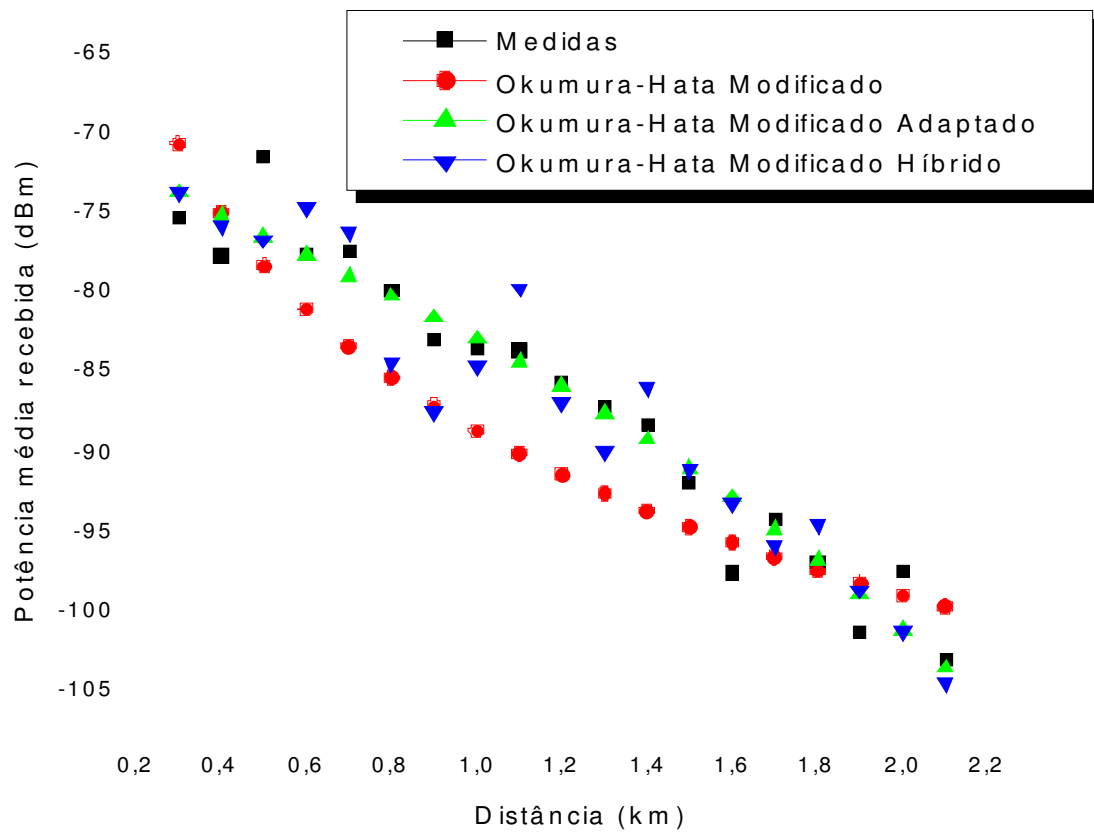


Figura 5.32 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Okumura-Hata Modificado para a rota 2

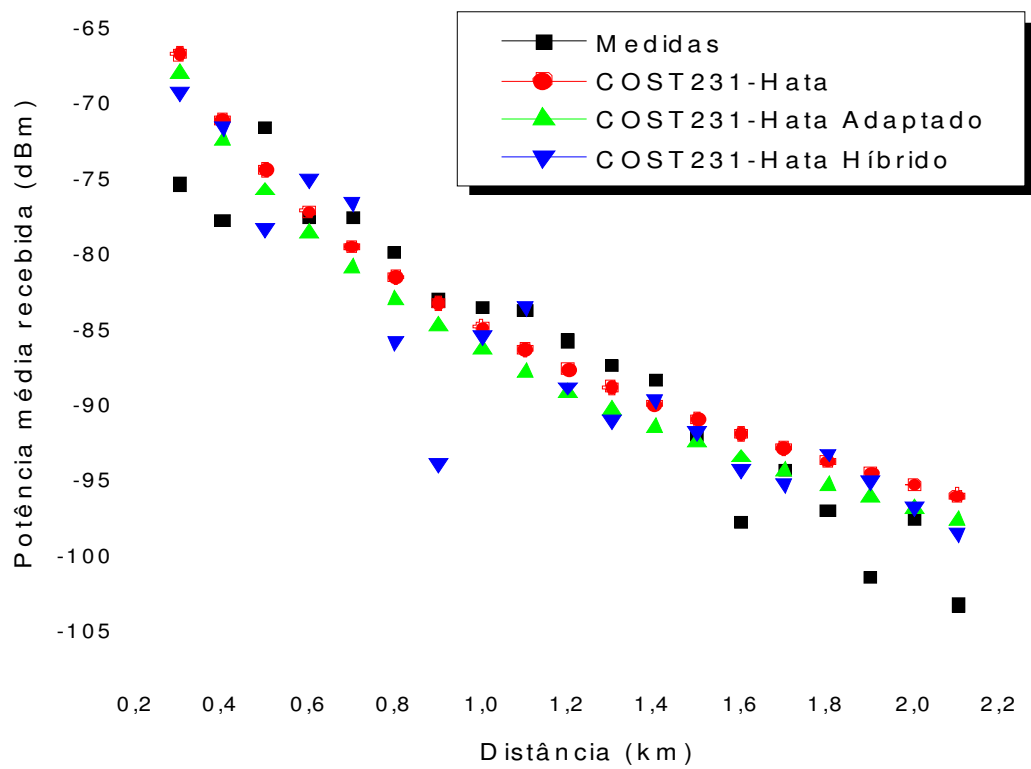


Figura 5.33 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de COST231-Hata para a rota 2

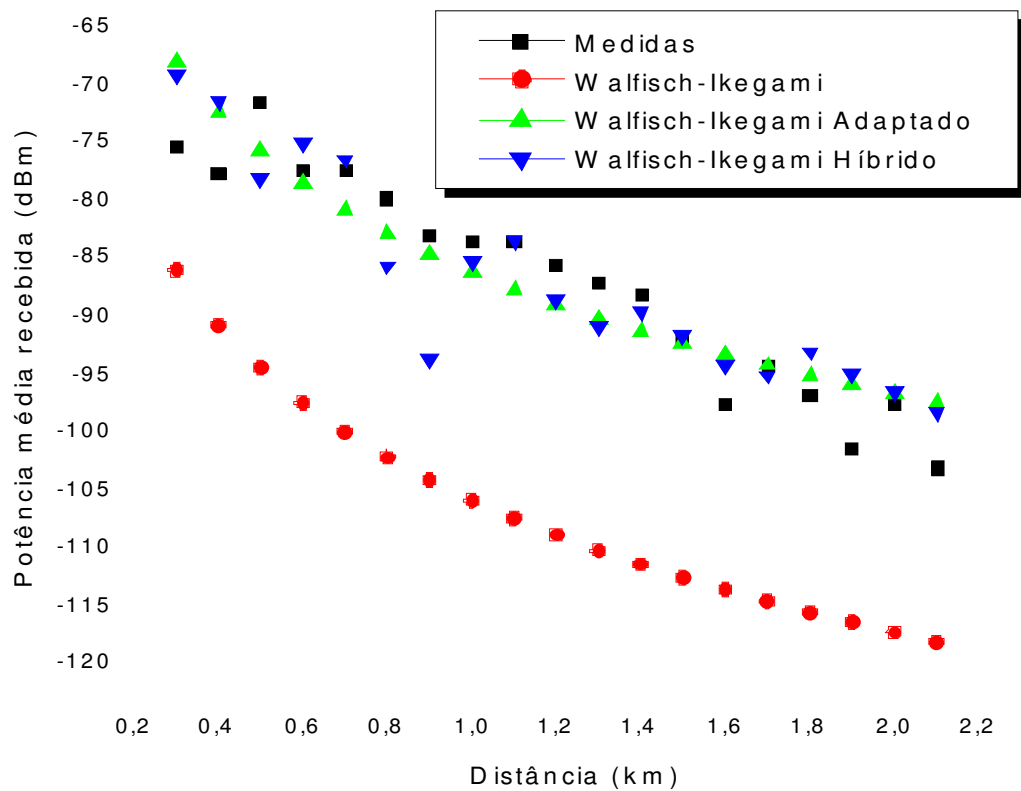


Figura 5.34 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Walfisch-Ikegami para a rota 2

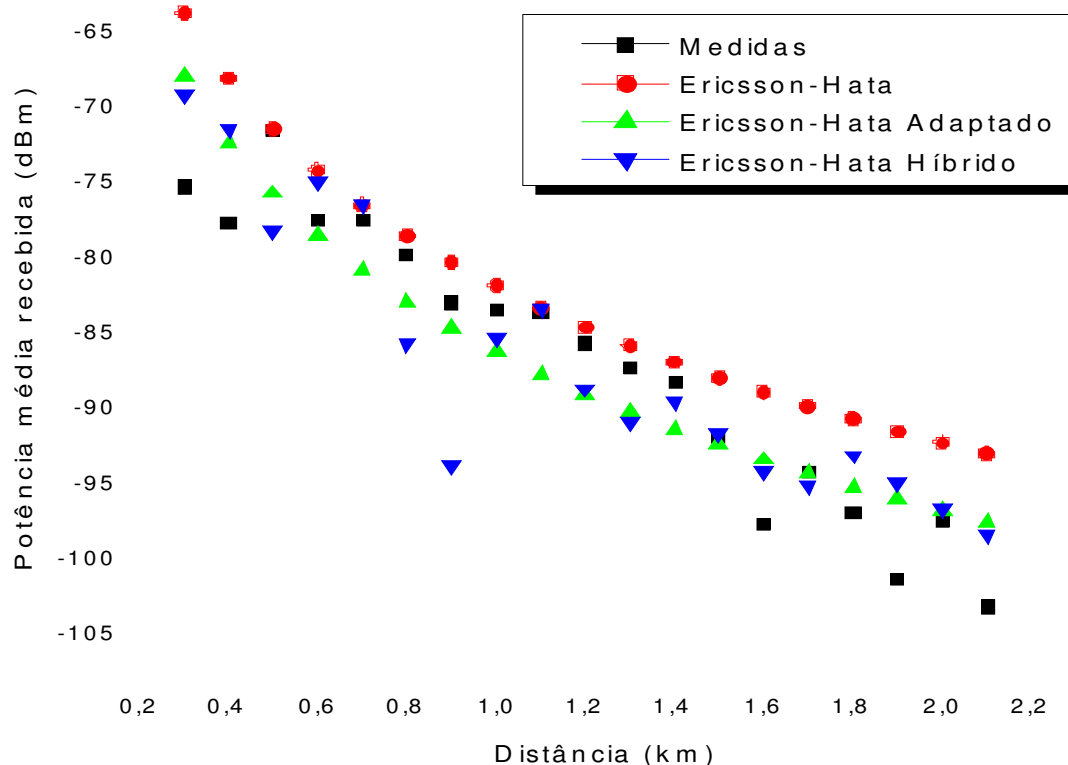


Figura 5.35 – Gráfico da estimativa dos modelos empírico, adaptado e híbrido de Ericsson-Hata para a rota 2

Pode-se observar mais uma vez a partir das Tabelas 5.20, 5.21 e 5.23 e através das Figuras 5.32-5.35, que os modelos adaptados e híbridos de predição foram os que tiveram melhor desempenho em relação aos seus respectivos modelos empíricos convencionais também para o rota 2.

Dentre os modelos empíricos, o modelo de Okumura-Hata Modificado teve o melhor desempenho, tendo um erro médio absoluto de 4,07 dB, desvio padrão de 1,80 dB e erro rms de 4,45 dB. Pode-se observar ainda, que o modelo de Walfisch-

Ikegami apresentou os maiores erros para a rota 2, tendo um erro médio absoluto de 19,73 dB, desvio padrão de 3,88 dB e erro rms de 20,11 dB.

Quanto aos modelos de COST231-Hata e Ericsson-Hata, estes apresentaram resultados bons, suas previsões tiveram um erro médio absoluto de 3,11 dB e 4,41 dB, desvio padrão de 2,57 dB e 3,81 dB e erro rms de 4,04 e 5,82 dB, respectivamente.

Dentre os modelos de predição adaptados, assim como para a rota 1 os modelos considerados tiveram desempenhos muito semelhantes. O modelo de Okumura-Hata Modificado teve erro médio absoluto de 1,49 dB, desvio padrão de 1,51 dB e erro rms de 2,12 dB. Os demais modelos adaptados tiveram erro médio absoluto de 3,19 dB, desvio padrão de 1,93 dB e erro rms de 3,73 dB.

Quanto aos modelos híbridos de predição, o modelo híbrido de Okumura-Hata Modificado apresentou melhor desempenho, tendo erro médio absoluto de 2,65 dB, desvio padrão de 1,36 dB e erro rms 2,98 dB. Pode-se observar que os demais modelos híbridos apresentaram o mesmo desempenho, tendo erro médio absoluto de 3,66 dB, desvio padrão de 2,82 dB e erro rms de 4,62 dB.

A partir dos resultados obtidos pode-se verificar a grande aplicabilidade e utilização de técnicas numéricas aliadas às redes neurais artificiais em problemas de otimização de modelos analíticos. Nesse trabalho as técnicas utilizadas podem ser utilizadas na predição de perda de propagação em ambiente móvel terrestre no planejamento e implantação de sistemas rádio móveis, onde as variáveis a serem consideradas neste tipo de projeto são difíceis de serem definidas ou medidas. Logo, os modelos propostos nesse trabalho provêem uma melhora significativa de predição de propagação em relação aos modelos empíricos utilizados tradicionalmente.