

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO ROBERTO DE FREITAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE PARAMETRIZAÇÃO E
AJUSTE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE RF *STANDARD PROPAGATION
MODEL - SPM*, EM AMBIENTE *OUTDOOR*, PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
MÓVEL LIMITADOS PRIVADOS DE MISSÃO E DE INFRAESTRUTURA CRÍTICAS

CURITIBA

2016

PAULO ROBERTO DE FREITAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE PARAMETRIZAÇÃO E
AJUSTE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE RF *STANDARD PROPAGATION
MODEL - SPM*, EM AMBIENTE *OUTDOOR*, PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
MÓVEL LIMITADOS PRIVADOS DE MISSÃO E DE INFRAESTRUTURA CRÍTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração de Telecomunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Horácio Tertuliano Filho

CURITIBA

2016

Freitas, Paulo Roberto de

Desenvolvimento de uma metodologia de parametrização e ajuste do modelo de propagação de RF *standard propagation model* – *SPM*, em ambiente outdoor, para sistemas de comunicação móvel limitados privados de missão e de infraestrutura críticas / Paulo Roberto de Freitas. – Curitiba, 2016.

86 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Horácio Tertuliano Filho

Bibliografia: p. 100-103

1. Ondas de rádio - Propagação. 2. Redes locais sem fio. 3. Comunicação móvel. I. Tertuliano Filho, Horácio. II. Título.

CDD 621.384

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PAULO ROBERTO DE FREITAS** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE PARAMETRIZAÇÃO DE AJUSTE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE RF STANDARD PROPAGATION MODEL-SPM EM AMBIENTE OUTDOOR PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL LIMITADOS PRIVADOS, DE MISSÃO E INFRAESTRUTURA CRÍTICAS**, após terem inquirido o aluno e realizado e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 21 de Dezembro de 2016.


HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO
Avaliador Externo (UNB)


BERNARDO REGO BARROS DE ALMEIDA LEITE
Avaliador Externo (UFPR)

Dedico este trabalho aos meus pais, Mário (*in memoriam*) e Josefa, pela educação e incentivo desde a primeira infância, à minha esposa Elza pelo apoio incondicional e companheirismo e às minhas queridas filhas Thaís e Thainá pelas contribuições, amizade e respeito.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Horácio Tertuliano Filho, pelo acompanhamento, apoio e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica e ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná.

À secretária do Programa, Maria Raquel Forte, pela disponibilidade e presteza ao longo desta trajetória.

À Companhia Paranaense de Energia e, em especial, à sua Subsidiária Integral Copel Telecomunicações, pelo suporte técnico no fornecimento dos equipamentos e materiais utilizados neste projeto.

Ao colega de empresa, Eng. Marcos Roberto Piaceski da Cruz, pelo auxílio e apoio sempre que solicitado.

Agradeço, finalmente, aos professores César Augusto Dartora, Bernardo Rego Barros de Almeida Leite e Paulo Henrique Portela de Carvalho, que se dispuseram a ler, comentar e julgar este trabalho de dissertação.

Dai graças ao Senhor porque ele é bom, eterna é sua misericórdia.
Salmo 118, 29

RESUMO

As organizações prestadoras de serviços públicos, não podem prescindir da utilização de tecnologias de informação e comunicação proprietárias, de missão e de infraestrutura críticas, as quais proporcionam, às suas atuações e operações, as condições absolutamente necessárias para realizar suas missões. Tais requisitos, como disponibilidade, confiabilidade e escalabilidade, são vitais para o atingimento das rigorosas metas de desempenho, estabelecidas pelos órgãos governamentais reguladores. O presente trabalho de pesquisa propõe uma metodologia para a parametrização e o ajuste do modelo de propagação de rádio frequência SPM, adequado à realidade física ambiental, tecnológica contemporânea e legalmente vigente no país, aplicável às redes privadas de comunicação móvel de missão e infraestrutura críticas, utilizando a faixa do espectro pertinente, destinado às autorizadas ou concessionárias concernentes, a partir de uma ferramenta computacional de predição comercial. O método empregado, na conformação e na caracterização das variáveis do modelo SPM, envolve a coleta de um conjunto extenso de medições em campo, obtido através da implementação de dois sistemas de transmissão e um sistema de recepção móvel, capaz de registrar, além dos níveis dos sinais propagados, as respectivas coordenadas geográficas pontuais, perfazendo o espaço amostral representativo das regiões morfológicas urbanas, suburbanas e rurais. O ajuste e parametrização do modelo SPM é, então, conduzido, utilizando uma técnica comparativa de regressão não linear, de acordo com a amostragem coletada. A validação do modelo SPM calibrado é realizada por meio das análises qualitativa e quantitativa, verificando a aproximação entre o ajuste proposto e a coleção de dados medidos, comparando-se as curvas de regressão e aplicando-se cálculos estatísticos, como erro médio, desvio padrão e correlação, nos espaços amostrais computados. A utilização da metodologia de desenvolvimento empreendida, apresenta importante contribuição para auxiliar as implementações ou validações de projetos de predição de cobertura e propagação, na faixa do espectro de frequências considerado e, ainda, pode ser empregada na avaliação dos limites e potencialidades de outros modelamentos empíricos.

Palavras-chave: Infraestrutura Crítica. Modelo de Propagação. Predição de Cobertura.

ABSTRACT

The organizations providing public services, should not work without the use of proprietary information and communication technologies and mission critical infrastructure, which provide, for their actions and operations, the absolutely necessary conditions to carry out their missions. Such requirements such as availability, reliability and scalability are vital to the achievement of stringent performance targets set by government regulatory agencies. The present work proposes a methodology for the parameterization and adjustment of the SPM radio frequency propagation model, adequate to the contemporary physical and legal environmental reality in the country, applicable to private mission critical communication and critical infrastructure networks, using the range of the pertinent spectrum, destined to the authorized or dealers concerned, from a computational commercial tool of prediction. The method used in the conformation and characterization of the variables for the SPM model, involves the collection of an extensive set of measurements in the field, obtained through the implementation of two transmission systems and a mobile reception system capable of recording, the levels of the propagated signals and the respective geographical coordinates, making up the sample space representative of the urban, suburban and rural morphological regions. The adjustment and parameterization of the SPM model is then conducted, using a comparative nonlinear regression technique, according to the collected sampling data. The validation of the calibrated SPM model is performed through qualitative and quantitative analyzes, verifying the approximation between the proposed fit and the collection of measured data, comparing the regression curves and applying statistical calculations such as mean error, standard deviation and correlation, in the sample spaces computed. The use of the development methodology undertaken has an important contribution to help implementations or validations of coverage and propagation prediction projects in the range of the frequency spectrum considered and can also be used to evaluate the limits and potentialities of other empirical models

Key words: Critical Infrastructure. Propagation Model. Coverage Prediction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE ESFÉRICA DE DENSIDADE DE POTÊNCIA PARA O ESPAÇO LIVRE	23
FIGURA 2 - SERGEY A. SCHELKUNOFF E HARALD T. FRIIS	25
FIGURA 3 - FENÔMENOS BÁSICOS DE PROPAGAÇÃO, REFLEXÃO, DIFRAÇÃO E ESPALHAMENTO, RESPECTIVAMENTE ILUSTRADOS	26
FIGURA 4 - SITUAÇÃO FÍSICA DA SUPERFÍCIE DE TERRA PLANA	27
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DO MECANISMO FÍSICO DA DIFRAÇÃO.....	29
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DA OBSTRUÇÃO TIPO GUME DE FACA	30
FIGURA 7 - MAGNITUDE RELATIVA DA ATENUAÇÃO POR DIFRAÇÃO EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO ADIMENSIONAL v	31
FIGURA 8 - MÉTODO DE EPSTEIN-PETERSON PARA DIFRAÇÃO COM TRÊS OBSTRUÇÕES	32
FIGURA 9 - MÉTODO DE MILLINGTON PARA A DIFRAÇÃO COM TRÊS OBSTRUÇÕES	33
FIGURA 10 - MÉTODO DE DEYGOUT PARA DIFRAÇÃO COM TRÊS OBSTRUÇÕES	33
FIGURA 11 - ÁBACO DA POTÊNCIA DE SINAL RECEBIDA PARA 50% DE LOCALIZAÇÃO MÉDIA E 1 WATT DE POTÊNCIA IRRADIADA.....	37
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DE PARAMETRIZAÇÃO	48
FIGURA 13 - ORTOFOTO DE LOCAÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES NA SE PHS	55
FIGURA 14 - ORTOFOTO DE LOCAÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES NA SE CEL	56
FIGURA 15 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO VHF DAS SEs PHS E CEL	57
FIGURA 16 - ANTENA COLINEAR OMNIDIRECIONAL E DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO.....	58
FIGURA 17 - VISTA FRONTAL EQUIPAMENTO REPETIDOR TB9100	59
FIGURA 18 - VISTA TRASEIRA EQUIPAMENTO REPETIDOR TB9100	59
FIGURA 19 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE RECEPÇÃO MÓVEL.....	60
FIGURA 20 - GPS GARMIN ETREX VISTA.....	61

FIGURA 21 - ANTENA OMNIDIRECIONAL $\frac{1}{4} \lambda$	61
FIGURA 22 - INVERSOR 12 Vcc/127 Vca	62
FIGURA 23 - ROTEADOR DE PACOTES TCP/IP	62
FIGURA 24 - LINHAS DE COMANDO TELNET	63
FIGURA 25 - INSTRUMENTO MONITOR DE RF	64
FIGURA 26 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE COLETA DE DADOS.....	66
FIGURA 27 - NÍVEIS DE RF E HORÁRIOS COLETADOS	67
FIGURA 28 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO VBS	68
FIGURA 29 - INTERFACE GRÁFICA DO PROGRAMA <i>TRACKMAKER</i> ®.....	69
FIGURA 30 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS E HORÁRIOS COLETADOS	70
FIGURA 31 - TABELA DE INFORMAÇÕES DE MEDIÇÃO E COORDENADAS CONCATENADAS	71
FIGURA 32 - TRAJETÓRIAS GEOREFERENCIADAS PERCORRIDAS DESDE A SUBESTAÇÃO PINHEIROS E LEGENDA DOS NÍVEIS DE RECEPÇÃO	75
FIGURA 33 - TRAJETÓRIAS GEOREFERENCIADAS PERCORRIDAS DESDE A SUBESTAÇÃO CASCAVEL E LEGENDA DOS NÍVEIS DE RECEPÇÃO	76
FIGURA 34 - CONSTANTE DE <i>OFFSET</i> DO AFASTAMENTO MÉDIO ENTRE CURVAS	78
FIGURA 35 - INCLINAÇÃO DAS CURVAS DE REGRESSÃO	79
FIGURA 36 - COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE SIMULAÇÃO COM DIFRAÇÃO ..	80
FIGURA 37 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA URBANA phs24	86
FIGURA 38 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA URBANA phs31	86
FIGURA 39 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA URBANA cel0487	
FIGURA 40 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA SUBURBANA phs28	88
FIGURA 41 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA SUBURBANA phs35	89
FIGURA 42 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA SUBURBANA cel06.....	89
FIGURA 43 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA RURAL phs25.	91

FIGURA 44 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA RURAL phs30 .92	
FIGURA 45 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA RURAL cel03 ..92	
FIGURA 46 - DIAGRAMA DE COBERTURA PONTO ÁREA PARA A SUBESTAÇÃO PINHEIROS	95
FIGURA 47 - DIAGRAMA DE COBERTURA PONTO ÁREA PARA A SUBESTAÇÃO CASCAVEL	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	VALORES NUMÉRICOS DOS PARÂMETROS DO MODELO	44
TABELA 2	LOCALIZAÇÃO DAS TORRES E DOS SÍTIOS DE TRANSMISSÃO	54
TABELA 3	DETALHAMENTO DOS COEFICIENTES E PARÂMETROS DO AJUSTE PARA O MODELO SPM.....	82
TABELA 4	ESTATÍSTICAS DAS ROTAS URBANAS.....	88
TABELA 5	ESTATÍSTICAS DAS ROTAS SUBURBANAS.....	90
TABELA 6	ESTATÍSTICAS DAS ROTAS RURAIS.....	93
TABELA 7	ESTATÍSTICAS GLOBAIS DAS ROTAS	94

LISTA DE SIGLAS

AM	Amplitude Modulada
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AVL	Automatic Vehicle Location
CDMA	Code Division Multiple Access
COST	European Cooperation in Science and Technology
CW	Continuous Wave
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
FDM	Frequency Division Multiplexing
FM	Frequência Modulada
GIS	Geographical Information System
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union – Radio Sector
LTE	Long Term Evolution
MAE	Mean Absolute Error
MSE	Mean Squared Error
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PTT	Push To Talk
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RF	Rádio Frequência
RMSE	Root Mean Squared Error
SCDMA	Synchronous Code Division Multiple Access
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
SPM	Standard Propagation Model
SUI	Stanford University Interim

TCP	Transmission Control Protocol
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTM	Universal Transverse Mercator
VBS	Visual Basic Script
VHF	Very High Frequency
WiMAX	Wireless Maximum Speed
WLL	Wireless Local Loop

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA TRANSMISSÃO SEM FIO E O MODELAMENTO DO CANAL DE RÁDIO MÓVEL	19
2.1	AS ERAS CLÁSSICA E MODERNA DO ELETROMAGNETISMO	19
2.2	A ERA DAS TELECOMUNICAÇÕES	20
2.3	CARACTERÍSTICAS E ASPECTOS BÁSICOS DA PROPAGAÇÃO NO CANAL DE RÁDIO MÓVEL.....	22
2.4	MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO.....	25
2.4.1	Modelo de reflexão em terra plana	26
2.4.2	Modelos de difração	28
2.4.2.1	Método de Epstein-Peterson.....	32
2.4.2.2	Método de Millington.....	33
2.4.2.3	Método de Deygout.....	33
2.4.3	Modelo de reflexão e espalhamento em superfície rugosa	34
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	34
3	MODELOS DE PROPAGAÇÃO EMPÍRICOS E A APLICAÇÃO EM FERRAMENTA COMPUTACIONAL COMERCIAL	36
3.1	MODELO DE EGLI	37
3.2	MODELO DE LONGLEY E RICE.....	38
3.3	MODELO DE HATA.....	39

3.4	MODELO DE SAKAGAMI E KUBOI	40
3.5	MODELO DE COST-HATA.....	42
3.6	MODELO DE ERCEG.....	43
3.6.1	Modelo de Erceg Modificado ou Stanford University Interim (SUI)	44
3.6.2	Modelo Stanford University Interim (SUI) estendido.....	45
3.7	MODELO WLL	46
3.8	MODELO SPM E A APLICAÇÃO COMPUTACIONAL ATOLL®.....	47
3.8.1	Descrição básica da ferramenta computacional	47
3.8.2	Descrição do modelo SPM	48
3.8.3	Premissas e restrições do modelo SPM	50
3.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	51
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1	MATERIAIS.....	53
4.1.1	Estações de transmissão.....	53
4.1.2	Estação de recepção	60
4.2	MÉTODOS.....	64
4.2.1	Coleta de dados.....	65
4.2.2	Critério para amostragem e descarte na coleta de dados	71
4.2.3	Parametrização e ajuste do modelo SPM.....	73
4.2.3.1	Ambiente de simulações e de coleta.....	74
4.2.3.2	Ajuste do modelo de propagação SPM.....	77
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	83
5	TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	84
5.1	PLOTAGEM E ESTATÍSTICA DAS CURVAS DE SIMULAÇÃO	84
5.1.1	Rotas percorridas em áreas urbanas.....	85
5.1.2	Rotas percorridas em áreas suburbanas.....	88
5.1.3	Rotas percorridas em áreas rurais.....	90

5.2	VALIDAÇÃO FINAL E ESTATÍSTICA GERAL.....	93
5.3	DIAGRAMAS DE PREDIÇÃO DOS SISTEMAS PONTO ÁREA.....	94
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	97
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	98
	REFERÊNCIAS.....	100
	ANEXOS	104

1 INTRODUÇÃO

Na grande maioria dos países ao redor do mundo, o modelo de negócios denominado *utility*, apresenta-se formatado por características típicas de serviços públicos, tais como: energia, transporte, água e telecomunicações, os quais compreendem as necessidades de disponibilidade, de alta confiabilidade crítica, de facilidade de utilização e de escalabilidade e são fortemente regulados por agências governamentais (RAPPA, 2004).

As empresas que adotam o modelo descrito são designadas *utilities*, sendo que, no Brasil, podem assumir a natureza de direito público ou privado e, possuem redes de informação e comunicação caracterizadas como críticas, que devem apresentar confiabilidade e disponibilidade, isto é, devem ser tolerantes a falhas, nas suas bases tecnológicas de infraestrutura pois, em seus sistemas de operação e manutenção, residem os processos vitais de atuação segura e eficaz e, que, por sua vez, proporcionam produtos e serviços de utilidade pública eficientes e confiáveis.

Define-se, conseqüentemente, como infraestrutura crítica de telecomunicações aplicadas às *utilities* e, formalmente adotada no país, aquela cuja destruição, mesmo que parcial ou a degradação sensível de seu desempenho por um determinado período de tempo, possa causar impacto significativo do ponto de vista social, econômico e político (BRASIL, 2008).

Adicionalmente, Liotine (2003), genericamente, define que missão crítica refere-se à infraestrutura e à operação que são absolutamente necessárias para uma organização realizar sua missão. No caso de um agente prestador de utilidade pública, a missão crítica pode assumir vários contextos, dependendo de sua natureza. Por exemplo: serviços ou segurança públicos.

Outra definição aplicável ao contexto, trata das operações de missão críticas dependentes de comunicação por voz ou dados, as quais devem apresentar uma caracterização mínima, cujos elementos chave estão listados abaixo:

- Realização de manobras de operação através de comandos de voz, com inteligibilidade e gravação em tempo real. Esta é uma característica de importância crucial nas comunicações críticas, uma vez que os interlocutores devem entender as mensagens sem necessidade de

repetição e, ainda, reproduzir as conversações armazenadas em caso de análises posteriores;

- Modo de chamada tipo *PTT (push to talk)* de acionamento instantâneo, que permite a transmissão dos sinais de forma imediata para o receptor ou conjunto de receptores usuários;
- Chamadas para grupos específicos de trabalho, cujos membros dedicam-se a situações particularizadas e/ou regionalizadas;
- Existência de centros de despacho de serviços, que podem acessar qualquer ponto de acionamento remoto e/ou local disponível na rede, com possibilidade de chamadas individuais ou em grupo para seus usuários;
- Identificação de usuários através de protocolos padronizados em toda rede;
- Chamadas de alerta e emergência, que indicam situações ou condições urgentes e que requerem prioridade de acesso imediato à rede;
- Capacidade de comunicação direta entre usuários, quando fora do alcance da rede ou quando atuando em áreas confinadas;
- Utilização de equipamentos com especificações militares e com graus de proteção elevados contra penetração de líquidos e poeira, incluindo invólucros com resistência mecânica e blindagem eletromagnética;
- Adoção de características intrinsecamente seguras, para operações em ambientes com atmosferas agressivas e explosivas;
- Possibilidade de ativação de encriptação de mensagens para sigilo nas comunicações;

- Os dispositivos da rede, especialmente os terminais de usuários, devem adotar padrões internacionais regulamentados e padronizados nas tecnologias de fabricação, incluindo os protocolos de interfaces aéreas e suportar mecanismos tipo *AVL (automatic vehicle location)*.

Adicionalmente, deve-se destacar que, embora as *utilities* utilizem dispositivos de usuários genéricos comuns e, cumulativamente, outros serviços de redes comerciais, como opção secundária de comunicação, estas redes e dispositivos não possuem o desempenho requerido em situações de eventos críticos, como quedas de energia, intempéries desfavoráveis, vandalismo, entre outros incidentes. Os sistemas comerciais de comunicação sofrem, também, frequentemente, sobrecarga de usuários e, nestas situações, causam indisponibilidade nos serviços.

Desta forma, os requisitos de comunicação demandados pelas *utilities* necessitam de canais dedicados e preferenciais, com prioridade de acesso e disponíveis a qualquer tempo, para mobilizar suas equipes de campo, em contingências emergenciais.

Outros requisitos estabelecem que, a confiabilidade, a segurança e a redundância das redes, devem permanecer sob o controle local da engenharia e da operação e manutenção internas pertinentes, incluindo a disponibilidade da melhor área de cobertura possível, dentro das respectivas regiões de atuação, com a mínima ocorrência de zonas de sombra.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho pretende desenvolver uma metodologia para o ajuste das variáveis que definem o modelo de propagação de rádio frequência *SPM (Standard Propagation Model)*, adequado à realidade ambiental regional, tecnológica e legal no Brasil, aplicáveis às faixas de frequências comumente usadas pelas *utilities*, em suas redes privadas de comunicação móvel, a partir de uma ferramenta

computacional de predição comercial, que pode tratar e conformar o referido modelo disponível e, adicionalmente, comparar as predições com medições em campo.

Espera-se, então, alcançar no modelamento, um ajuste compatível com a topografia e a morfologia características das áreas urbanas, suburbanas e rurais representativas do território objeto desta pesquisa. Como o interesse das *utilities*, em sua maioria, contempla as regiões metropolitanas e rurais, a morfologia determinada pelos ambientes urbanos densos, não será considerada no escopo deste trabalho, aliada ao fato de que o tratamento e estudo dos fenômenos de propagação, neste último ambiente, diferem da análise e metodologia pretendida (YUN; ISKANDER, 2015).

Conforme Sharma e Singh (2010), de modo geral, os modelos de propagação podem ser classificados em três formas básicas: determinísticos, estatísticos e empíricos. Os modelos determinísticos utilizam as equações de Maxwell, incluindo as leis de refração e difração e, portanto, são melhores e mais exatos, porém exigem maiores recursos computacionais, que os torna difíceis de implementar e executar em dispositivos convencionais de pequeno porte e de menor custo. Já nos modelos estatísticos, a predição é obtida através do uso de probabilidades, em especial as funções de densidade de probabilidade.

No caso dos modelos empíricos, estes utilizam equações obtidas de medidas de propagação em campo, em vários ambientes, os quais resultam em predições com exatidão suficientemente adequadas.

Então, comumente, duas estratégias de predição de perdas de propagação são utilizadas atualmente. Uma emprega os modelos, já citados, determinísticos ou estatísticos de propagação e outra deriva dos modelos empíricos, a partir de um conjunto de medidas em campo, cuja metodologia será empregada neste trabalho.

Para tanto, são realizadas medidas de campo, com auxílio de sistemas geoprocessados e de coleta de intensidade de sinal recebido, exportando, de forma automatizada, para a ferramenta computacional de predição, um conjunto de informações que compreendem: coordenadas geográficas, endereços, medição do sinal recebido, nível de ruído presente, morfologia local e demais dados de interesse.

Desta forma, espera-se ajustar a ferramenta, equacionando e atualizando sua base modelar e, complementarmente, busca-se delinear o comportamento dos mecanismos de propagação de radiofrequência nas regiões pesquisadas,

contribuindo para a formatação de futuras pesquisas acadêmicas, relativas ao contexto teórico-experimental e ao desenvolvimento e à aplicação prática do modelamento de propagação obtido.

1.1.2 Objetivos específicos

Para o ajuste da ferramenta computacional de predição de cobertura e para o equacionamento do modelo de propagação de rádio frequência ponto-área, os seguintes objetivos específicos serão buscados:

- Descrever a parametrização, o cálculo e as recomendações do modelo padrão de propagação Forsk (2010) *SPM (Standard Propagation Model)* baseado no modelo de Hata (1980), aplicados à faixa de frequências *VHF (Very High Frequency)*;
- Coletar os conjuntos de dados de medição de recepção de sinal para os transmissores operando em *CW (Continuous Wave)*, em determinadas frequência e potência, nos ambientes urbano, suburbano e rural;
- Executar o processo de parametrização e ajuste da ferramenta computacional de predição, para o modelo padrão de propagação;
- Desenvolver uma metodologia para a parametrização e o ajuste do modelo *SPM* aplicável aos sistemas de comunicação móvel ponto-área, verificando, através de avaliações estatísticas e cálculos de erros de estimativas, como *MAE (Mean Absolute Error)*, *MSE (Mean Squared Error)* e *RMSE (Root Mean Squared Error)*, a exatidão deste modelo calibrado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o advento do marco regulatório nos Sistemas e Serviços Limitados Privados (2013) e, no arcabouço das Resoluções pertinentes, oriundo da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), as *utilities* brasileiras necessitam digitalizar seus sistemas de comunicação móvel de voz e dados, especialmente aqueles de missão e infraestrutura críticas, adotando as tecnologias de modulação digitais disponíveis e homologadas no mercado, de forma a manter suas redes licenciadas e autorizadas.

Também, com a implantação compulsória das determinações contidas na Resolução N° 568 da ANATEL, cuja canalização *VHF* é transcrita nos ANEXOS A e B, os projetos de cobertura, para os sistemas de comunicação móvel, necessitam de uma predição diferenciada, disponível nas ferramentas computacionais atuais, porém com necessidade de adequação ao ambiente operacional e à realidade morfológica e topográfica regionais, notadamente na utilização das faixas de frequência em uso no país (BRASIL, 2011).

Assim as empresas de energia, transporte, água e telecomunicações, usuárias dos canais adequados, preferenciais e licenciados, definidos pelas Resoluções pertinentes, obrigam-se a buscar, com maior exatidão possível, a determinação das áreas de cobertura de suas concessões, evitando incorrer em um ambiente de incertezas operacional e de projeto de implementação.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste trabalho compreende o capítulo introdutório, no qual se apresentam os aspectos contextuais, bem como se descrevem os objetivos, a justificativa e a relevância da pesquisa.

Esta estrutura compreende, ainda, o capítulo 2, onde é apresentada a evolução histórica da transmissão das ondas eletromagnéticas, associadas às comunicações sem fio, incluindo o modelamento genérico do comportamento do canal de rádio móvel, a propagação, a atenuação e os fenômenos característicos decorrentes.

Em seguida, no capítulo 3, é realizada uma pesquisa bibliográfica que envolve a evolução das técnicas de modelamentos matemáticos empíricos, de propagação e de desvanecimento dos sinais de RF (radiofrequência) emitidos, culminando com o detalhamento e a descrição da implementação comercial do modelo de propagação *SPM*, incluindo suas premissas e limitações, na ferramenta computacional utilizada para auxiliar o desenvolvimento do método de calibração do referido modelo.

No capítulo 4, é descrita a metodologia empregada para a coleta de dados em campo, cujas medidas foram obtidas a partir de equipamentos transmissores, sistemas irradiantes e infraestruturas de torres de telecomunicações, localizadas na cidade paranaense de Cascavel, nas Subestações Cascavel e Pinheiros, pertencentes à Companhia Paranaense de Energia (Copel). As regiões nas quais as duas infraestruturas encontram-se instaladas representam, de forma amostral, as condições morfológicas necessárias para o modelamento dos ambientes urbano, suburbano e rural. Ainda neste capítulo, é conduzida a parametrização do modelo padrão da ferramenta de predição utilizada, como base do desenvolvimento da metodologia, dos testes e da validação para o ajuste pretendido, de acordo com a amostragem coletada.

Na sequência, no capítulo 5, são descritos os testes de verificação realizados e os resultados ajustados, para o modelo derivado da parametrização desenvolvida, através de avaliações e de estimativas estatísticas de erros.

O capítulo 6, então, tem como objeto, as conclusões acerca do modelamento, assim como as eventuais limitações, as sugestões e a aplicabilidade para futuros trabalhos de pesquisa pertinentes.

2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA TRANSMISSÃO SEM FIO E O MODELAMENTO DO CANAL DE RÁDIO MÓVEL

As tecnologias de informação e (tele) comunicação (TICs), tornaram-se parte integrante da sociedade moderna, produzindo um profundo impacto comportamental que preenche e influencia as relações humanas, nas redes sociais virtuais, no entretenimento (música e vídeo eletrônicos) ou mesmo nas aplicações críticas de segurança e serviços públicos. Caso as projeções de mercado se confirmem, dentro de um curto prazo, praticamente todos os dispositivos e objetos físicos estarão conectados e interativos (RODRIGUEZ, 2015).

Toda esta conectividade tornou-se realidade devido, principalmente, à transmissão e recepção de sinais de rádio, transportados por ondas eletromagnéticas, cujo histórico é apresentado neste capítulo, incluindo o modelamento básico do canal sem fio e os mecanismos físicos de propagação, que causam desvanecimento e atenuação nos sistemas de telecomunicações, especificamente nos sistemas móveis.

2.1 AS ERAS CLÁSSICA E MODERNA DO ELETROMAGNETISMO

A partir do início do século XIX, cujas décadas iniciais foram profícuas nas descobertas relativas à eletricidade e ao estabelecimento de campos magnéticos, induzidos pela corrente elétrica circulando através de condutores apropriados, contribuíram sobremaneira para o desenvolvimento inicial do eletromagnetismo e, em decorrência, a transmissão das ondas eletromagnéticas. Nessa época, em 1831, Michael Faraday, construiu o primeiro gerador elétrico, convertendo o funcionamento do motor elétrico de corrente contínua, desenvolvido por Joseph Henry alguns anos antes, em uma máquina rudimentar capaz de produzir energia elétrica. Faraday demonstrou, em essência que, uma alteração ou variação no campo magnético induz um campo elétrico e vice-versa (ULABY; RAVAIOLI, 2015).

Esta relação de conversão, na qual uma alteração ou mudança no campo elétrico induz um campo magnético foi, primeiramente, proposta e, matematicamente expressa, por James Clerk Maxwell em 1864 e incorporada em suas quatro famosas

equações em 1873. Maxwell (1873) publicava, então, nesse ano, o seu Tratado em Eletricidade e Eletromagnetismo, no qual foram unificadas as descobertas de Coulomb, Oersted, Ampere, Faraday, dentre outros.

Maxwell ainda sugeriu, em seus postulados que, uma perturbação eletromagnética propaga-se com a velocidade da luz no espaço livre e, então, deduziu que a luz seria, também, uma onda eletromagnética transversa, em relação à direção e aos campos elétrico e magnético presentes (SARKAR et al., 2006).

A teoria de Maxwell, a qual primeiramente comprovou e previu a existência das ondas eletromagnéticas, não foi completamente e imediatamente aceita pela comunidade científica, até que Heinrich Hertz em 1887, descobriu e verificou experimentalmente a existência das ondas de rádio, através de um sistema que podia gerar ondas eletromagnéticas e, também, detectá-las (HERTZ, 1893).

Por volta de 1896, ainda na era considerada clássica, Guglielmo Marconi já havia registrado diversas patentes em sistemas de rádio e, realizou, a primeira transmissão transoceânica no ano de 1899, estabelecendo um enlace entre Poldhu, no País de Gales e a ilha da Terra Nova, no Canadá. Em 1909 foi premiado com o Nobel de Física, também por suas experiências e realizações em radiotelegrafia.

2.2 A ERA DAS TELECOMUNICAÇÕES

Desde o início do século XX, os desenvolvimentos das radiocomunicações e, posteriormente, denominadas pelo uso consagrado, o termo telecomunicações, paralelamente ao desenvolvimento das tecnologias computacionais, sofreram vertiginosa ascensão, os quais são, resumida e criteriosamente, explorados na linha do tempo apresentada abaixo (ULABY; RAVAIOLI, 2015):

- Reginald Fessenden em 1902, inventa a modulação em amplitude (AM) para transmissão telefônica. Em 1906, inaugura a radiodifusão em amplitude modulada, transmitindo voz e musicais, na véspera de Natal desse ano.
- Lee De Forest em 1912, desenvolve o amplificador com válvula tríodo para a telegrafia sem fio. Também em 1912, o pedido de socorro enviado

pelo navio Titanic via rádio, pode ser detectado a 100 km de distância no oceano, pelo transatlântico Carpathia, que manobrou para salvar 705 passageiros, poucas horas após o acidente.

- Edwin Armstrong em 1919, inventa o receptor de rádio super-heteródino.
- Vladimir Zworykin em 1923, inventa o televisor. Em 1926, John Baird transmite imagens sobre linhas telefônicas, entre Londres e Glasgow. As transmissões regulares de televisão por radiodifusão, iniciam na Alemanha em 1935, na Inglaterra em 1936 e nos Estados Unidos em 1939.
- Em 1926 é inaugurado o primeiro serviço telefônico regular entre Londres e Nova Iorque.
- Edwin Armstrong em 1933, inventa a modulação em frequência (FM).
- Robert Watson-Watt em 1935, inventa o sistema de radar.
- William Shockley, Walter Brattain e John Bardeen em 1947, inventam o transistor de junção nos Laboratórios Bell, invento que catalisaria a integração da eletrônica.
- Jack Kilby em 1958, constrói o primeiro circuito integrado utilizando o material semiconductor com base no elemento germânio e, paralelamente, Robert Noyce constrói o mesmo dispositivo em silício.
- Em 1960 é lançado, com sucesso, o primeiro satélite de comunicação passivo pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o qual reflete os sinais de rádio para o planeta. Em 1963, o primeiro satélite de comunicação é colocado em órbita geoestacionária.

- Em 1979 o Japão constrói a primeira rede de telefonia celular, seguida, nos anos seguintes por redes implantadas nos Estados Unidos. Em 2002 os dispositivos terminais de usuários passam a suportar transmissões de vídeo e Internet.
- Em 1997 a sonda *Pathfinder* transmite imagens de Marte para a Terra.
- Em 2012 os dispositivos tipo *smartphones* ultrapassam 1 bilhão de unidades em operação no mundo.

2.3 CARACTERÍSTICAS E ASPECTOS BÁSICOS DA PROPAGAÇÃO NO CANAL DE RÁDIO MÓVEL

O canal de rádio móvel coloca acentuadas limitações nos sistemas de comunicação sem fio. O percurso da propagação dos sinais de RF, entre o transmissor e o receptor, pode apresentar, desde uma simples linha de visada até severas obstruções, causadas por obstáculos sólidos, como edifícios e construções, elevações do relevo e algum tipo de vegetação.

Desta forma, o canal de rádio móvel torna-se aleatório, uma vez que a estação terminal pode mover-se com velocidades diferentes e causa flutuações dificilmente previsíveis no sinal de RF. O modelamento deste canal, historicamente, tem sido um dos maiores desafios para o projeto dos sistemas móveis e, normalmente, é tratado de maneira estatística, baseado em medições de campo, realizadas especificamente para um sistema de comunicação em particular e para uma determinada alocação de espectro (RAPPAPORT, 2002).

O meio de transmissão primário na propagação da onda de rádio é a atmosfera e a atenuação destas ondas é devida ao espalhamento geométrico, à interferência de múltiplos caminhos e à perda de absorção no ambiente (SIWIAK; BAHREINI, 2007).

Neste contexto, a perda de transmissão, apresenta, primeiramente, uma característica básica: a propagação no espaço livre, considerando-se os meios naturais como a troposfera e a ionosfera e, além disso, as transmissões por enlaces terrestres com visada direta ou por satélites geoestacionários ou de baixa órbita.

Assim, a equação da perda no espaço livre pode ser derivada da premissa de que o campo eletromagnético distante, através do qual a propagação percorre a distância de separação entre o transmissor e o receptor, é muito maior que a dimensão linear da antena de recepção e, ainda, a antena de transmissão é ideal e isotrópica.

Sob estas circunstâncias, a energia irradiada é espalhada sobre a superfície de uma esfera, conforme ilustrado na FIGURA 1 e, é definida, como a densidade de potência nesta superfície, a qual pode ser expressa da seguinte maneira (SALOUS, 2013):

$$S = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (1)$$

onde S é a densidade de potência, d é o raio considerado até a superfície da esfera e P_T é a potência transmitida.

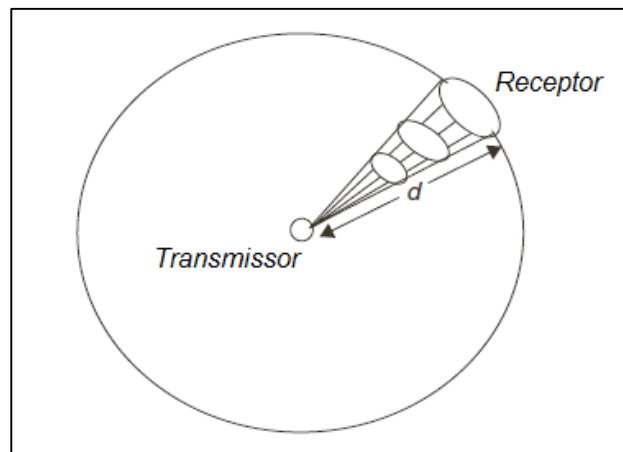


FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE ESFÉRICA DE DENSIDADE DE POTÊNCIA PARA O ESPAÇO LIVRE
 FONTE: ADAPTADO DE SALOUS (2013).

Ainda de acordo com a FIGURA 1, as linhas de densidade de fluxo decrescem na medida em que a distância aumenta a partir da fonte (transmissor). Então, a potência disponível na antena do receptor P_R , com área efetiva ou abertura A , é dada por:

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi d^2} A = \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} P_T G_R$$

onde G_R é o ganho da antena de recepção e λ o comprimento de onda e, é dado por:

$$G_R = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (3)$$

A equação (2) pode ser reescrita para expressar a perda no espaço, através da relação entre a potência transmitida e a potência recebida. Para uma antena de recepção isotrópica e com ganho unitário, tem-se:

$$\frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^2 \quad (4)$$

onde f é a frequência e c a velocidade da luz.

Pode-se expressar a equação (4) em decibéis e, para maior conveniência, a frequência será expressa em [MHz] e a distância em [km]. Neste caso, a equação da perda no espaço livre L_f , é dada por:

$$L_f = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} = 20 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} d_{km} + 32,4 \text{ dB} \quad (5)$$

As considerações e descrições apresentadas anteriormente, foram primeiramente exploradas por Friis (1946), cuja expressão clássica, a qual pode ser deduzida das expressões anteriores, para a perda do espaço livre é expressa na equação (6) e, como ilustração histórica, a mesma equação pode ser vista na FIGURA 2, no quadro de fundo da imagem.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{A_R A_T}{\lambda^2 d^2} \quad (6)$$



FIGURA 2 - SERGEY A. SCHELKUNOFF E HARALD T. FRIIS
 FONTE: SIWIAK (2007).

2.4 MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO

Os três fenômenos básicos de propagação, além daquele associado ao meio natural, como a perda no espaço livre, são a reflexão, a difração e o espalhamento, conforme esquematizado na FIGURA 3. A reflexão pode ocorrer na superfície do solo ou, quando uma onda plana encontra um objeto com grandes dimensões, se comparado com o comprimento de onda incidente. De acordo com a lei da reflexão, a direção da onda plana incidente e a direção da onda plana refletida, formam o mesmo ângulo em relação à superfície normal. A difração acontece, normalmente, quando a onda plana atinge um objeto cujas dimensões são da mesma ordem do comprimento de onda. Conforme o Princípio de Huygens, a interação da onda plana com o objeto gera ondas secundárias atrás deste obstáculo. O espalhamento ocorre quando uma onda plana incide em algum objeto que possui dimensões muito reduzidas se comparado com o comprimento de onda original. O objeto ou obstáculo dispersivo redireciona a energia da onda plana incidente em várias direções (PÄTZOLD, 2012).

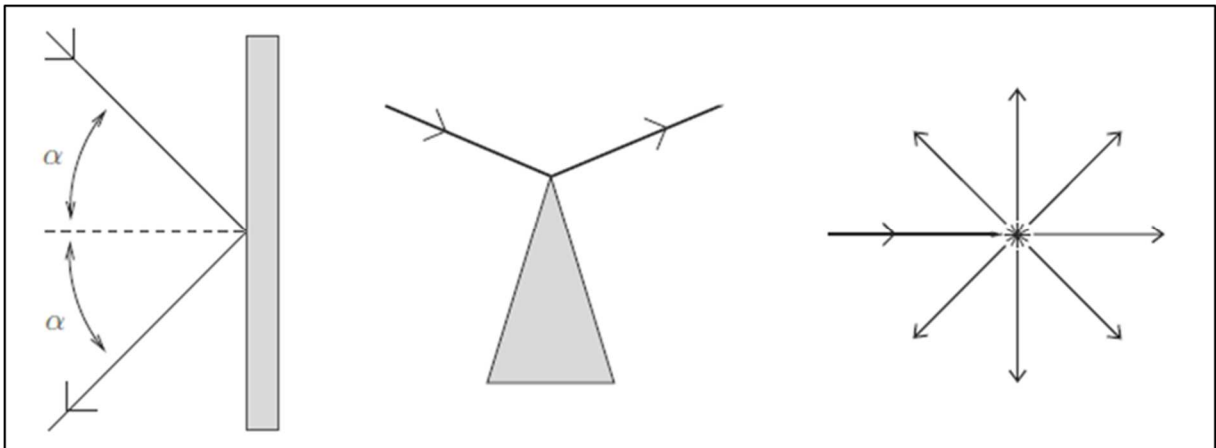


FIGURA 3 - FENÔMENOS BÁSICOS DE PROPAGAÇÃO, REFLEXÃO, DIFRAÇÃO E ESPALHAMENTO, RESPECTIVAMENTE ILUSTRADOS
 FONTE: PATZOLD (2012).

2.4.1 Modelo de reflexão em terra plana

O modelo de reflexão comumente utilizado para determinar, com maior exatidão a perda de percurso de uma transmissão no canal de rádio móvel, é o modelo de terra plana, que serve de base, inclusive, para determinação e contribuição para estimar a atenuação na propagação, na existência de reflexões múltiplas, em várias superfícies lisas, como obstáculos planos ou a própria superfície da crosta terrestre, incluindo as áreas amplas alagadas, como rios, lagos, mares ou oceanos.

Este modelo emprega os conceitos da óptica geométrica que consiste em avaliar o caminho direto e a reflexão no solo da propagação da onda entre o transmissor e o receptor. Embora existam limitações, ele é empregado com razoável exatidão em sistemas de comunicação móveis, em distâncias relativamente pequenas, da ordem de poucos quilômetros ou em células para comunicação urbana. Este método é descrito como reflexão especular, no caso em que a superfície que separa o meio de propagação e o solo é lisa. Quando o solo ou a superfície apresentar irregularidades significativas, o que ocorre com maior frequência em condições reais, a reflexão é dita difusa (RAPPAPORT, 2002).

A situação descrita para reflexão plana, encontra-se ilustrada na FIGURA 4, onde observa-se que as antenas das estações base e terminal, situam-se na

superfície lisa, com as alturas h_T e h_R , respectivamente. Neste caso a propagação ocorre via o caminho direto e através da reflexão no solo.

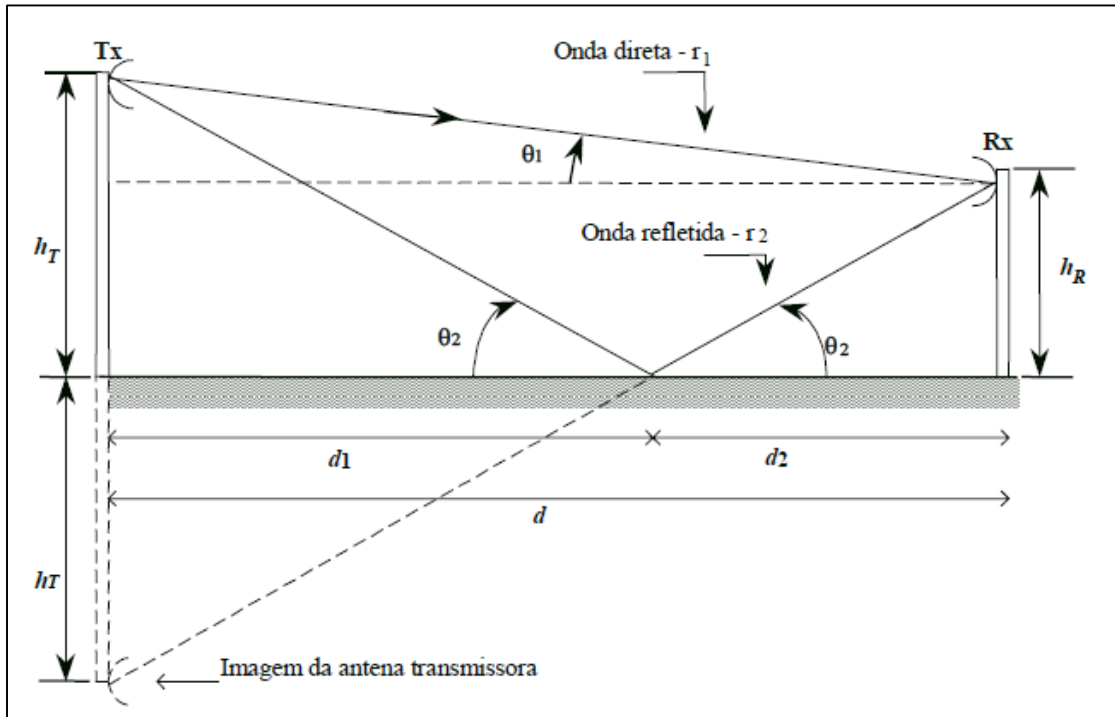


FIGURA 4 - SITUAÇÃO FÍSICA DA SUPERFÍCIE DE TERRA PLANA
 FONTE: ADAPTADO DE SAUNDERS (2007).

Utilizando-se da teoria da imagem da óptica geométrica, na situação mostrada na FIGURA 4, a qual considera um raio refletido proveniente de uma imagem do transmissor no solo, como se este solo fosse um espelho, é relativamente simples deduzir e, utilizando algumas aproximações, a expressão da relação entre as potências transmitida P_T e recebida P_R (SAUNDERS; ARAGÓN-ZAVALA, 2007):

$$\frac{P_R}{P_T} \approx \frac{h_R^2 h_T^2}{d^4} \quad (7)$$

A equação (7) pode ser expressa em decibéis, conforme (8):

$$L_P = 40 \log_{10} d - 20 \log_{10} h_R - 20 \log_{10} h_T \quad (8)$$

onde L_P representa a perda total do percurso do raio, o qual representa a onda eletromagnética em terra plana.

2.4.2 Modelos de difração

Na propagação das ondas eletromagnéticas, tratando-se de enlaces reais terrestres, encontra-se um ou vários obstáculos entre o transmissor e o receptor. Alguns modelos serão descritos neste trabalho, os quais dependem do cálculo de atenuação dos obstáculos por difração.

Para efetivar esses cálculos, é necessário idealizar a forma dos obstáculos presentes no caminho de propagação da onda eletromagnética. Pode-se assumir que eles possuem uma espessura pequena e que sua solução seja comparada com a de um semi-plano condutor infinito.

Este tipo de obstáculo denomina-se, através do uso consagrado, gume de faca. Ou então, diz-se que tais obstáculos possuem um raio de curvatura bem definido e que sua solução pode ser aproximada com o cálculo de difração sobre um cilindro e a este tipo denomina-se obstáculo arredondado.

Conforme descrito anteriormente, a reflexão e a refração são, usualmente, baseadas na premissa de que os obstáculos ou superfícies reflexivas, têm grandes dimensões se comparadas com o comprimento de onda das frequências transmitidas, através do meio de propagação considerado.

Quando uma frente de onda encontra um obstáculo ou descontinuidade com dimensões compatíveis com o comprimento de onda incidente, a solução para o fenômeno físico que ocorre, é explicada pelo princípio de Huygens. Este sugere que, cada ponto de uma determinada frente de onda, atua como uma fonte secundária de onda e, acontece uma combinação, a qual produz uma nova frente na direção de propagação.

Esta é uma condição ideal, cujo comportamento é aplicável quando a frente de onda possui dimensões infinitas nas duas direções consideradas. De acordo com a FIGURA 5, na região posterior ao obstáculo real, no lado oposto à incidência da

frente de onda original, sendo que esse obstáculo se apresenta impenetrável ou perfeitamente absorvente, somente um semi-plano da frente de onda contorna a obstrução. A teoria da propagação, de apenas um raio simples, admite que um campo eletromagnético existe na região de sombra abaixo da linha pontilhada e, a aparente curvatura da nova frente de onda, na região de fronteira da obstrução, é conhecida como difração (PARSONS, 2000).

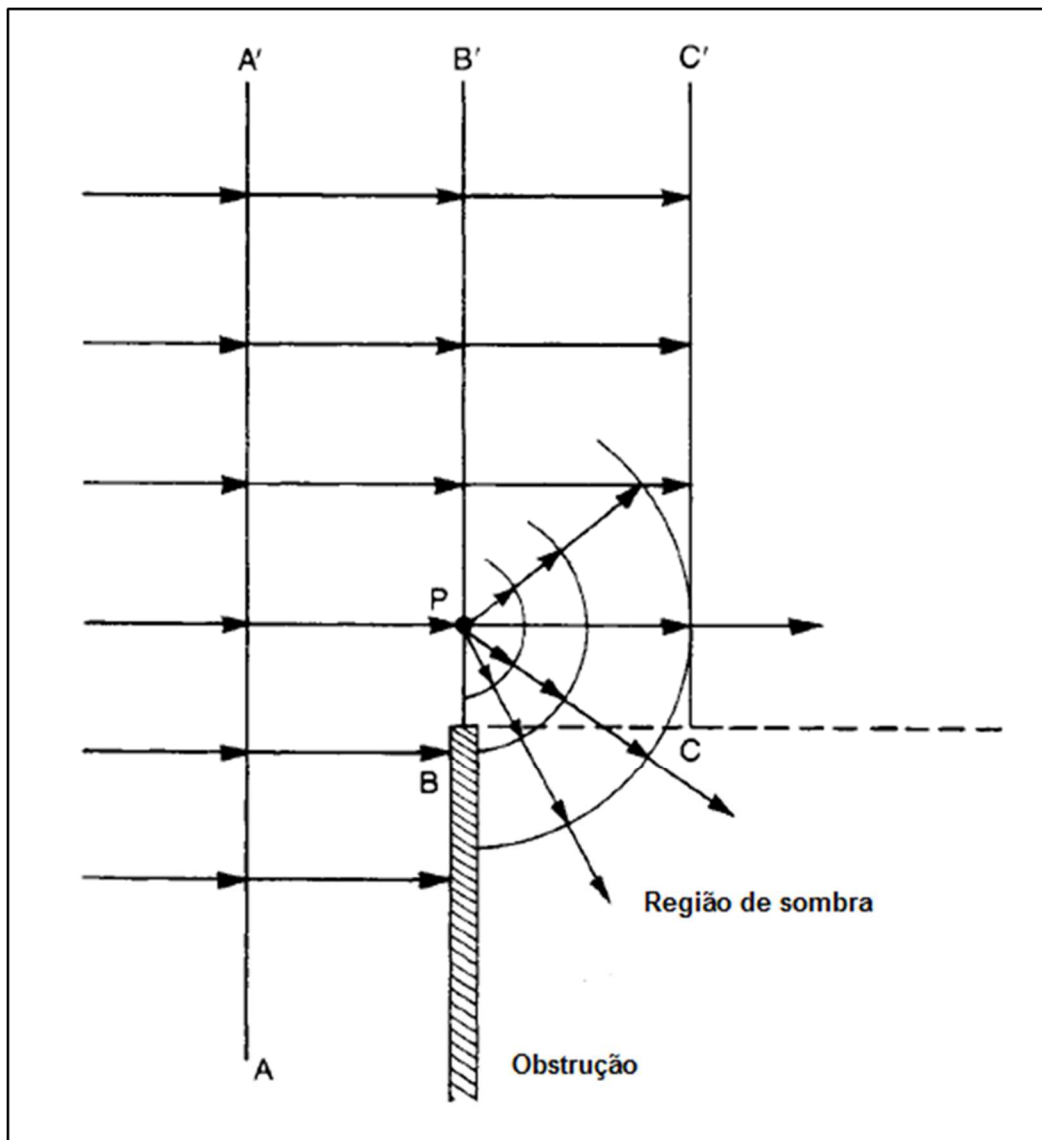


FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DO MECANISMO FÍSICO DA DIFRAÇÃO
 FONTE: ADAPTADO DE PARSONS (2000)

Associada à difração, a propagação das ondas no canal de rádio, sofre atenuação ou perda, pois é afetada pelas obstruções e desvios nas elevações do relevo ou em outros obstáculos. A perda de percurso resultante das influências destas obstruções pode ser obtida matematicamente a partir das integrais de

Fresnel e suas características geométricas, compondo e resultando no parâmetro adimensional ν expresso em (9) (JAKES, 1974):

$$\nu = -h_p \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} \quad (9)$$

onde r_1 e r_2 são as distância de separação e h_p é a altura da obstrução, conforme ilustrado na FIGURA 6, cuja representação do obstáculo é denominada tipo gume de faca.

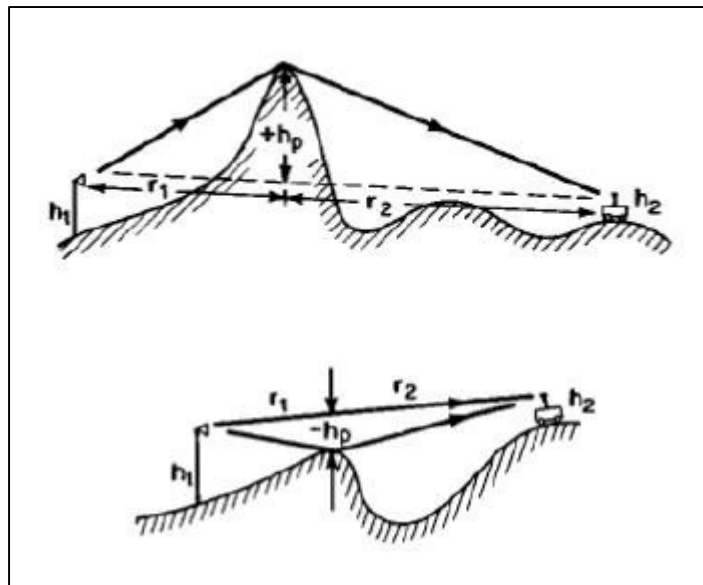


FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DA OBSTRUÇÃO TIPO GUME DE FACA
 FONTE: LEE (1998)

A determinação dos efeitos da obstrução tipo gume de faca, considerando a situação descrita e o parâmetro adimensional ν , para a solução dos termos associados com as integrais de Fresnel, é difícil encontrar e deduzir de modo simples. Desta forma, Lee (1998), propõe as soluções representadas nas equações (10), (11), (12), (13), (14) e na FIGURA 7 que representa graficamente os intervalos dos valores de ν .

$$L_r = 0 \text{ dB} \quad 1 \leq \nu \quad (10)$$

$$L_r = 20 \log(0,5 + 0,62\nu) \quad 0 \leq \nu \leq 1 \quad (11)$$

$$L_r = 20 \log(0,5e^{0,95\nu}) \quad -1 \leq \nu \leq 0 \quad (12)$$

$$L_r = 20 \log\left(0,4 - \sqrt{0,118 - (0,1\nu + 0,38)^2}\right) \quad -2,4 \leq \nu < -1 \quad (13)$$

$$L_r = 20 \log\left(-\frac{0,225}{\nu}\right) \quad \nu < -2,4 \quad (14)$$

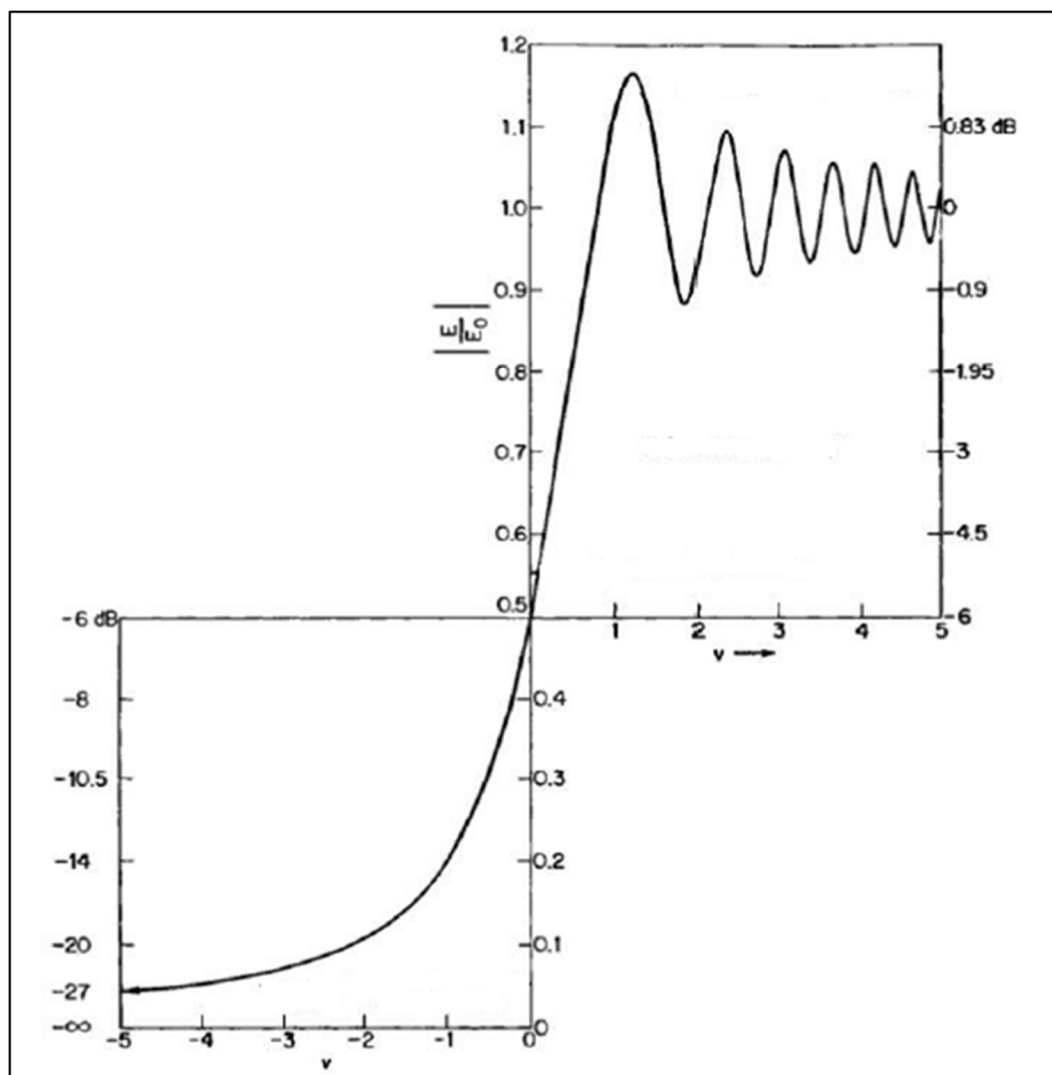


FIGURA 7 - MAGNITUDE RELATIVA DA ATENUAÇÃO POR DIFRAÇÃO EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO ADIMENSIONAL ν
 FONTE: ADAPTADO DE LEE (1998)

Outra solução para as integrais de Fresnel, que correspondem às variações das componentes de campo eletromagnético, cujo parâmetro adimensional expressa

a perda de percurso causada pela obstrução, obtida pelo desenvolvimento em séries das referidas integrais, fornece as seguintes relações aproximadas (SIZUN, 2005):

$$L_r = 0 \quad \nu \leq -0,71 \quad (15)$$

$$L_r = -6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(\nu - 0,1)^2 + 1} - \nu + 0,1 \right] \quad -0,71 < \nu \leq 2,3 \quad (16)$$

$$L_r = -12,95 - 20 \log \nu \quad \nu > 2,3 \quad (17)$$

Na maioria das situações, em condições e aplicações práticas, existe mais que um obstáculo tipo gume de faca, onde ocorre a propagação por difração, nos enlaces de rádio. Nestas condições, a perda por difração num conjunto de obstáculos duplos e sua determinação, pode ser utilizada para encontrar as perdas adicionais quando existem três ou mais obstruções e, basicamente, três modelos, a seguir descritos, são comumente utilizados para obter a atenuação nestas obstruções múltiplas, com resultados bastante próximos às soluções teóricas.

2.4.2.1 Método de Epstein-Peterson

Este método é baseado na premissa de que cada extremo das obstruções é iluminado pelo transmissor e pela energia precedente difratada da obstrução anterior. A atenuação total é a soma das perdas por difração introduzidas em cada obstrução (EPSTEIN; PETERSON, 1953). A FIGURA 8 ilustra, esquematicamente, a construção do método com a presença de três obstáculos.

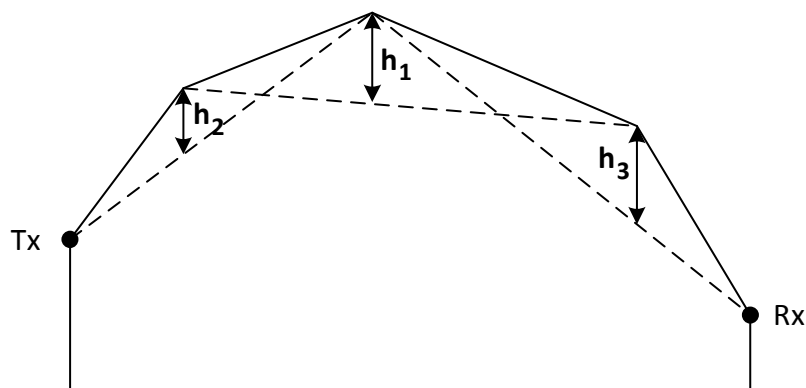


FIGURA 8 - MÉTODO DE EPSTEIN-PETERSON PARA DIFRAÇÃO COM TRÊS OBSTRUÇÕES
FONTE: O AUTOR (2016)

2.4.2.2 Método de Millington

No método de Millington, cuja construção é mostrada na FIGURA 9, a perda em cada obstáculo tipo gume de faca é obtida e, posteriormente, adicionada para o tratamento total das atenuações ao longo do enlace. As possibilidades de aproximações nos cálculos são válidas, quando as distâncias entre as obstruções são muito maiores que as alturas das mesmas (MILLINGTON et al., 1962).

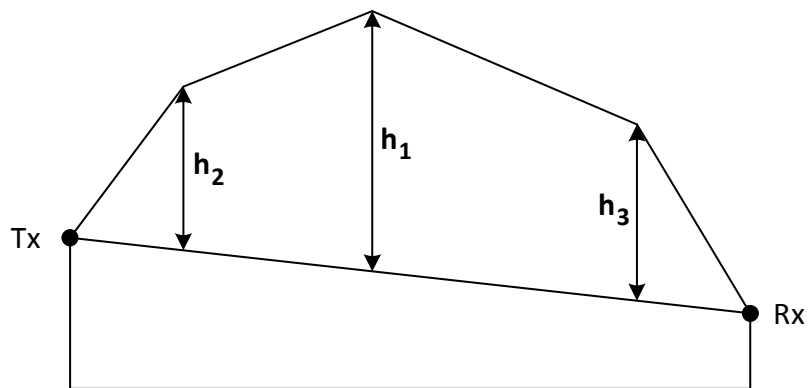


FIGURA 9 - MÉTODO DE MILLINGTON PARA A DIFRAÇÃO COM TRÊS OBSTRUÇÕES
FONTE: O AUTOR (2016)

2.4.2.3 Método de Deygout

O método de Deygout é baseado na premissa de que um obstáculo é dominante, o qual é, primeiramente responsável pela atenuação devido à difração, sendo que as demais obstruções são secundárias. A FIGURA 10, apresenta a construção típica do método de Deygout para três obstáculos (DEYGOUT, 1966).

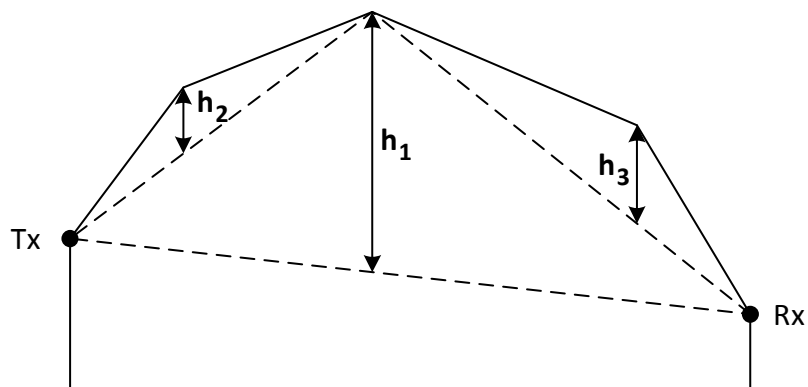


FIGURA 10 - MÉTODO DE DEYGOUT PARA DIFRAÇÃO COM TRÊS OBSTRUÇÕES
FONTE: O AUTOR (2016)

Os valores de atenuação obtidos por este método, tradicionalmente, são elevados, se comparados com o rigoroso método de Millington, desta forma Deygout (1991) introduziu um fator de correção, a ser subtraído, para adequar o cálculo da perda por difração total.

2.4.3 Modelo de reflexão e espalhamento em superfície rugosa

Na prática muitas superfícies, ao longo do percurso dos enlaces de rádio, tais como o solo, paredes e telhados de edifícios e construções entre outras, não são perfeitamente lisas. Dependendo do grau de rugosidade e o comprimento de onda incidente, poderá ocorrer o efeito de reflexão especular até a dispersão difusa. A redução na amplitude das ondas refletidas ou dispersas, é modelada pelas expressões (18) e (19) (BARCLAY, 2013).

$$\Delta\phi = 4\pi\Delta h \sin(\theta_i)/\lambda \quad (18)$$

$$L_r = e^{(-\Delta\phi^2)} \quad (19)$$

onde Δh é a altura reta aproximada da rugosidade, θ_i é o ângulo da onda incidente, λ o comprimento de onda e L_r a atenuação resultante em decibéis.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A evolução da indústria de comunicação móvel pública alcançou um patamar significativo no mundo nos últimos anos. Para demonstrar o avanço dos sistemas de telecomunicações sem fio, bem como auferir o rápido crescimento das redes de voz e dados móveis, em fevereiro de 2016, o Brasil já possuía 258 milhões de acessos em telefonia móvel celular utilizando, aproximadamente, 1 GHz de largura de espectro de rádio, distribuídos em 76.892 estações rádio bases, em todo território nacional. Tal fato representa a utilização média de 1,3 aparelho terminal por habitante (ANATEL, 2016).

Neste capítulo foram descritos o desenvolvimento e a evolução histórica dos sistemas de telecomunicações, desde as primeiras experiências com ondas eletromagnéticas até as modernas redes de comunicação multimídia. Inseridos neste cenário, foram explorados o modelamento do canal de comunicação móvel de rádio e os principais mecanismos de propagação, os quais implicam na atenuação das ondas eletromagnéticas transmitidas, produzindo o desvanecimento do sinal de RF e as limitações de alcance e utilização dos dispositivos pertinentes.

Os conceitos e definições da problemática de atenuação que ocorrem no canal de rádio móvel, formam o alicerce básico na concepção das ferramentas de predição de cobertura de RF e, neste trabalho, são parte integrante da metodologia de desenvolvimento desta pesquisa.

3 **MODELOS DE PROPAGAÇÃO EMPÍRICOS E A APLICAÇÃO EM FERRAMENTA COMPUTACIONAL COMERCIAL**

Nas futuras redes sem fio, os desafios para incrementar a disponibilidade e aumentar as taxas de transmissão de dados, serão direcionados para compatibilizar os efeitos da atenuação na propagação, com os requisitos e limitações dos canais de RF e espectro disponíveis. A questão principal estará em obter, através dos esquemas de combinação e adaptabilidade, mecanismos de utilização eficiente das tecnologias em desenvolvimento, tais como diversidade de frequência, diversidade de tempo e diversidade de antenas. A performance destes sistemas de diversidade estará fortemente relacionada com os efeitos de propagação do canal de rádio móvel. Então, o conhecimento e o modelamento da propagação, são indispensáveis durante a seleção desses esquemas apropriados de diversidade e o planejamento das redes, para satisfazer os requisitos e a complexidade das aplicações dos usuários e manter os custos dos sistemas num nível aceitável (ROCHE, 2012).

Visando, então, cumprir os requisitos mínimos de predição de propagação, associados aos padrões de cada rede de comunicação móvel, várias técnicas têm sido desenvolvidas, com tratamentos distintos, as quais incluem as abordagens empíricas, estatísticas e determinísticas. As abordagens empíricas ainda são largamente utilizadas, uma vez que produzem resultados satisfatórios e requerem pouco processamento computacional, quando aplicável.

As modelagens empíricas consideram, como critério de qualidade de cobertura nas predições, um limiar específico de probabilidade, geralmente em 50%, cujo contorno corresponde a esse percentual de disponibilidade, o qual pode ser estendido e observado dentro da área interna limitada por esta borda (FONTAN; ESPINEIRA, 2008).

Neste capítulo, são abordados e descritos, os modelos de propagação empíricos, com algum tipo de tratamento estatístico, comumente adotados por ferramentas computacionais comerciais. Tais modelos serão apresentados em ordem cronológica, com o intuito de demonstrar a evolução e a adequação às tecnologias de sistemas sem fio e à alocação de espectro de frequências, determinados pelos órgãos reguladores e padronizadores. Por fim, serão detalhados, a ferramenta *Afol*® e o respectivo modelo de propagação que será

objeto de estudo e adequação nesta pesquisa, conforme a metodologia, implementações práticas e análises pertinentes.

3.1 MODELO DE EGLI

Este modelo, concebido no final dos anos 50 no século passado, prevê aplicação em frequências a partir de 40 MHz até 1 GHz, compreendendo a faixa VHF e parte da faixa UHF (*Ultra High Frequency*) de frequências do espectro eletromagnético de rádio, incluindo os sistemas fixos e móveis de comunicação.

Complementarmente, leva em conta os efeitos das variações de altitude do terreno e sua ocupação, em relação à frequência, às alturas das antenas e suas polarizações e à distância dos enlaces e, é expresso através de fórmulas empíricas e gráficos normalizados, conforme ábaco ilustrado na FIGURA 11.

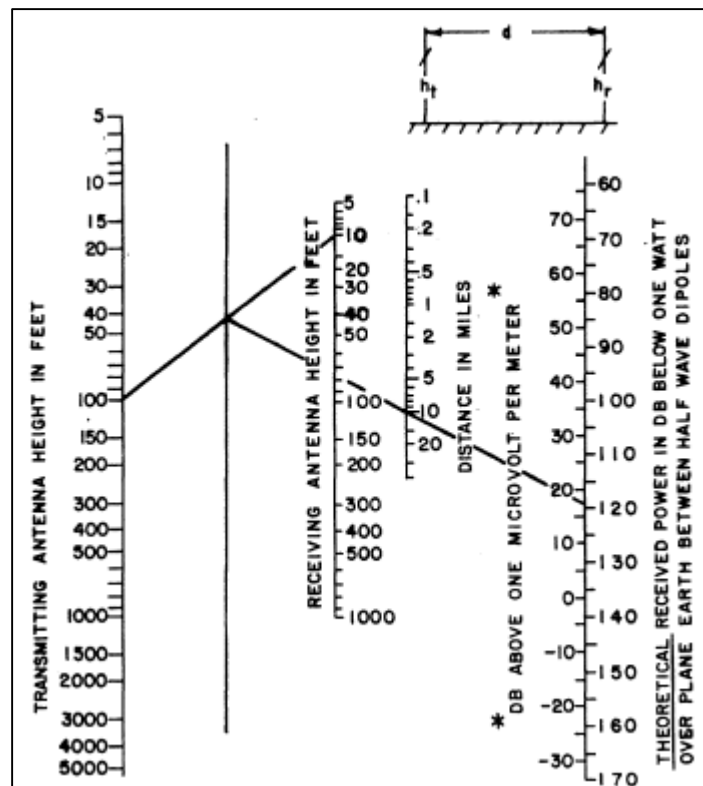


FIGURA 11 - ÁBACO DA POTÊNCIA DE SINAL RECEBIDA PARA 50% DE LOCALIZAÇÃO MÉDIA E 1 WATT DE POTÊNCIA IRRADIADA
 FONTE: EGLI (1957)

A expressão que define empiricamente, a partir de dados de medição em campo, o nível de potência (P_{50}) do sinal recebido, conforme equação (20), inclui a consideração estatística média de ocorrência em 50% da localização da antena de recepção, para irradiação de 1 Watt e utilização de dipolos de meia onda (EGLI, 1957).

$$P_{50} = 0,345 \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \left(\frac{40}{f} \right)^2 P_t 10^{-14} \quad (20)$$

onde h_t e h_r são as alturas das antenas de transmissão e recepção respectivamente, d é a distância entre o transmissor e o receptor, f é a frequência da portadora e P_t é a potência irradiada.

3.2 MODELO DE LONGLEY E RICE

Neste modelo considera-se um método para predição média de perda do sinal de rádio, em transmissões sobre terrenos irregulares. O método baseia-se na teoria básica de propagação da onda eletromagnética, na variabilidade do sinal como função do clima e do posicionamento das estações e, também, em um grande número de medições de campo. É aplicável para frequências acima de 20 MHz e pode ser utilizado para terrenos com perfis detalhados ou em terrenos com uma característica média representativa de uma determinada área ou região.

As três dimensões da variabilidade que incluem os fenômenos físicos estatísticos associados, os quais correspondem, ao percentual do tempo em que o enlace não ultrapassa um determinado valor de atenuação; em seguida ao percentual de localização das rotas ou percursos nos quais ocorrem degradação e, finalmente, ao percentual de situações em regiões similares que sofrem perda, relacionadas ao sinal rádio (HUFFORD et al., 1982).

A perda de percurso em decibéis é definida pelas expressões (21), (22), (23) e (24), que apresentam um termo relativo à atenuação no espaço livre e outro relacionado aos mecanismos de propagação de reflexão, difração ou dispersão,

respectivamente, para três faixas de distâncias possíveis e avaliadas pelo modelo (LONGLEY; RICE, 1968).

$$L_{cr} = L_{bf} + A_{cr} \quad (21)$$

onde L_{cr} representa a perda total, L_{bf} é a perda no espaço livre obtida através da equação (5) e A_{cr} a atenuação devida a um dos mecanismos de propagação respectivos, que ocorrem com menor valor.

$$A_{cr} = A_e \quad (22)$$

onde A_e é a perda associada à reflexão em terra plana e linha de visada desobstruída, para distâncias menores ou iguais a 20 km.

$$A_{cr} = A_d \quad (23)$$

onde A_d é a atenuação sofrida por difração, considerando a existência de obstruções duplas tipo gume de faca, para distâncias entre 20 até 150 km.

$$A_{cr} = A_s \quad (24)$$

onde A_s é a atenuação ocasionada pela dispersão por difusão, em distâncias superiores a 150 km.

3.3 MODELO DE HATA

Neste modelo, uma fórmula empírica para a perda de propagação de sistemas móveis, incluindo as correções para áreas suburbanas e abertas, é derivada do relatório de Okumura et al (1968) de forma a estabelecer um método de predição computacional. Esta perda de propagação em áreas urbanas é aplicável na faixa de frequências de 100 a 1500 MHz, em distâncias entre 1 e 20 km, nas

estações base com altura de antenas de 30 a 200 metros e estações móveis veiculares com antenas de 1 a 10 metros de altura.

A fórmula padrão para a perda de propagação é expressa em (25), com os fatores de correção para as alturas das antenas móveis equacionados em (26), (27) e (28), considerando os ambientes de pequenas ou médias cidades, bem como metrópoles, respectivamente. As correções para áreas suburbanas e abertas, são expressas em (29) e (30), introduzindo os fatores de aproximação pertinentes (HATA, 1980).

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R \quad (25)$$

onde f_c é a frequência fundamental da portadora, h_b é a altura efetiva da antena da estação base, h_m é a altura da antena da estação móvel, R é a distância entre as estações e $a(h_m)$ o fator de correção de altura da estação móvel.

$$a(h_m) = (1,1 \log f_c - 0,7)h_m - (1,56 \log f_c - 0,8) \quad (26)$$

$$a(h_m) = 8,29(\log 1,54h_m)^2 - 1,1 \quad f_c \leq 200MHz \quad (27)$$

$$a(h_m) = 3,2(\log 11,75h_m)^2 \quad f_c \geq 400MHz \quad (28)$$

$$L_{ps} = L_p\{\text{área urbana}\} - 2\{\log(f_c/28)\}^2 - 5,4 \quad (29)$$

$$L_{po} = L_p\{\text{área urbana}\} - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94 \quad (30)$$

Deve-se observar que a frequência é dada em MHz, as alturas das antenas em metros e a distância em quilômetros.

3.4 MODELO DE SAKAGAMI E KUBOI

A fórmula de predição, neste modelo, é expressa pela soma de termos com funções simples e seus respectivos parâmetros, associados com os dados de

medição obtidos na área metropolitana de Tóquio, no Japão. O modelo considera, ainda, no ambiente específico de aplicação urbano, a altura da antena da estação base, distância, frequência, largura da rua onde a estação móvel se encontra, altura média dos edifícios e a altura dos prédios na lateral das ruas derivada pelo método de análise de múltipla regressão (SAKAGAMI; KUBOI, 1991). Este modelo foi corrigido visando ampliar a aplicação a partir da banda de frequências original, com a inserção dos dois últimos termos na equação, na sua forma final, conforme a expressão (31), detalhada e dada por:

$$\begin{aligned}
 L = & 100 - 7,1 \log W + 0,023\theta + 1,4 \log h_s + 6,1 \log \langle H \rangle \\
 & - \left\{ 24,37 - 3,7 \left(\frac{H}{h_{b0}} \right)^2 \right\} \log h_b \\
 & + (43,42 - 3,1 \log h_b) \log d + 20 \log f \\
 & + e^{\{13(\log f - 3,23)\}}
 \end{aligned} \tag{31}$$

onde W é a largura da rua (5 a 50 metros), θ é o ângulo da rua (0 a 90 graus), h_s é a altura dos edifícios ao longo da rua (5 a 80 metros), $\langle H \rangle$ é a altura média dos edifícios (5 a 50 metros acima da estação móvel no solo), h_b altura da antena da estação base (20 a 100 metros acima da estação móvel no solo), h_{b0} é a altura da estação base a partir do solo, H é a altura dos edifícios próximos à estação base, d é a distância entre as estações base e móvel (0,5 a 10 quilômetros) e f é a frequência (450 a 2.200 MHz).

O modelo considerado *Sakagami Estendido*, obtido dos resíduos das equações de regressão propostas por KITAO e ICHITSUBO (2006), é representado pela expressão de perda na propagação, através da equação (32), a qual pode ser aplicada em ambientes urbanos, com razoável aproximação aos valores medidos, para frequências acima de 0,8 MHz até, aproximadamente, 8.000 MHz.

$$L = 54 + 40 \log d - 30 \log h_b + 21 \log f - 5,0 \log(h_m/1,5) - S(\alpha) \tag{32}$$

onde $S(\alpha)$ é o fator de correção para o percentual (5 a 50%) de área ocupada por edifícios, obtido pelas relações (33) e (34):

$$S(\alpha) = -0,6\alpha + 25 \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{\text{Área ocupada pelos edifícios}}{\text{Área alvo da predição}} 100\% \quad (34)$$

3.5 MODELO DE COST-HATA

A estrutura de cooperação europeia entre pesquisadores, engenheiros e estudantes, *European Cooperation in Science and Technology*, através de sua iniciativa COST 231, conduziu extensas campanhas de medição de campo em cidades da Europa, para verificar diferentes modelos existentes de propagação e, adicionalmente, propor novos modelos, cujas aplicações de sistemas de comunicação utilizam bandas de frequências entre 900 a 1.800 MHz.

Desta forma a iniciativa COST 231, propôs uma extensão ao modelo de Hata, para bandas de frequências entre 1.500 a 2.000 MHz, analisando as curvas de propagação em frequências superiores, em aplicações restritas para macro células, nas estações com alturas de antenas acima dos tetos de edifícios (COST 231, 1999).

O modelo, então denominado COST-HATA pode ser expresso por (35), restrito aos parâmetros de faixa de frequências de 1.500 a 2.000 MHz, altura da estação base entre 30 a 200 metros, altura da estação móvel entre 1 a 10 metros e distâncias de 1 a 20 km.

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_{Base} - a(h_{Mobile}) \\ + (44,9 - 6,55 \log h_{Base}) \log d + C_m \quad (35)$$

onde L_b é a atenuação total, f é a frequência, h_{Base} é a altura da estação base, d é a distância entre transmissor e receptor, $a(h_{Mobile})$ é dada pela equação (36) e C_m

é o fator de correção para médias cidades e áreas suburbanas com pouca densidade de vegetação (0 dB) e áreas metropolitanas (3 dB).

$$a(h_{Mobile}) = (1,1 \log f - 0,7)h_{Mobile} - (1,56 \log f - 0,8) \quad (36)$$

3.6 MODELO DE ERCEG

Este modelo apresenta um comportamento estatístico, com a formulação da perda de percurso derivada de dados experimentais coletados nos Estados Unidos, em macro células existentes, operando na faixa de frequência de 1.900 MHz. O modelo aplica-se em áreas suburbanas e é particularizado por diferentes categorias de terreno, sendo que a determinação da atenuação é realizada pela obtenção do correspondente expoente e pela sombra de desvanecimento. Estes dois parâmetros são modelados estatisticamente e são dependentes da altura da antena da estação base e as categorias determinadas pelo terreno e sua ocupação.

A perda de propagação em função da distância é expressa em (37), com a atenuação total em decibéis, sendo que os fatores de espaço livre, expoente e sombra de desvanecimento, são descritos empiricamente e equacionados em (38) e (39) (ERCEG et al., 1999).

$$PL = A + 10\gamma \log(d/d_0) + s \quad d \geq d_0 \quad (37)$$

onde PL é a perda total de percurso, A é a perda no espaço livre, d é distância entre a estação base e o receptor, γ é o expoente de atenuação, s é o efeito de desvanecimento e d_0 é a distância padrão de 100 metros.

$$A = 20 \log(4\pi d_0/\lambda) \quad (38)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (39)$$

onde λ é o comprimento de onda da frequência da portadora em metros, h_b é a altura da antena da estação base, s é o efeito de desvanecimento, com amplitude entre 8,2 a 10,6 dB, e os parâmetros a , b e c , constantes dependentes das categorias de terreno, são definidos na TABELA 1.

TABELA 1 VALORES NUMÉRICOS DOS PARÂMETROS DO MODELO

Parâmetros	Categoria do Terreno		
	A	B	C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

FONTE: ADAPTADO DE ERCEG et al (1999)

- A** - terrenos montanhosos com densidade de vegetação moderada a intensa;
- B** - terrenos montanhosos com densidade de vegetação leve ou plano com densidade de vegetação moderada a intensa;
- C** - terrenos planos com densidade de vegetação leve;

3.6.1 Modelo de Erceg Modificado ou Stanford University Interim (SUI)

Resultado de um esforço cooperativo entre o grupo de trabalho do IEEE (802.16) e a Universidade de Stanford, este modelo, derivado de análises complementares do modelo de Erceg, foi desenvolvido com o intuito de modelar o canal para aplicações que utilizam a tecnologia *WiMax*. Para adequar e utilizar este modelo, em frequências acima de 2.000 MHz e para alturas de antenas entre 2 a 10 metros, foram introduzidos fatores de correção, na formulação original, conforme as expressões descritas abaixo (ERCEG et al., 2001).

$$PL_{\text{modificado}} = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (40)$$

onde PL é dado pela equação (37), ΔPL_f é o termo para correção da frequência da portadora dado por (41) e ΔPL_h é o fator de correção para a altura da antena de recepção especificados em (42) e (43), relacionados aos tipos ou categorias de terreno informados na TABELA 1.

$$\Delta PL_f = 6 \log(f/2000) \quad f \geq 2.000 \text{ MHz} \quad (41)$$

$$\Delta PL_h = -10,8 \log(h/2) \quad \text{para categorias A e B} \quad (42)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log(h/2) \quad \text{para a categoria C} \quad (43)$$

3.6.2 Modelo Stanford University Interim (SUI) estendido

Esta variante do modelo *SUI (Stanford University Interim)*, considera a perda no espaço livre até o ponto de inflexão dado pela distância padrão de 100 metros d_0 . Além deste ponto de inflexão, a perda é incrementada pela variação do expoente, aliado ao fato de que a probabilidade de linha de visada desobstruída decresce com o aumento da distância d entre as estações base e estação receptora. O equacionamento deste modelo estendido é descrito nas expressões, adotando h_b e h_t como as alturas das estações transmissora e receptora, respectivamente (SENARATH et al., 2007).

$$PL = 20 \log(4\pi d/\lambda) \quad d \leq d'_0 \quad (44)$$

$$PL = A + 10\gamma \log(d/d_0) + \Delta PL_f + \Delta PL_{ht} \quad d > d'_0 \quad (45)$$

$$A = 20 \log(4\pi d'_0/\lambda) \quad (46)$$

$$d'_0 = d_0 10^{-\left(\frac{\Delta PL_f + \Delta PL_{ht}}{10\gamma}\right)} \quad (47)$$

$$\Delta PL_{ht} = -10 \log(h_t/3) \quad h_t \leq 3m \quad (48)$$

$$\Delta PL_{ht} = -20 \log(h_t/3) \quad h_t > 3m \quad (49)$$

3.7 MODELO WLL

Os sistemas fixos *Wireless Local Loop (WLL)* são baseados em redes celulares e, têm sido, nas últimas décadas, largamente implementados em países que pretendem ampliar suas infraestruturas de telefonia ou na expansão destas redes para áreas remotas, principalmente rurais. Adicionalmente, tais sistemas, tornaram-se uma alternativa para as redes de acesso que trafegam aplicações de dados, como a Internet, assumindo grande importância nas necessidades específicas do planejamento de predições de cobertura. Assim, baseado em diferentes modelos de propagação de uso consagrado, o modelo WLL, em sua versão básica e geral, é expresso e obtido conforme as equações (50), (51) e (52) (HAR et al., 2000).

$$PL = -10 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R_m}\right)^2 - 10 \log\left\{Q^2(g_p) + 4 \left[\sin\left(2\pi \frac{\Delta h_b \Delta h_r}{\lambda R_m}\right)\right]^2\right\} \quad (50)$$

$$Q(g_p) = 3,502g_p - 3,327g_p^2 + 0,962g_p^3 \quad (51)$$

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta h_b}{R_m}\right) \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \approx \frac{\Delta h_b}{R_m} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (52)$$

onde λ é o comprimento de onda em metros, R_m é o espaço de separação das antenas em metros, α é o ângulo de visada em radianos, d é a média de espaçamento entre os edifícios ou construções, h_b e h_r são as alturas das antenas do transmissor e receptor, respectivamente.

3.8 MODELO SPM E A APLICAÇÃO COMPUTACIONAL ATOLL®

3.8.1 Descrição básica da ferramenta computacional

A ferramenta computacional de planejamento e predição de redes sem fio *Atoll®*, é uma plataforma com capacidade tecnológica diversificada que suporta as implementações de redes integradas tipo *Radio Access Network (RAN)* simples e *Radio Access Technology (RAT)* múltipla, envolvendo as etapas de projeto, expansão e otimização. A ferramenta incorpora a manipulação de dados e mapas geográficos, através de geoprocessamento padrão *Geographic Information System (GIS)*, que permite empregar os formatos mais comuns disponíveis. A simulação e a avaliação de cobertura ponto-área incluem, ainda, o modelamento das capacidades de tráfego e de disponibilidade e a viabilidade de enlaces ponto a ponto, incluindo as facilidades de planejamento automático de frequência, alocação de sítios e células e a calibração dos modelos de propagação (FORSK, 2015).

Está, tipicamente, baseada em elaboração de projetos a partir de moldes pré-definidos, com a estrutura necessária para a tecnologia desejada e, também, com a possibilidade de alterar qualquer parâmetro para adequação aos requisitos específicos existentes. Os conjuntos dos parâmetros que podem ser alterados compreendem os equipamentos de rádio (sítios, transmissores, antenas, cabos coaxiais, repetidores e outros), os dados de rádio (bandas de frequência, especificidades tecnológicas, sistemas de coordenadas) e dados geográficos (classes e alturas de morfologia, mapas digitais, mapas vetoriais), aplicáveis às tecnologias de redes celulares (GSM/GPRS/EDGE, CDMA, UMTS, SCDMA, LTE), às tecnologias de acesso fixas e móveis (WiMAX e WiFi) e às tecnologias ponto-área e ponto a ponto (FORSK, 2015b).

A FIGURA 12 ilustra o sequenciamento adotado para configuração e parametrização básica da ferramenta *Atoll®*, cujo processo de criação ou adequação, pode ser aplicado às tecnologias disponíveis.

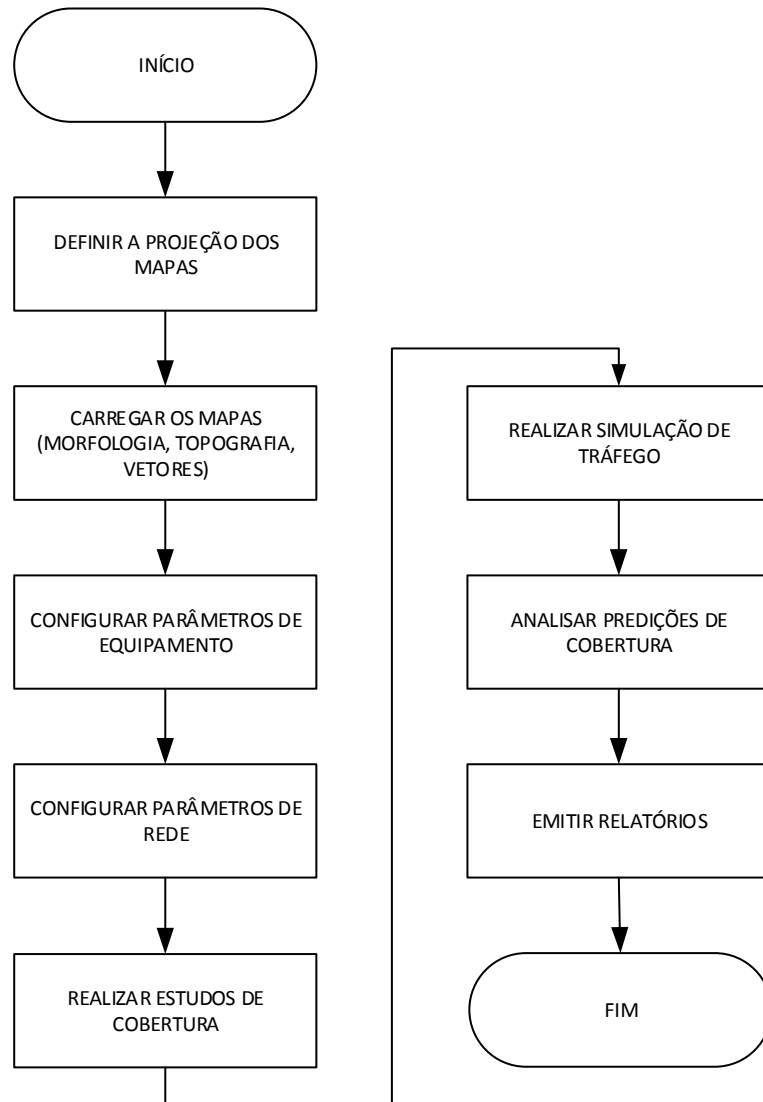


FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DE PARAMETRIZAÇÃO
 FONTE: O AUTOR (2016)

3.8.2 Descrição do modelo SPM

O modelo de propagação SPM, é aplicável às tecnologias ponto-área, móveis ou fixas e, as predições de cobertura, podem ser definidas por transmissor na rede, por nível de sinal ou interferência em zonas sobrepostas e em condições específicas, através de poligonais fechadas que delimitam áreas, restringindo os cálculos para um conjunto de transmissores selecionados.

Este modelo é baseado nas fórmulas empíricas de propagação de Hata e é apropriado para elaborar predições na faixa de frequências entre 150 a 3.500 MHz, em distâncias compreendidas de 1 a 20 km, considerando as perdas por difração e

as perdas em morfologia com aproximação estatística, nos ambientes urbanos, suburbanos e rurais. Em (53) a expressão geral do modelo SPM apresenta os termos e funções correspondentes ao cálculo da potência prevista nos dispositivos de recepção (FORSK SARL, 2015c).

$$P_R = P_{Tx} - (K_1 + K_2 * \log(d) + K_3 * \log(H_{Txef}) + K_4 * \textit{Diffraction Loss} + K_5 * \log(d) * \log(H_{Txef}) + K_6 * H_{Rxef} + K_7 * \log(H_{Rxef}) + K_{clutter} * F(\textit{clutter}) + K_{hill,LOS}) \quad (53)$$

onde:

P_R	potência prevista de recepção (dBm)
P_{Tx}	potência de transmissão (EIRP) (dBm)
K_1	constante de <i>offset</i> (dB)
K_2	fator de multiplicação por $\log(d)$
d	distância entre transmissor e receptor (m)
K_3	fator de multiplicação por $\log(H_{Txef})$
H_{Txef}	altura efetiva da antena de transmissão (m)
K_4	fator de multiplicação positivo por <i>Diffraction Loss</i>
<i>Diffraction Loss</i>	perda por difração em obstruções (dB)
K_5	fator de multiplicação por $\log(d) * \log(H_{Txef})$
K_6	fator de multiplicação por H_{Rxef}
K_7	fator de multiplicação por $\log(H_{Rxef})$
H_{Rxef}	altura efetiva da antena de recepção (m)
$K_{clutter}$	fator de multiplicação por $F(\textit{clutter})$

A função de cálculo da atenuação considerando a morfologia e ocupação do solo, é a média ponderada das perdas, obtida pela equação (54).

$$F(\textit{clutter}) = \sum_{i=1}^n L_i * W_i \quad (54)$$

onde L é a perda devido à morfologia, W é o peso da ponderação e n é o número de pontos ou obstruções ao longo do perfil de enlace.

3.8.3 Premissas e restrições do modelo SPM

Os cálculos de perda de percurso entre o transmissor e o receptor utilizando o modelo SPM, são uma representação matemática da atenuação média sofrida pela onda eletromagnética, ao longo da distância que separa estes dispositivos, adicionando-se as perdas por difração e margens de desvanecimento de sinal, resultando em matrizes de perdas que, então, são utilizadas nas determinações de cobertura, simulações de tráfego e análises de pontos isolados.

Esta matriz de perdas é calculada e construída, na ferramenta *Atoll*®, por meio da extração das altitudes do mapa digital do terreno, das alturas das antenas acima do solo, das características de morfologia da superfície e das configurações dos equipamentos em uso. Desta forma, pode-se considerar que, as premissas necessárias para que a ferramenta *Atoll*® determine as previsões possíveis, estão relacionadas diretamente a estes aspectos, os quais ainda incluem a melhor resolução geográfica e o maior detalhamento da classe e altitude morfológicas.

Ainda que, utilizem-se mapas com resoluções razoáveis (melhor que 10 metros) e dados detalhados das peculiaridades da ocupação do solo, encontram-se consideráveis restrições no modelo SPM, quando aplicado em previsões para sistemas ponto-área, em comunicações móveis, que fazem uso de frequências na faixa VHF do espectro e dedicadas às redes de missão e infraestrutura críticas:

- As recomendações do conjunto de parâmetros K_1 , amostrados somente para as tecnologias GSM, UMTS, LTE e WiMax, com frequências de operação que variam de 800 a 3500 MHz;
- As recomendações do conjunto de parâmetros K_n , derivados de formulação empírica aplicáveis em áreas que não correspondem ao relevo, vegetação e particularidades construtivas regionais;

- As perdas por classes de morfologia que são definidas pelo usuário da ferramenta e são dependentes de avaliação subjetiva;
- O emprego do método de calibração automática, disponível na ferramenta, que é fortemente dependente da qualidade e granularidade da amostragem de medições em campo e dos valores padronizados dos parâmetros K_n .

3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Dadas as dificuldades relacionadas com o planejamento e implementação dos sistemas de comunicação móvel em geral, análises e simulações tornam-se uma questão fundamental, se consideradas as redes sem fio do futuro e suas performances, especialmente quando os projetos necessitam envolver a compreensão do comportamento destas redes, quando elas adquirem maior tamanho e complexidade. Conseqüentemente, os modelos de predição de cobertura devem ser desenvolvidos, envolvendo vários aspectos que influenciam a performance dos sistemas e, obrigam-se, em decorrência, a combinar e utilizar as projeções das simulações. Resumindo, no ambiente das futuras gerações de redes sem fio, a mobilidade não será o único requisito, mas, também e adicionalmente, as precauções decorrentes das principais questões que governam o seu comportamento e sua performance (SANTI, 2012).

Neste capítulo foram apresentados os principais modelos de propagação de RF presentes na literatura científica, a partir dos quais os modelos mais recentes vêm sendo pesquisados, desenvolvidos e aplicados em ferramentas computacionais comerciais. Observa-se que, nos modelamentos descritos, além do aspecto empírico presente, obtido de extensas medições em campo, o comportamento estatístico da propagação é avaliado, em diferentes abordagens, caracterizando exatidão suficiente para garantir implementações confiáveis, do ponto de vista de cobertura de sinal.

Cabe ressaltar que o Setor de Radiocomunicação do *ITU (International Telecommunication Union)*, tem publicadas duas recomendações na série

denominada *P-Series*, que tratam e descrevem um método para as previsões ponto-área. A Recomendação P.1546-5 pode ser utilizada em enlaces de rádio terrestres, marítimos ou híbridos e é baseado na interpolação de curvas derivadas de níveis de sinais obtidas empiricamente como função da distância, altura das antenas, frequências e percentual do tempo. O procedimento de cálculo inclui correções para obstruções do terreno e da morfologia presente (ITU-R, 2013).

A Recomendação P.1812-4 complementa a Recomendação P.1546-5 e, proporciona, um método detalhado para análise baseado no perfil do terreno (ITU-R, 2015a).

Nos dois métodos, os modelos de propagação são intrínsecos e baseados na literatura apresentada, portanto não foram detalhados devido às recomendações apresentarem somente uma metodologia de utilização para as previsões ponto-área.

Neste trabalho, baseada na fundamentação descrita, a melhoria da exatidão e da confiabilidade do modelo SPM, será buscada, pela coleta de dados e pela adequação pertinente e pela superação das restrições apontadas, procurando demonstrar a viabilidade e aplicabilidade do método usado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo em tela, os recursos de equipamentos e materiais necessários, bem como a técnica empregada para solucionar a problemática proposta, serão descritos e demonstrados, visando abarcar a eficácia e repetitividade da metodologia utilizada, conduzida em duas situações práticas reais, a partir das quais foram coletados os dados de sinal de RF, através das rotas definidas e percorridas pelo sistema de medição empregado.

Ao final, este capítulo culminará com a parametrização do modelo SPM, de acordo com as condições de propagação encontradas nas medições em campo e com as análises empíricas, matemáticas e estatísticas adotadas.

4.1 MATERIAIS

Nesta seção, o ambiente de coleta de dados em campo é apresentado incluindo os dispositivos, aplicativos, materiais e equipamentos utilizados no conjunto de geração e aquisição das séries de medições, conduzidas para levantar a coleção de informações necessárias ao desenvolvimento da pesquisa.

O ambiente de coleta, para melhor compreensão e determinação, será discriminado em três montagens e locação, com o intuito de criar o sistema de transmissão e recepção, fixo e móvel respectivamente, para os sinais de RF na faixa de frequências alvo, a serem medidos na estação veicular.

4.1.1 Estações de transmissão

As estações de transmissão estão localizadas em duas subestações de transmissão e distribuição do sistema elétrico, pertencentes à Companhia Paranaense de Energia (Copel), no Município de Cascavel, região sudoeste do Estado do Paraná. A infraestrutura disponível nos locais, compreende as torres de telecomunicações autoportantes e os demais subsistemas. O detalhamento da localização dos sítios é mostrado na TABELA 2, sendo que a escolha dos locais procurou envolver os ambientes representativos das áreas geográficas de relevo e ocupação de solo, adequadas ao modelamento da propagação de RF pesquisada.

TABELA 2 LOCALIZAÇÃO DAS TORRES E DOS SÍTIOS DE TRANSMISSÃO

Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Fabricante	Altura
SUBESTAÇÃO PINHEIROS	SE PHS	24°55'56"	53°26'42"	SADE	70 METROS
SUBESTAÇÃO CASCAVEL	SE CEL	24°59'28"	53°27'05"	SADE	55 METROS

FONTE: O AUTOR (2016)

As FIGURAS 13 e 14 ilustram o posicionamento das torres de telecomunicações, locadas e identificadas nas ortofotos correspondentes das subestações Pinheiros e Cascavel respectivamente, nas quais é possível observar, além de todo barramento elétrico, as casas de comando, onde estão abrigados os equipamentos de telecomunicações e o sistema de transmissão de RF em questão.

O diagrama dos sistemas de transmissão instalados nas Subestações Pinheiros e Cascavel, pode ser visualizado, esquematicamente, na FIGURA 15, incluindo as características técnicas de cada parte relevante da infraestrutura usada no processo de transmissão, na modalidade onda contínua, ou seja, a portadora de RF na frequência adequada, permanece ativa, durante a realização das medições.

A referida infraestrutura ilustrada que, denomina-se, estação base fixa, compõe-se da antena colinear de dipolos dobrados, montada na configuração omnidirecional e alimentada por um cabo coaxial de baixa perda tipo *Cellflex 1/2"®*, a partir do transmissor do equipamento módulo repetidor, abrigado na sala de comunicação das casas de comando das subestações envolvidas.

O subsistema caracterizado como irradiante, composto de antena, cabo coaxial e acessórios, está suportado pela torre de telecomunicações autoportante de fabricação SADE. Esta estrutura foi construída para atender ao antigo *backbone* de telecomunicações da COPEL, que utilizava a tecnologia *FDM (Frequency Division Multiplexing)* de rádios analógicos, operando na faixa de frequências do espectro de 6 GHz, atualmente destinada aos serviços de comunicação em satélites geoestacionários. A capacidade máxima disponível naquele período de operação disponibilizava 600 canais de 4 kHz de banda, em todo anel redundante no Estado do Paraná. A FIGURA 16 mostra a imagem da antena omnidirecional e o respectivo diagrama de irradiação horizontal da configuração de montagem.

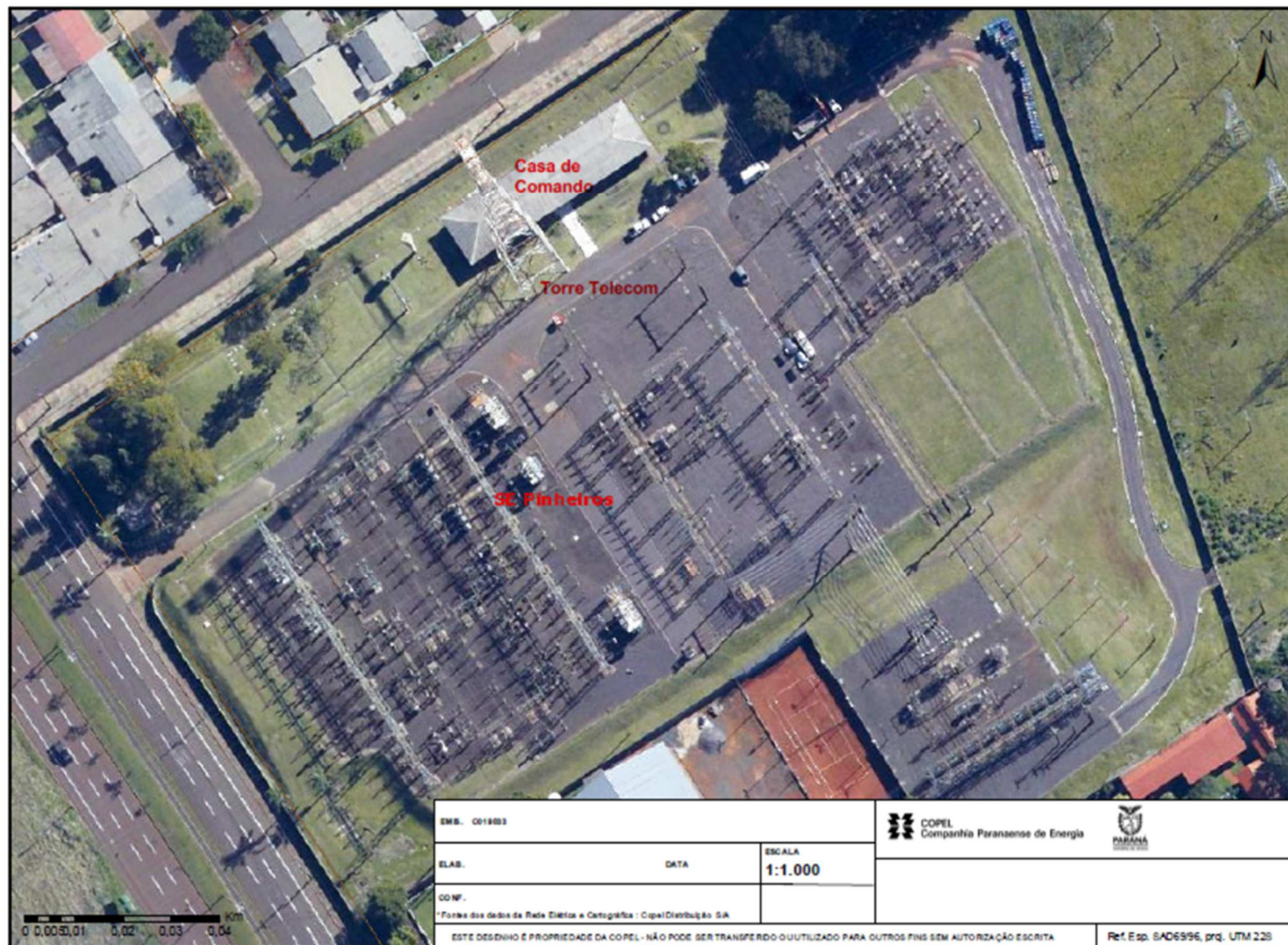


FIGURA 13 - ORTOFOTO DE LOCAÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES NA SE PHS
 FONTE: WEBGEO/COPEL (2016)

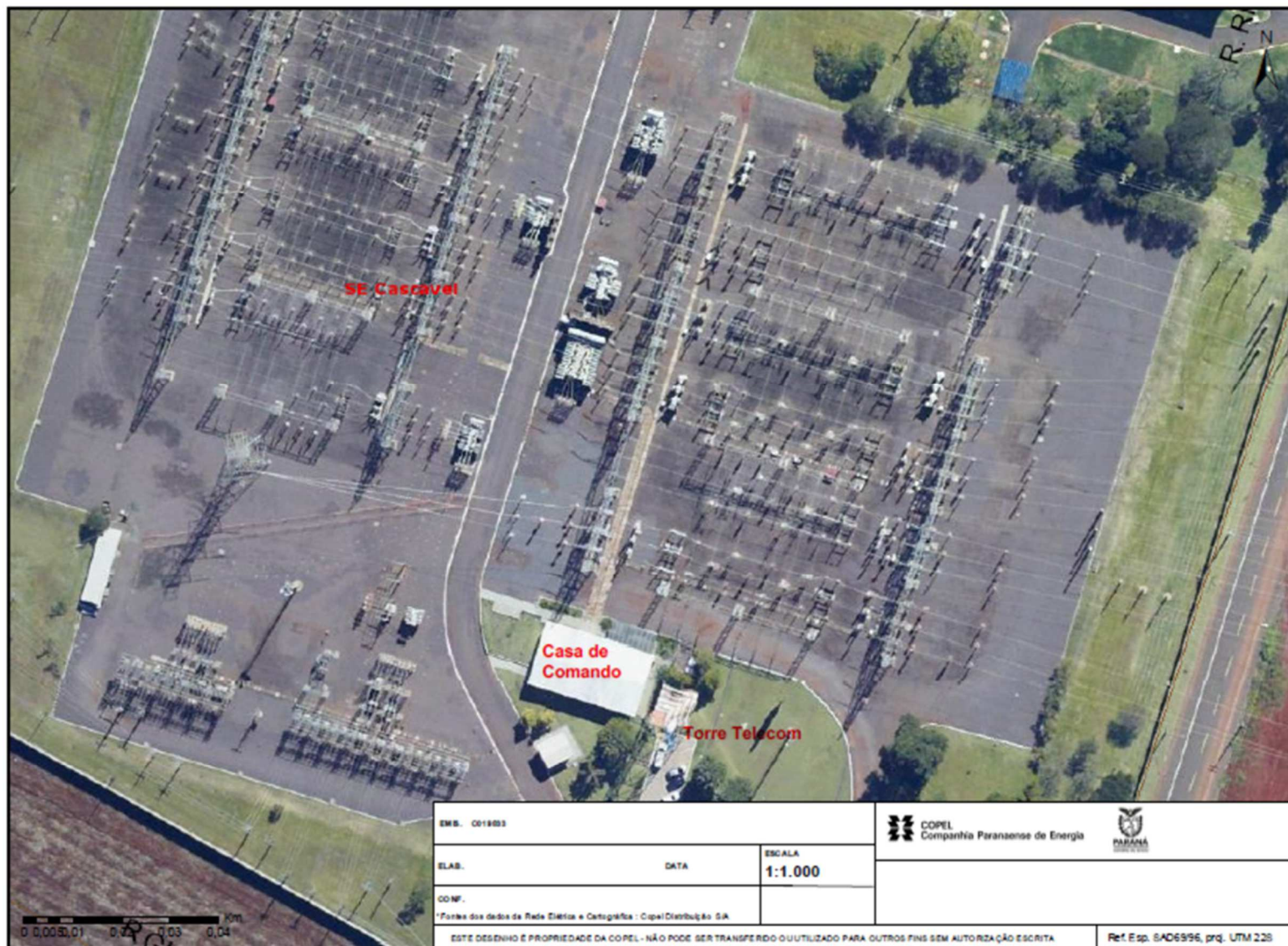


FIGURA 14 - ORTOFOTO DE LOCAÇÃO DA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES NA SE CEL
 FONTE: WEBGEO/COPEL (2016)

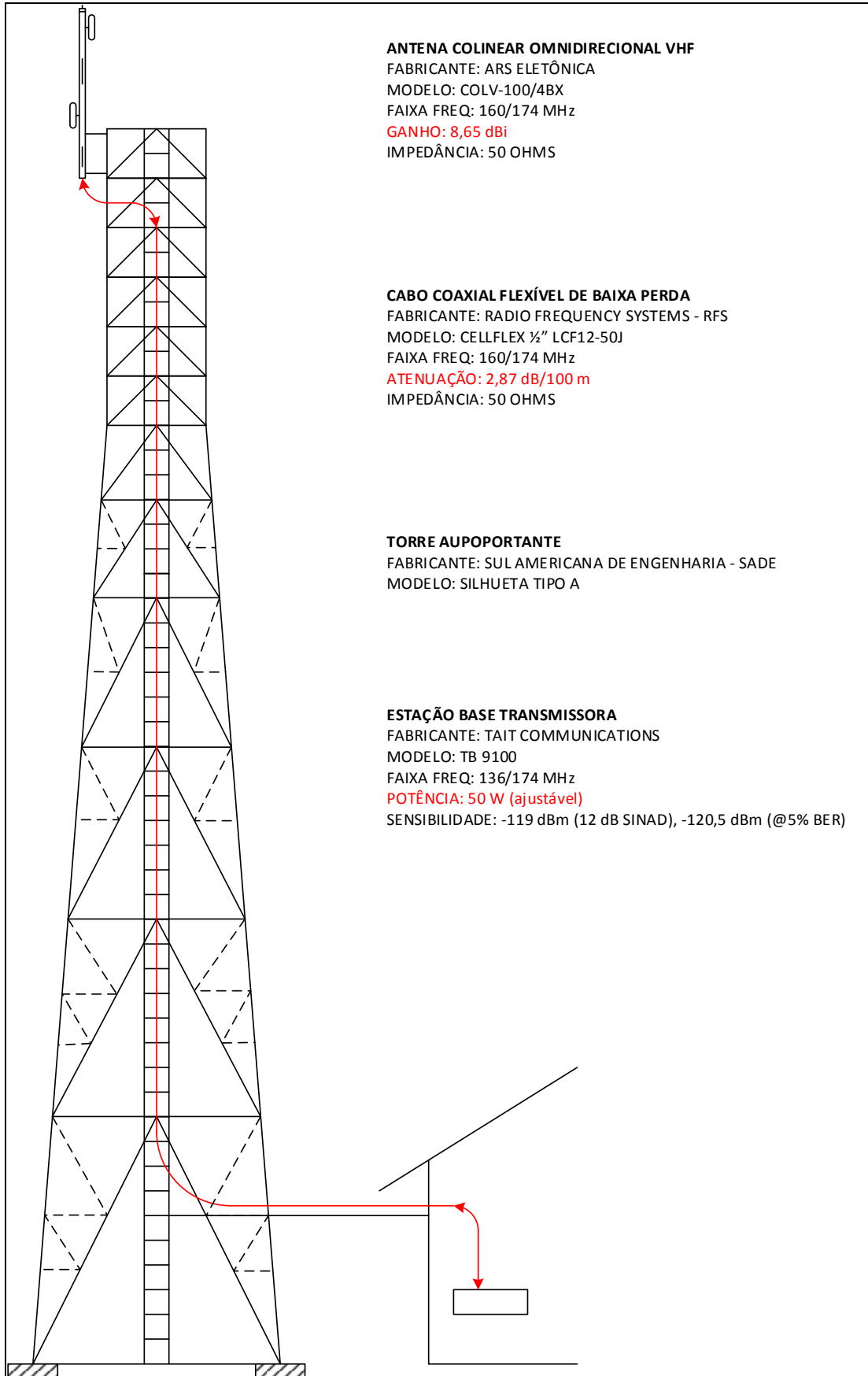


FIGURA 15 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO VHF DAS SEs PHS E CEL
 FONTE: O AUTOR (2016)

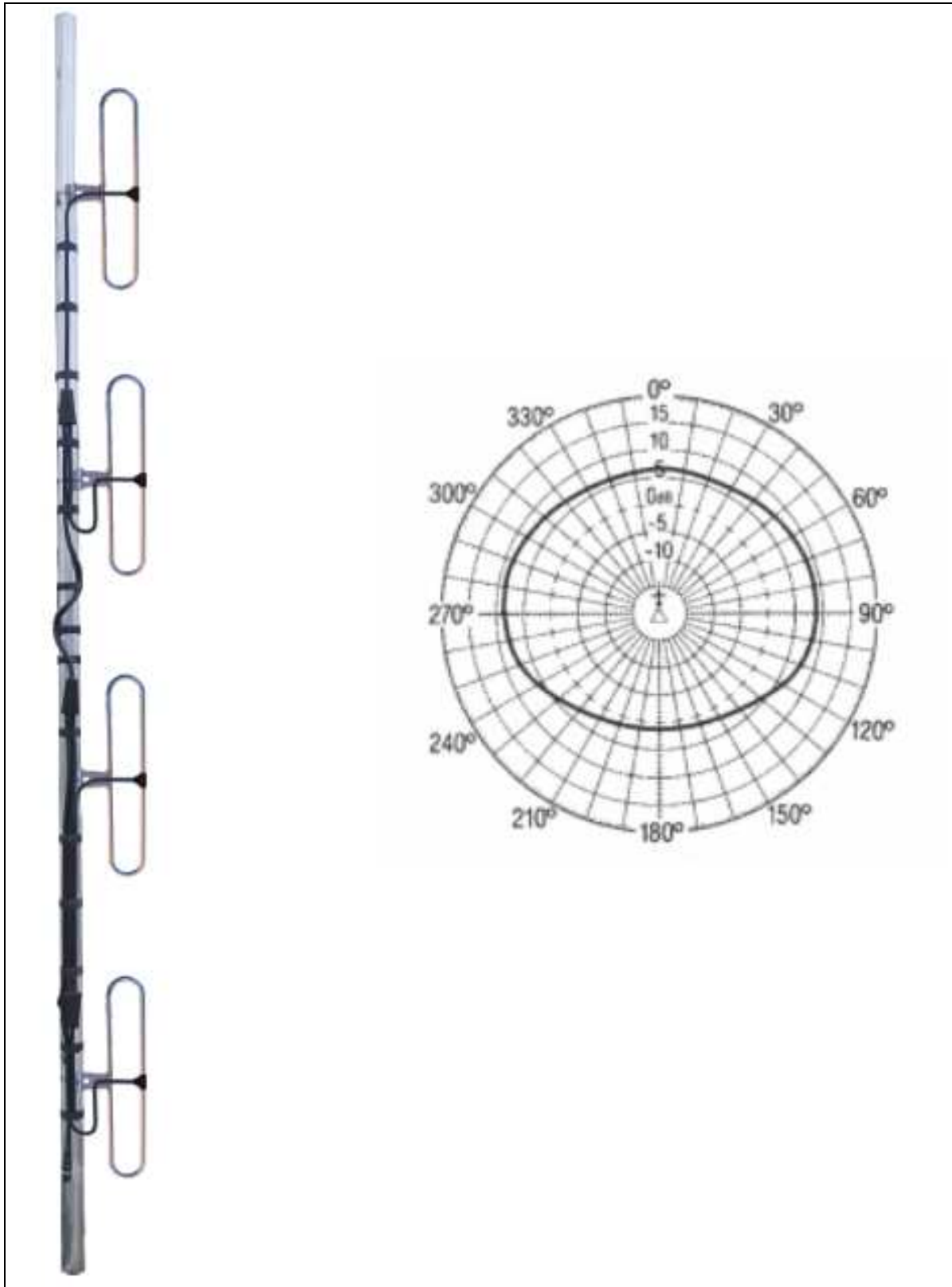


FIGURA 16 - ANTENA COLINEAR OMNIDIRECIONAL E DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO
FONTE: ARS ELETRÔNICA (2016)

O equipamento módulo repetidor que compreende o subsistema de transmissão, é uma estação rádio base, com capacidade de encaminhamento de tráfego local de voz e dados de baixa capacidade, através do transmissor e receptor na faixa VHF do espectro de frequências e, adicionalmente, encaminha o referido tráfego, via interface Ethernet IP, à rede corporativa de operação centralizada de despacho. O equipamento tem condições de operar no modo dual em modulação analógica FM e modulação digital C4FM, com canalização de RF em 12,5 kHz (ANEXOS A e B), proporcionando sua utilização em redes de comunicação analógicas legadas e em redes digitais atuais que atendem ao marco regulatório brasileiro desta modalidade em comunicações privativas. As FIGURAS 17 e 18 mostram as visões frontal e traseira do equipamento, na versão instalada e utilizada para a condução dos testes e medidas de propagação.



FIGURA 17 - VISTA FRONTAL EQUIPAMENTO REPETIDOR TB9100
FONTE: TAIT COMMUNICATIONS (2016)



FIGURA 18 - VISTA TRASEIRA EQUIPAMENTO REPETIDOR TB9100
FONTE: TAIT COMMUNICATIONS (2016)

4.1.2 Estação de recepção

A estação de recepção e coleta de dados montada em veículo automotor, compreende os dispositivos e equipamentos necessários para obter as medições de nível de sinal de RF e coordenadas geográficas, de forma automática, armazenando a coleção de informações no disco rígido do computador pessoal tipo *notebook*.

Assim como na seção 4.1.1 para o sistema de transmissão, nesta seção, o diagrama do sistema de recepção, é mostrado na FIGURA 19, cujo conjunto denomina-se estação de recepção móvel, o qual compõe-se da antena de recepção, receptor *GPS (Global Positioning System)*, instrumento monitor de RF, roteador de rede TCP/IP, *notebook* que executa as aplicações pertinentes e demais acessórios periféricos. Desta forma, descrevem-se nos parágrafos seguintes, as características funcionais e técnicas dos equipamentos componentes do sistema de recepção.

O computador pessoal, tipo *notebook*, é de fabricação *Itautec®*, com processador *Intel Core i5®*, memória de 6 GB e sistema operacional *Windows 7®*, em barramento de 64 bits.

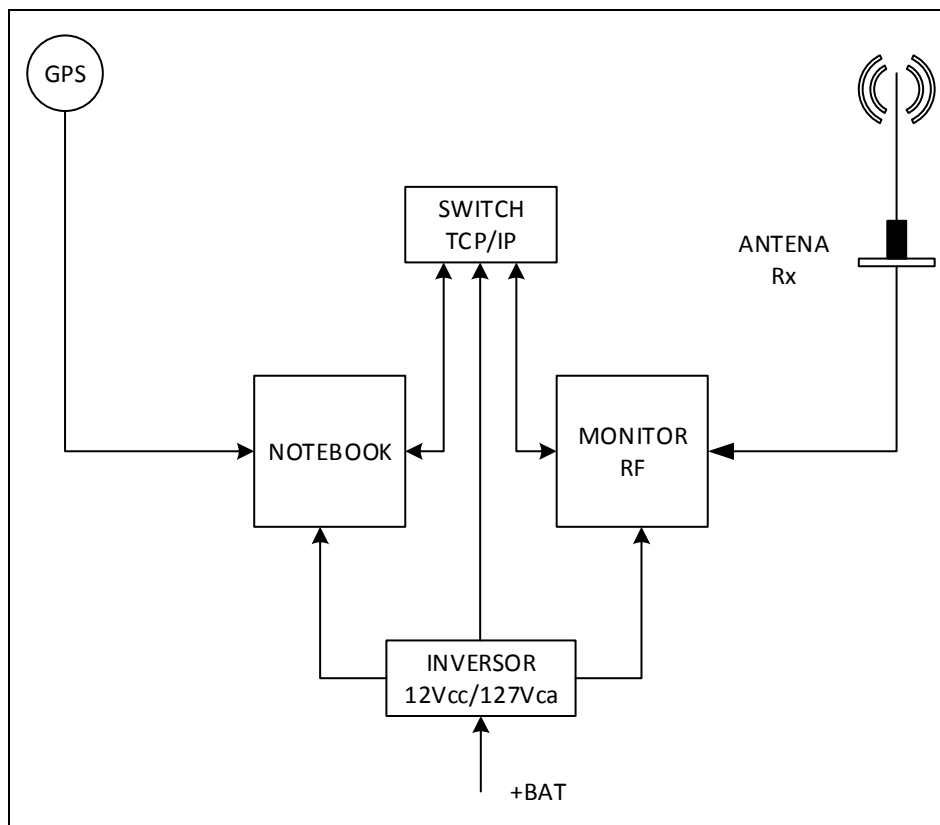


FIGURA 19 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE RECEPÇÃO MÓVEL
FONTE: O AUTOR (2016)

O receptor *GPS Garmin Etrex Vista®* utilizado (FIGURA 20), possui interface de comunicação serial tipo RS 232, para disponibilização dos dados de horário local, coordenadas e altitudes e, conectado diretamente ao *notebook*, é capaz de transferir estas informações com auxílio do programa *TrackMaker®*, para um arquivo no formato txt, a cada segundo de tempo.



FIGURA 20 - GPS GARMIN
ETREX VISTA
FONTE: GARMIN INC. (2001)

A antena de recepção é do tipo plano terra de $\frac{1}{4}$ de onda, com base magnética, sintonizada na frequência desejada através do ajuste por corte de seu comprimento. O modelo usado nas medições é do fabricante Aquário, modelo MC-300C, com 1,5 dBi de ganho e 50 Ohms de impedância nominal (FIGURA 21).



FIGURA 21 - ANTENA OMNIDIRECIONAL $\frac{1}{4} \lambda$
FONTE: ANTENAS AQUÁRIO (2016)

Devido a necessidade de prover alimentação compatível com os equipamentos que formam o conjunto de medição, utilizou-se um dispositivo inversor, mostrado na FIGURA 22, alimentado pelo sistema de bateria do veículo, que converte a energia contínua em tensão e correntes alternadas, com a potência necessária para suprir a carga demandada.



FIGURA 22 - INVERSOR 12 Vcc/127 Vca
FONTE: INITEL (2016)

Para estabelecer uma conexão de rede, com protocolo de roteamento TCP/IP, entre o *notebook* e o monitor de RF, perfaz o conjunto, o *Router D-Link*, modelo DI-804HV, ilustrado na FIGURA 23.



FIGURA 23 - ROTEADOR DE PACOTES TCP/IP
FONTE: D-LINK (2016)

O instrumento monitor de RF, que possui uma plataforma avançada de solução de medidas em sistemas de rádio, incluindo aplicações de laboratório e em campo, fabricado atualmente pela *Cobham/Aeroflex®*, modelo 3920B, foi utilizado para medir os sinais de nível de potência de recepção, obtidos pela interface Ethernet, via conexão de rede com o *notebook*, no modo DHCP, executando o arquivo de programação tipo *Visual Basic Script (VBS)* que contém a instrução de leitura de nível do analisador de espectro.

Este comando utiliza o formato padrão *Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)*, definido em adição ao padrão IEEE 488-2 (1992), que emprega um conjunto de códigos e protocolos de comunicação necessários para adquirir medições remotas em instrumentos de testes. Tal formato e protocolo não definem o meio físico ou interface física e, portanto, pode ser aplicado aos enlaces de comunicação de dados tipo Ethernet, que é o caso da implementação empregada na pesquisa, na pequena rede entre o *notebook* e monitor de RF.

A FIGURA 24 mostra, além do sequencial desvanecimento do sinal, as linhas de comando no padrão SCPI e arquivo no formato texto, executando o protocolo Telnet, utilizadas para obter a identificação do instrumento monitor e a requisição da medida do nível de sinal, através da tela do analisador de espectro, solicitando a coleta do respectivo nível na marca definida.

```
*idn?>indo ao Cliente MS Telnet
AEROFLEX,39XX,1000046115,1.7.8.1,2

:sa:marker:mkr1:level?
-34.61
:sa:marker:mkr1:level?
-35.41
:sa:marker:mkr1:level?
-36.77
:sa:marker:mkr1:level?
-38.77
:sa:marker:mkr1:level?
-41.84
:sa:marker:mkr1:level?
-44.28
:sa:marker:mkr1:level?
-45.96
```

FIGURA 24 - LINHAS DE COMANDO TELNET
FONTE: O AUTOR (2016)

A FIGURA 25 apresenta a visão frontal do monitor de RF descrito.



FIGURA 25 - INSTRUMENTO MONITOR DE RF
 FONTE: COBHAM (2016)

4.2 MÉTODOS

A maioria dos sistemas de comunicação móvel opera em complexos ambientes de propagação que não podem ser precisamente modelados somente pela avaliação da perda no espaço livre. Numerosos modelos têm sido desenvolvidos para prever as típicas perdas de percurso em ambientes urbanos, suburbanos e rurais e, mais recentemente, em ambientes internos, no interior de edificações. Estes modelos são, muitas vezes, baseados em medições empíricas, em determinadas faixas de frequência e distância, em regiões geográficas específicas e com ocupação de solo características. Entretanto, o uso destes modelos, não se restringem aos ambientes em que as campanhas de medição

foram realizadas, podendo ocorrer aplicações em situações genéricas, com razoável exatidão (GOLDSMITH, 2005).

Neste contexto, esta seção descreve a metodologia para o ajuste dos parâmetros do modelo de predição SPM, que poderá ser aplicado nas condições similares ao campo e ambiente pesquisado, desde a coleta de dados de medição, até a comparação do modelo ajustado com as medidas obtidas, utilizando uma técnica de regressão não linear, que pretende demonstrar a eficácia do processo.

4.2.1 Coleta de dados

O processo de coleta dos dados e o tratamento do conjunto das informações obtidas seguiram o encadeamento das ações mostradas no fluxograma da FIGURA 26, com o intuito de construir uma coleção de medidas e coordenadas geográficas, representativas dos diferentes ambientes de propagação, para compor o espaço amostral a partir do qual o modelo SPM será parametrizado com os fatores de correção apropriados. As atividades relacionadas ao referido fluxograma, são apresentadas com maiores detalhes e explicitados nos itens e parágrafos seguintes.

1. Início do processo;
2. Montagem das estações de transmissão fixas e de recepção móvel de acordo com a composição detalhada dos materiais, equipamentos e dados técnicos operacionais das seções 4.1.1 e 4.1.2;
3. Definição das rotas e percurso da estação móvel no entorno das estações de transmissão;
4. Realização automatizada das coletas de medições pela estação móvel, em consonância com as rotas e percursos pré-definidos;
5. Armazenamento em arquivos eletrônicos das coordenadas e medidas coletadas;
6. Classificação e descarte de medidas com desvio acima da projeção e tendência esperados;
7. Gravação das tabelas filtradas;
8. Geração de banco de dados e backup das tabelas filtradas;
9. Término do processo.

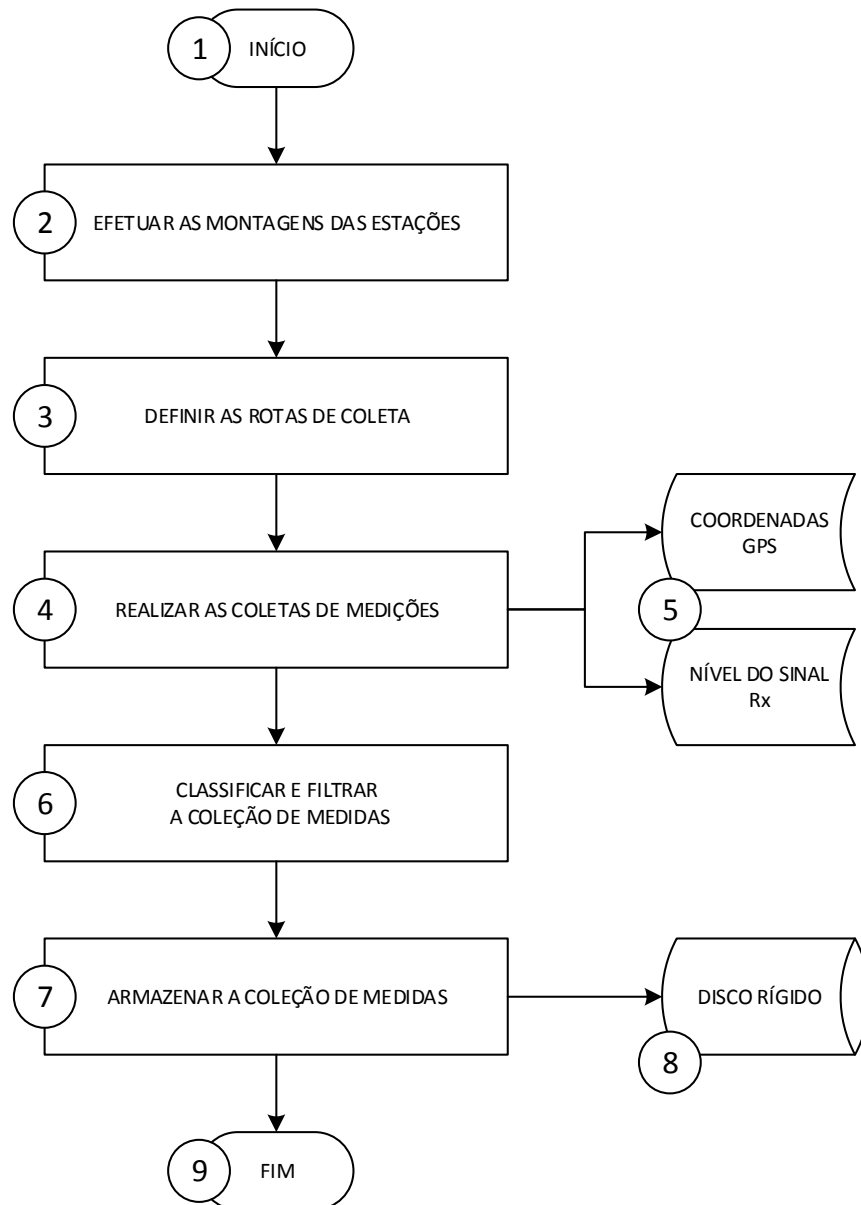


FIGURA 26 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE COLETA DE DADOS
FONTE: O AUTOR (2016)

As rotas de coleta foram definidas de forma radial a partir das estações de transmissão, nas vias com possibilidade de circulação com o veículo e estação de recepção, percorrendo distâncias de até 10 km uma única vez, com os tempos de percurso determinados pelos critérios de amostragem. A trajetória única e as condições climáticas e de horários não interferem nas coletas, uma vez que a propagação na frequência utilizada (170 MHz), não é influenciada por estas circunstâncias (ITU-R, 2015b).

Relativamente à coleta de dados de medições de forma automatizada, este procedimento é efetivado pela aplicação em *software*, o qual executa um programa no formato *VBS (Visual Basic Script)*, que cria e grava um arquivo texto no disco rígido do computador portátil, de nível de sinal lido no monitor de RF e de horário.

Assim, na medida em que a estação móvel percorre as rotas escolhidas, o conjunto monitor de RF e *script*, coletam as respectivas informações, uma vez que as estações de transmissão, enviam, de maneira contínua a portadora de RF em 170 MHz, frequência para a qual o modelamento será desenvolvido.

O arquivo texto gerado pela coleta automatizada, pode ser visualizado na FIGURA 27, na qual constam os valores de sinal de RF medidos e o padrão de horário que será usado para sincronizar as leituras de medição e coordenadas geográficas.

Data da Coleta: 22/10/2015	
-74.76	18:31:04
-75.14	18:31:05
-75.36	18:31:06
-75.63	18:31:07
-76.65	18:31:08
-78.44	18:31:09
-81.70	18:31:11
-82.98	18:31:12
-80.96	18:31:13
-81.21	18:31:14
-83.54	18:31:15
-84.87	18:31:16
-86.41	18:31:17
-84.69	18:31:18
-85.58	18:31:19
-83.38	18:31:20
-82.40	18:31:21
-82.32	18:31:22
-81.67	18:31:23
-80.73	18:31:24
-80.02	18:31:25
-78.73	18:31:26
-77.88	18:31:27
-77.89	18:31:28
-78.94	18:31:29
-83.39	18:31:30
-83.74	18:31:31
-82.92	18:31:32
-83.73	18:31:33
-85.78	18:31:34
-85.53	18:31:35
-84.82	18:31:36

FIGURA 27 - NÍVEIS DE RF E HORÁRIOS COLETADOS
FONTE: O AUTOR (2016)

O diagrama de blocos do aplicativo VBS, ilustrado na FIGURA 28, compõe-se das etapas descritas na sequência, sendo que as linhas de código do programa são apresentadas nos ANEXOS C e D.

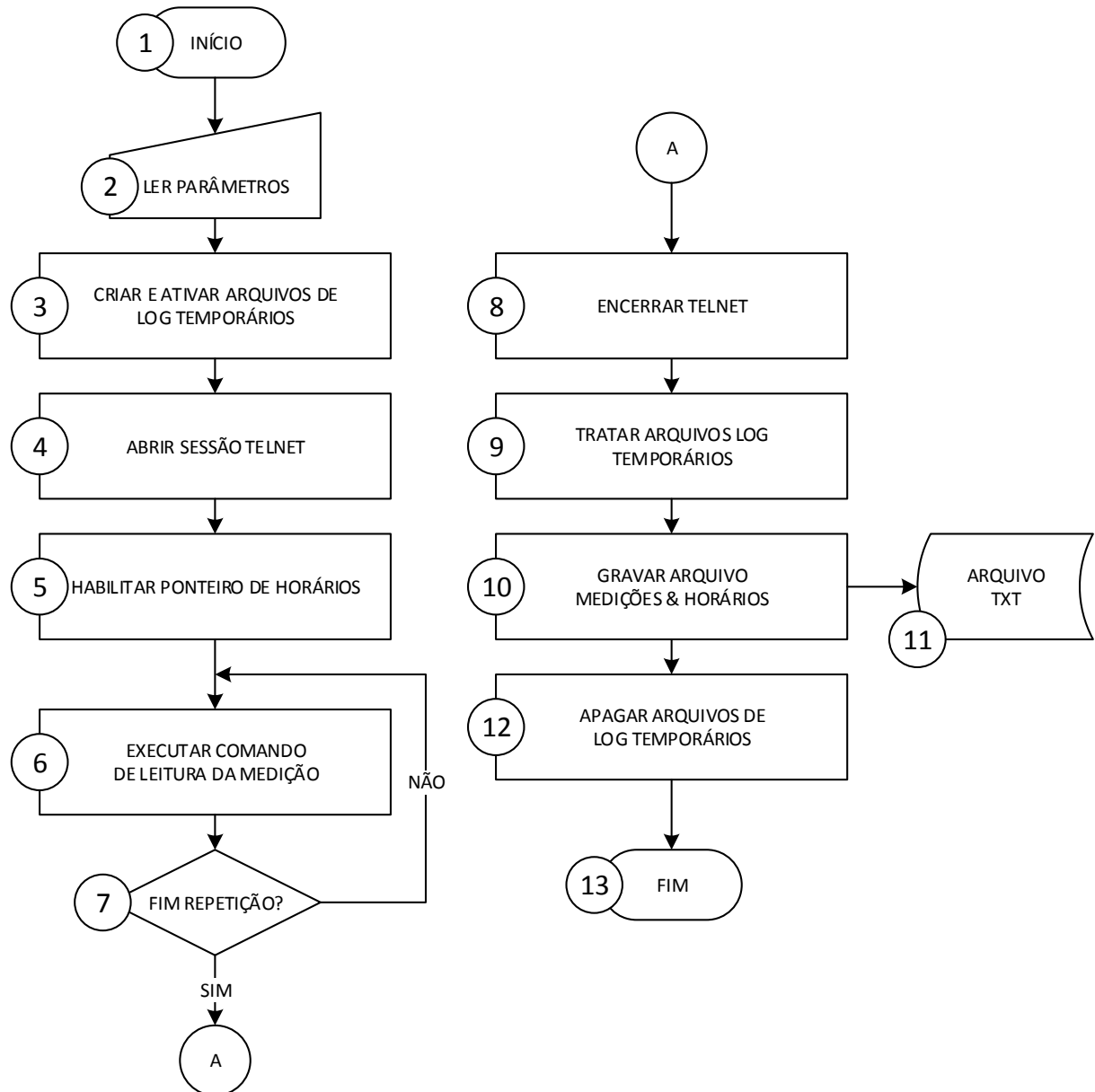


FIGURA 28 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO VBS
FONTE: O AUTOR (2016)

1. Início do processo;
2. Leitura dos parâmetros de número máximo de pontos e nome do arquivo, inseridos pelo usuário;
3. Criação de arquivos de log temporários e habilitação de gravação;
4. Abertura de sessão Telnet para inclusão das requisições de medição;

5. Habilitação do ponteiro de horários para aquisição diretamente do computador;
6. Execução sequencial dos comandos de leitura de medição;
7. Verificação do atingimento do número máximo de repetições;
8. Encerramento da sessão Telnet;
9. Tratamento dos arquivos de log temporários, preparando para escrita;
10. Gravação dos arquivos de medição e horários;
11. Formatação de saída dos arquivos textos;
12. Exclusão de arquivos de log temporários;
13. Término do processo.

No caso das coordenadas geográficas, a gravação e medição, é efetuada executando-se o programa *freeware TrackMaker®*, versão 13.9.564 o qual é capaz de fornecer, além das coordenadas no formato da projeção *UTM (Universal Transverse Mercator)*, o horário para sincronização com as medidas de sinal capturadas pelo monitor de RF.

A FIGURA 29 ilustra a interface gráfica do programa *TrackMaker®*, utilizado em conjunto com o respectivo equipamento receptor GPS.

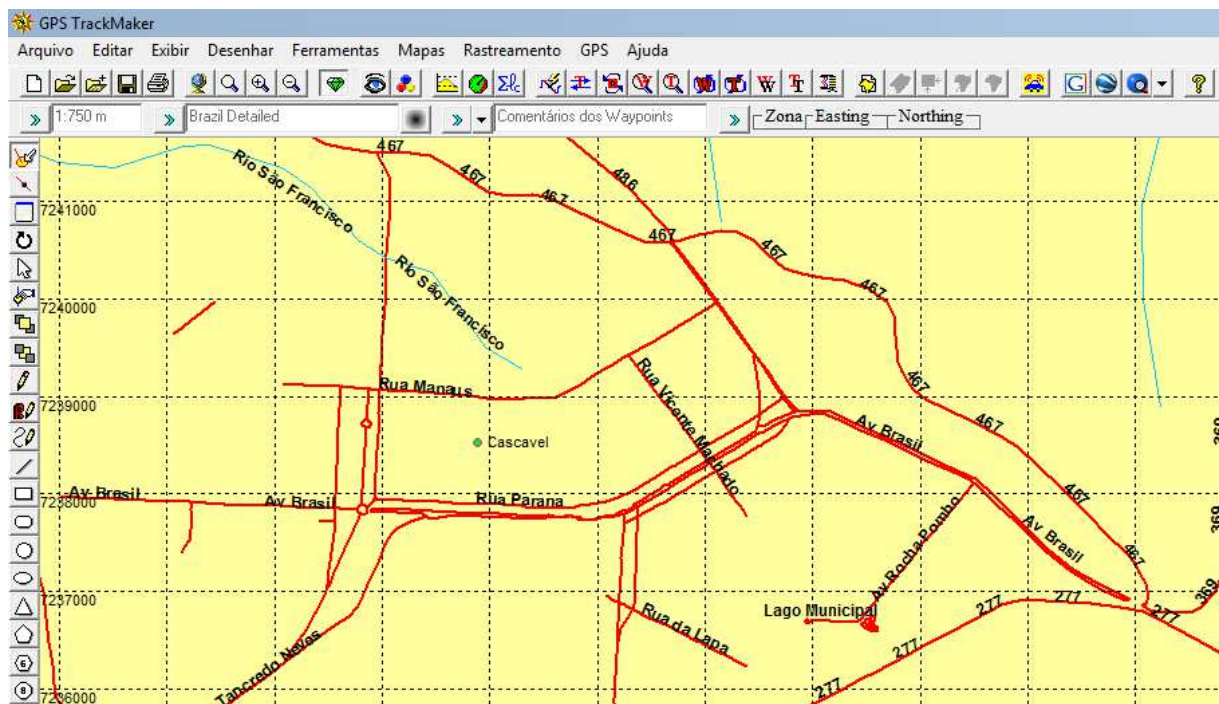


FIGURA 29 - INTERFACE GRÁFICA DO PROGRAMA *TRACKMAKER®*
 FONTE: GEO STUDIO TECHNOLOGY LTD (2014)

O arquivo texto gerado a partir do programa *TrackMaker*®, apresenta os dados conforme a FIGURA 30 que, neste caso, mostra as coordenadas geográficas, data de coleta e horário de sincronização, obtidos a partir do receptor GPS utilizado.

```
Version,212
WGS 1984 (GPS),217, 6378137, 298.257223563, 0, 0, 0
USER GRID,0,0,0,0,0
t,utm,22J,252198.047,7233175.646,10/22/2015,18:31:04,750.8831,1
t,utm,22J,252197.761,7233175.263,10/22/2015,18:31:05,751.9009,0
t,utm,22J,252197.452,7233174.829,10/22/2015,18:31:06,753.0748,0
t,utm,22J,252197.170,7233174.351,10/22/2015,18:31:07,754.285,0
t,utm,22J,252197.047,7233173.969,10/22/2015,18:31:09,754.5581,0
t,utm,22J,252196.951,7233173.695,10/22/2015,18:31:10,754.8198,0
t,utm,22J,252197.296,7233173.709,10/22/2015,18:31:12,753.9709,0
t,utm,22J,252197.334,7233173.446,10/22/2015,18:31:14,753.5723,0
t,utm,22J,252197.647,7233173.420,10/22/2015,18:31:16,753.1455,0
t,utm,22J,252197.287,7233172.881,10/22/2015,18:31:17,754.5911,0
t,utm,22J,252196.982,7233172.516,10/22/2015,18:31:18,755.7275,0
t,utm,22J,252197.035,7233172.701,10/22/2015,18:31:20,755.6993,0
t,utm,22J,252197.613,7233173.481,10/22/2015,18:31:21,753.7814,0
t,utm,22J,252198.107,7233174.206,10/22/2015,18:31:22,752.0861,0
t,utm,22J,252198.162,7233174.418,10/22/2015,18:31:24,752.0751,0
t,utm,22J,252198.443,7233174.826,10/22/2015,18:31:25,751.1753,0
t,utm,22J,252198.627,7233175.109,10/22/2015,18:31:26,750.5707,0
t,utm,22J,252198.796,7233175.364,10/22/2015,18:31:27,750.0852,0
t,utm,22J,252198.621,7233175.213,10/22/2015,18:31:30,750.9186,0
t,utm,22J,252198.518,7233175.111,10/22/2015,18:31:31,751.2474,0
```

FIGURA 30 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS E HORÁRIOS COLETADOS
FONTE: O AUTOR (2016)

Os arquivos de coleta de medição e coordenadas geográficas são, então, concatenados, utilizando o horário como referência de sincronização, para serem inseridos ou importados pelo programa *Atoll*®, no qual são criadas as bases de informações denominadas *CW measurements*.

As tabelas de informações contêm os dados de altitude, tipo de morfologia e a sua altitude estatística, a topografia do terreno no ponto medido, a distância entre o transmissor e o receptor do sistema de teste e, adicionalmente, após a simulação, as colunas de medição, erro e predição. Estas descrições podem ser visualizadas na FIGURA 31.

Id	X	Y	Alt. DTM (m)	Clutter	Clutter height (m)	DTM + clutter (m)	Distance (m)	M (dBm)	Error (P-M) (dB)	P (dBm) CEL_1
1	252.202	7.233.153	751	1 - OPEN	0	751	132	-26,38	-10,4	-36,78
2	252.201	7.233.153	751	1 - OPEN	0	751	131	-26,66	-10,19	-36,85
3	252.202	7.233.152	751	1 - OPEN	0	751	133	-26,38	-10,39	-36,77
4	252.201	7.233.150	751	1 - OPEN	0	751	134	-26,29	-10,51	-36,8
5	252.202	7.233.149	751	1 - OPEN	0	751	135	-26,07	-10,79	-36,86
6	252.202	7.233.148	751	1 - OPEN	0	751	136	-25,56	-11,33	-36,89
7	252.201	7.233.146	751	1 - OPEN	0	751	137	-25,79	-11,14	-36,93
8	252.199	7.233.141	751	1 - OPEN	0	751	140	-32,51	-4,6	-37,11
9	252.197	7.233.135	751	1 - OPEN	0	751	144	-34,31	-3,25	-37,56
10	252.195	7.233.127	751	1 - OPEN	0	751	149	-29,24	-9,8	-39,04
11	252.193	7.233.124	751	1 - OPEN	0	751	151	-28,74	-10,87	-39,61
12	252.192	7.233.121	750	1 - OPEN	0	750	153	-28,29	-12,04	-40,33
13	252.190	7.233.117	750	1 - OPEN	0	750	156	-28,07	-13,52	-41,59
14	252.189	7.233.112	750	1 - OPEN	0	750	160	-28,71	-15,15	-43,86
15	252.187	7.233.108	750	1 - OPEN	0	750	162	-29,69	-15,65	-45,34
16	252.186	7.233.103	750	1 - OPEN	0	750	167	-30,7	-16,37	-47,07
17	252.184	7.233.097	750	1 - OPEN	0	750	171	-31,38	-17,31	-48,69
18	252.182	7.233.092	749	1 - OPEN	0	749	175	-27,9	-20,7	-48,6
19	252.180	7.233.088	749	1 - OPEN	0	749	178	-27,28	-19,68	-46,96
20	252.179	7.233.083	749	1 - OPEN	0	749	183	-29,7	-15,14	-44,84
21	252.177	7.233.077	749	1 - OPEN	0	749	188	-30,49	-12,71	-43,2
22	252.175	7.233.072	749	1 - OPEN	0	749	192	-30,75	-11,4	-42,15
23	252.173	7.233.067	749	1 - OPEN	0	749	196	-30,56	-10,83	-41,39
24	252.172	7.233.063	748	1 - OPEN	0	748	200	-31,07	-10,15	-41,22
25	252.170	7.233.059	748	1 - OPEN	0	748	203	-31,42	-9,82	-41,24
26	252.169	7.233.054	747	1 - OPEN	0	747	208	-31,2	-10,06	-41,26
27	252.168	7.233.049	747	1 - OPEN	0	747	212	-32,26	-9,02	-41,28
28	252.165	7.233.040	747	1 - OPEN	0	747	220	-33,58	-8,06	-41,64
29	252.163	7.233.036	746	1 - OPEN	0	746	224	-34,54	-7,37	-41,91
30	252.161	7.233.031	746	1 - OPEN	0	746	228	-36,11	-6,15	-42,26

FIGURA 31 – TABELA DE INFORMAÇÕES DE MEDIÇÃO E COORDENADAS CONCATENADAS
 FONTE: ATOLL® (2016)

4.2.2 Critério para amostragem e descarte na coleta de dados

Numerosas investigações, teóricas e experimentais, das variações dos sinais de rádio em terrenos irregulares ou áreas construídas, têm mostrado que a propagação das ondas eletromagnéticas é, aproximadamente, estacionária no tempo, em condições fixas, em oposição às variações espaciais ou móveis do nível de sinal e que possui uma natureza tripla. A primeira é a perda de percurso, que pode ser definida genericamente como o decréscimo da amplitude do sinal de RF expressa em decibéis. A dispersão de larga escala no domínio espacial ou a dispersão de longo período no domínio do tempo, é a segunda característica, usualmente definida na literatura científica como dispersão por sombreamento ou lenta, causada pela difração em obstáculos de grandes dimensões. A terceira natureza ou característica, é a dispersão de pequena escala no domínio espacial ou a dispersão de curto período ou rápida no domínio do tempo, que é causada por interferências mútuas em situações de multipercursos do sinal, através ou no contorno de obstáculos, cujas dimensões variam de meio a três comprimentos de onda (BANSAL, 2004).

Para evitar que as dispersões rápidas e lentas descritas, interfiram na coleta de dados e, conseqüentemente, na amostragem adequada das medições de nível de sinal recebido na estação móvel, Lee (1993) propôs a obtenção de uma média local pela aproximação a um determinado comprimento espacial, que represente as variações medidas, de forma praticamente linear. Desta forma e, de acordo com esta recomendação, usando-se entre 36 a 50 amostras no intervalo de 40λ , pode-se adequar o processo de coleta de dados para obter uma média local coerente com as alterações no perfil do terreno e com as variações nos ambientes ocupados por edificações. Este critério foi satisfeito neste trabalho, adequando-se a velocidade de deslocamento da estação móvel para, no máximo 10 km/h, considerando as medições dos pontos individuais a cada segundo.

Adicionalmente, com o propósito de eliminar ou mitigar medições com desvios muito elevados (*outliers*), a coleção de dados deve ser filtrada para preservar a representatividade da morfologia e do perfil do terreno e, ainda, proporcionar resultados estatisticamente válidos. Desta forma, os procedimentos básicos para conduzir a filtragem das medidas consideradas impróprias ao ajuste e adequação do modelo de propagação, podem ser divididos em (FORSK SARL, 2015d):

- *Filtragem por classe de morfologia*: devem ser removidos os pontos que representam ocorrência menor que 5% da classe morfológica, desde que a referida classe esteja representada em mais de uma rota de coleta. A classe e a indicação percentual podem ser obtidas da ferramenta *Atoll®*, geradas por meio da opção de visualização específica por rota;
- *Filtragem por nível de sinal e distância do transmissor*: devem ser removidas medições com níveis acima de -20 dBm devido à saturação do receptor e menores que -112 dBm como valor típico, em função da sensibilidade característica do mesmo receptor. As distâncias mínimas e máximas do transmissor de referência, não devem ser inferiores a 200 metros e superiores a 10 quilômetros, especialmente em áreas rurais;

- *Filtragem por condições geográficas:* devem ser removidos os pontos em que ocorrem múltiplas reflexões no terreno e que não representam toda região considerada, tais como: existência de grandes lagos ou superfícies reflexivas, percursos sob pontes, viadutos ou túneis e obstruções muito próximas ao transmissor;
- *Filtragem por homogeneidade:* pontos com desvios excessivamente altos, com quedas bruscas no nível do sinal ou elevações súbitas, devem ser removidos para preservar a propagação espacialmente homogênea ao longo da rota de medição. Estes desvios podem ocorrer devido a flutuações topográficas bruscas ou ao aparecimento de obstáculos durante o percurso da rota, como outros veículos maiores nas proximidades da estação de medição.

4.2.3 Parametrização e ajuste do modelo SPM

A parametrização e o ajuste do modelo SPM, após a coleta e armazenamento da coleção de dados de medições, que inclui o nível do sinal de RF recebido na estação móvel e as coordenadas geográficas do ponto de aquisição, foi efetivada comparando-se os valores medidos com os resultados da simulação na ferramenta computacional. Para melhor avaliação, foram elaborados os gráficos de nível *versus* distâncias, para cada rota determinada a partir das estações de transmissão, as quais compreendem a morfologia representativa da ocupação de solo em cada direção de percurso da trajetória percorrida pela estação móvel.

Adicionalmente, para o traçado gráfico das referidas curvas de medição e simulação, foi utilizado o método da análise de regressão, comumente aplicado e conceitualmente simples, para investigar a relação funcional entre variáveis. Esta associação ou vínculo pode ser expressa como uma equação ou um modelo, relacionando a variável de resposta (dependente) com uma ou mais variáveis exploratórias (independentes) (CHATTERJEE; HADI, 2006).

Neste trabalho, foi utilizado o modelo de regressão não linear, devido a forma da curva matemática representada pelo comportamento do sinal de RF e pela atenuação sofrida pela propagação da onda eletromagnética, que depende da

distância e das características do terreno, entre as estações de transmissão e a estação móvel receptora.

Devido à este comportamento não linear do sinal de RF, optou-se pela aplicação do modelo matemático descrito nas expressões 55, 56 e 57, cujos parâmetros ou coeficientes adotam o formato de uma função exponencial, onde θ é o vetor determinado pelas variáveis α e β que necessitam ser estimadas (SEBER; J.WILD, 2003).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) \quad (55)$$

$$\theta = (\alpha, \beta) \quad (56)$$

$$y \approx \alpha e^{\beta x} \quad (57)$$

Para estimar os parâmetros ou coeficientes e as variáveis destas expressões, considerou-se a aproximação linear por quadrados mínimos, utilizando o software *MatLab®*, versão R2014a, executando o aplicativo ou *toolbox* denominada *Curve Fitting*, cujo método proporciona o ajuste de curvas ou superfícies a partir de uma coleção de dados, realizando análises de regressão, podendo, ainda, elaborar pós-processamento, interpolação, estimar intervalos de confiança e efetuar plotagem gráfica (MATHWORKS, 2015).

4.2.3.1 Ambiente de simulações e de coleta

O ambiente geográfico de coleta dos dados, que representa o mapeamento das campanhas de medição, pode ser visualizado genericamente, nas FIGURAS 32 e 33, que ilustram as trajetórias e rotas percorridas pelo conjunto estação móvel, as quais compreendem o georeferenciamento de 3.919 pontos correspondentes à estação fixa locada na Subestação Cascavel e de 4.857 pontos correspondentes à estação fixa locada na Subestação Pinheiros, filtrados pelos critérios estabelecidos em 4.2.2, ambas situadas na região metropolitana da cidade de Cascavel. Os percursos envolvem as áreas com adensamento urbano e suburbano e, também, as rotas estabelecidas através de porções de ocupação de relevo rurais.

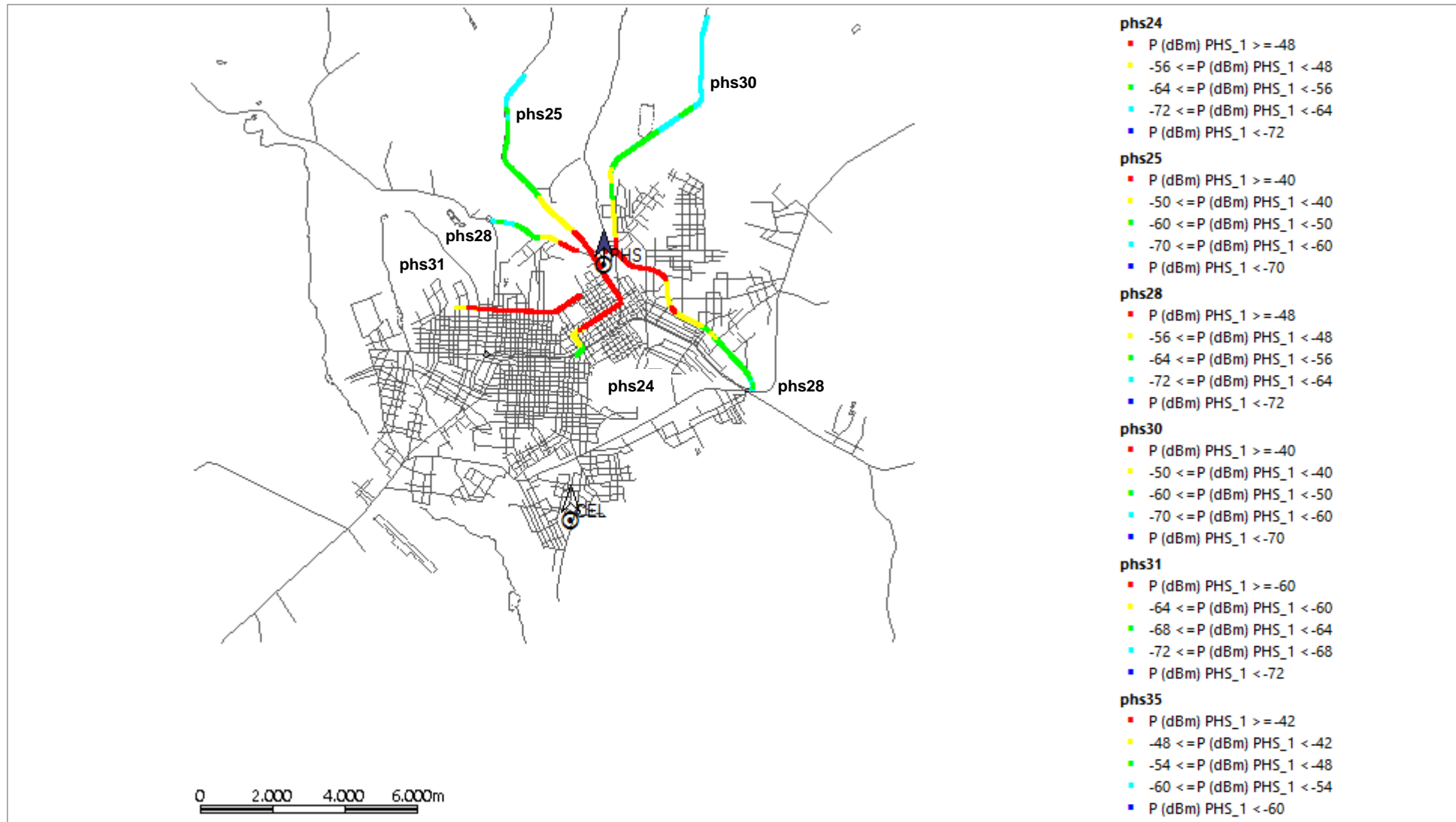


FIGURA 32 - TRAJETÓRIAS GEORREFERENCIADAS PERCORRIDAS DESDE A SUBESTAÇÃO PINHEIROS E LEGENDA DOS NÍVEIS DE RECEPÇÃO
 FONTE: O AUTOR (2016)

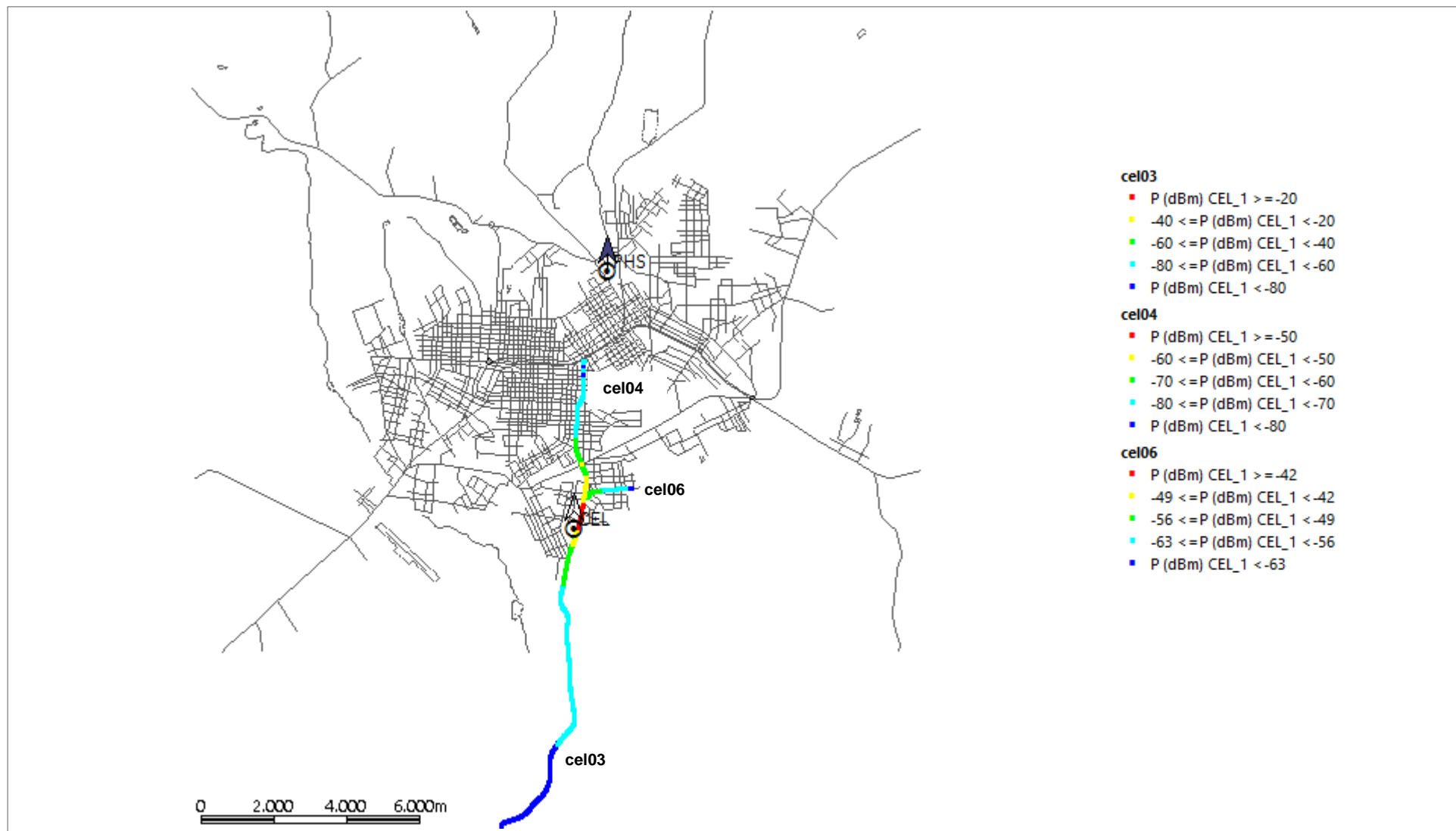


FIGURA 33 - TRAJETÓRIAS GEOREFERENCIADAS PERCORRIDAS DESDE A SUBESTAÇÃO CASCAVEL E LEGENDA DOS NÍVEIS DE RECEPÇÃO
 FONTE: O AUTOR (2016)

4.2.3.2 Ajuste do modelo de propagação SPM

O processo de ajuste ou sintonia do modelo de propagação SPM foi conduzido com auxílio da ferramenta computacional *Atool*® versão 3.3.0, a qual inclui a possibilidade e disponibilidade para modificar os parâmetros associados ao referido modelo, baseado numa coleção de dados de medição em campo.

O procedimento adotado para o ajuste e, posteriormente, o desenvolvimento ou adaptação do modelo SPM, compreende, basicamente, a comparação das curvas de regressão dos sinais medidos, coletados em campo, com as curvas de regressão dos sinais calculados ou simulados, obtidos pela parametrização padrão, com o propósito de minimizar o erro entre os valores da predição de perda de percurso e aqueles encontrados na realização das medições.

Após a comparação gráfica, pode-se ajustar os principais valores dos parâmetros do modelo SPM, de acordo com as correspondentes análises do afastamento e da inclinação das curvas de regressão, associando estes desvios, com os coeficientes presentes nos termos da expressão matemática do referido modelo, que descrevem a atenuação e demais fenômenos de desvanecimento do sinal de RF, nas condições previstas de aplicação.

O primeiro fator ou coeficiente para ajuste do modelo SPM, descrito na expressão (53), é o parâmetro K_1 denominado de constante de *offset*, o qual corrige o afastamento das curvas de medição e predição para todas as simulações de percurso ou de rotas estabelecidas e efetuadas, uma vez que inclui, intrinsecamente, a atenuação devido à frequência. Desta forma, conforme a FIGURA 34, o referido afastamento médio pode ser observado graficamente, na plotagem da medição e da simulação da rota rural *ce/03*, ilustrando, ainda, a regressão das curvas.

Neste caso, bem como nas demais simulações, a correção estabelecida para o coeficiente K_1 representa, em valor médio absoluto, 35,9 dB considerando o intervalo entre o valor original do modelo SPM de +17,4 dB, que determina a atenuação padrão e o novo valor ajustado de -18,5 dB, o qual estabelece o ganho no sinal de recepção na predição e que proporciona o ajuste inicial para a frequência de operação adotada. Como o modelo SPM original e seus parâmetros contempla

simulações de cobertura para frequências compreendidas entre 900 a 3.000 MHz, adotou-se este processo inicial para adequar a predição à faixa VHF do espectro.

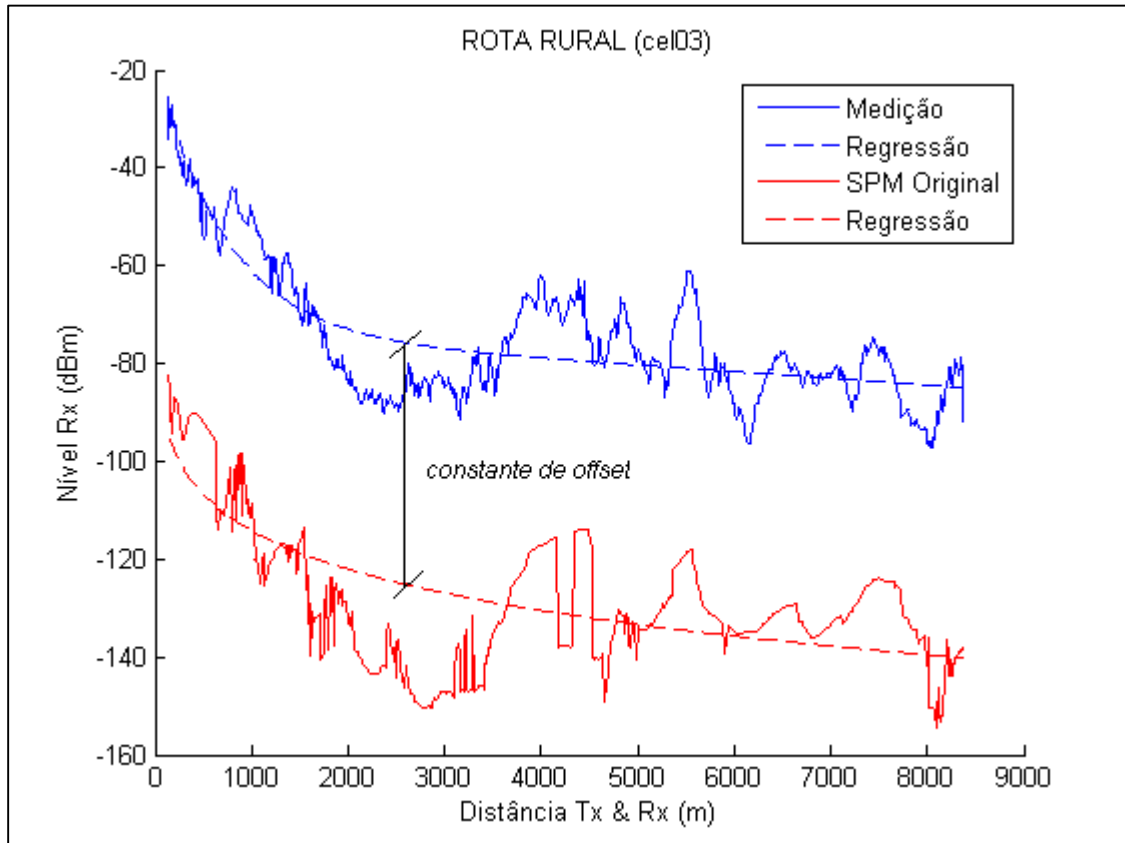


FIGURA 34 - CONSTANTE DE *OFFSET* DO AFASTAMENTO MÉDIO ENTRE CURVAS
 FONTE: O AUTOR (2016)

O segundo coeficiente para ajuste do modelo SPM, refere-se ao parâmetro $\log(d)$, associado à distância entre o transmissor e o receptor e que é precedido pelo fator de multiplicação K_2 , o qual, em última análise, é manipulado para alterar a atenuação sofrida pela onda eletromagnética, na medida em que a estação móvel de recepção, afasta-se da estação transmissora, em qualquer direção, determinando o decaimento médio do sinal de RF. Esta atenuação ou decaimento é representada graficamente e, é ilustrada na FIGURA 35, pela diferença na inclinação das curvas de regressão dos sinais medidos e aqueles calculados pelo modelo computacional, considerando, para melhor percepção, a simulação da rota urbana *phs24*.

Para o modelamento e ajuste aplicado aos sistemas utilizados, o fator de multiplicação K_2 , preservou o valor especificado empiricamente na expressão (25), do modelo de propagação de Hata (1980), que estabelece o valor absoluto de 44,9

unidades multiplicativas ao parâmetro $\log(d)$, conforme curva ilustrada no ANEXO E, representativo do decaimento não linear da portadora de RF no percurso.

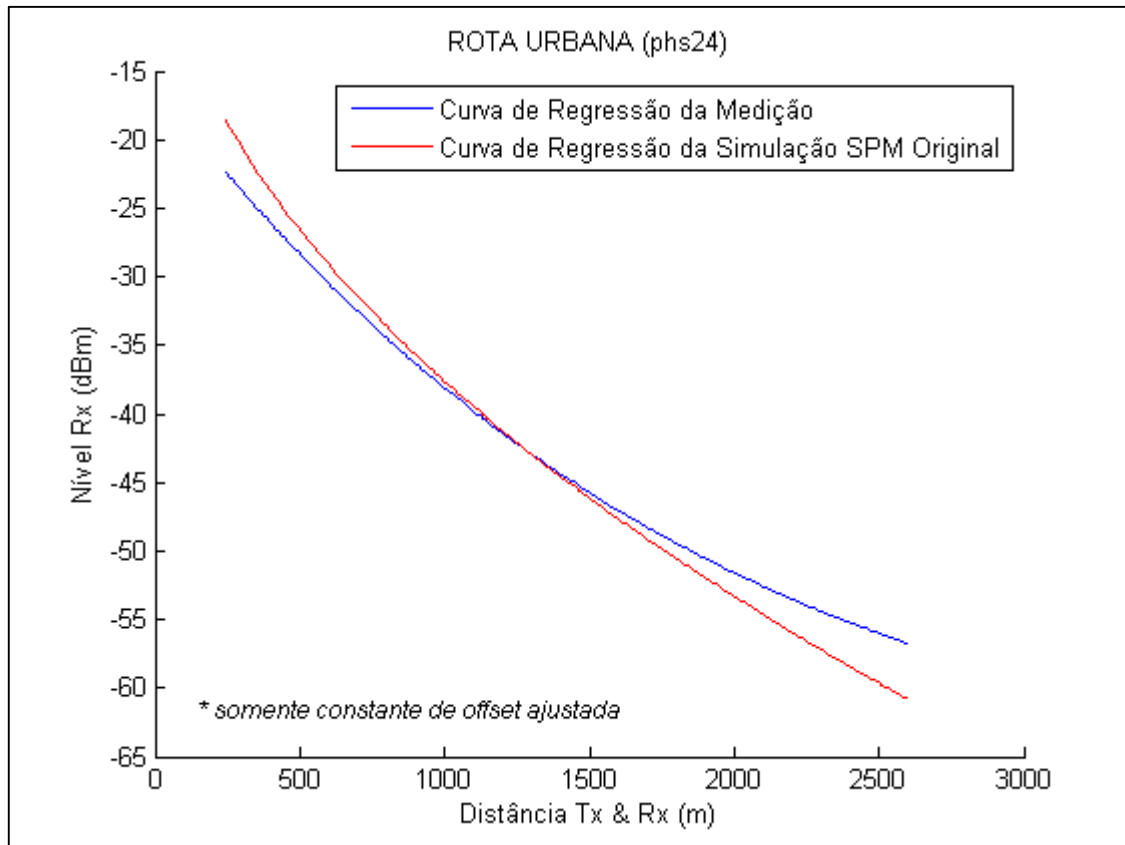


FIGURA 35 - INCLINAÇÃO DAS CURVAS DE REGRESSÃO
FONTE: O AUTOR (2016)

O terceiro coeficiente K_3 , que corresponde ao fator de multiplicação do parâmetro $\log(H_{Txef})$, representativo da altura efetiva da antena da estação transmissora que, neste caso, é configurada com a mesma altura física das antenas nas estruturas verticais, é obtido pela combinação de dois fatores a partir do modelo padrão de Hata (1980) e definido como 5,83 unidades positivas e absolutas.

O coeficiente denominado K_4 , de valor nulo no modelo original SPM e unitário no modelo ajustado final, é o fator de multiplicação para as perdas de percurso do sinal, submetidas ao fenômeno da difração, que ocorre devido ao perfil do terreno e à ocupação da superfície do solo. O valor unitário inserido determina a atenuação intrínseca aos obstáculos e relevo e, representa o cálculo das respectivas perdas sem ajustamento, melhor adaptado ao equacionamento do modelo.

As perdas por difração são avaliadas e calculadas no modelo corrigido, utilizando o método de Deygout (1966), descrito neste trabalho no item 2.4.2.3, o qual considera a condição de atenuação de um obstáculo dominante no percurso do sinal propagado.

A FIGURA 36 apresenta a comparação das curvas de simulação utilizando o método de Deygout para o cálculo da difração e, adicionalmente, a curva de medição como referência de formato buscado na predição.

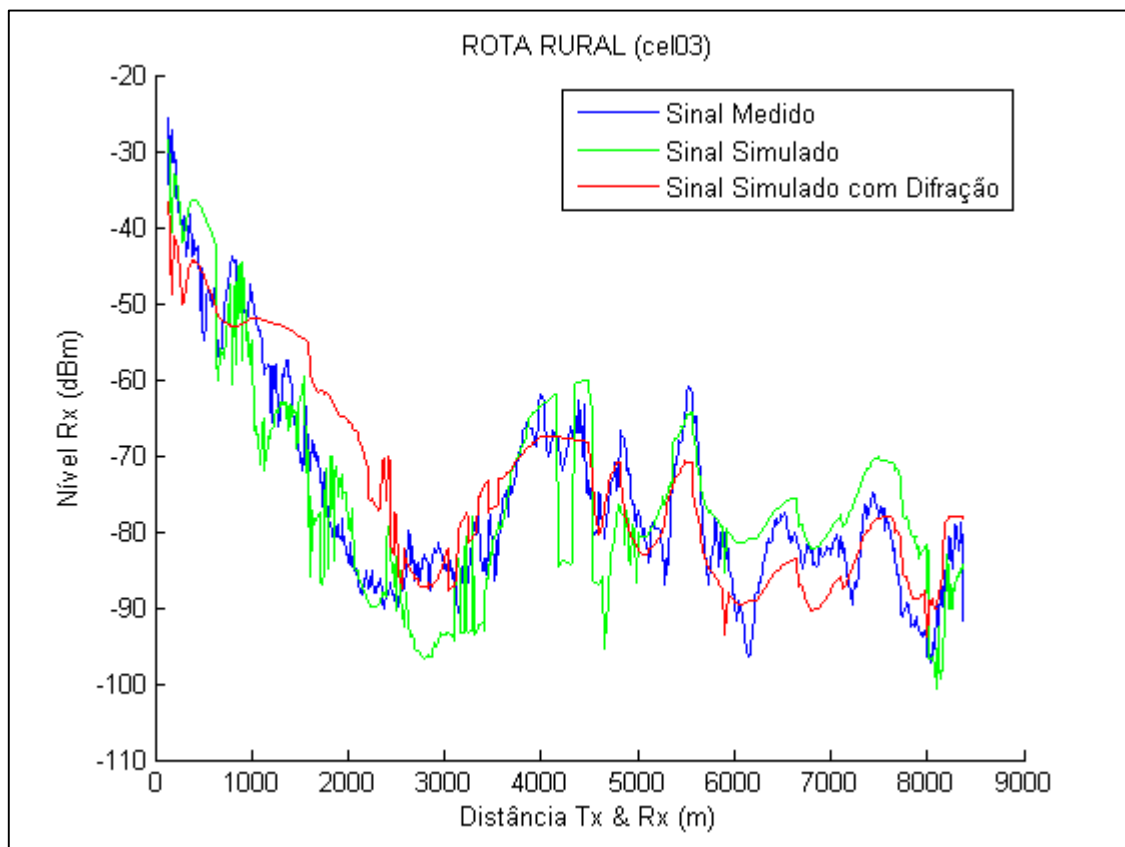


FIGURA 36 - COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE SIMULAÇÃO COM DIFRAÇÃO
 FONTE: O AUTOR (2016)

O coeficiente K_5 também manteve o valor estimado pelo modelo padrão de Hata (1980), o qual é fator multiplicativo do parâmetro $\log(d) * \log(H_{Tx_{ef}})$, que pode ser considerado como o ajuste fino da atenuação do sinal de RF, dado pela inclinação da curva de decaimento da propagação, assim como no parâmetro $\log(d)$ descrito anteriormente, uma vez que, da mesma forma, a altura efetiva da antena da estação transmissora é configurada com a mesma altura física das antenas acima do solo. Este coeficiente apresenta o valor de -6,55 unidades,

determinando um ganho na expressão (53) do modelo SPM, associado, também, à distância entre o transmissor e o receptor.

Os coeficientes dos termos H_{Rxef} e $\log(H_{Rxef})$, K_6 e K_7 , respectivamente, são nulos no modelo original e no modelo ajustado, uma vez que as posições relativas e efetivas das alturas da antena da estação móvel, em relação ao solo e à altitude do transmissor, não são computadas para avaliar os efeitos das obstruções, os quais são calculados pelas perdas por difração.

Como a altura da classe de morfologia é estimada pela média dos tipos de obstáculos, em função da indisponibilidade das dimensões das possíveis obstruções na base de dados, o parâmetro $K_{clutter} * F(clutter)$ é anulado e a perda por difração é avaliada em conjunto com a topografia do relevo envolvido.

Finalmente, o termo $K_{hill,LOS}$ é, também anulado, pois refere-se somente à regiões com elevações que não obstruem a linha de visada entre transmissor e receptor, corrigindo possíveis desvios de relevo no perfil dos enlaces que, no caso deste trabalho, não são aplicáveis devido às condições de existência de obstruções presentes nos percursos do sinal propagado.

Desta forma, o modelo de propagação ajustado, apresenta-se formulado na expressão (58), aplicando-se todas as considerações e definições descritas.

$$\begin{aligned}
 P_R = P_{Tx} - & (-18,5 + 44,9 \\
 & * \log(\text{distância } T_x \text{ e } R_x) \\
 & + 5,83 * \log(\text{altura fixa antena } T_x) + 1 \\
 & * (\text{perda por difração de Deygout}) - 6,55 \\
 & * \log(\text{distância } T_x \text{ e } R_x) * \log(\text{altura fixa antena } T_x)) \quad (58)
 \end{aligned}$$

A TABELA 3, apresenta o detalhamento dos coeficientes e parâmetros ajustados para o modelo SPM, considerando a condição original padrão e a situação definitiva do modelamento, cujos valores obtidos no ajuste final aparecem em destaque. Também é possível observar o detalhamento da sintonia automática do modelo SPM, para a situação genérica e para as situações das curvas isoladas, visando ilustrar as variações dos coeficientes, específicas e relativas aos ambientes percorridos.

TABELA 3 DETALHAMENTO DOS COEFICIENTES E PARÂMETROS DO AJUSTE PARA O MODELO SPM

Parâmetros		Valores dos Coeficientes por Rotas									Valores dos Coeficientes Padrão e Ajustados		
		cel03	cel04	cel06	phs24	phs25	phs28	phs30	phs31	phs35	Padrão	Ajuste Automático	Ajuste Final
Próximo ao Tx	K1 (<i>los</i>)	-40	-40	42,08	0	29,65	0	35,77	0	0	17,4	0	-18,5
	K2 (<i>los</i>)	45	45	20	57,8	48,76	41,16	33,06	41,91	41,2	44,9	56,31	44,9
	K1 (<i>nlos</i>)	-40	-40	0	0	20,59	38,52	0	0	0	17,4	4,37	-18,5
	K2 (<i>nlos</i>)	45	45	38,24	59,34	51,42	29,88	42,89	40,2	41,75	44,9	54,85	44,9
Distante do Tx	K1 (<i>los</i>)	-40	-40	42,08	0	29,65	0	35,77	0	0	17,4	0	-18,5
	K2 (<i>los</i>)	45	45	20	57,8	48,76	41,16	33,06	41,91	41,2	44,9	56,31	44,9
	K1 (<i>nlos</i>)	-40	-40	0	0	20,59	38,52	0	0	0	17,4	4,37	-18,5
	K2 (<i>nlos</i>)	45	45	38,24	59,34	51,42	29,88	42,89	40,2	41,75	44,9	54,85	44,9
Altura Efetiva	K3 (Tx)	0	0	-20	-20	-20	-20	-4,93	-20	-20	5,83	-20	5,83
Difração	Método	<i>Deygout</i>	<i>Deygout</i>	<i>Epstein</i>	<i>Epstein</i>	<i>Deygout</i>	<i>Deygout</i>	<i>Deygout</i>	<i>Deygout</i>	<i>Deygout</i>	<i>Deygout</i>	<i>Epstein</i>	<i>Deygout</i>
	K4	1	1	0,91	0,24	0,1	0,26	0,02	0,38	0,31	0	0,43	1
Outros	K5	-3	-5	0	-10	-7,75	0	-4,71	0	0	-6,55	-10	-6,55
	K6 (Rx)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	K7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	K (morfologia)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

FONTE: O AUTOR (2016)

Também é possível observar, na mesma TABELA 3, a discriminação dos parâmetros K_1 e K_2 que podem ser alterados em função de possíveis condições próximas ou distantes das estações transmissoras, a partir de uma determinada distância escolhida. Além disso, os referidos parâmetros permitem discretizar a ocorrência de linha de visada obstruída (*non line of sight - nlos*) ou a linha de visada sem obstrução (*line of sight - los*), nas situações em que estas características influenciam na predição. Neste trabalho, estas condições excepcionais não tiveram efeito, como pode ser notado pela repetição dos valores parametrizados.

Adota-se, ainda, a descrição e nomenclatura dos parâmetros e demais características técnicas aplicáveis, no formato original presente na interface gráfica de usuário da ferramenta.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Para o atingimento dos propósitos deste Capítulo, foram implementados e descritos, dois ambientes de simulação de coleta de dados de medições, visando parametrizar e ajustar o modelo de propagação *Atoll®* SPM, incluindo a montagem do sistema de recepção móvel, que permitiu a obtenção da coleção de níveis de sinais de RF, utilizada no procedimento de resolução e solução empreendida.

Os ambientes de simulação foram determinados, considerando as principais características representativas de relevo e ocupação de solo, associadas aos locais e espaços urbanos, suburbanos e rurais, que apresentam condições específicas para a propagação das ondas eletromagnéticas de rádio e, contribuem ou afetam, de maneira substancial, os fenômenos de desvanecimento pertinentes.

A formatação final do modelo ajustado SPM, obtido através da análise e comparação das curvas de medição e simulação, utilizando uma técnica de regressão não linear, foi representada como expressão matemática e, adicionalmente, discriminada, apresentando os coeficientes e parâmetros em tabela comparativa, demonstrando, inclusive, valores encontrados nas predições isoladas das rotas estabelecidas, na predição padrão do modelo SPM e na predição intermediária genérica aplicada.

5 TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo valida o procedimento de ajuste do modelo de propagação SPM e os conceitos da metodologia empregada neste trabalho, descrevendo as simulações realizadas com a nova configuração proposta, através das comparações gráficas ilustradas para cada rota percorrida pela estação móvel.

A aproximação qualitativa e quantitativa entre o modelo ajustado proposto e a coleção de dados obtidos nas campanhas de medição, podem ser observados, respectivamente, pela comparação gráfica entre as curvas de regressão e os cálculos estatísticos aplicados na análise de dispersão dos espaços amostrais considerados.

Por fim, visando demonstrar a funcionalidade e operacionalidade do modelamento concluído, são apresentados os diagramas de predição para as duas estações de transmissão utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa, estabelecendo as áreas de cobertura, ilustrando o estudo de propagação utilizando a configuração ajustada para o modelo SPM.

5.1 PLOTAGEM E ESTATÍSTICA DAS CURVAS DE SIMULAÇÃO

Para a análise gráfica e comparativa das predições de cobertura, adotou-se o agrupamento determinado pela ocupação de solo característica das regiões percorridas pelo sistema de medição, em relação a cada uma das duas estações de transmissão, instaladas nas Subestações e denominadas Pinheiros (phs) e Cascavel (cel). A identificação das rotas, então, inclui o acrônimo definido para cada estação e o respectivo número indicativo do sequenciamento aplicado.

A plotagem foi obtida com auxílio da ferramenta computacional *MatLab*®, gerando os gráficos de nível de sinal recebido pela estação móvel em função da distância ou afastamento da estação transmissora, cujos pontos foram exportados, no formato adequado, a partir dos arquivos gravados e compilados, oriundos das campanhas de medição detalhados anteriormente.

A necessária manipulação dos pontos de plotagem foi, preliminarmente, tratada na ferramenta computacional *Atoll*®, passando por uma formatação intermediária utilizando o programa *MS Excel*®, de maneira a inserir na referida

ferramenta *MatLab®*, o conjunto de medições e simulações concatenados e coerentes com a metodologia utilizada.

5.1.1 Rotas percorridas em áreas urbanas

As plotagens das curvas de medição e simulação, referentes às rotas urbanas, são mostradas nas FIGURAS 37, 38 e 39, as quais apresentam, ainda, as curvas de medição sem regressão, que correspondem aos sinais coletados ponto a ponto em campo, visando proporcionar ou estabelecer uma referência visual para as curvas de regressão.

A primeira observação, como análise qualitativa, é ilustrada pela aparente regularidade da concavidade das curvas de regressão, o que expressa o decaimento regular do sinal de RF para a simulação, muito próximo ao sinal medido.

Este comportamento pode ser avaliado quantitativamente através da medida de dispersão estatística, dada pelo coeficiente de correlação de Pearson, o qual avalia a similaridade no comportamento da modelagem das curvas ou a resposta da associação linear entre as variáveis pertinentes, (COHEN et al., 2003).

Os coeficientes de correlação, normalmente (em geral), variam dentro do intervalo numérico entre -1,00 e +1,00, indicando uma relação entre estas variáveis aleatórias contínuas medidas e simuladas que, conseqüentemente, proporcionam o estabelecimento de duas grandes propriedades denominadas força e direção. Quanto à força, uma correlação maior ou igual a 0,60 é considerada forte e, quanto à direção, como é positiva determina a tendência de relação proporcional destas variáveis (APPOLINARIO, 2012).

Matematicamente, de acordo com Stevenson (2004), o coeficiente de correlação de Pearson r pode ser expresso pela equação (59).

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})/s_x][(y_i - \bar{y})/s_y]}{(n - 1)} \quad (59)$$

onde x e y são todas as variáveis dos conjuntos de medição e simulação, s é o desvio padrão dos respectivos conjuntos e n é o número de variáveis de cada conjunto.

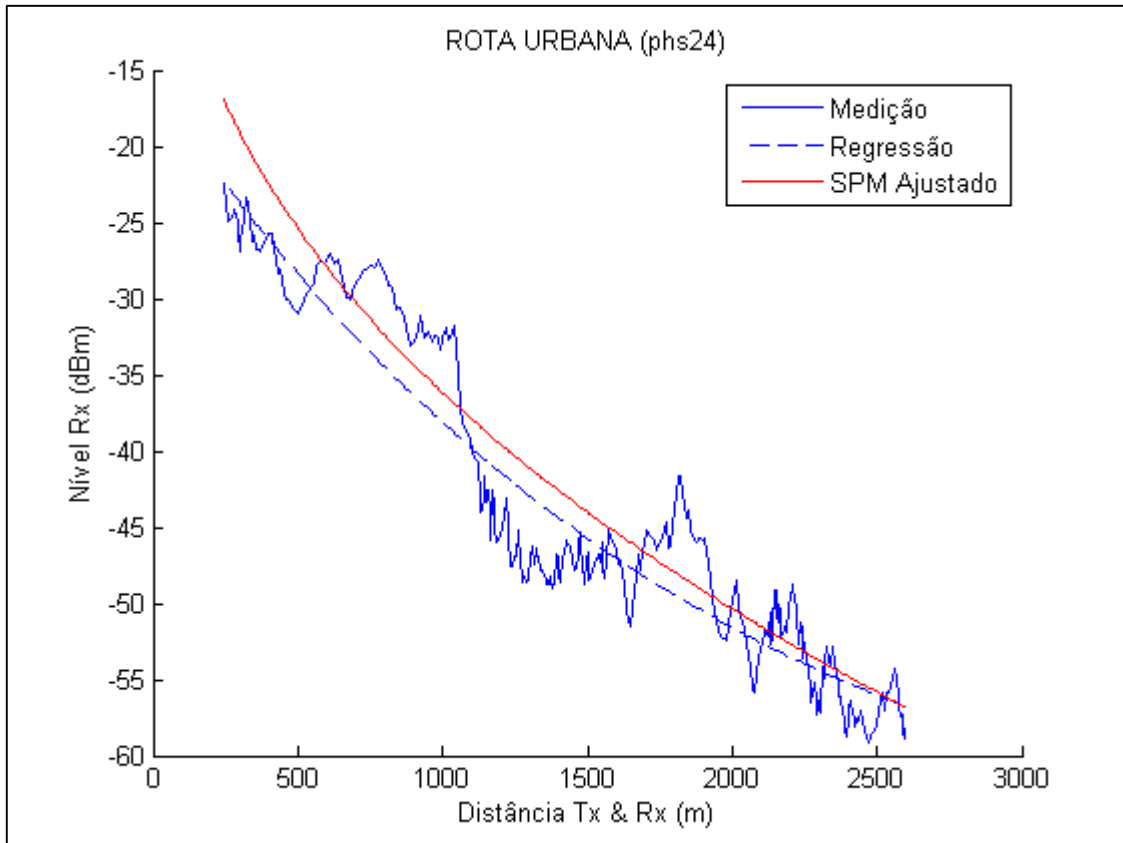


FIGURA 37 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA URBANA phs24
 FONTE: O AUTOR (2016)

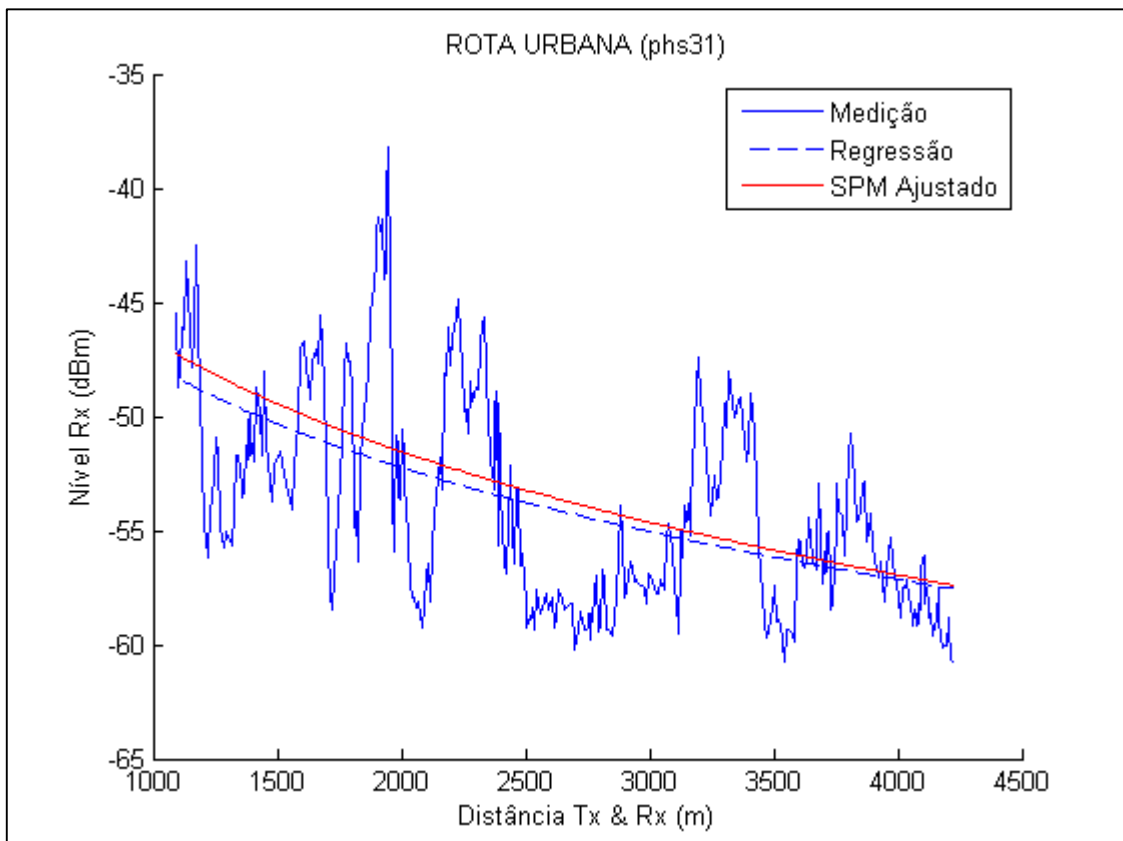


FIGURA 38 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA URBANA phs31
 FONTE: O AUTOR (2016)

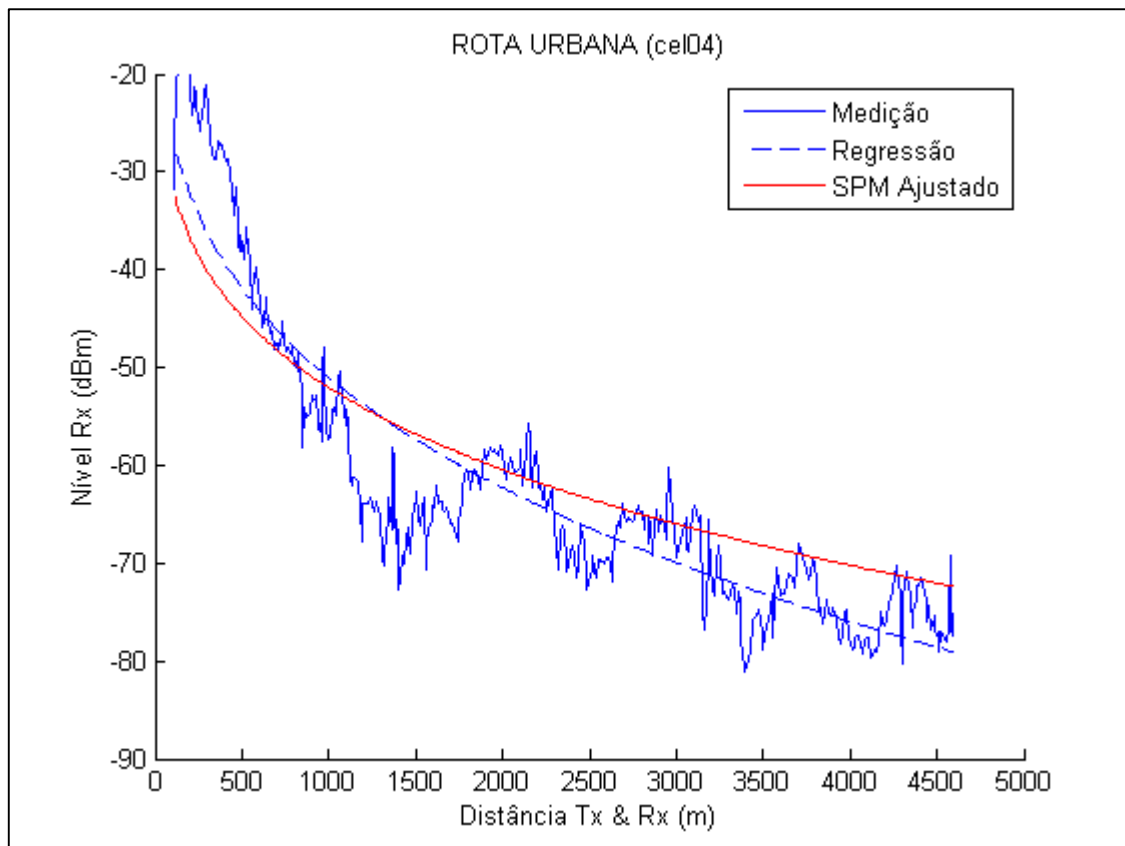


FIGURA 39 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA URBANA cel04
 FONTE: O AUTOR (2016)

Já para a determinação quantitativa do afastamento entre as curvas de regressão, que definem uma atenuação ou ganho ao longo da rota, relativamente aos sinais medidos, utiliza-se a avaliação do erro médio, associado às medidas de desvio padrão e erro médio quadrático (SHCHERBAKOV et al., 2013).

Os referidos afastamentos, neste caso para as curvas de propagação em área urbana, estão compreendidos entre 0,52 a 1,64, que correspondem a valores em decibéis positivos, acima da curva de regressão dos sinais medidos. Deste modo, resumem-se na TABELA 4, as estimativas e os cálculos estatísticos para as rotas urbanas analisadas, por transmissor e globais, demonstrando a eficácia do ajuste do modelo SPM, nas condições estabelecidas de propagação, aliada aos espaços ou áreas percorridas pela estação móvel.

TABELA 4 ESTATÍSTICAS DAS ROTAS URBANAS

Estatística	Local	Nº de Pontos	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	RMSE (dB)	Correlação
Global	—	1.211	1,12	6,81	6,9	0,86
Por Transmissor	CEL_1	478	1,64	8,47	8,63	0,84
	PHS_1	733	0,79	5,43	5,48	0,79
Por Rota de Medição	cel04	478	1,64	8,47	8,63	0,84
	phs24	342	1,09	6,59	6,68	0,92
	phs31	391	0,52	4,14	4,17	0,6

FONTE: ADAPTADO DE ATOLL® (2016)

5.1.2 Rotas percorridas em áreas suburbanas

As plotagens das curvas de medição e simulação, referentes às rotas suburbanas, são mostradas nas FIGURAS 40, 41 e 42, as quais apresentam, também, além das curvas de medição real, as respectivas curvas de regressão, que fornecem os subsídios para a análise qualitativa aplicada, relativa ao decaimento do sinal de RF coletado e simulado.

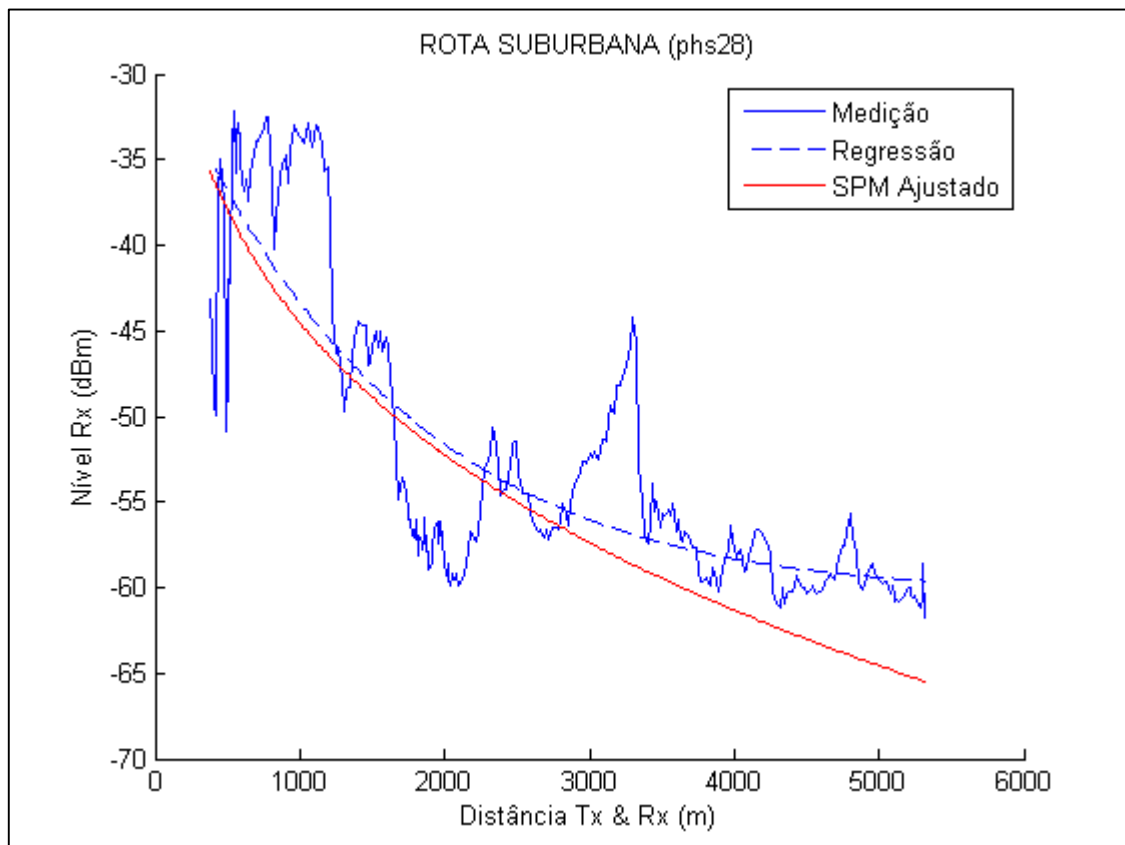


FIGURA 40 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA SUBURBANA phs28
FONTE: O AUTOR (2016)

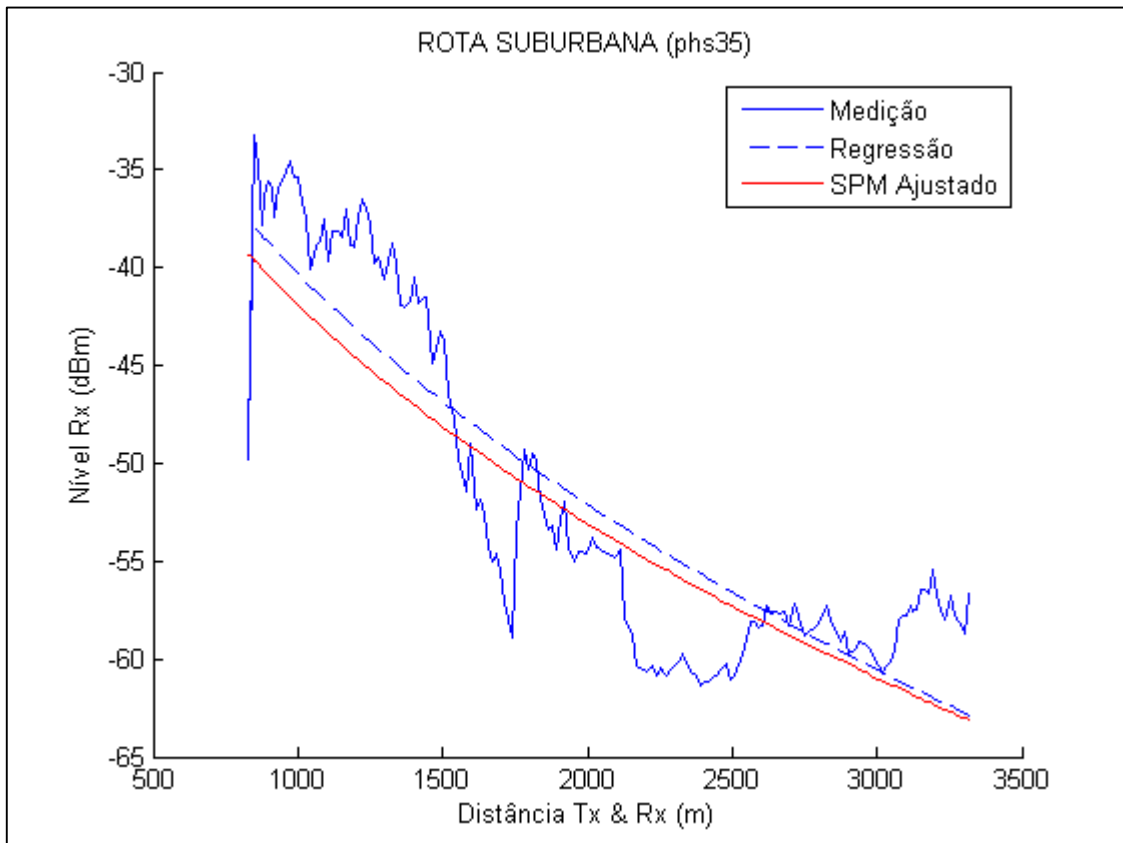


FIGURA 41 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA SUBURBANA phs35
 FONTE: O AUTOR (2016)

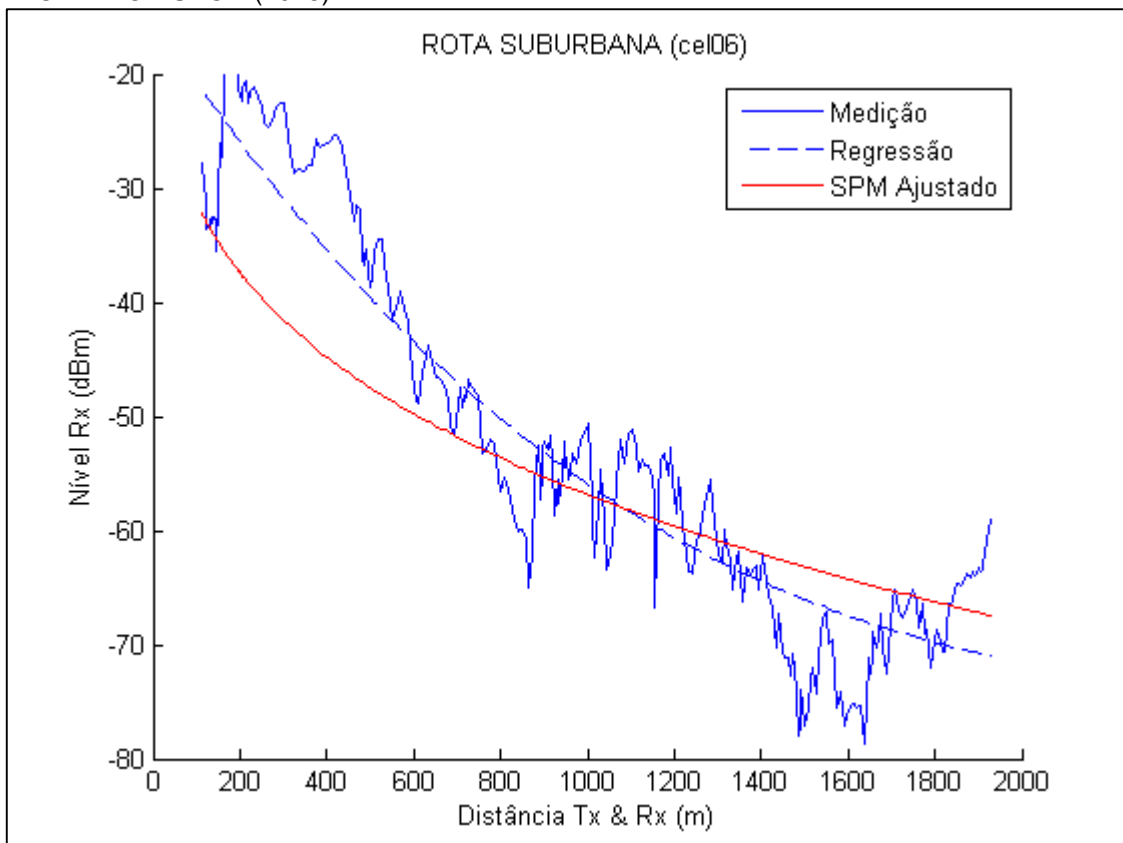


FIGURA 42 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA SUBURBANA cel06
 FONTE: O AUTOR (2016)

A avaliação quantitativa deste decaimento, para as regiões suburbanas, aponta uma correlação bastante forte, uma vez que os coeficientes de correlação estão incluídos no intervalo de 0,8 a 0,89, demonstrando a relação de similaridade entre as curvas de medição e predição. Já a análise quantitativa para o afastamento entre as curvas, revela que existe um equilíbrio entre ganhos e perdas no sinal simulado e, descreve, uma boa aproximação no intervalo de -2,18 a 1,03 decibéis relativos.

Na TABELA 5, podem ser observados os cálculos estatísticos relativos ao ambiente em avaliação e análise, definido como suburbano, os quais evidenciam a eficácia do ajuste do modelo SPM, conforme os resultados encontrados na simulação, no cenário de avaliação executado.

Nota-se, ainda, que a inclinação entre as curvas de regressão na FIGURA 42, referentes à rota cel06, embora apresente-se, em ângulo, ligeiramente diferente, demonstrado pelo desvio padrão obtido, o modelamento não é afetado, como mostram o erro médio, o desvio médio e o coeficiente de correlação finais.

TABELA 5 ESTATÍSTICAS DAS ROTAS SUBURBANAS

Estatística	Local	Nº de Pontos	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	RMSE (dB)	Correlação
Global	—	785	-0,74	8,06	8,09	0,75
Por Transmissor	CEL_1	295	1,03	10,98	11,02	0,83
	PHS_1	490	-1,8	5,33	5,63	0,83
Por Rota de Medição	cel06	295	1,03	10,98	11,02	0,83
	phs28	329	-2,18	5,81	6,21	0,8
	phs35	161	-1,03	4,08	4,21	0,89

FONTE: ADAPTADO DE ATOLL® (2016)

5.1.3 Rotas percorridas em áreas rurais

As curvas relativas às áreas rurais, compreendem, por sua natureza, maiores deslocamentos da estação móvel e, portanto, uma coleção de dados de medição mais extensa que determina um espaço amostral maior sem, no entanto, apresentar variações de ocupação de solo significativas.

Desta forma, as classes de obstrução presentes não interferem, estatisticamente, com maior ou menor influência na simulação, embora as perdas

com difração, incluem na predição, além das variações de relevo, as atenuações sofridas pela onda eletromagnética nos obstáculos, ao longo dos percursos executados.

Nestas circunstâncias, as plotagens das curvas de medição e simulação, ilustradas nas FIGURAS 43, 44 e 45, evidenciam a efetividade no modelamento desenvolvido, uma vez que, pela apreciação gráfica qualitativa, o decaimento sofrido pelo sinal de RF nas predições realizadas, aproxima-se com boa similaridade ao sinal médio, expresso pelas respectivas curvas de regressão.

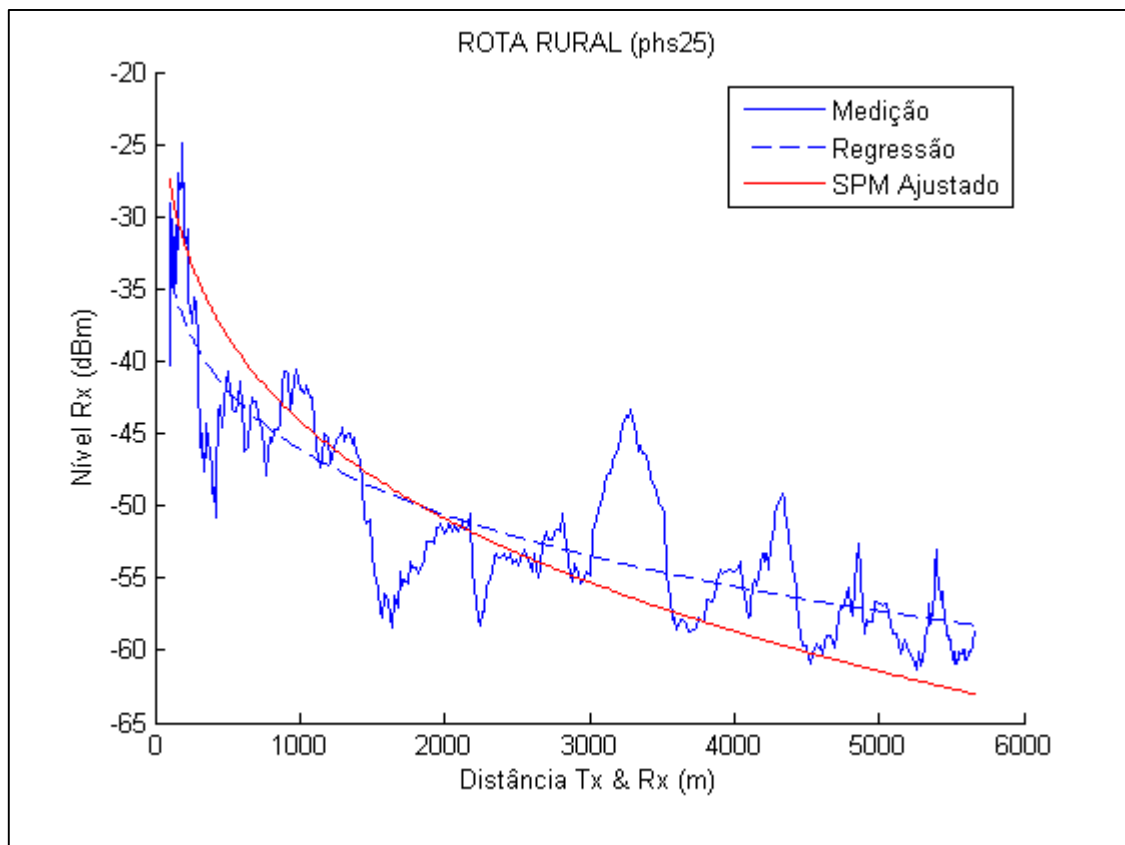


FIGURA 43 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA RURAL phs25
 FONTE: O AUTOR (2016)

O desvanecimento simulado do sinal, nas regiões rurais, apresenta uma correlação bastante forte, quantitativamente calculado pelo intervalo entre 0,82 e 0,9, comprovando a aproximação com os sinais obtidos na medição desta campanha.

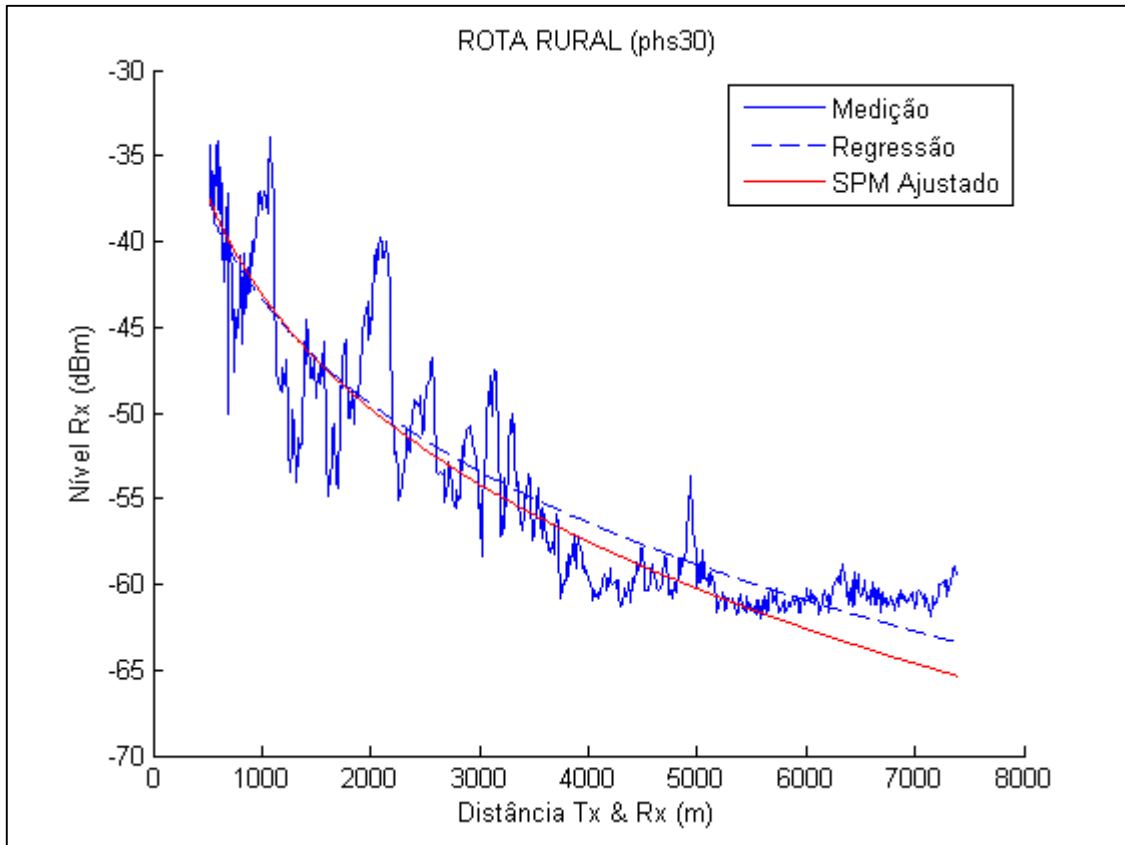


FIGURA 44 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA RURAL phs30
 FONTE: O AUTOR (2016)

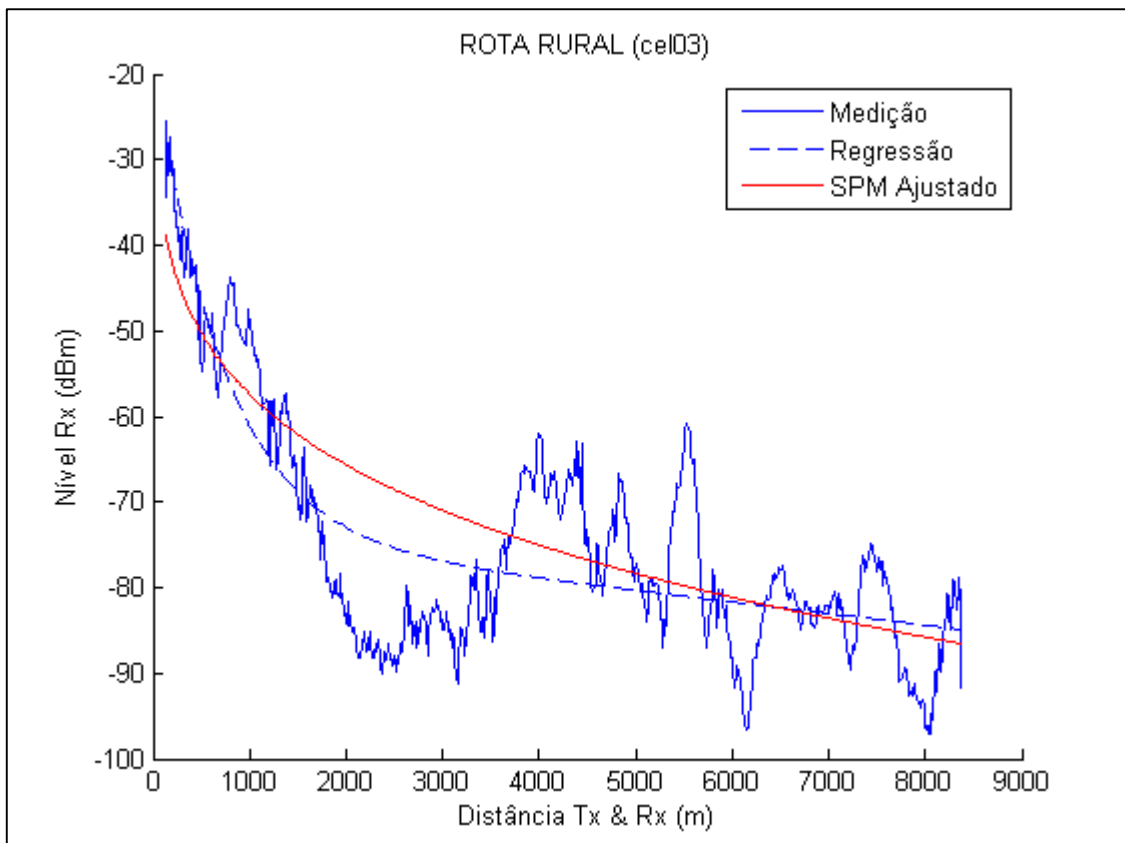


FIGURA 45 - CURVAS DE PREDIÇÃO E DE MEDIÇÃO DA ROTA RURAL cel03
 FONTE: O AUTOR (2016)

O afastamento das curvas, apresenta uma variação entre -3,7 a 1,47 decibéis, determinado pelo erro médio calculado. Ainda que a amplitude deste intervalo seja considerada elevada, esta condição ocorre devido aos cruzamentos entre as curvas de regressão, sem contribuir negativamente com o modelamento alcançado.

Resumem-se, então, na TABELA 6, as estatísticas destas rotas rurais experimentadas, a qual proporciona a visão condensada dos fatores que demonstram a validade do modelamento competente.

TABELA 6 ESTATÍSTICAS DAS ROTAS RURAIS

Estatística	Local	Nº de Pontos	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	RMSE (dB)	Correlação
Global	—	1.925	-0,92	7,13	7,18	0,9
Por Transmissor	CEL_1	822	1,47	6,9	7,05	0,9
	PHS_1	1.103	-2,71	6,76	7,28	0,84
Por Rota de Medição	cel03	822	1,47	6,9	7,05	0,9
	phs25	388	-0,89	5,43	5,5	0,86
	phs30	715	3,7	7,19	8,09	0,82

FONTE: ADAPTADO DE ATOLL® (2016)

5.2 VALIDAÇÃO FINAL E ESTATÍSTICA GERAL

A consolidação do método de ajuste e validação do modelo de propagação SPM, encontram-se discriminados na TABELA 7 que, de acordo com as estatísticas globais apresentadas na linha em destaque, demonstram o resultado alcançado na calibração deste modelo, corroborado através do cálculo do erro médio obtido em -0,25 dB, associado a um coeficiente de correlação de 0,87, de amplitude alta, comprovando a aproximação dos valores preditos ou simulados com os valores reais coletados em campo. Destacam-se, ainda, os valores calculados encontrados para o desvio padrão e erro médio quadrático, os quais determinam a tendência central média dos dados comparados e, conseqüentemente, apontam para uma dispersão relativamente pequena.

Neste ponto, é oportuno mencionar e ilustrar a título de exemplificação, o descarte da rota cel02, a qual apresenta, conforme a figura do ANEXO F, um comportamento incoerente para uso no desenvolvimento desta metodologia e em desacordo com os critérios de filtragem apontados no Item 4.2.2 deste trabalho.

TABELA 7 ESTATÍSTICAS GLOBAIS DAS ROTAS

Estatística	Local	Nº de Pontos	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	RMSE (dB)	Correlação
Global	—	3.921	-0,25	7,29	7,29	0,87
Por Transmissor	CEL_1	1.595	1,44	8,27	8,39	0,89
	PHS_1	2.326	-1,42	6,27	6,43	0,79
Por Rota de Medição	cel03	822	1,64	6,9	7,05	0,9
	cel04	478	1,03	8,47	8,63	0,84
	cel06	295	1,09	10,98	11,02	0,83
	phs24	342	-0,89	6,59	6,68	0,92
	phs25	388	-2,18	5,43	5,5	0,86
	phs28	329	-3,7	5,81	6,21	0,8
	phs30	715	0,52	7,19	8,09	0,82
	phs31	391	-1,03	4,14	4,17	0,6
	phs35	161	-3,7	4,08	4,21	0,89

FONTES: ADAPTADO DE ATOLL® (2016)

5.3 DIAGRAMAS DE PREDIÇÃO DOS SISTEMAS PONTO ÁREA

Os diagramas de predição de cobertura mostram, graficamente, os resultados definidos pelas configurações e condições de simulação, utilizando um conjunto de instruções aplicadas à ferramenta computacional *Atoll*®, as quais proporcionam a flexibilidade de selecionar quais atributos devem ser apresentados, bem como a maneira que aparecem representados em tela.

Após a determinação dos parâmetros de cálculo, tais como modelo de propagação, tecnologia, tipo de cobertura, dentre outros, o programa calcula as perdas de propagação nas trajetórias entre o transmissor e o receptor, gerando uma matriz de perdas por ponto, na área de interesse, que depende das resoluções dos mapas de topografia e morfologia disponíveis na base de dados geográfica, adequada para a região do estudo e compatível com o formato apropriado.

As FIGURAS 46 e 47, apresentam, os diagramas de cobertura para os níveis de sinal de RF, calculados a partir das duas estações de transmissão implementadas na coleta de dados desta pesquisa, cujas infraestruturas foram detalhadas anteriormente. A respectiva legenda ilustra os mapas de calor gerados pelas predições, demonstrando a efetividade do modelamento, nas análises de cobertura para os sistemas ponto área pertinentes.

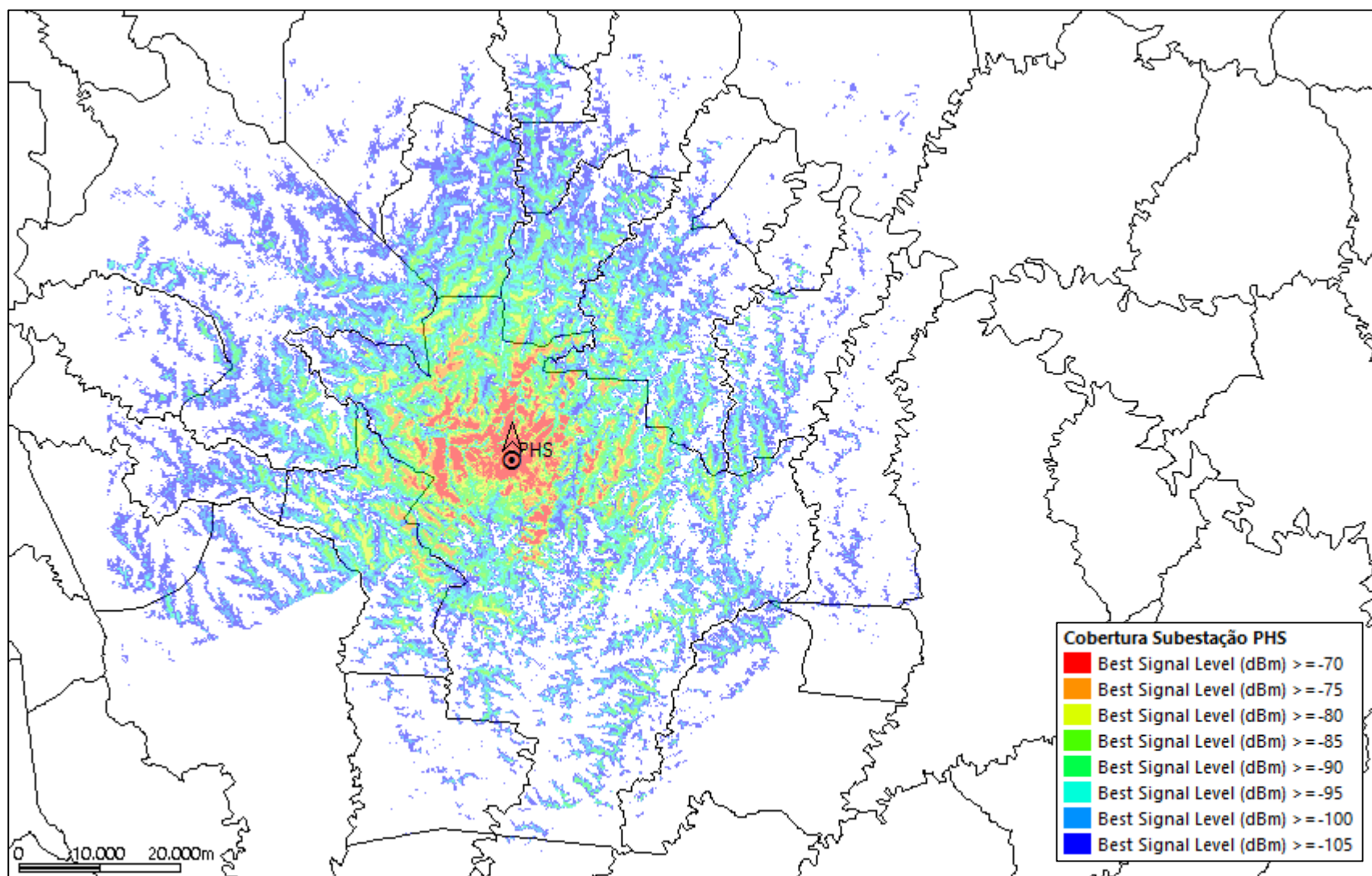


FIGURA 46 - DIAGRAMA DE COBERTURA PONTO ÁREA PARA A SUBESTAÇÃO PINHEIROS
FONTE: ADAPTADO DE ATOLL® (2016)

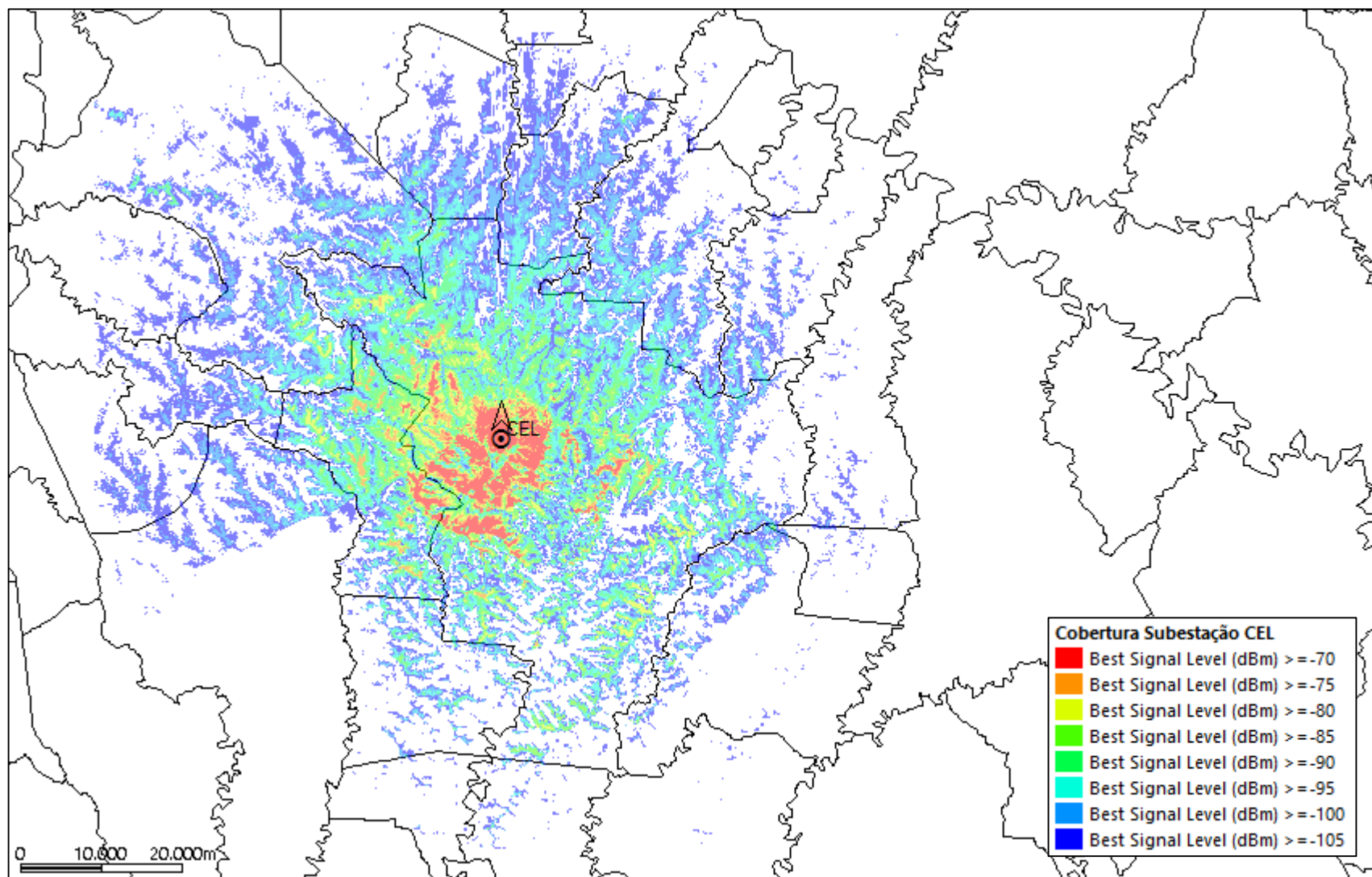


FIGURA 47 - DIAGRAMA DE COBERTURA PONTO ÁREA PARA A SUBESTAÇÃO CASCAVEL
FONTE: ADAPTADO DE ATOLL® (2016)

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo valida a metodologia apresentada e descrita, através das plotagens das curvas de medição e simulação, obtidas pelo conjunto de dados de sinais coletados em campo e os estudos de predição conduzidos com o modelo de propagação SPM ajustado.

Os gráficos foram agregados em função da ocupação de solo característica e presente nos ambientes urbanos, suburbanos e rurais, estratificando as análises qualitativas e quantitativas, em cada conjunto de curvas.

O decaimento e a inclinação dos sinais de RF medidos, foram avaliados pelo coeficiente de correlação de Pearson, entre as curvas de regressão, sendo que o afastamento entre elas, ou atenuação sofrida, foi apreciado através dos cálculos de erro médio e erro médio quadrático.

A validação final ocorreu com a consolidação das estatísticas globais, incluindo a medida de desvio padrão de dispersão dos dados. Desta forma, foram satisfeitos os objetivos propostos pela metodologia aplicada e construída, proporcionando a aproximação teórico-prática dos resultados alcançados.

A título de demonstração e comprovação, foram traçados graficamente, os diagramas de cobertura ponto área para cada infraestrutura utilizada, possibilitando a visão discriminada das fronteiras de variação de potência de sinal, de acordo com a resolução propiciada pelos mapas de topografia e morfologia disponíveis.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os requisitos de tecnologias de informação e comunicação demandados por empresas concessionárias de serviços públicos, em especial aquelas denominadas *utilities*, fornecedoras de água, gás, energia, entre outros insumos, possuem exigências de disponibilidade e confiabilidade, de forma a proporcionar rápidas respostas de atuação, principalmente em situações contingenciais e emergenciais.

Consequentemente a utilização de mecanismos, processos e ferramentas operacionais, baseadas em tecnologias de telecomunicações, são de fundamental importância nas mobilizações das forças de trabalho em campo e em centrais de operação, tais como comunicações móveis, que empregam infraestrutura ponto área, apoiadas no uso de transmissões de voz e dados, em tempo real e em rádio frequências compreendidas pelo espectro VHF.

Este trabalho apresenta uma importante contribuição na parametrização e no ajuste do modelo SPM, por meio de uma metodologia capaz de produzir a predição de cobertura e propagação de RF, em sistemas de comunicação móvel críticos, elaborando um método eficiente de diagnóstico preliminar no planejamento e projeto das implementações de redes com serviços limitados privados, cujo mecanismo de simulação e avaliação, proporcionado através da utilização de uma ferramenta computacional comercial, ora calibrada, alcançou o desenvolvimento do ajuste do modelo de propagação mais adequado e eficaz, aplicáveis aos ambientes característicos onde estão presentes ou planejam-se implementar estas redes de comunicação.

A definição da técnica do ajuste do modelo de propagação SPM, foi realizada após extensa pesquisa e levantamento bibliográfico, nos quais foi possível constatar a potencialidade do *software Atoll®*, que contempla os principais métodos e estudos de propagação das ondas eletromagnéticas de rádio, aliado à disponibilidade de alteração paramétrica, baseada em campanhas de medição em campo.

A validação dos conceitos e desenvolvimento conduzidos nesta pesquisa, adotou a coleta de um conjunto de medições de sinais em dois sistemas de transmissão e um de recepção, implementados e compartilhados dentro de uma infraestrutura proprietária de concessionária de energia elétrica local.

Este conjunto de medições foi empregado para configurar os parâmetros do modelo desenvolvido, comparando-se curvas de desvanecimento e, ainda, serviu para comprovar a eficácia dos resultados obtidos, aplicando-se técnicas estatísticas de avaliação de dispersão e correlação de dados.

Recomenda-se, então, em trabalhos futuros, a utilização da metodologia empregada, adequando-se o sistema de medição, procurando automatizar a coleta e armazenamento dos dados de medição, uma vez que, no método empregado pelo arquivo de *script* elaborado, em cada rota, necessitou-se de nova inicialização e de uma configuração preliminar.

Sugere-se, também, que haja disponibilidade de mapas digitais de morfologia, na ferramenta computacional, com as informações de alturas de obstáculos exatas em sua base de dados, para avaliação das perdas de percurso por difração, reflexão e espalhamento, calcadas em ocupações de solo recentes.

Adicionalmente, a empregabilidade do modelo de propagação desenvolvido, pode ser adotada por qualquer ferramenta, em função da aplicação específica para estudos de cobertura em frequências da faixa VHF do espectro eletromagnético, considerando as áreas urbanas, suburbanas e rurais características do relevo e geografia brasileiros.

Finalmente, no intuito de solidificar e tornar os resultados mais robustos, sugere-se a construção ou desenvolvimento de um modelo empírico ou estatístico, adaptado às áreas urbanas densas, utilizando esta metodologia e as técnicas de traçado de raios, já disponíveis em ferramentas comerciais com versões mais recentes.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES - ANATEL. Dados, Telefonia Móvel. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/dados/index.php/component/content/article?id=283>>. .
- APPOLINARIO, F. **Metodologia da Ciência**. 2012.
- BANSAL, R. **Handbook of Engineering Electromagnetics**. 2004.
- BARCLAY, L. **Propagation of Radiowaves**. 2013.
- BRASIL. Portaria nº 2, de 8 de fevereiro de 2008. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Gabinete de Segurança Institucional, Brasília, DF, 11 fev. 2008**, , n. Seção 1, p. 1. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&data=11/02/2008>>. .
- BRASIL. Resolução nº 617, de 19 de junho de 2013. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Gabinete de Segurança Institucional, Brasília, DF, 21 Jun. 2013**, p. 57–59. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/06/2013&jornal=1&pagina=57&totalArquivos=168>>. .
- BRASIL. Resolução nº 568, de 15 de junho de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 jun. 2011**, , n. Seção 1, p. 38–43. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=28/06/2011&jornal=1&pagina=38&totalArquivos=84>>. .
- CHATTERJEE, S.; HADI, A. S. **Regression Analysis by Example**. 2006.
- COHEN, J.; COHEN, P.; WEST, S. G.; LEONA S. AIKEN. **Applied Multiple Regression Correlation Analysis for the Behavioral Sciences**. 2003.
- COST 231. **Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems - Final Report**. 1999.
- DEYGOUT, J. Multiple Knife-Edge Diffraction of Microwaves. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, , n. 4, p. 480–489, 1966.
- DEYGOUT, J. Correction factor for multiple knife-edge diffraction. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 39, n. 8, p. 1256–1258, 1991.
- EGLI, J. J. Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain. **Proceedings of the IRE**, v. 45, n. 10, 1957.

EPSTEIN, J.; PETERSON, D. W. An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MC. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, , n. September, p. 281–285, 1953.

ERCEG, V.; GREENSTEIN, L. J.; TJANDRA, S. Y.; et al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 17, n. 7, p. 1205–1211, 1999.

ERCEG, V.; HARI, K. V. S.; SMITH, M. S.; BAUM, D. S. **Channel Models for Fixed Wireless Applications**. 2001.

FONTAN, F. P.; ESPINEIRA, P. M. **Modeling the Wireless Propagation Channel**. 2008.

FORSK SARL. Measurements and Model Calibration Guide. , 2010. Paris: Forsk Incorporation.

FORSK SARL. **Administrator Manual**. AT330_AM_E ed. 2015a.

FORSK SARL. **Atoll User Manual Radio**. AT330_UMR_ ed. 2015b.

FORSK SARL. **Atoll Technical Reference Guide**. AT330_TRR ed. 2015c.

FORSK SARL. **Model Calibration Guide**. AT330_MCG_ ed. 2015d.

FRIIS, H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. **Proceedings of the IRE and Waves and Electrons May**, , n. 1, p. 254–256, 1946.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. 2005.

HAR, D.; XU, C.; XIA, H. H. Propagation modelling for wireless local loop channel. **International Journal of Communication Systems**, v. 13, n. 3, p. 231–241, 2000.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 29, n. 3, 1980.

HERTZ, H. **Electric Waves**. 1893.

HUFFORD, G. A; LONGLEY, A G.; KISSICK, W. A. A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode. **Design**, , n. April, p. 126, 1982. Disponível em: <<http://www.its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/82-100/>>. .

ITU-R. RECOMMENDATION P.1546-5: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. **Electronic Publication**, v. P-Series, 2013. Disponível em: <<http://www.itu.int/pub/R-REC/en>>. .

ITU-R. RECOMMENDATION P.1812: A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands. **Electronic Publication**, v. P-series, 2015a. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1812/en>>. .

ITU-R. RECOMMENDATION P.1406-2 Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands. **Electronic Publication**, v. P-series, 2015b. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1406-2-201507-l/en>>. .

JAKES, W. **Microwave Mobile Communications**. 1974.

KITAO, K.; ICHITSUBO, S. Path Loss Prediction Formula for Urban and Suburban Areas for 4G Systems. **2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference**, v. 6, n. c, p. 2911–2915, 2006.

LEE, W. C. Y. **Mobile Communications Design Fundamentals**. 1993.

LEE, W. C. Y. **Mobile Communications Engineering**. 1998.

LIOTINE, M. **Mission-critical Network Planning**. Artech House, 2003.

LONGLEY, A. G.; RICE, P. L. **Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain: A Computer Method**. 1968.

MATHWORKS. **MatLab Curve Fitting ToolBox User's Guide**. 2015b ed. 2015.

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. 1873.

MILLINGTON, G.; HEWITT, R.; IMMIRZI, F. S. Double knife-edge diffraction in field-strength predictions. **Proceedings of the IEE-Part C: Monographs**, v. 109, n. 507, p. 419–429, 1962.

OKUMURA, Y.; OHMORI, E.; KAWANO, T.; FUKUDA, K. Field Strength Variability in VHF and UHF Land Mobile Service. **Rev. Elec. Commun. Lab**, v. 16, 1968.

PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. 2000.

PÄTZOLD, M. **Mobile Radio Channels**. 2012.

RAPPA, M. A. The utility business model and the future of computing services. **IBM Systems Journal**, v. 43, n. 1, p. 32–42, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11576-009-0192-8>><<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5386779>>. .

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communication - Principles & Practice**. Second ed. Prentice Hall, 2002.

ROCHE, G. D. LA. **LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks**. 2012.

RODRIGUEZ, J. **Fundamentals of 5G Mobile Networks**. Wiley, 2015.

SAKAGAMI, S.; KUBOI, K. Mobile propagation loss prediction for arbitrary urban environments. **Electronics and Communications in Japan**, v. 74, n. 10, 1991.

SALOUS, S. **Radio Propagation Measurement and Channel Modelling**. Wiley, 2013.

SANTI, P. **Mobility Models for Next Generation Wireless Networks: Ad Hoc, Vehicular and Mesh Networks (Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems)**. 2012.

SARKAR, K. T.; MAILLOUX, R. J.; OLINER, A. A.; SALAZAR-PALMA, M.; SENGUPTA, D. L. **History of Wireless**. 2006.

SAUNDERS, S.; ARAGÓN-ZAVALA, A. **Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems**. 2007.

SEBER, G. A. F.; J.WILD, C. **Nonlinear Regression**. 2003.

SENARATH, G.; TONG, W.; ZHU, P.; et al. Multi-Hop Relay System Evaluation Method. **IEEE 802.16j-06/013r3**, 2007. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/2/3/556/>>. .

SHARMA, P. K.; SINGH, R. K. Comparative Analysis of Propagation Path loss Models with Field Measured Data. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 6, p. 2008–2013, 2010.

SHCHERBAKOV, M. V.; BREBELS, A.; SHCHERBAKOVA, N. L.; et al. A survey of forecast error measures. **World Applied Sciences Journal**, v. 24, n. 24, p. 171–176, 2013.

SIWIAK, K.; BAHREINI, Y. **Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications**. 3rd ed. Artech House, 2007.

SIZUN, H. **Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications**. 2005.

STEVENSON, W. J. **Estatística Aplicada à Administração**. 2004.

ULABY, F. T.; RAVAIOLI, U. **Fundamentals of Applied Electromagnetics**. 7th ed. Pearson, 2015.

YUN, Z.; ISKANDER, M. F. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling : Principles and Applications. **IEEE in Access**, v. 3, p. 1089–1100, 2015.

ANEXOS

ANEXO A

Frequências nominais das portadoras nas subfaixas de 157,45 MHz a 159,40 MHz e de 162,05 MHz a 164,00 MHz (Tabela C1.A - Resolução ANATEL 568).

CANAL N°	IDA (MHz)	VOLTA(MHz)
473	157,45625	162,05625
474	157,46875	162,06875
475	157,48125	162,08125
476	157,49375	162,09375
477	157,50625	162,10625
478	157,51875	162,11875
479	157,53125	162,13125
480	157,54375	162,14375
481	157,55625	162,15625
482	157,56875	162,16875
483	157,58125	162,18125
484	157,59375	162,19375
485	157,60625	162,20625
486	157,61875	162,21875
487	157,63125	162,23125
488	157,64375	162,24375
489	157,65625	162,25625
490	157,66875	162,26875
491	157,68125	162,28125
492	157,69375	162,29375
493	157,70625	162,30625
494	157,71875	162,31875
495	157,73125	162,33125
496	157,74375	162,34375
497	157,75625	162,35625
498	157,76875	162,36875
499	157,78125	162,38125
500	157,79375	162,39375
501	157,80625	162,40625
502	157,81875	162,41875
503	157,83125	162,43125
504	157,84375	162,44375
505	157,85625	162,45625
506	157,86875	162,46875
507	157,88125	162,48125
508	157,89375	162,49375
509	157,90625	162,50625
510	157,91875	162,51875

511	157,93125	162,53125
512	157,94375	162,54375
513	157,95625	162,55625
514	157,96875	162,56875
515	157,98125	162,58125
516	157,99375	162,59375
517	158,00625	162,60625
518	158,01875	162,61875
519	158,03125	162,63125
520	158,04375	162,64375
521	158,05625	162,65625
522	158,06875	162,66875
523	158,08125	162,68125
524	158,09375	162,69375
525	158,10625	162,70625
526	158,11875	162,71875
527	158,13125	162,73125
528	158,14375	162,74375
529	158,15625	162,75625
530	158,16875	162,76875
531	158,18125	162,78125
532	158,19375	162,79375
533	158,20625	162,80625
534	158,21875	162,81875
535	158,23125	162,83125
536	158,24375	162,84375
537	158,25625	162,85625
538	158,26875	162,86875
539	158,28125	162,88125
540	158,29375	162,89375
541	158,30625	162,90625
542	158,31875	162,91875
543	158,33125	162,93125
544	158,34375	162,94375
545	158,35625	162,95625
546	158,36875	162,96875
547	158,38125	162,98125
548	158,39375	162,99375
549	158,40625	163,00625
550	158,41875	163,01875
551	158,43125	163,03125
552	158,44375	163,04375
553	158,45625	163,05625
554	158,46875	163,06875
555	158,48125	163,08125

556	158,49375	163,09375
557	158,50625	163,10625
558	158,51875	163,11875
559	158,53125	163,13125
560	158,54375	163,14375
561	158,55625	163,15625
562	158,56875	163,16875
563	158,58125	163,18125
564	158,59375	163,19375
565	158,60625	163,20625
566	158,61875	163,21875
567	158,63125	163,23125
568	158,64375	163,24375
569	158,65625	163,25625
570	158,66875	163,26875
571	158,68125	163,28125
572	158,69375	163,29375
573	158,70625	163,30625
574	158,71875	163,31875
575	158,73125	163,33125
576	158,74375	163,34375
577	158,75625	163,35625
578	158,76875	163,36875
579	158,78125	163,38125
580	158,79375	163,39375
581	158,80625	163,40625
582	158,81875	163,41875
583	158,83125	163,43125
584	158,84375	163,44375
585	158,85625	163,45625
586	158,86875	163,46875
587	158,88125	163,48125
588	158,89375	163,49375
589	158,90625	163,50625
590	158,91875	163,51875
591	158,93125	163,53125
592	158,94375	163,54375
593	158,95625	163,55625
594	158,96875	163,56875
595	158,98125	163,58125
596	158,99375	163,59375
597	159,00625	163,60625
598	159,01875	163,61875
599	159,03125	163,63125
600	159,04375	163,64375

601	159,05625	163,65625
602	159,06875	163,66875
603	159,08125	163,68125
604	159,09375	163,69375
605	159,10625	163,70625
606	159,11875	163,71875
607	159,13125	163,73125
608	159,14375	163,74375
609	159,15625	163,75625
610	159,16875	163,76875
611	159,18125	163,78125
612	159,19375	163,79375
613	159,20625	163,80625
614	159,21875	163,81875
615	159,23125	163,83125
616	159,24375	163,84375
617	159,25625	163,85625
618	159,26875	163,86875
619	159,28125	163,88125
620	159,29375	163,89375
621	159,30625	163,90625
622	159,31875	163,91875
623	159,33125	163,93125
624	159,34375	163,94375
625	159,35625	163,95625
626	159,36875	163,96875
627	159,38125	163,98125
628	159,39375	163,99375

ANEXO B

Frequências nominais das portadoras nas subfaixas de 165,60 MHz a 169,20 MHz e de 170,20 MHz a 173,80 MHz (Tabela C2 - Resolução ANATEL 568).

CANAL N°	IDA (MHz)	VOLTA(MHz)
940	165,60625	170,20625
941	165,61875	170,21875
942	165,63125	170,23125
943	165,64375	170,24375
944	165,65625	170,25625
945	165,66875	170,26875
946	165,68125	170,28125
947	165,69375	170,29375
948	165,70625	170,30625
949	165,71875	170,31875
950	165,73125	170,33125
951	165,74375	170,34375
952	165,75625	170,35625
953	165,76875	170,36875
954	165,78125	170,38125
955	165,79375	170,39375
956	165,80625	170,40625
957	165,81875	170,41875
958	165,83125	170,43125
959	165,84375	170,44375
960	165,85625	170,45625
961	165,86875	170,46875
962	165,88125	170,48125
963	165,89375	170,49375
964	165,90625	170,50625
965	165,91875	170,51875
966	165,93125	170,53125
967	165,94375	170,54375
968	165,95625	170,55625
969	165,96875	170,56875
970	165,98125	170,58125
971	165,99375	170,59375
972	166,00625	170,60625
973	166,01875	170,61875
974	166,03125	170,63125
975	166,04375	170,64375
976	166,05625	170,65625
977	166,06875	170,66875

978	166,08125	170,68125
979	166,09375	170,69375
980	166,10625	170,70625
981	166,11875	170,71875
982	166,13125	170,73125
983	166,14375	170,74375
984	166,15625	170,75625
985	166,16875	170,76875
986	166,18125	170,78125
987	166,19375	170,79375
988	166,20625	170,80625
989	166,21875	170,81875
990	166,23125	170,83125
991	166,24375	170,84375
992	166,25625	170,85625
993	166,26875	170,86875
994	166,28125	170,88125
995	166,29375	170,89375
996	166,30625	170,90625
997	166,31875	170,91875
998	166,33125	170,93125
999	166,34375	170,94375
1000	166,35625	170,95625
1001	166,36875	170,96875
1002	166,38125	170,98125
1003	166,39375	170,99375
1004	166,40625	171,00625
1005	166,41875	171,01875
1006	166,43125	171,03125
1007	166,44375	171,04375
1008	166,45625	171,05625
1009	166,46875	171,06875
1010	166,48125	171,08125
1011	166,49375	171,09375
1012	166,50625	171,10625
1013	166,51875	171,11875
1014	166,53125	171,13125
1015	166,54375	171,14375
1016	166,55625	171,15625
1017	166,56875	171,16875
1018	166,58125	171,18125
1019	166,59375	171,19375
1020	166,60625	171,20625
1021	166,61875	171,21875
1022	166,63125	171,23125

1023	166,64375	171,24375
1024	166,65625	171,25625
1025	166,66875	171,26875
1026	166,68125	171,28125
1027	166,69375	171,29375
1028	166,70625	171,30625
1029	166,71875	171,31875
1030	166,73125	171,33125
1031	166,74375	171,34375
1032	166,75625	171,35625
1033	166,76875	171,36875
1034	166,78125	171,38125
1035	166,79375	171,39375
1036	166,80625	171,40625
1037	166,81875	171,41875
1038	166,83125	171,43125
1039	166,84375	171,44375
1040	166,85625	171,45625
1041	166,86875	171,46875
1042	166,88125	171,48125
1043	166,89375	171,49375
1044	166,90625	171,50625
1045	166,91875	171,51875
1046	166,93125	171,53125
1047	166,94375	171,54375
1048	166,95625	171,55625
1049	166,96875	171,56875
1050	166,98125	171,58125
1051	166,99375	171,59375
1052	167,00625	171,60625
1053	167,01875	171,61875
1054	167,03125	171,63125
1055	167,04375	171,64375
1056	167,05625	171,65625
1057	167,06875	171,66875
1058	167,08125	171,68125
1059	167,09375	171,69375
1060	167,10625	171,70625
1061	167,11875	171,71875
1062	167,13125	171,73125
1063	167,14375	171,74375
1064	167,15625	171,75625
1065	167,16875	171,76875
1066	167,18125	171,78125
1067	167,19375	171,79375

1068	167,20625	171,80625
1069	167,21875	171,81875
1070	167,23125	171,83125
1071	167,24375	171,84375
1072	167,25625	171,85625
1073	167,26875	171,86875
1074	167,28125	171,88125
1075	167,29375	171,89375
1076	167,30625	171,90625
1077	167,31875	171,91875
1078	167,33125	171,93125
1079	167,34375	171,94375
1080	167,35625	171,95625
1081	167,36875	171,96875
1082	167,38125	171,98125
1083	167,39375	171,99375
1084	167,40625	172,00625
1085	167,41875	172,01875
1086	167,43125	172,03125
1087	167,44375	172,04375
1088	167,45625	172,05625
1089	167,46875	172,06875
1090	167,48125	172,08125
1091	167,49375	172,09375
1092	167,50625	172,10625
1093	167,51875	172,11875
1094	167,53125	172,13125
1095	167,54375	172,14375
1096	167,55625	172,15625
1097	167,56875	172,16875
1098	167,58125	172,18125
1099	167,59375	172,19375
1100	167,60625	172,20625
1101	167,61875	172,21875
1102	167,63125	172,23125
1103	167,64375	172,24375
1104	167,65625	172,25625
1105	167,66875	172,26875
1106	167,68125	172,28125
1107	167,69375	172,29375
1108	167,70625	172,30625
1109	167,71875	172,31875
1110	167,73125	172,33125
1111	167,74375	172,34375
1112	167,75625	172,35625

1113	167,76875	172,36875
1114	167,78125	172,38125
1115	167,79375	172,39375
1116	167,80625	172,40625
1117	167,81875	172,41875
1118	167,83125	172,43125
1119	167,84375	172,44375
1120	167,85625	172,45625
1121	167,86875	172,46875
1122	167,88125	172,48125
1123	167,89375	172,49375
1124	167,90625	172,50625
1125	167,91875	172,51875
1126	167,93125	172,53125
1127	167,94375	172,54375
1128	167,95625	172,55625
1129	167,96875	172,56875
1130	167,98125	172,58125
1131	167,99375	172,59375
1132	168,00625	172,60625
1133	168,01875	172,61875
1134	168,03125	172,63125
1135	168,04375	172,64375
1136	168,05625	172,65625
1137	168,06875	172,66875
1138	168,08125	172,68125
1139	168,09375	172,69375
1140	168,10625	172,70625
1141	168,11875	172,71875
1142	168,13125	172,73125
1143	168,14375	172,74375
1144	168,15625	172,75625
1145	168,16875	172,76875
1146	168,18125	172,78125
1147	168,19375	172,79375
1148	168,20625	172,80625
1149	168,21875	172,81875
1150	168,23125	172,83125
1151	168,24375	172,84375
1152	168,25625	172,85625
1153	168,26875	172,86875
1154	168,28125	172,88125
1155	168,29375	172,89375
1156	168,30625	172,90625
1157	168,31875	172,91875

1158	168,33125	172,93125
1159	168,34375	172,94375
1160	168,35625	172,95625
1161	168,36875	172,96875
1162	168,38125	172,98125
1163	168,39375	172,99375
1164	168,40625	173,00625
1165	168,41875	173,01875
1166	168,43125	173,03125
1167	168,44375	173,04375
1168	168,45625	173,05625
1169	168,46875	173,06875
1170	168,48125	173,08125
1171	168,49375	173,09375
1172	168,50625	173,10625
1173	168,51875	173,11875
1174	168,53125	173,13125
1175	168,54375	173,14375
1176	168,55625	173,15625
1177	168,56875	173,16875
1178	168,58125	173,18125
1179	168,59375	173,19375
1180	168,60625	173,20625
1181	168,61875	173,21875
1182	168,63125	173,23125
1183	168,64375	173,24375
1184	168,65625	173,25625
1185	168,66875	173,26875
1186	168,68125	173,28125
1187	168,69375	173,29375
1188	168,70625	173,30625
1189	168,71875	173,31875
1190	168,73125	173,33125
1191	168,74375	173,34375
1192	168,75625	173,35625
1193	168,76875	173,36875
1194	168,78125	173,38125
1195	168,79375	173,39375
1196	168,80625	173,40625
1197	168,81875	173,41875
1198	168,83125	173,43125
1199	168,84375	173,44375
1200	168,85625	173,45625
1201	168,86875	173,46875
1202	168,88125	173,48125

1203	168,89375	173,49375
1204	168,90625	173,50625
1205	168,91875	173,51875
1206	168,93125	173,53125
1207	168,94375	173,54375
1208	168,95625	173,55625
1209	168,96875	173,56875
1210	168,98125	173,58125
1211	168,99375	173,59375
1212	169,00625	173,60625
1213	169,01875	173,61875
1214	169,03125	173,63125
1215	169,04375	173,64375
1216	169,05625	173,65625
1217	169,06875	173,66875
1218	169,08125	173,68125
1219	169,09375	173,69375
1220	169,10625	173,70625
1221	169,11875	173,71875
1222	169,13125	173,73125
1223	169,14375	173,74375
1224	169,15625	173,75625
1225	169,16875	173,76875
1226	169,18125	173,78125

ANEXO C

Arquivo de chamada e execução de *telnet* e *script*, com o formato de lote do MS Windows®.

```
@ECHO OFF
```

```
REM Executar telnet e o script  
start telnet.exe  
cscript //nologo coletar.vbs
```

```
DEL horarios.txt
```

ANEXO D

Arquivo VBS para coleta e armazenamento das coleções de dados de medição.

```

set OBJECT=WScript.CreateObject("WScript.Shell")
WScript.sleep 50
Set fso = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
WScript.sleep 50

'Ler parâmetros
arquivo=InputBox("Entre com o Nome do Arquivo","Arquivo de
Resultados")
repete=InputBox("Entre com a Quantidade de Medições","Número de
Repetições")
'Criar arquivo de log
OBJECT.SendKeys "set logfile " & arquivo & ".log~"
WScript.sleep 50

'Ativar log
OBJECT.SendKeys "set logging~"
WScript.sleep 50

'Abrir sessão do telnet
OBJECT.SendKeys "open 192.168.0.125 8080~"
WScript.sleep 50

'Criar ponteiro do arquivo de horários
Set escrever1 = fso.OpenTextFile ("horarios.txt", 2, True)

'Executar primeiro comando
OBJECT.SendKeys "*idn?~"
WScript.sleep 50

'Laço com repetições do comando de medição tendo uma pausa
específica
Dim i
For i = 1 to repetes
    OBJECT.SendKeys ":sa:marker:mkr1:level?~"
    escrever1.WriteLine Time() 'Escreve o horário no arquivo
    WScript.sleep 1000
Next

```

```

'Fechar arquivo de horários
escrever1.Close

'Voltar ao prompt do telnet
OBJECT.SendKeys "'^ç'~"
WScript.sleep 50

'Sair do telnet
OBJECT.SendKeys "quit~"
WScript.sleep 50

'Tratar os arquivos de log e horários gerando um novo arquivo
Set ler1 = fso.OpenTextFile((arquivo & ".log"), 1)
Set ler2 = fso.OpenTextFile("horarios.txt", 1)
Set escrever2 = fso.OpenTextFile ((arquivo & ".txt"), 2, True)

escrever2.WriteLine "Data da Coleta: " & Date() 'Escreve a data na
primeira linha do arquivo

Do Until ler1.AtEndOfStream
    valor1=ler1.ReadLine
    If Mid(valor1,1,1) = "-" Then          'Procura no log as linhas
com as medições
        valor2=ler2.ReadLine
        escrever2.WriteLine valor1 & "      " & valor2
    End if
Loop

'Encerrar arquivos
ler1.Close
ler2.Close
escrever2.Close

'Apagar arquivo de log
fso.DeleteFile (arquivo & ".log")

```

ANEXO E

Curvas elaboradas por Hata (1980), para modelamento e formulação padrão da perda de propagação - $L_p = A + B \log R$.

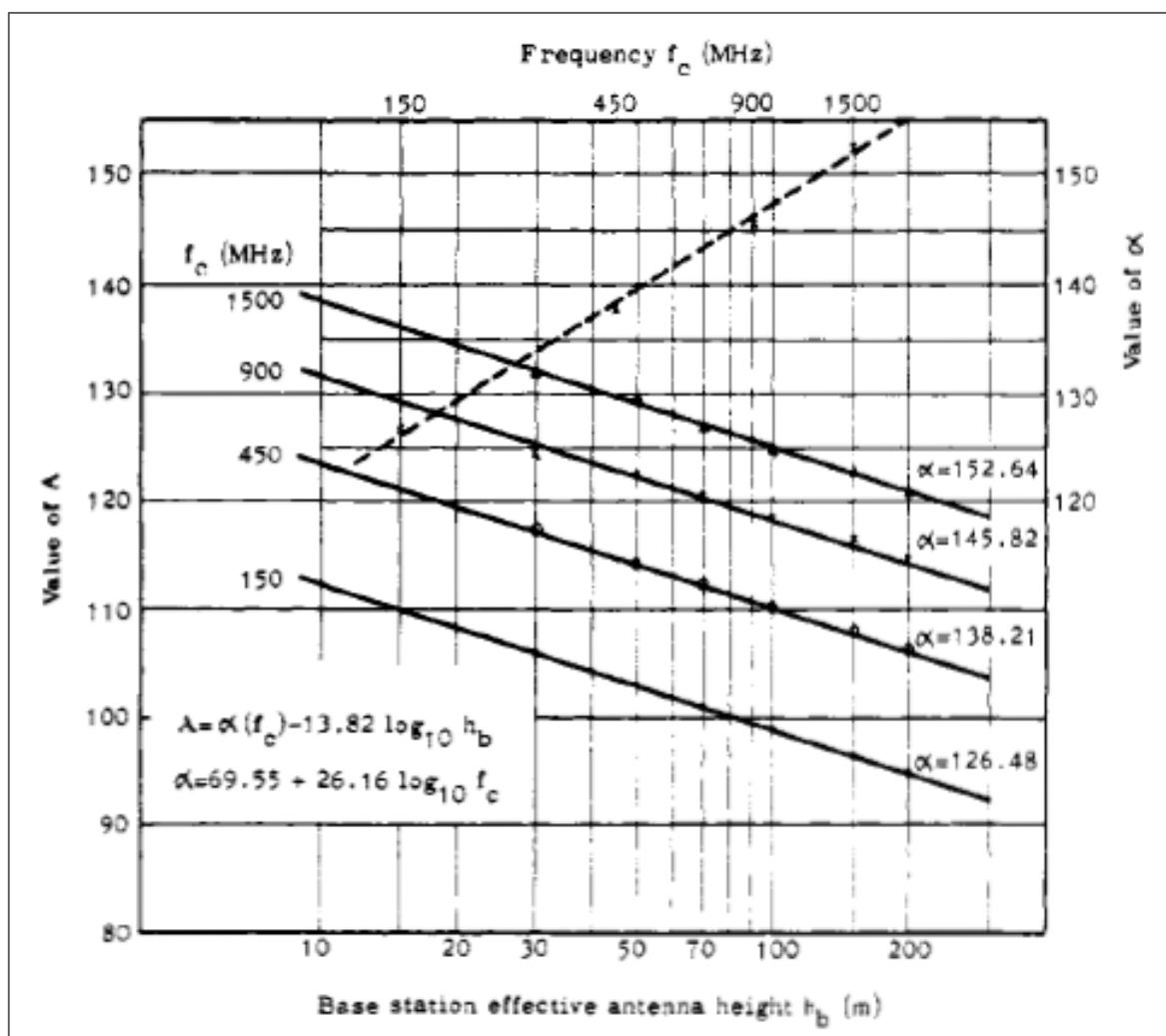


FIGURA 48 – CURVAS PARA DEDUÇÃO DO FATOR “A”
 FONTE: HATA (1980)

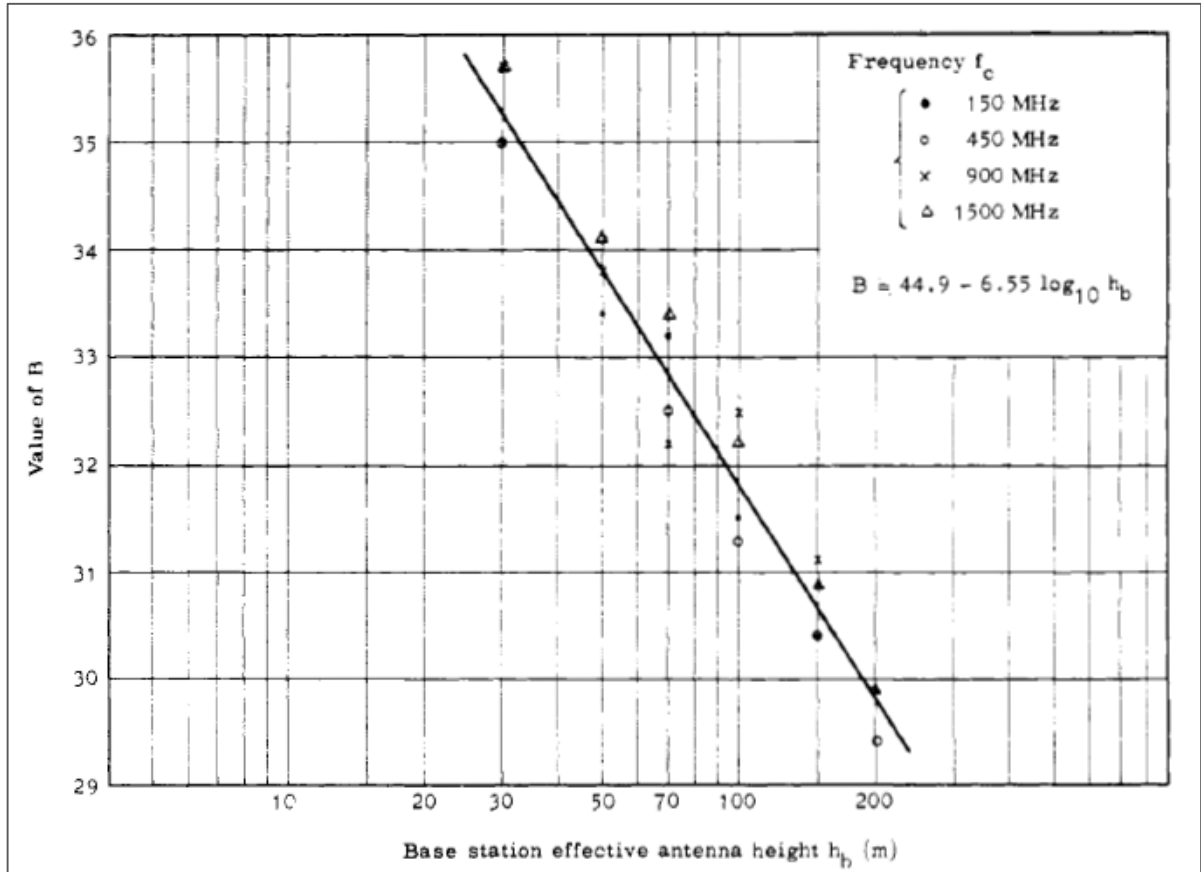


FIGURA 49 – CURVAS PARA DEDUÇÃO DO FATOR “B”
 FONTE: HATA (1980)

ANEXO F

Plotagem da rota cel02, descartada da construção da metodologia de parametrização e ajuste do modelo SPM, a qual ilustra a incoerência do comportamento das medições com os critérios adotados.

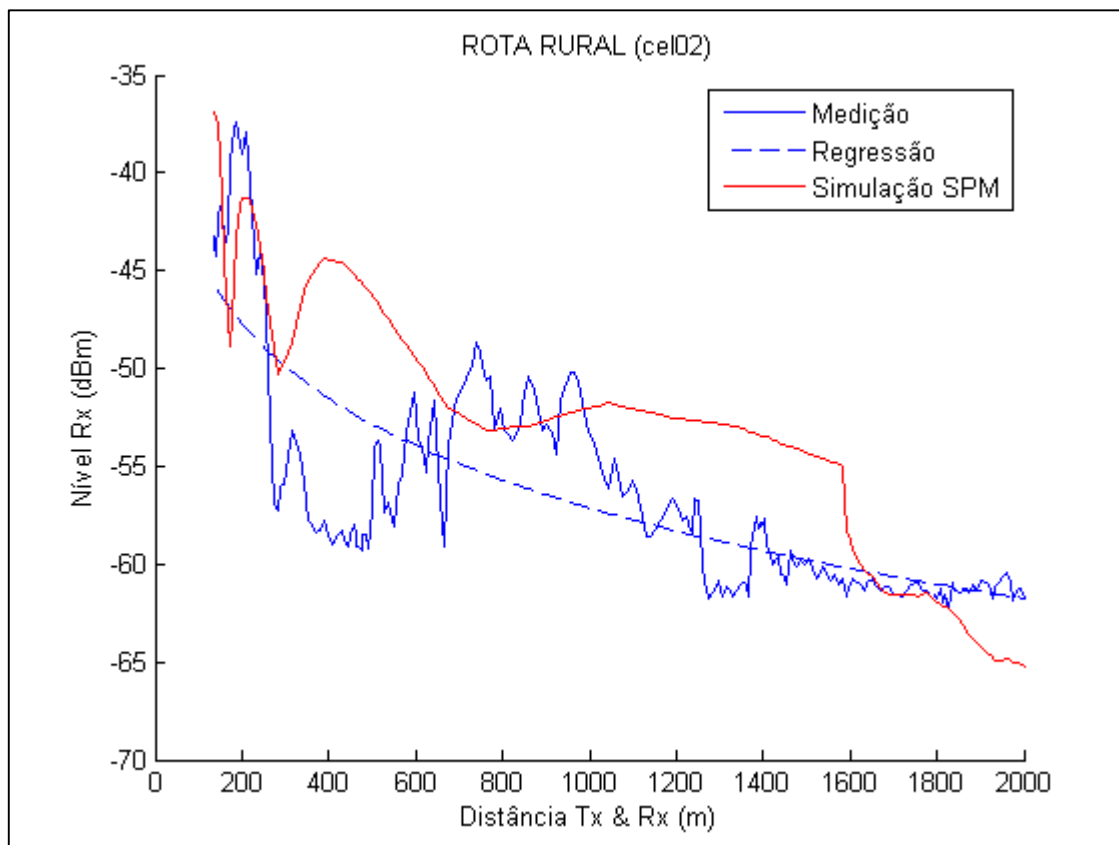


FIGURA 50 – CURVAS DE PREDIÇÃO E MEDIÇÃO DA ROTA RUAL cel02
FONTE: O AUTOR (2016)