



Departamento de Engenharia Elétrica – CETUC

CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE RADIOPROPAGAÇÃO PARA TV DIGITAL

Projeto 205: *Felipe Schoemer Jardim*¹

Projeto 314: *Ralph Engel Piazza*¹

Orientador: *Gláucio Lima Siqueira*²



¹ *Aluno da Graduação do curso de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.*

² *Engenheiro Eletrônico de Telecomunicações, Professor Associado CETUC*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO	3
3. METODOLOGIA	3
4. RESULTADOS	6
5. CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS	11

1. INTRODUÇÃO

O Brasil está começando a implantar o sistema de TV digital que irá operar no país. Para auxiliar nessa implementação foram desenvolvidos vários projetos nas mais diversas áreas e, dentre elas, o de caracterização do canal rádio. Neste trabalho procuramos caracterizar o canal para receptores móveis com diferentes velocidades. Esse estudo definirá as variabilidades em pequena e larga escala do sinal, assim como a possibilidade de uso de diversidade de antenas para melhoria desta recepção. Esse conhecimento auxiliará empresas que lidam com telecomunicações a desenvolver sistemas que permitirão o uso da televisão nos mais diversos meios de transporte e receptores portáteis [1,2].

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é fornecer o modelo de cobertura e variabilidade para o canal de radiopropagação, com recepção móvel, nas frequências que serão utilizadas para a implantação do Sistema Brasileiro de TV digital. Queremos também determinar a correlação e os ganhos da diversidade do sinal de duas antenas variando a distância entre elas, verificando a separação adequada. Além disso, fizemos um estudo da variabilidade do sinal recebido em pequena e larga escala e assim determinamos a função de densidade de probabilidade que melhor descreve o sinal [3].

3. METODOLOGIA

Foram realizadas medidas de intensidade de campo com mobilidade para caracterizar a variabilidade de um sinal característico de TV digital emitido por uma antena transmissora (Figura 3.1) na faixa de frequência destinada a esse serviço. A configuração de recepção utilizada dispunha de duas antenas de polarização horizontal omni-direcionais (Figura 3.2) construídas no laboratório e fixadas a uma haste sobre a unidade móvel de medida [4,5].



Figura 3.1 – Antena Transmissora



Figura 3.2 – Antenas Receptoras

Antes do início dos testes foi feito um planejamento visando definir as rotas e suas respectivas posições relativas ao transmissor. Quatro rotas principais foram selecionadas e percorridas na Barra da Tijuca, partindo de pontos próximos à antena transmissora e possuindo diferentes direções (Figura 3.3). Desse modo a intensidade do sinal recebido variava de acordo com as rotas, devido à distribuição horizontal da radiação emitida pela antena transmissora (Figura 3.4).

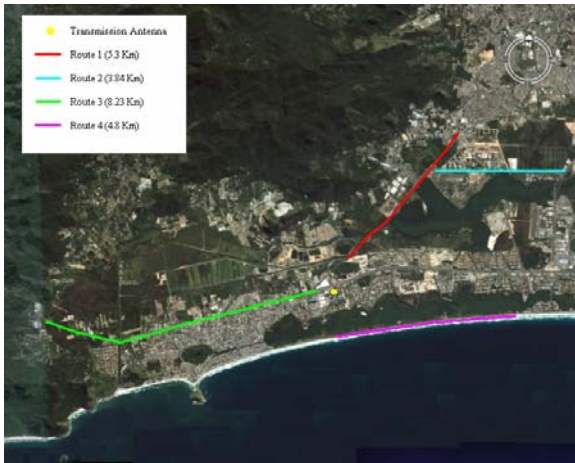


Figura 3.3 – Rotas

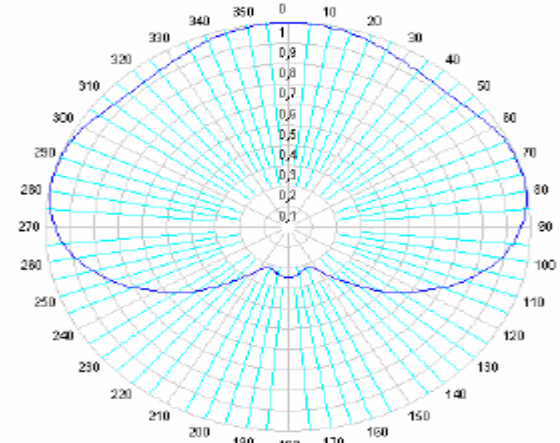


Figura 3.4 – Diagrama de Radiação

O sinal transmitido era coletado pelas duas antenas do receptor móvel, composto de amplificadores de baixo ruído e analisadores de espectro (HP e ANRITSU). A saída de áudio destes analisadores foi amostrada por um conversor A/D com uma taxa de mil amostras por segundo e enviados a um computador para armazenagem. As medidas foram feitas utilizando quatro distâncias diferentes entre as antenas receptoras, sendo essas 0.5λ , 1.0λ , 1.5λ , 2.0λ , viabilizando um estudo dos ganhos de diversidade. Para cada separação a unidade móvel se deslocou com duas velocidades, 35 e 70 Km/h e percorreu as rotas em ambas as direções. Deste modo, foi possível estudar o efeito da velocidade na variabilidade do canal conforme nos afastamos ou nos aproximamos da antena transmissora.

Inicialmente fizemos cortes nos dados coletados com o intuito de corrigir as variações de velocidades surgidas durante as medições. Essas variações ocorreram devido a fatores como o trânsito, a aceleração inicial e desaceleração final do móvel. O método empregado para cortar os dados foi realizado em *software* MATLAB, assim como os demais cálculos feitos nesse projeto. Com o intuito de separar as variações em larga escala das variações em pequena escala, fizemos um estudo dos erros associados às médias móveis com as janelas de 20λ , 30λ e 40λ para cada antena receptora, considerando as distâncias entre elas, as diferentes rotas e velocidades. A escolha destas janelas de filtragem está baseada no trabalho de Lee [6]. Os erros de cada janela correspondem ao quanto a distribuição da media móvel se aproxima de uma distribuição gaussiana, ou seja, quanto melhor é o ajuste, menor é o erro. Com isso decidimos a filtragem de separação entre as variabilidades de larga e pequena escala para assim estudá-las separadamente. A média móvel foi calculada usando a seguinte equação (4.1):

$$y_s(i) = \frac{1}{2N+1} (y(i+N) + y(i+N-1) + \dots + y(i-N)) \quad [4.1]$$

onde $y_s(i)$ é o valor da média móvel para o ponto i , N é o numero de pontos vizinhos para cada lado de $y_s(i)$ e $(2N+1)$ é o tamanho da janela.

Assim foi possível fazer uma análise da variação em pequena escala que foi obtida removendo a média móvel que, devido à escolha da janela apropriada, equivale à variação lenta do sinal. A variação rápida existe devido ao fenômeno de multipercurso. Como a unidade móvel está, em geral, imersa num ambiente urbano, ela receberá raios através dos vários mecanismos de propagação gerados pelo ambiente, como difração e reflexão. A mobilidade da unidade portátil possibilita que, a cada instante, o móvel esteja recebendo uma diferente combinação de ondas propagantes. Os vários raios refletidos no ambiente urbano são

os principais causadores do multipercurso. Este fenômeno está representado abaixo (Figura 3.5).

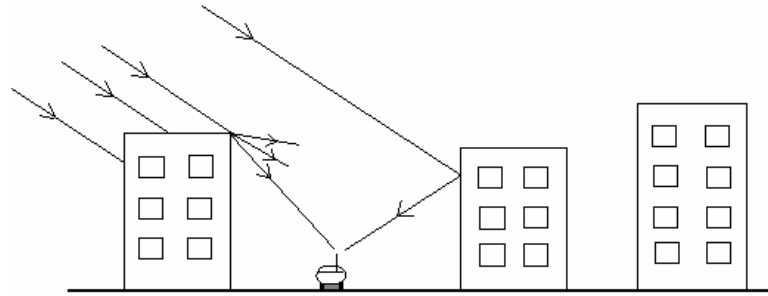


Figura 3.5 – Cenário de Multipercurso

Em seguida analisamos a correlação entre as antenas, de acordo com a variação rápida, para as diferentes rotas, velocidades e espaçamento entre elas. Isso foi feito em MATLAB usando a equação (4.2):

$$r_0 = \frac{\sum_n (s_{n,1} - \bar{m}_1) \times (s_{n,2} - \bar{m}_2)}{\sqrt{\sum_n (s_{n,1} - \bar{m}_1)^2 \times \sum_n (s_{n,2} - \bar{m}_2)^2}} \quad [4.2]$$

onde \bar{m}_1 e \bar{m}_2 são as médias das variações rápidas do sinal captado pela primeira e segunda antena respectivamente e, $s_{n,1}$ e $s_{n,2}$ são os valores das variações rápidas a cada instante de amostragem n , onde todas as amostras, posteriores ao corte, são percorridas.

Depois realizamos um estudo sobre os ganhos de diversidade das antenas, utilizando três métodos para combinar os sinais recebidos nos braços de diversidade:

- seleção do melhor (S_1 ou S_2),
- mesmo ganho ($(S_1 + S_2)/2$)
- taxa máxima ($\sqrt{S_1^2 + S_2^2}$)

onde S_1 e S_2 são os níveis de sinal recebidos nos analisadores HP e Anritsu respectivamente.

Com a variação de pequena escala foi também possível fazer uma análise estatística do sinal para diferentes trechos dos percursos, observando como as principais funções de densidade de probabilidade (Rayleigh, Rice, Nakagami, Weibull ou Gaussiana), usadas em comunicações móveis, se ajustavam ao sinal. Essas funções estão descritas na Tabela 3.1. Vimos então as diferentes situações que cada distribuição melhor descrevia o sinal dependendo da proximidade da antena.

Distribution	Linear scale	Logarithmic scale		
Rayleigh	$p_x(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$	$p_y(y) = \frac{1}{2M\sigma^2} \exp\left[\frac{y}{M} - \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{y}{M}\right)\right]$		
Rice	$p_x(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right)$	$p_y(y) = \frac{1}{2M\sigma^2} \exp\left\{\frac{y}{M} - \frac{1}{2\sigma^2} \left[s^2 + \exp\left(\frac{y}{M}\right)\right]\right\} I_0\left[\frac{s}{\sigma^2} \exp\left(\frac{y}{2M}\right)\right]$		
m-Nakagami	$p_x(x) = 2\left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \frac{x^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right)$	$p_y(y) = \frac{1}{M\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \exp\left[\frac{my}{M} - \frac{m}{\Omega} \exp\left(\frac{y}{M}\right)\right]$		
Weibull	$p_x(x) = \frac{w}{a} x^{w-1} \exp\left(-\frac{x^w}{a}\right)$	$p_y(y) = \frac{w}{2Ma} \exp\left[\frac{wy}{2M} - \frac{1}{a} \exp\left(\frac{wy}{2M}\right)\right]$		
Distribution	\bar{x}	$\overline{x^2}$	\bar{y}	$\overline{y^2}$
Rayleigh	$\sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}$	$2\sigma^2$	$M[\ln(2\sigma^2) - \gamma]$	$M^2 \left\{ [\ln(2\sigma^2) - \gamma]^2 + \frac{\pi^2}{6} \right\}$
Rice	$\exp\left(-\frac{K}{2}\right) \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[(1+K)I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right) \right]$	$s^2 + 2\sigma^2$		
m-Nakagami	$\frac{1}{\Gamma(m)} \sqrt{\frac{\Omega}{m}} \Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)$	Ω	$M \left[\ln\left(\frac{\Omega}{m}\right) + \psi(m) \right]$	$M^2 \left\{ \left[\ln\left(\frac{\Omega}{m}\right) + \psi(m) \right]^2 - \zeta(2, m-1) \right\}$
Weibull	$a^{1/w} \Gamma\left(1 + \frac{1}{w}\right)$	$a^{2/w} \Gamma\left(1 + \frac{2}{w}\right)$	$\frac{2M}{w} (\ln a - \gamma)$	$\left(\frac{2M}{w}\right)^2 \left[(\ln a - \gamma)^2 + \frac{\pi^2}{6} \right]$

$x > 0, m > \frac{1}{2}, M = 4.34, \gamma = 0.5772$.
 $I_0(\cdot)$ modified Bessel function first kind zero order.
 $I_1(\cdot)$ modified Bessel function first kind first order.
 $\Gamma(\cdot)$ Gamma function.
 $\psi(\cdot)$ Digamma function.
 $\zeta(\cdot)$ Riemann Zeta function [11].

Tabela 3.1 – Funções de Densidade de Probabilidade

Em seguida geramos uma curva de cruzamento de nível aonde vimos a frequência com qual o sinal cruza diferentes níveis de potência. Este fator é decisivo na escolha de características de modulação e taxa de transmissão do sinal.

4. RESULTADOS

O sinal captado com o móvel se aproximando da antena, com velocidade de 70 Km/h, para a primeira rota, está representado nos gráficos abaixo (Figura 4.1 & Figura 4.2). Em cada gráfico estão representadas as variações de pequena e larga escala do sinal e também sua variação com relação à distância da antena transmissora.

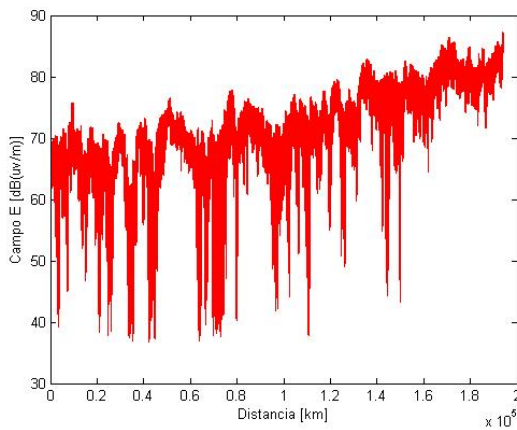


Figura 4.1 – Sinal captado pela HP

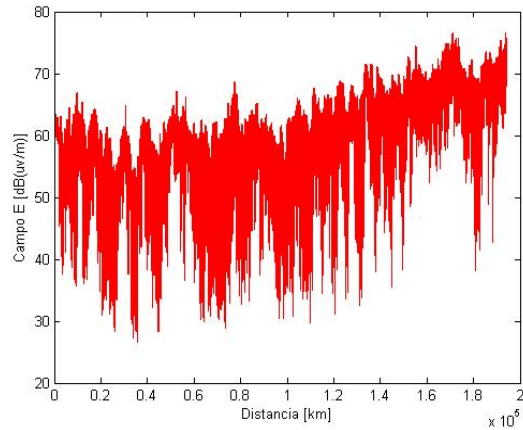


Figura 4.2 – Sinal captado pela Anritsu

Com o auxílio de programas escritos em MATLAB foi possível acessar os erros gerados pelas janelas de 20λ , 30λ e 40λ usadas para calcular as médias móveis, o que possibilitou construir tabelas de erros para cada rota, separação entre as antenas e velocidade de percurso. Como já mencionado anteriormente, esses erros demonstram a proximidade da distribuição de media móvel com uma distribuição Gaussiana. As tabelas abaixo (Tabela 4.1 & Tabela 4.2) são exemplos dos erros obtidos quando o móvel se deslocava na primeira rota com uma separação de antenas de 1.5λ .

Antena 1			
	20 Lambdas	30 Lambdas	40 Lambdas
Ida a 35 km/h	0.0072	0.0078	0.0083
Volta a 35 km/h	0.0067	0.0076	0.0083
Ida a 70 km/h	0.0069	0.0078	0.0085
Volta a 70 km/h	0.0077	0.0089	0.0108

Antena 2			
	20 Lambdas	30 Lambdas	40 Lambdas
Ida a 35 km/h	0.0057	0.0065	0.0072
Volta a 35 km/h	0.0058	0.0069	0.0073
Ida a 70 km/h	0.0064	0.0070	0.0080
Volta a 70 km/h	0.0104	0.0126	0.0396

Tabela 4.1 & Tabela 4.2 – Erro para primeira rota com separação de 1.5λ

Observando essas tabelas conclui-se que o tamanho de janela para média móvel ideal é o de 20λ , pois apresenta os menores erros, em média, como exemplificado acima. Além disso, os erros apresentados com a velocidade de 35 Km/h foram, em geral, menores que com 70 Km/h. Então utilizamos esse tamanho de janela para calcular a média móvel do sinal para as duas antenas, como mostra o gráfico abaixo, onde um dos sinais foi deslocado em $10 [dB(\mu V/m)]$ para melhor visualização (Figura 4.3).

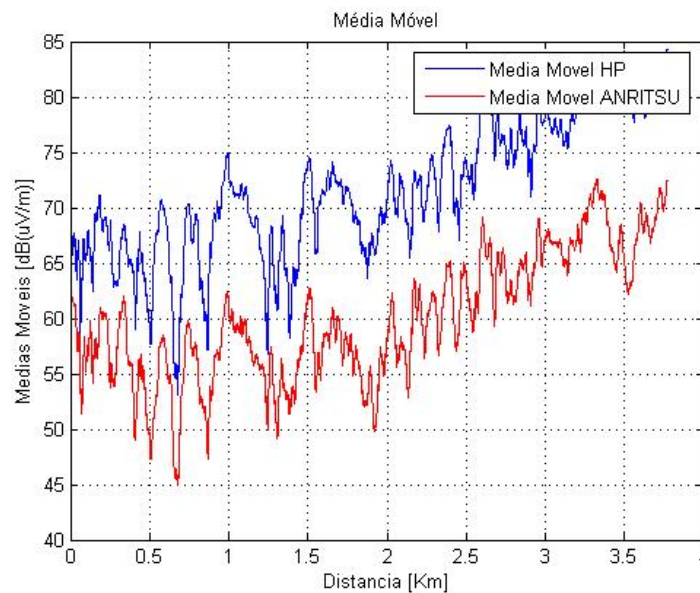


Figura 4.3 – Médias Móveis (Rota 1, separação entre as antenas de 1.5λ)

Em seguida, dividindo o sinal original pela média móvel, obtivemos a variação de pequena escala, desse modo foi removida a variação com a distância em relação à antena transmissora e a variação devido a sombreamento. O gráfico abaixo da esquerda (Figura 4.4) ilustra um exemplo de sinal com sua respectiva média móvel e o da direita (Figura 4.5) mostra esse mesmo sinal sem sua variação lenta [7].

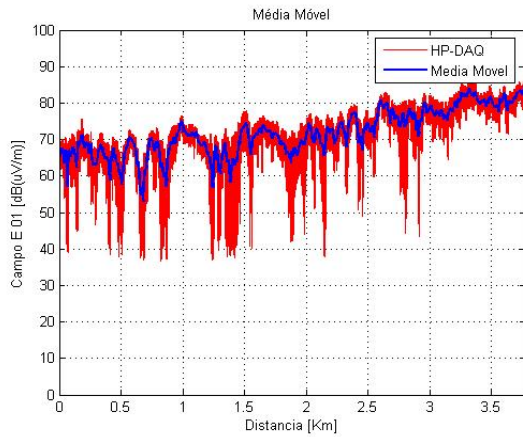


Figura 4.4 – Sinal com Média Móvel

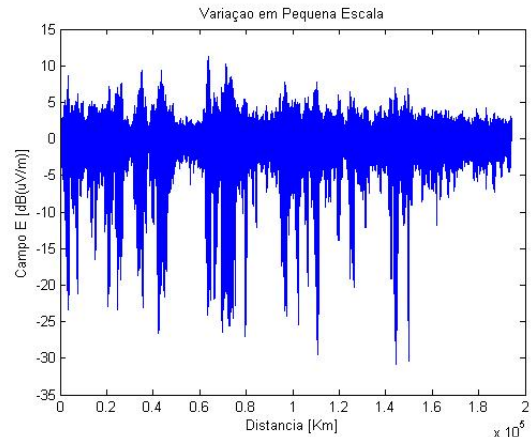


Figura 4.5 – Variação em Pequena Escala

Aplicando a fórmula de correlação foi possível construir tabelas indicando os coeficientes de correlação entre as duas antenas conforme variamos a velocidade e a distância entre as mesmas, para cada rota. A tabela abaixo (Tabela 4.3) mostra o caso da primeira rota, enquanto o histograma (Figura 4.6) foi gerado a partir do cálculo das médias e desvios padrões de cada separação de antena, considerando todas as rotas, velocidades e direções percorridas em conjunto.

	0,5 λ	1,0 λ	1,5 λ	2,0 λ
Ida 35	0.5653	0.4047	0.2708	0.2685
Volta 35	0.5624	0.3093	0.1876	0.3034
Ida 70	0.6278	0.5123	0.2734	0.4090
Volta 70	0.6292	0.4266	0.2057	0.2074

Tabela 4.3 – Coeficientes de Correlação

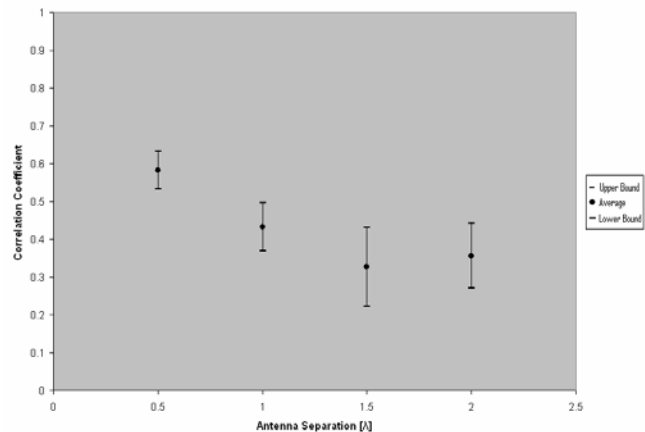


Figura 4.6 – Valor Médio de Correlação

Percebe-se então que a separação entre as antenas deve ser, idealmente, de pelo menos 1.0λ pois, em média, a partir dessa distância obteve-se um coeficiente de correlação menor do que 0.5. Esse valor de correlação é geralmente aceito como mínimo necessário para obter um ganho de diversidade razoável. Essas conclusões podem ser evidenciadas acima, tanto pela tabela para o caso específico quanto pelo gráfico dos coeficientes médios.

Os resultados obtidos, através das aplicações das fórmulas citadas anteriormente dos diferentes tipos de ganho, foram os esperados. O método de taxa máxima teve o ganho mais elevado, o método de mesmo ganho o segundo e o método de seleção do melhor o ganho inferior. A tabela abaixo evidencia os ganhos, em média, obtidos por cada método utilizado, para a primeira rota, combinando os ganhos das antenas para todas as direções e velocidades (Tabela 4.4).

Separação	Seleção do Melhor	Mesmo Ganho	Taxa Máxima
0.5	2.07	3.82	4.05
1.0	2.37	4.03	4.30
1.5	2.80	4.27	4.60
2.0	2.64	4.16	4.48
Média	2.47	4.07	4.36

Tabela 4.4 – Resultados Médios de Ganho

Os gráficos seguintes ilustram as distribuições cumulativas para o ganho de cada antena e o ganho combinado, calculado através dos diversos métodos mencionados (Figura 4.7 Figura 4.8 & Figura 4.9).

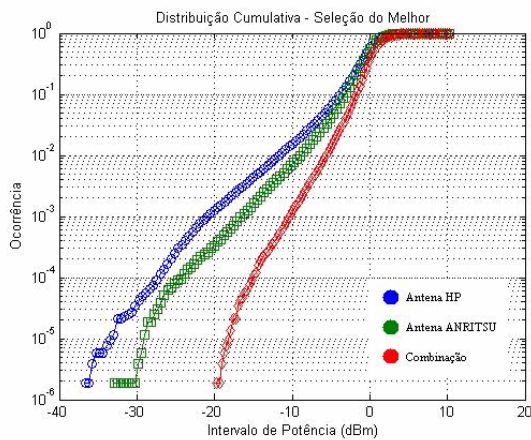


Figura 4.7 – Seleção do Melhor

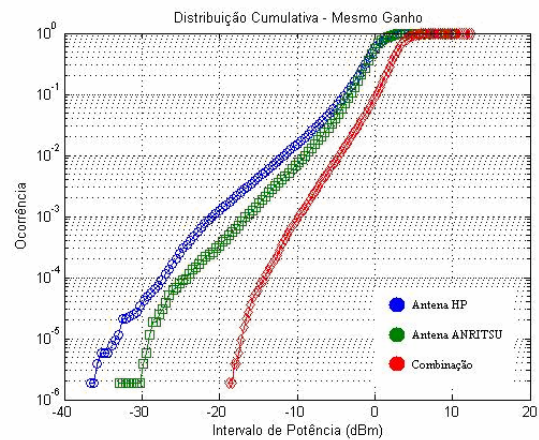


Figura 4.8 – Mesmo Ganho

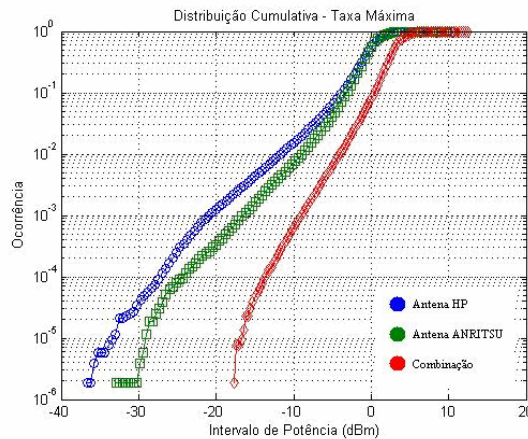


Figura 4.9 – Taxa Máxima

A próxima etapa do projeto foi analisar o ajuste das principais funções de densidade de probabilidade ao sinal em diferentes trechos da rota: início, meio e fim. Geramos gráficos mostrando como cada distribuição se adequou ao sinal para cada trecho e vimos que para o início e meio da rota a distribuição mais adequada foi a normal e no fim dela foi Rayleigh [8]. Esses resultados eram esperados, pois a influência do raio direto é mais forte próximo à antena transmissora, o que faz a distribuição tender a Gaussiana. Porém em algumas ocasiões isso não ocorreu devido ao ambiente urbano das medições não serem propícios ao fenômeno de multipercurso, que é o maior responsável pela redução da influência do raio direto. Os

gráficos abaixo são exemplos dos três diferentes trechos na primeira rota onde foram calculadas as distribuições (Figura 4.10, Figura 4.11 & Figura 4.12).

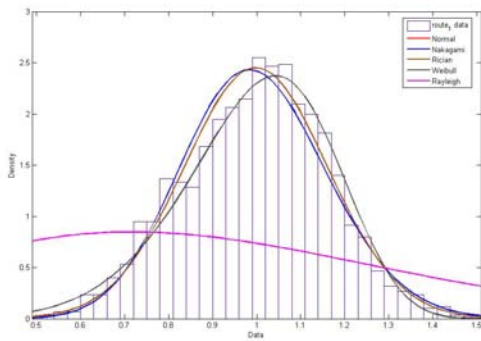


Figura 4.10 – Início

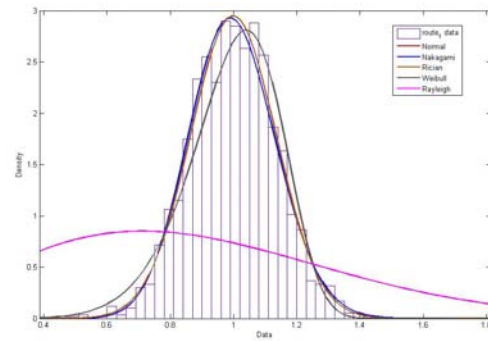


Figura 4.11 - Meio

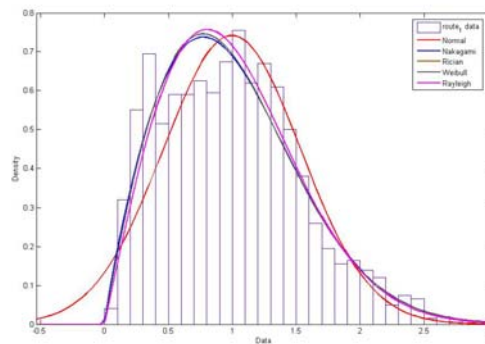


Figura 4.12 – Final

Concluimos o projeto examinando a taxa de cruzamento de nível do sinal. Montamos um gráfico (Figura 4.13) com intuito de visualizar a quantidade de vezes que o sinal passa por um determinado nível de intensidade, e fazendo uma varredura desse nível para incluir todo o espectro do sinal.

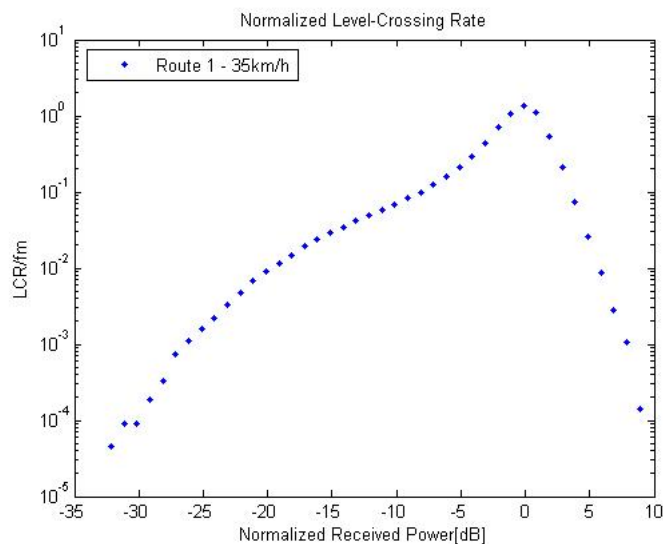


Figura 4.13 – Cruzamento de Nível

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho fizemos uma caracterização da rádio propagação para sistemas de TV digital que serão implementados no país a partir do final de 2007. Um sinal na faixa de frequência de interesse foi transmitido de um prédio na Barra da Tijuca e, com um receptor móvel, este sinal foi recebido em diversos pontos ao longo de percursos selecionados. Usando duas antenas na recepção, fizemos uma análise dos ganhos no nível mediano do sinal obtidos pela técnica de diversidade em espaço. Primeiramente vimos que o melhor tamanho de janela para calcular a média móvel e retirar o efeito da variação de larga escala do sinal, foi de 20 comprimentos de onda. A análise da correlação entre as antenas evidenciou que conforme elas se afastam o coeficiente de correlação diminui, sendo necessário pelo menos 1.0λ de separação para uma diversidade de espaço com ganho aceitável. Das técnicas de combinação empregadas, a combinação de Taxa Máxima foi a que obteve maiores ganhos, como teoricamente esperados.

O estudo da variabilidade do sinal em pequena escala mostrou que a componente de raio direto do sinal era muito forte na maioria dos trechos das rotas, fazendo com que a melhor função de densidade de probabilidade que se ajustava ao sinal fosse a Gaussiana. Em alguns trechos, mais pertos do final de cada rota, o sinal direto não ficou forte e a melhor função que se ajustou foi a Rayleigh. Foi concluído então que, apesar da região de medida ser urbana, ela não possui muitos prédios e construções grandes, fazendo com que o fenômeno de multipercurso, que diminui a influencia do sinal direto, seja pequeno.

O resultado experimental de taxa de cruzamento de nível mostrou sua adequação ao modelo teórico e seu resultado é fundamental para definições de projeto.

Os resultados apresentados neste trabalho fornecerão um importante *background* para o planejamento das redes de TV digital que serão em breve elaboradas. O conhecimento das características do canal é de importância fundamental.

Como sugestão de trabalhos futuros, propomos a elaboração de estudos de banda larga para uma análise de dispersão do sinal.

REFERÊNCIAS

[1] Recommendation ITU-R p.307, **VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1000 MHz**, International Telecommunications Union, Genebra Suíça, 1995.

[2] Carvalho, J.N.; **Propagação em áreas urbanas na faixa de UHF – Aplicação ao planejamento de sistemas de TV digital**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Agosto 2003.

[3] Cavalcanti, J.F.B., **Medidas de Rádio Propagação em UHF em ambientes suburbanos para TV digital: Estudo de Cobertura para recepção fixa**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Setembro 2005.

[4] Siqueira, G.L., **Notas de aula da disciplina Canal de Propagação Rádio Móvel**, CETUC Puc-Rio.

[5] **Aspectos de Rádio – Propagação**, WirelessBR, publicação eletrônica em <http://www.wirelessbrasil.org>, Márcio Eduardo da Costa Rodrigues.

[6] W.C.Y Lee, **Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal**, IEEE Trans. On Vehicular Technology, VT-34, N^o 1, pp. 22 a 27, Fevereiro 1985.

[7] Siqueira, G.L., Jardim, F. S., Piazza, R.E., Cavalcanti, J.F.B.; **The Use of Space Diversity for UHF Digital TV Mobile Reception**, Eleventh WSEAS International Conference on Communication, Crete Island, Greece, Junho 2007.

[8] Siqueira, G.L., Jardim, F. S., Piazza, R.E., Cavalcanti, J.F.B., Silva, R.M.L.; **Variability Studies for Móbile Digital TV Reception at UHF**, a ser apresentado no IMOC 2007, Bahia, Setembro 2007.