

# Modelo de Propagação Empírico de Interiores para Redes LTE em 2600 MHz

Clayton C. de Lima, Emerson A. de O. Lima e Waslon T. A. Lopes

**Resumo**—Este artigo aborda o problema da análise de cobertura de redes de telefonia móvel celular LTE que operam na faixa do espectro de 2600 MHz considerando ambientes interiores. Mais especificamente, técnicas de otimização com implementação computacional são utilizadas para ajustar parâmetros de um modelo de propagação existente, gerando um modelo de propagação que tem o objetivo de minimizar o desvio apresentado entre os valores calculados através das simulações e os valores aferidos no ambiente. Os modelos matemáticos de previsão de cobertura puramente empíricos considerados foram: One Slope, Dual-Slope, Partitioned, Multi-Parede COST231, Average Walls e ITU-R P1238 e as técnicas de otimização aplicadas foram: GlobalSearch, MultiStart e Simulated Annealing. Resultados de simulação mostram ganhos de até 85% na redução entre os valores de medidos e os valores obtidos após o ajuste dos modelos de propagação.

**Palavras-Chave**—Propagação, Interiores, Predição, Planejamento, Telefonia Móvel Celular.

**Abstract**—This paper deals with the problem of coverage analysis for LTE mobile telephone networks operating in 2600 MHz frequency band considering indoor environments. More precisely, optimization techniques with computational implementation are used to adjust the parameters of an existing propagation model with the objective of minimizing the deviation between the simulation data and field measurements. The mathematical empirical models for coverage prediction used in this work are One Slope, Dual-Slope, Partitioned, Multi-wall COST231, Average Walls and ITU-R P1238 and the optimization techniques are GlobalSearch, MultiStart and Simulated Annealing. Simulation results shown that gains of the order of 85% can be achieved after the adjust in the propagation models.

**Keywords**—Propagation, Indoor, Prediction, Planning, Mobile Cellular Telephony.

## I. INTRODUÇÃO

No fechamento do terceiro trimestre do ano de 2015, já somavam-se cerca de 7 bilhões de terminais móveis espalhados pelo mundo (segundo a UIT - Wireless Intelligence, GSA - The Global mobile Suppliers Association) No mês de janeiro do ano de 2016, foram registrados cerca de 257,3 milhões de terminais no Brasil (segundo Anatel - Agência Nacional de Telecomunicações, órgão que regulamenta o serviço de Telecomunicações no Brasil) [1] o que revela uma densidade de celulares no Brasil de 125,31 celulares/100 habitantes.

Este artigo traz uma proposta de melhorar o processo de planejamento de redes de telefonia móvel celular LTE que

Clayton C. de Lima e Emerson A. de O. Lima. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas (PPGES), Escola Politécnica de Pernambuco (POLI), Universidade de Pernambuco (UPE), Recife-PE, Brasil, E-mail: eal@poli.br. Waslon Terlizzie Araújo Lopes. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa-PB, Brasil, Email: waslon@ieee.org.

operam na faixa do espectro de 2600 MHz [2] com interesse de cobertura em ambientes interiores. Mais especificamente, através de técnicas de otimização com implementação computacional, é possível uma reformulação matemática de um modelo de propagação existente, gerando um modelo de propagação que tem o objetivo de minimizar o desvio apresentado entre os valores calculados através das simulações e os valores aferidos no ambiente [3]. As ferramentas de previsão existentes simulam o comportamento da propagação de ondas através de modelos empíricos que não representam bem o espaço confinado. O resultado dessa representação, é um desvio padrão médio de 8,2 dB entre as previsões dos principais modelos de propagação empíricos (presentes nas ferramentas e na literatura) e os níveis de sinal aferidos no teste de caminhada (*walk test*) [4].

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II traz uma breve explanação sobre os modelos de propagação. A Seção III faz uma síntese sobre as técnicas de otimização. A Seção IV descreve o ambiente de medições. A Seção V apresenta os respectivos resultados e finalmente a Seção VI traz as conclusões e comentários finais.

## II. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

O planejamento de um sistema de telefonia móvel celular tem por base a região de cobertura do sinal irradiado e o tráfego cursado na rede. O comportamento do sinal na região de cobertura pode ser previsto através de modelos de propagação, que são funções matemáticas que permitem estimar o nível de sinal recebido por um terminal em determinada localização dentro da região definida como interesse de cobertura. Para que um modelo tenha resultados assertivos, é necessário o conhecimento das características do ambiente assim como dos mecanismos de propagação de uma onda eletromagnética. Os estudo de ambientes interiores é uma tarefa bastante difícil pela complexidade de interações ocorridas em sua estrutura.

Existem vários modelos de propagação na literatura, sendo esses classificados com bom resultado quando 68% dos valores projetados estão contidos dentro do desvio padrão máximo (na faixa de 6 à 8 dB), quando feita a comparação com os valores aferidos em campo após a instalação da rede [5].

Para prever a cobertura de interiores, os modelos existentes dividem-se em duas grandes classes: modelos empíricos e modelos determinísticos [6]. Os modelos determinísticos requerem um custo computacional muito elevado para implementação, pois utilizam técnicas de traçado de raios, da teoria geométrica da difração e até mesmo das diferenças

finitas no domínio do tempo para calcular as estatísticas de propagação de multipercurso, fazendo a soma de todas as componentes de todos os percursos da onda. Para aplicação dessas técnicas, é necessário um nível de detalhamento muito elevado da geometria do prédio e dos materiais utilizados na construção, o que nem sempre está disponível para os projetos de rádio. Nos modelos empíricos, são apresentadas equações (o que facilita a sua implementação) que consideram as perdas do espaço-livre adicionadas as perdas de pisos e paredes, para representar o ambiente fechado, sendo essas equações obtidas através de medições realizadas no ambiente de análise, sendo seus ajustes e modificações do modelo de atenuação do espaço livre dado pela equação de Friis [7]. Para esse trabalho, serão comparados os resultados da aplicação dos modelos empíricos mais utilizados e reconhecidamente mais eficientes para células em interiores na faixa de frequência estudada, sendo eles: One Slope, Dual-Slope, Particionado, Multi-Parede COST231, Average Walls e ITU-R P1238.

### A. One Slope

O modelo One Slope assume uma dependência linear entre a perda (em dB) e a distância entre o transmissor e receptor, devendo a distância entre o transmissor levar em consideração um parâmetro  $n$ , também conhecido em algumas literaturas como o gradiente  $n$  distância-potência, que é ajustado em variação do ambiente de propagação e pode ser definido pela Tabela I

TABELA I  
ÍNDICES DE DESVANECIMENTO ( $n$ ) [6] ADAPTADO.

Cenário	$n$	Mecanismos de propagação dominantes
Corredor	1,4-1,9	Onda guiada
Quartos grandes e vazios	2	Visada direta (LOS - line of sight)
Quartos mobiliados	3	LOS - Multipercurso
Quartos densamente mobiliados	4	Espalhamento por obstáculos, sem linha de visada direta
Multi-andar	5	Atenuação em paredes e pisos

A Equação 1 representa o cálculo para o modelo One Slope:

$$L = L_0 + 10n \cdot \log_{10}(d) \quad (1)$$

### B. Dual-Slope

Alguns estudos indicam que normalmente para ajustar com precisão as medidas de perda de percurso, não deve ser utilizado um único modelo [6]. Baseado nesse conceito, o modelo de *Dual-Slope* divide a visão em dois grupos de pontos para análise. Primeiramente são os pontos com visada direta (LOS, do inglês *line-of-sight*) entre o transmissor e receptor e depois são os pontos com visada obstruída entre o transmissor e receptor (NLOS, do inglês *non line-of-sight*). Para cada região, existe um expoente de perda de caminho que irá caracterizar a propagação em conjunto com uma distância de ruptura de algumas centenas de metros entre eles, onde ocorrerá as mudanças de propagação de um regime para o outro. Essa distância de ruptura leva em consideração que em ambientes interiores o teto e as paredes podem obstruir a Zona de Fresnel (área constituída por sequência de elipses concêntricas que caracterizam a linha de visada do sinal

irradiado)[8]. Logo a perda no percurso é representada através da Equação 2 que segue abaixo:

$$L = L_0 + \begin{cases} 10n_1 \log_{10} d & 1m < d \leq d_{bp}, \\ 10n_1 \log_{10} d_{bp} + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{bp}} \right) & d > d_{bp}. \end{cases} \quad (2)$$

O valores para expoente de perda de percurso são calculados de modo empírico e geralmente são atribuídos  $n_1 = 2$  e  $n_2 = 4$ , com distância do ponto de interrupção entre 200 m e 500 m, mas é fundamental destacar que esses valores podem variar de acordo com cada medição. Para planejar a cobertura de locais interiores, é importante garantir que não haja sobreposição das células com co-canal dentro da distância do ponto de interrupção.

### C. Particionado

Baseado no conceito de que não existe homogeneidade na distribuição de potência entre transmissor e receptor, o modelo Particionado segmenta a distribuição de forma gradiente em função da distância entre transmissor e receptor e atribui a cada grau um expoente de perda de percurso diferenciado para caracterizar a propagação [10]. A representação dessa partição pode ser vista através da Equação 3 [9].

$$L = L_0 + \begin{cases} 20 \log_{10} d & 1m < d \leq 10m, \\ 20 + 30 \log_{10} \left( \frac{d}{10m} \right) & 10m < d \leq 20m, \\ 29 + 60 \log_{10} \left( \frac{d}{20m} \right) & 20m < d \leq 40m, \\ 47 + 120 \log_{10} \left( \frac{d}{40m} \right) & d > 40m. \end{cases} \quad (3)$$

### D. Multi-Parede COST231

Alguns modelos sugerem que o fator de soma das perdas apresentadas por paredes e pisos seja dado em função de uma função individual para cada parede e piso. Um modelo que representa essa proposta é o Multi-Parede COST231 (COST, do inglês *European Co-operative for Scientific and Technical Research*) [11], que considera cada variação de  $n$  paredes e pisos (com materiais diferentes entre o percurso da onda) uma função de  $n$  para cada variação. Para melhor entendimento, sua fórmula matemática pode ser vista na Equação 4.

$$L = L_F + L_C + \sum_{i=1}^W L_{wi} n_{wi} + L_f n_f^{\left[ \frac{n(f)+2}{n(f)+1} - b \right]} \quad (4)$$

O modelo Multi-Parede COST231 tem como vantagem a opção de variação de tipos de paredes para o mesmo ambiente, o que possibilita maior aproximação das perdas no espaço. Na Tabela II, é apresentada uma relação dos valores de  $L_{wi}$  para cada tipo de parede (mais comumente utilizado):

### E. Average Walls

Baseado no modelo Multi-Parede COST231 o modelo *Average Walls* diferencia pela caracterização da perda gerada pela obstrução das paredes em um único parâmetro  $L_w$  [9]. Para

TABELA II

VARIAÇÕES DE  $L_{wi}$  PARA TIPOS DE PAREDE DIFERENTE [9] ADAPTADO.

Tipo de Parede	$L_{wi}$	Descrição
Fina	3,4 dB	Parede divisória (não suporta carga) por exemplo: lâminas de gesso, tábuas de madeira ou paredes finas de concreto (<10 cm).
Grossa	6,9 dB	Uma parede de sustentação ou parede de espessura maior (>10 cm), por exemplo: concreto ou tijolo.

inserir o valor de  $L_w$  é necessário calcular a perda agregada por cada parede que obstruir o caminho entre transmissor e receptor. Esse cálculo é dado através da Equação 5 de acordo com o quantitativo de paredes associadas [9].

$$\begin{cases} L_1 = L - L_0 - 20 \log_{10} d_1 \\ L_2 = L - L_0 - 20 \log_{10} d_2 - L_1 \\ L_i = L - L_0 - 20 \log_{10} d - \sum_{j=1}^{i-1} L_j \end{cases} \quad (5)$$

Após obtenção da da perda de todas as paredes, o parâmetro  $L_w$  é dado pela média aritmética de todas as perdas, podendo assim compor a representação da perda total mapeada pelo modelo que é dada na Equação 6.

$$L = L_0 + 20 \log_{10} d + K_w L_w \quad (6)$$

#### F. ITU-R P1238

O modelo ITU-R P1238 é apresentado na recomendação P.1238 [12], da União Internacional de Telecomunicações - Rádio Propagação (ITU-R do inglês, *International Telecommunications Union - Radio Communication Sector*) e requer poucas informações sobre o trajeto da onda e o ambiente de instalação, tornando-se generalista quanto ao ambiente [12]. As perdas do trajeto em interiores são compostas da aferição e das estatísticas de desvanecimento por sombreamento, considerando a perda por vários pisos. A propagação através das paredes e de outros obstáculos está descrita de forma implícita e a formulação matemática do modelo pode ser representado por:

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad (7)$$

### III. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

A proposta deste trabalho trata de uma abordagem de minimização para equações não lineares com uma ou mais de uma variável. As variáveis são parâmetros atuais dos modelos matemáticos presentes na literatura e o objetivo é encontrar o valor mínimo dessas variáveis que modele as funções em virtude das medições apresentadas no ambiente de teste [13] através da função objetivo dada pela Equação 8. Para esse tipo de abordagem, foram escolhidos três classes de solucionadores de uma caixa de ferramentas de otimização do Matlab, sendo essas as que mais se aplicam na solução da proposta por conta do objetivo de busca. Essa classes são as seguintes: GlobalSearch, MultiStart e *Simulated Annealing*, para as quais serão detalhas nas seções seguintes seu métodos de busca e sua forma de otimização.

$$\min \Phi = \sum_{k=1}^N (L_k - L_{obs})^2 \quad (8)$$

#### A. GlobalSearch

O GlobalSearch (GS) é uma classe de solucionador do Matlab utilizada para busca do mínimo global eficiente num único processador através de um algoritmo heurístico de multi-partida [14]. Essa classe pode trabalhar com propriedades padrões do Matlab para encontrar a solução de uma busca global, pode utilizar valores e propriedades específicas do objeto a ser construído, pode criar cópias de outras soluções de busca global alterando valores específicos, ou por fim, pode solucionar uma busca global com valores gerados de uma solução através do método MultiStart. Aplicada a uma função objetivo, é possível criar pontos que atendam dentro dos limites pré-definidos, os valores otimizados para os parâmetros declarados.

A abordagem do GlobalSearch é muito semelhante a do MultiStart. Para localizar o mínimo global, o algoritmo inicia sua lógica com um solucionador local através da função *fmincon* (nativa do Matlab) a partir de vários pontos iniciais para localizar a área de atração (região para qual convergem os mínimos, seja ele local ou global) da função [14].

#### B. MultiStart

Assim como o GlobalSearch, o MultiStart (MS) é uma classe de solucionador do Matlab para otimização baseada em minimização gradiente [14]. A estratégia de busca do seu algoritmo é bastante semelhante ao GlobalSearch, porém para essa classe o objetivo é de encontrar múltiplos mínimos locais. O método contém propriedades opcionais que afetam diretamente na construção e forma de execução do algoritmo [15]. Aplicada a uma função objetivo, é possível criar pontos que atendam dentro dos limites pré-definidos, os valores otimizados para os parâmetros declarados.

Assim como abordagem do algoritmo, o método de implementação do MultiStart é muito semelhante ao do GlobalSearch. Para localizar os mínimos locais, o algoritmo inicia sua lógica com um solucionador local através da função *fmincon* (nativa do Matlab) a partir de vários pontos iniciais para localizar a área de atração (região para qual convergem os mínimos, seja ele local ou global) da função.

#### C. Simulated Annealing

Também localizado na caixa de ferramenta do Matlab, o *Simulated Annealing* (SA) é uma técnica de otimização para soluções livre de derivadas ou com limites, utilizada na busca do mínimo global da função objetivo [15]. Ela simula o processo físico de recozimento de metais fundidos, dando origem assim ao seu nome (recozimento do inglês, *annealing*) [16]. Sua estrutura funciona de forma análoga ao processo de recozimento de metais fundidos, onde os dados a serem minimizados representam o metal derretido e a estrutura cristalina quando o metal é solidificado representa o mínimo local da função objetivo. Quando aplicado a otimização, o algoritmo

do *Simulated Annealing* busca um estado  $L_{min}$  que minimize uma função custo real positiva [16]. A proposta principal do algoritmo do *Simulated Annealing* é inserir aleatoriedade na busca do mínimo global da função energia  $E(\cdot)$ , que é usualmente igual a função objetivo, para que as interações não sejam interrompidas em um mínimo local. O resultado das interações na  $m$ -ésima posição é um vetor aleatório que possui todos os parâmetros de otimização. De acordo com a lei de probabilidades, é feito um mapeamento do estado atual do sistema através da função perturbação  $Pert(\cdot)$ . Por meio de uma perturbação aleatória, para cada passo do algoritmo é gerado um novo estado  $Pert(L_m)$  a partir do estado corrente do sistema. Logo, é calculada a variação de energia dada por  $\Delta E_m = E(Pert(L_m)) - E(L_m)$ . O resultado dessa variação irá definir o passo de alteração do estado. Se o resultado for negativo, o sistema move-se para o novo estado, caso contrário, a mudança para o novo estado é feita por decisão probabilística [16]. Para cada  $m$  é atribuído uma variável aleatória  $\Phi_m$ , onde se e somente se  $\Phi_m = 1$  é aceito a perturbação do passo  $m$ . A probabilidade de aceitação da mudança do estado é chamada de regra de aceitação do algoritmo *Simulated Annealing* [16]. Se a perturbação não é aceita, o sistema permanece do estado  $L_m$ . Quase todas as mudanças de estado são aceitas quando a temperatura é alta, da mesma forma que, quando o valor da temperatura é baixa, a perturbação que aumenta a energia não é aceita. Um ponto relevante é de que quando o  $T_m = 0$  inevitavelmente o algoritmo irá parar no mínimo local. Quanto maior a capacidade do sistema de se mover de estados com energia, maior a capacidade do *Simulated Annealing* não ser interrompido num mínimo local. Quando a temperatura do sistema estabiliza, eventualmente é reconhecido com o estado de equilíbrio térmico [16]. Quando ocorre esse estado com temperaturas próximas de zero, é muito provável que se tenha atingido o ótimo global, ou seja, o estado de menor energia. Para alcançar o equilíbrio térmico de forma mais rápida, é iniciar o algoritmo com temperatura alta [16]. Dessa forma, acontece o “derretimento” do sistema e quase todas as mudanças de estado passam a ser aceitas e a temperatura é mantida constante até aproximar o equilíbrio térmico, onde inicia-se o processo de redução da temperatura a cada interação para um valor pré-determinado, o que é conhecido com esquema de resfriamento. Novamente o algoritmo é executado até atingir o equilíbrio térmico até que o número máximo de interações seja alcançado.

#### IV. AMBIENTE DE MEDIÇÕES

O experimento de campo complementa os estudos de propagação para que os ajustes dos modelos teóricos tenham resultados mais assertivos. O fator de maior preocupação e logo de maior dificuldade desse experimento, é de criar o cenário mais realístico para que as medições sejam uma referência exata de modelagem. Essa base deve representar de forma fiel a visão do usuário em um sistema de interior alocado em uma rede LTE sem carga de tráfego e sem usuários adicionais acampados.

Para montagem do cenário dos testes de propagação, foi escolhido um prédio comercial no bairro do Recife, onde as

medições foram realizadas em um pavimento com dissensão de  $646,72 m^2$  e pé direito com elevação de 6 m, onde funciona o escritório de uma empresa fornecedora de telecomunicações.

Nesse pavimento foi instalado uma estação (eNodeB do inglês, *Evolved Node B* do fabricante Nokia (modelo: Flexi Multiradio) configurada com parâmetros referenciados de uma rede em operação comercial e versão de software do sistema RL50. No comissionamento da eNodeB, foram aplicadas as configurações de rádio frequência listadas na Tabela III.

TABELA III  
TABELA DE PARÂMETROS DE RADIO FREQUÊNCIA CONFIGURADOS NA ENodeB.

Parâmetros	Valores
eNodeB ID	10405
Local Cell ID	5
TAC	38100
Potência do Transmissor	40 watts / 46 dBm
Frequência no enlace direto	2665.0 MHz (EARFCN 3200)
Frequência do enlace reverso	2545.0 MHz (EARFCN 21200)
Largura de Banda	10 MHz

Para composição do sistema irradiante, foram utilizadas duas antenas omnidirecionais do fabricante Celta (modelo: CE-150727) de forma a possibilitar a configuração do MIMO, sendo ambas instaladas no teto a uma altura de 3 metros.

Para calcular a potência recebida pelo sinal de referência (RSRP, do inglês *Reference Signal Received Power*) dado em dBm no parêlo celular, é necessário um terminal com aplicativo específico para coletar as informações que são escaneadas da rede e transmitidas pela eNodeB. No cenário, foi utilizado um aparelho celular do fabricante Sony (modelo: D6633) e o aplicativo G-NetTrack.

O exato posicionamento do celular em relação a antena do transmissor é um fator fundamental para o sucesso do experimento, pois em conjunto com a medição da potência recebida pelo sinal de referência gera o binômio de mapeamento dos pontos da função base para calibração dos modelos. Esse posicionamento pode ser identificado através de métodos matemáticos [5] ou de através de instrumentos de medição. Visto que o cenário proposto é um ambiente interior, o georreferenciamento se torna um fator de dificuldade, o que aumenta a complexidade da aplicação dos métodos matemáticos. Para realizar as medições e manter a confiabilidade nas distâncias aferidas, utilizou-se um medidor laser de distâncias (modelo: GLM 80 *Professional*) do fabricante Bosch.

#### V. RESULTADOS

A classificação dos resultados obtidos, encontram-se populadas na Tabela IV e Tabela V. Nelas podem-se avaliar de forma explícita os ganhos obtidos através do processo de otimização. Inicialmente é exibido de forma consolidada todos os resultados do cálculo de desvio padrão (DP) para os modelos originais com suas respectivas remodelagens e na sequência os ganhos obtidos em dados percentuais com a evolução de cada caso. Os dados negativos, representam uma piora do desvio padrão (citados anteriormente como contraindicação).

Através dos gráficos exibidos na Figura 1 e Figura 2, é possível comparar o comportamento dos modelos analisados

TABELA IV

CLASSIFICAÇÃO DE RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO. DP (dBm).

Modelo	DP	DP (GS)	DP (MS)	DP (SA)
One Slope	5,32	2,02	2,02	2,04
Dual-Slope	3,90	3,44	6,19	5,32
Particionado	3,90	1,25	1,25	1,25
Multi-Parede COST231	13,49	2,81	2,78	2,76
Average Walls	8,68	2,76	2,76	2,76
ITU-R P1238	13,92	2,05	2,05	2,05

TABELA V

PERCENTUAL DE GANHO DA OTIMIZAÇÃO.

Modelo	DP (GS)	DP (MS)	DP (SA)
ITU-R P1238	85%	85%	85%
Multi-Parede COST231	79%	79%	80%
Average Walls	68%	68%	68%
Particionado	68%	68%	68%
Dual-Slope	12%	-59%	-36%
One Slope	62%	62%	62%

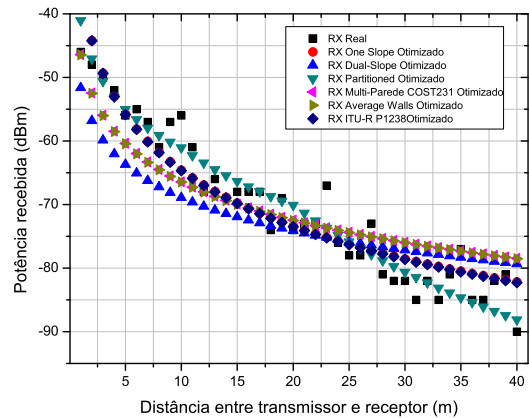


Fig. 2. Resultado Geral dos modelos Otimizados.

antes e depois da aplicação das técnicas de otimização, validando a eficiência dos resultados obtidos.

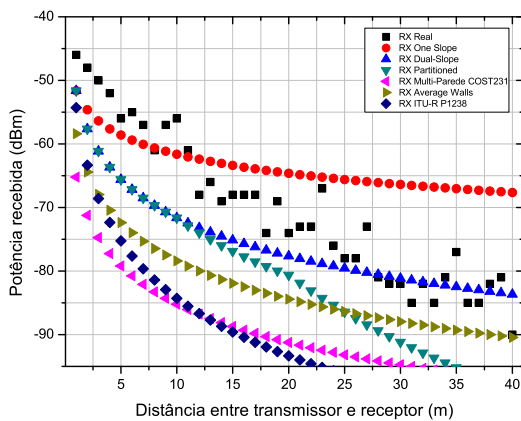


Fig. 1. Desvio Inicial dos Modelos Analisados.

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentado um estudo do comportamento de modelos de propagação empíricos em ambiente interiores para sistemas LTE que operam na faixa do espectro de 2600 MHz. Através desses modelos foi possível realizar uma reparametrização de suas constantes com valores otimizados de forma a melhorar a assertividade da projeção de comportamento da rede de telefonia móvel celular. Os resultados obtidos são comparados com as medições realizadas no cenário arbitrado para quantificar os níveis de evolução da reparametrização. Através da consolidação dos dados apresentados com ganhos positivos e experimentos bem sucedidos, é possível validar a contribuição da pesquisa para o planejamento de redes de telefonia móvel celular. Os ganhos percentuais (melhor caso de 85%) podem ser refletidos diretamente na economia de um planejamento de redes. Salienta-se que os melhores resultados foram obtidos com o modelo Particionado

remodelado para cálculo de predição com desvio padrão de 1,25 dBm.

## REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Telecomunicações. *Acessos SMP - Tecnologia*. [Online]. Disponível em: [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), 2015.
- [2] C. Cox. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [3] J. Laiho, A. Wacker, and T. Novosad. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [4] T. S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles And Practice*. Pearson Education, 2010.
- [5] L. Nunes. *Modelos de Propagação Aplicados à Localização em Telefonia Móvel Celular*, Dissertação de Mestrado, PPGES, UPE, Recife, PE, 2013.
- [6] V. A. Lopes e C. G. Rego. *Modelo Empírico de Predição de Cobertura em Ambientes Interiores*, Dissertação de Mestrado, DELT, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2014.
- [7] H. Nikookar, H. Hashemi e S. Member. *Phase Modeling of Indoor Radio em IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 594–606, 2000.
- [8] G. R. G. Rondón. *Análise de Atenuação de Sinal em Ambientes Indoor Usando Lógica Nebulosa*. Dissertação de Mestrado, CCAT, PUC-Campinas, Campinas, SP, 2009.
- [9] C. B. Andrade, R. Pierre e F. Hoefel, *On Indoor Coverage Models for Industrial Facilities em International Telecommunications Symposium*, 2010.
- [10] M. Ayadi, A. Ben e S. Tabbane. *A Novel Approach for Indoor Wave Propagation Modeling em IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 74 pp. 1544–1547, 2015.
- [11] J. C. Rodrigues, *Método de Adaptação de Modelos para Ambiente Indoor*. Dissertação de Mestrado, DEE, UFPA, Belém, PA, 2011.
- [12] ITU-R Radiocommunication Sector of ITU. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz P Series Radiowave propagation*, vol. 7, 2012.
- [13] G. R. Lindfield e J. E. T. Penny. *Numerical Methods: Using MATLAB*. Academic Press, 2012.
- [14] H. Xu, S. Wang, e S. Y. Wu. *Optimization Methods, Theory and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [15] MathWorks, [Online]. Disponível em: <http://www.mathworks.com>, 2016.
- [16] W. T. A. Lopes. *Diversidade em Modulação Aplicada à Transmissão de Imagens em Canais com Desvanecimento*, Tese de Doutorado, DEE, UFCG, Campina Grande, PB, 2003.