

6

Caracterização do Canal SFN

Tão importante quanto à caracterização do nível de sinal recebido numa SFN, é a análise das componentes do sinal no perfil de retardos. Embora a análise da seção anterior tenha mostrado que a SFN é capaz de prover significativos ganho e melhoria de diversidade, contribuindo para eliminar zonas de sombra na área de recepção, é importante garantir que o aumento do multipercurso na recepção, associado à transmissão de múltiplos sinais, não provoque uma interferência intersimbólica acima dos limites aceitáveis pelo sistema.

6.1

Atrasos Estruturais numa SFN

A capacidade dos sistemas de superar a interferência causada pelos multipercursos, tornou possível a construção de uma rede constituída de um grande número de fontes transmissoras capazes de transmitir um mesmo programa usando a mesma frequência.

Ao formar uma rede SFN, um sistema de transmissão pode servir uma grande área utilizando uma mesma frequência. A estrutura da SFN possibilita, também, que o receptor venha a se beneficiar do ganho de diversidade de espaço gerado pelas localidades distintas das fontes transmissoras, enquanto a potência em cada transmissor não é aumentada. Foi visto na seção 3.3, no entanto, que uma rede SFN deverá lidar com atrasos devido às reflexões causadas por obstáculos naturais e os atrasos decorrentes dos sinais retransmitidos pelas outras estações transmissoras da rede. Em outras palavras, ocorrerá à forte presença de uma dispersão estrutural na área de cobertura abrangida pela rede, também conhecida como sendo os multipercursos artificiais causados pela recepção dos sinais a partir dos diversos transmissores presentes na rede.

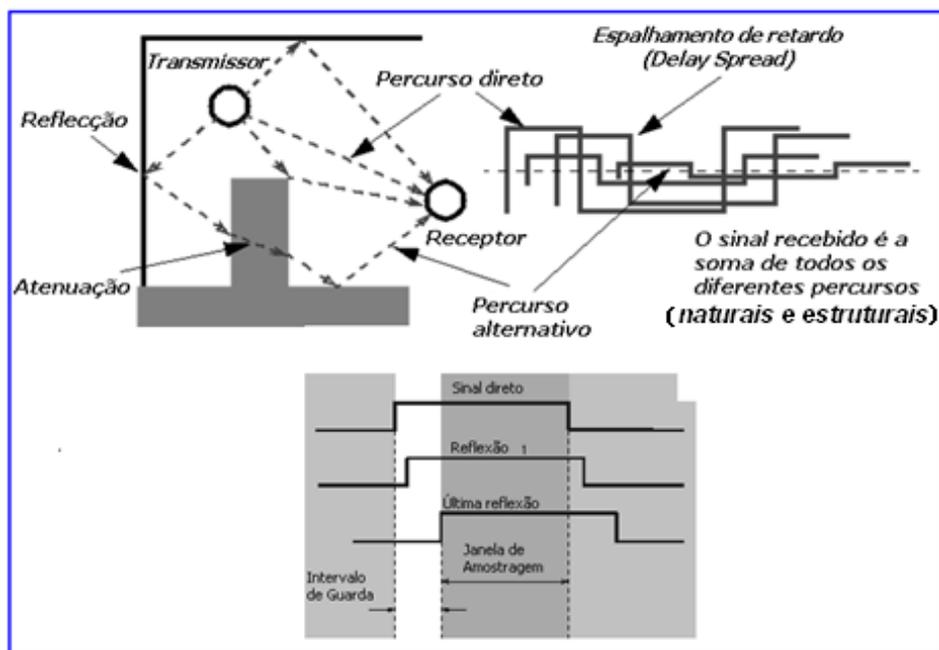


Figura 6.1 Mecanismos geradores da interferência intersimbólica na SFN

Assim, a interferência intersimbólica total presente será causada, principalmente, por dois mecanismos: a dispersão "natural" causada por componentes de onda refletidas nas vizinhanças do receptor e o espalhamento de retardo artificial (*artificial delay spread*) causado pela recepção de sinais a partir de vários transmissores. Este último, que também é visto como um retardo estrutural na rede, é efetivamente causado pela localização distinta das fontes transmissoras e tem duração mais longa, comparável ao intervalo de guarda do sistema " T_g ", que é superior a dispersão natural dos multipercursos.

Note-se que a duração do intervalo de guarda do sistema OFDM é um parâmetro ajustável no planejamento de uma rede SFN e que dependerá das distâncias entre as fontes transmissoras e da área de cobertura definida para o sistema.

Como pode ser visto na figura 6.1, se o espalhamento de retardo do sinal for menor do que o intervalo de guarda, não ocorrerá interferência intersimbólica e o sinal contribui totalmente para o sinal desejado, entretanto, sinais que chegam após o término da janela de amostragem, são tratados como sinais interferentes. Este fenômeno é chamado de auto-interferência. Aqueles sinais que chegam no meio contribuem parcialmente para o sinal desejado e, parcialmente, para a auto-interferência.

Nos sistemas de transmissão tradicionais das redes SFN, esta dispersão estrutural era mitigada por meio de equalização [30]-[31], no entanto, quando alguns dos transmissores estão situados muito longe do receptor, seus sinais podem chegar com muito atraso. Em vez de contribuir para a qualidade do sinal, estes sinais se tornam sinais interferentes para o sistema devido ao atraso excessivo. Neste caso, o equalizador vai deixar de funcionar porque o seu intervalo de observação se torna menor do que a dispersão estrutural presente no canal [32].

Tradicionalmente, um equalizador transversal era utilizado na recepção para eliminar a interferência na SFN. Todavia, devido aos atrasos mais longos e de maior magnitude dos diferentes caminhos de cada transmissor da rede, os equalizadores nem sempre eram capazes de convergir corretamente [32]. Por outro lado, o perfil de retardo de um sistema de transmissão distribuída necessariamente tem ecos com atrasos mais longos devido aos vários transmissores presentes na rede. Desse modo, fica evidente que o perfil médio, no caso da SFN, não poderá ser modelado por decaimentos exponenciais com uma constante de decaimento global [33], como era geralmente feito nos casos de redes com transmissão única [32]. Comparado com o perfil de retardo médio medido em uma rede de um único transmissor, o perfil médio de um sistema com diversidade de *site* é evidentemente mais esparsos [29], como pode ser visto na figura 6.6 da seção 6.3. A dispersão do canal é definida como a relação entre o tempo de duração gerado pelos multipercursos e o número de multipercursos.

Neste trabalho, propomos a derivação de um modelo de canal para recepção fixa, mais apropriado a uma real e contante expansão do número de transmissores de uma SFN [29], levando-se em conta que, atualmente, a maioria dos modernos simuladores de canal são de seis ou doze percursos.

Numa SFN, o retardo decorrente da dispersão natural dos ecos relacionados ao canal escalar e o retardo estrutural causado pela recepção dos sinais a partir dos outros transmissores na SFN serão apresentados. Como vimos, os espalhadores e refletores próximos causam a dispersão natural no canal escalar, e conseqüentemente, seu valor é de cerca de alguns micros segundos, tipicamente não superiores a 10 μ s [34][38]. Por outro lado, o retardo estrutural que surge

devido à recepção dos sinais a partir dos outros transmissores da rede, por imposições de planejamento do sistema, deverá ser menor ou igual à duração do intervalo de guarda T_g , portanto, o valor da banda de coerência do canal é menor do que a faixa do sinal transmitido, podendo o canal ser classificado seletivo em frequência.

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (6.1)$$

Nota-se através da expressão (6.1), que o desvanecimento seletivo em frequência, característico de sistemas banda larga que trabalham em frequência única [29], é intensificado devido à dispersão temporal adicional sofrida pelos símbolos transmitidos dentro do canal SFN, e que, por sua vez, induz à interferência intersimbólica no sistema, que deve ser combatida. Neste trabalho temos, também, o objetivo de propor um modelo mais adequado para um canal SFN, caracterizado pela sua seletividade de frequência.

6.2

Metodologia das Medições do Canal

Duas etapas de uma campanha de medição, considerando um sistema de recepção fixa ISDB-T, foram realizadas num sítio de medições abrangendo os bairros da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes, Curicica e Jacarepaguá, na cidade do Rio de Janeiro. Na figura 6.2 pode-se ter uma visão de toda a região de teste, onde as medições foram feitas usando um analisador vetorial Anritsu MS8901A, capaz de medir a resposta ao impulso do canal.

Os locais de medições foram escolhidos dentro da área de cobertura da SFN, conforme o planejamento descrito no capítulo 4. As medições foram realizadas com uma frequência de portadora de 563 MHz; parâmetros de modulação são FFT 8k, GI 1/16, 64 QAM e largura de canal de 6 MHz. A Fig. 6.2 mostra a SFN que consiste de dois transmissores ISDB-T (Sumaré e Pena), e a identificação dos pontos.

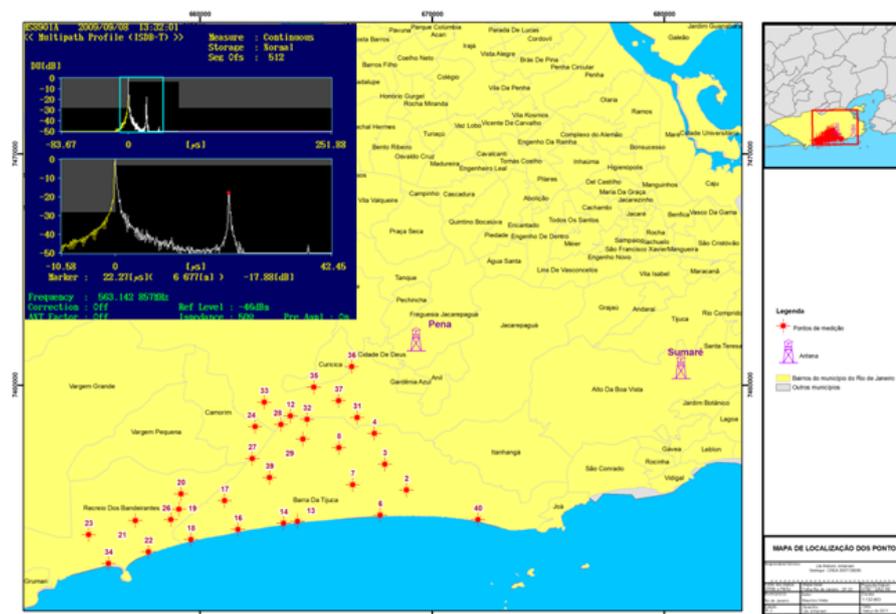


Figura 6.2 Localização dos pontos na região oeste da cidade do Rio de Janeiro

Os testes foram realizados com uma antena de recepção fixa direcional à altura de 10 metros, em conformidade com o padrão de testes de estudos de recepção para TV [21]. Com o intuito de comparar e avaliar o comportamento da resposta impulsional do canal, medidas também foram realizadas considerando uma antena de recepção omnidirecional. Os pontos de medições foram escolhidos de modo a abranger da melhor maneira possível toda região onde co-existiam sinais transmitidos pelos dois transmissores da rede SFN.

No total foram utilizados 31 pontos, sendo realizadas três medições do perfil de retardo em cada um deles a fim de obter as componentes de multipercurso válidas [27], conforme anexo do perfil de retardo referente ao ponto de referência (P17), ilustrado na figura 6.2. Um total de 279 perfis de retardo foram obtidos durante as duas campanhas de medições onde em um terço destes perfis foram abstraídas medições realizadas com a antena omnidirecional.

Em cada ponto nesse cenário a antena direcional foi orientada para cada transmissor da SFN, ficando o resto dos transmissores da rede suprimidos pelo diagrama de radiação da antena receptora, conforme ilustrado na figura 6.3.

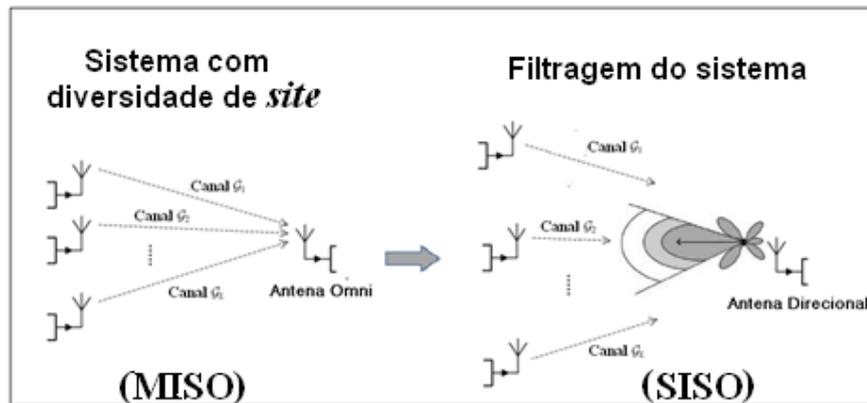


Figura 6.3 SFN vista como um sistema com diversidade de site

Neste caso, o objetivo foi suprimir a seletividade de frequência do canal inerente aos sistemas de uma única portadora e combater a dispersão de canal característica de um sistema de transmissão distribuída [32][29]. Deste modo, a SFN que pode ser vista como um sistema em diversidade de site *MISO* (*Multiple Input Single Output*), onde cada componente é representada pela propagação entre o l -ésimo transmissor e o receptor, passa a tender para um sistema sem diversidade de site *SISO* (*Single Input Single Output*) livre dos efeitos de propagação decorrentes da dispersão de canal imposta pela rede de transmissores distribuída. Note-se que o procedimento busca filtrar somente uma componente de um sistema que apresenta localidades distintas onde os sinais são propagados através de um único canal escalar, por sua vez associado, a um único parâmetro geralmente dependente θ_l .

A figura 6.4 ilustra o processo de filtragem aplicada em todos os pontos medidos durante as medições. Na metodologia de filtragem aplicada nas medições, orientamos a largura de feixe horizontal de 36° da antena receptora para cada fonte transmissora da rede. Todavia, conforme ilustrado na figura 6.5, cabe observar que em função de um alinhamento existente entre as localidades das fontes transmissoras da rede e os pontos medidos dentro da região iluminada pelos sites, não foi possível suprimir totalmente cada fonte transmissora com o diagrama de radiação da antena receptora.

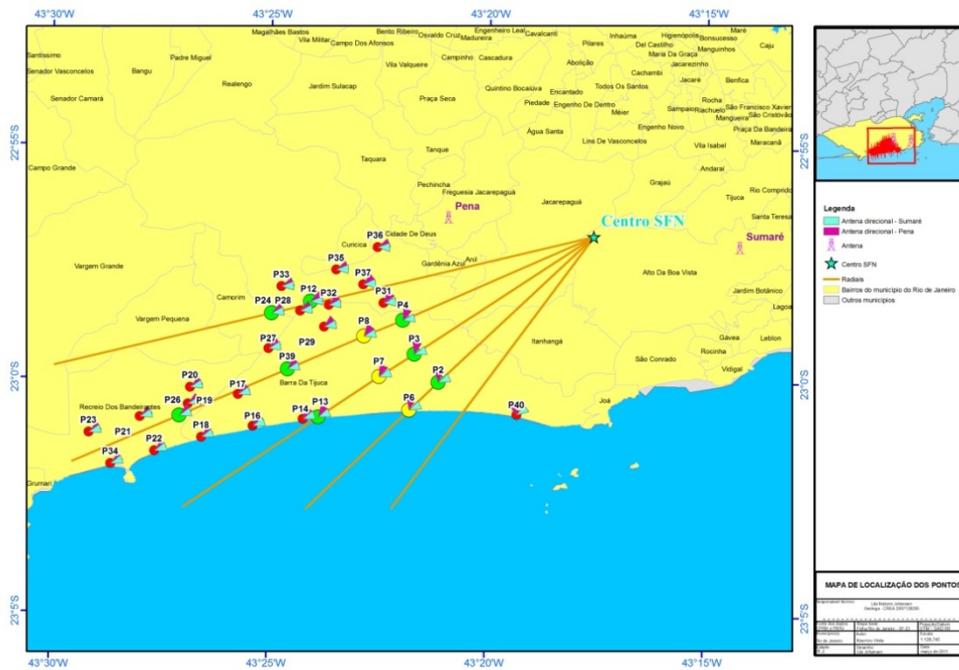


Figura 6.4 Filtragem do sistema

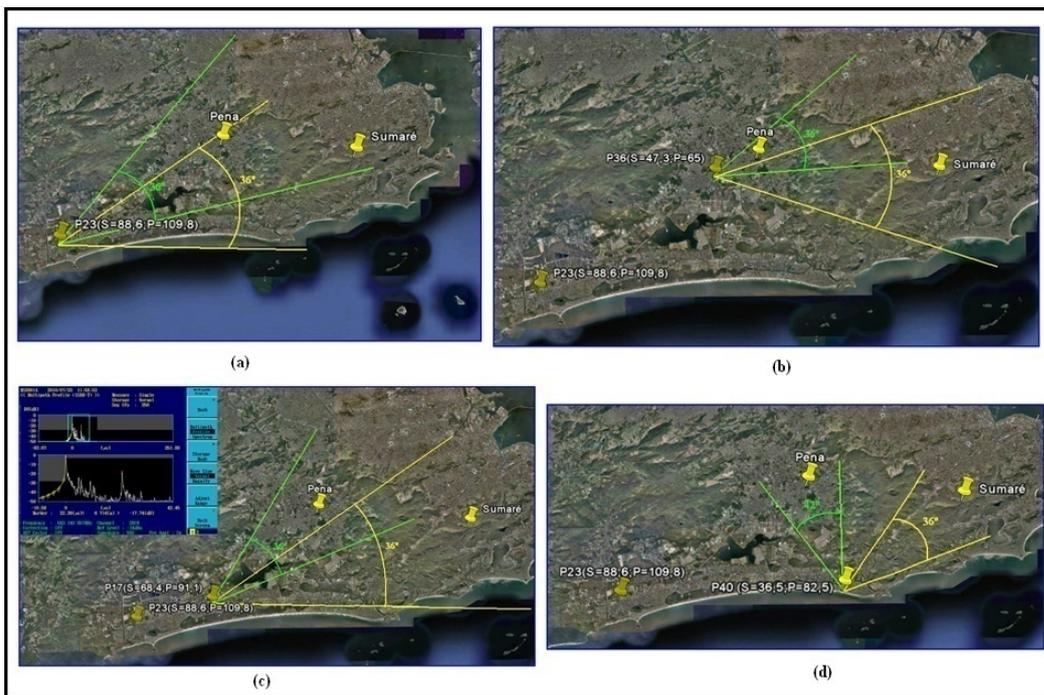


Figura 6.5 Filtragem dos transmissões – Sumaré e Pena

Observa-se, através da figura 6.5(a), que em pontos mais distantes os transmissores estão contidos dentro do ângulo de absorção máxima da antena

receptora. Nas figuras 6.5 (b) e (c), apesar dos transmissores não estarem dentro da largura de feixe direcionada pela antena, ainda se observa uma situação similar a anterior, porém com menor intensidade, conforme ilustrado no anexo da figura 6.5(c). Nota-se que os pontos de medição localizados numa região mais compreendida entre as fontes transmissoras, tornam-se mais favoráveis para filtragem dos sinais transmitidos, conforme ilustrado na figura 6.5(d), todavia, devido à topologia da região e a um bloqueio do sinal do transmissor da Pena, não observamos uma situação de cobertura simultânea dos transmissores nesta localidade, onde não foram realizadas medições.

Dado que este trabalho tem como foco a obtenção de um modelo de canal apropriado para recepção fixa de um sinal ISDB-T e que essa recepção normalmente ocorre dentro de um cenário onde, dependendo de sua localização, o usuário usualmente direciona sua antena para o site transmitindo o melhor sinal, justifica-se a metodologia em questão como aquela que bem aproxima uma situação real de recepção estacionária e, ao mesmo tempo, adequada para o cálculo de um modelo de canal para um sistema com diversidade de fontes transmissoras.

Após aplicar a metodologia de filtragem e obtenção das componentes de multipercurso válidas apresentada na próxima seção [27], todos os 279 perfis de retardos medidos ao longo das duas campanhas foram analisados e os resultados apresentados na seção 6.3 a seguir.

6.3

Processamento dos Dados Medidos

A análise dos parâmetros do canal foi feita utilizando as medições realizadas com a antena direcional, a fim de se obter as componentes do modelo de canal SFN, vista na seção 3.4. Como foi visto na seção 6.1, nesta análise separamos os efeitos do canal causados pelos espalhadores e refletores próximos ao receptor que causam a dispersão “natural” no canal e, conseqüentemente, geram atrasos tipicamente não superiores a 10 μ s [34].

Nas medições da resposta do canal o analisador vetorial utiliza os sinais piloto (distribuídos uniformemente nas portadoras, fazendo uso do esquema de

modulação OFDM), cuja característica é conhecida e utilizada para estimar e obter os perfis de retardo do canal.

A fim de se obter as componentes de multipercurso em cada um dos perfis e eliminar componentes de ruído, foi utilizada a técnica desenvolvida por Souza et. al. [27], que tem como objetivo eliminar os efeitos causados pelo ruído e obter as componentes reais de multipercurso pertencentes aos espalhadores. O procedimento começa com a obtenção do valor do ruído térmico, assumido como gaussiano com amplitudes seguindo a distribuição de Rayleigh. O valor mediano estimado é obtido assumindo que a amplitude do sinal segue uma distribuição de Rayleigh. Utilizando (6.2) e fazendo $p = 0.5$ é possível obter o valor do desvio padrão do ruído térmico referente ao valor mediano. Em nosso caso observou-se que o valor do desvio padrão do ruído térmico está 1.4 dB abaixo do valor mediano.

$$p = \exp\left(-\frac{\zeta}{2\sigma}\right) \quad (6.2)$$

O valor do limiar de ruído utilizado neste método é igual à mediana mais o desvio padrão do ruído térmico acrescido de uma margem, que é definida como o valor necessário para a obtenção ou filtragem das componentes de multipercurso válidas do perfil. O método, conhecido como CFAR (*Constant False Alarm Rate*), define uma margem que corresponde à probabilidade do ruído exceder um determinado limiar sem o surgimento de uma componente, ou seja, a probabilidade de falso alarme. Definindo um valor de 5×10^{-6} como a probabilidade de falso alarme, obtemos uma margem de 13.87 dB.

Pode-se dizer que as componentes correspondentes a ruído aparecem num determinado *intervalo* enquanto que as componentes válidas ocupam, pelo menos, dois *intervalos* com uma grande probabilidade. Se considerarmos que em pelo menos três perfis no mesmo ponto aparece uma componente num determinado *intervalo*, podemos utilizar estes dois critérios para melhorar o método de obtenção das componentes válidas. Assim, para cada ponto, foram utilizados três perfis, onde as componentes válidas tem que cumprir os seguintes critérios:

- a) O limiar de ruído é excedido nos três perfis analisados;
- b) Pelo menos um dos “vizinhos” satisfaz o item a).

Após a aplicação do algoritmo, obtém-se o resultado ilustrado na figura 6.6, para uma medida genérica.

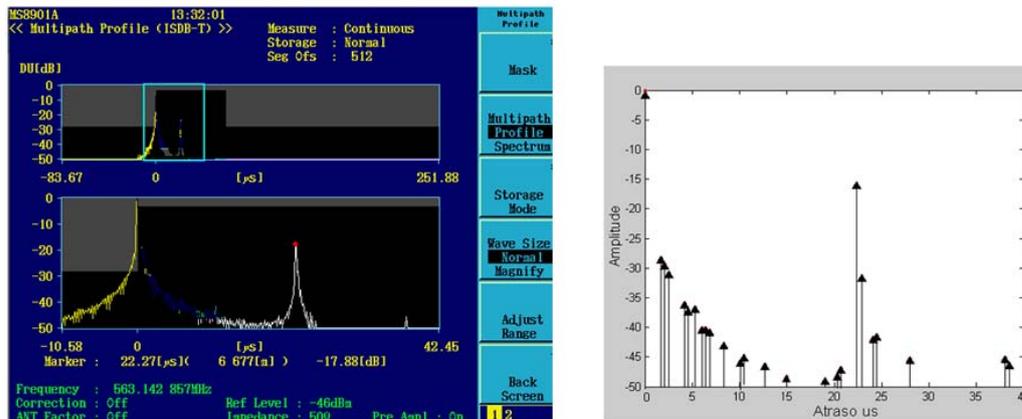


Figura 6.6 Perfil de retardo com a filtragem das componentes válidas

6.4

Resultados das Medições da Resposta Impulsional do Canal

6.4.1

Perfis de Retardos Medidos - Antena Direcional

A figura 6.7 apresenta os resultados obtidos a partir das medições realizadas nos 31 pontos de teste definidos na figura 6.2, utilizando uma antena direcional com 14 dBi de ganho, descrita na seção 4.1.2, à altura de 10 m, em conformidade com a recomendação ITU-R P.1407 [15]. Nestas medições, o limiar de ruído é de -50 dB.

Os atrasos de todos os percursos foram calculados em relação ao primeiro percurso (LOS) recebido localizado na origem do eixo dos retardos [35]. É possível observar, através da figura 6.7, que a densidade de potência da resposta impulsional do canal é considerável apenas em atrasos inferiores a 10 μ s. Com isto, podemos concluir para o canal medido que os multipercursos naturais são causados por espalhadores e refletores próximos ao receptor, confirmando os resultados obtidos em [34]. Cabe aqui, também ressaltar que uma das principais causas do desvanecimento rápido observado é o movimento dos referidos espalhadores e refletores mais próximos. Em relação ao quociente entre as

componentes LOS e NLOS, uma média entre os valores obtidos para o fator de Rice em cada ponto é igual a 16,82 dB.

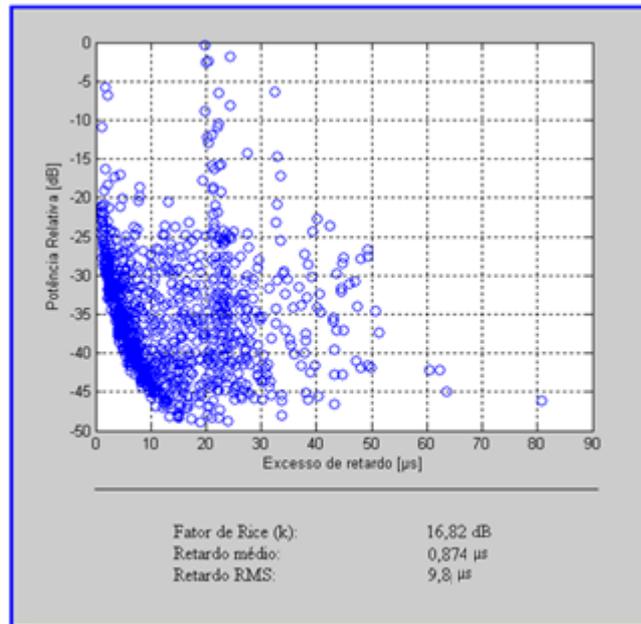


Figura 6.7 Resposta impulsional e parâmetros do canal – antena direcional a 10 m de altura

A figura 6.8 mostra a distribuição de potência das respostas impulsionais da figura 6.7. O gráfico da distribuição de potência dos retardos corresponde ao somatório das potências dos ecos da figura 6.7 para um cada valor de retardo.

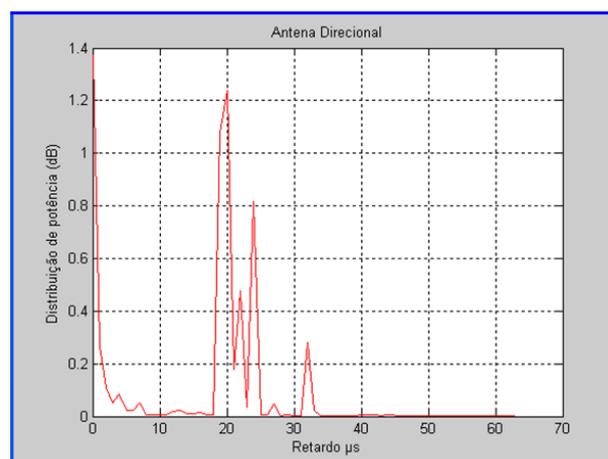


Figura 6.8 Distribuição de potência dos retardos no canal – antena direcional a 10 m de altura

A figura 6.9 mostra a distribuição cumulativa da potência dos retardos da resposta impulsional da figura 6.7.

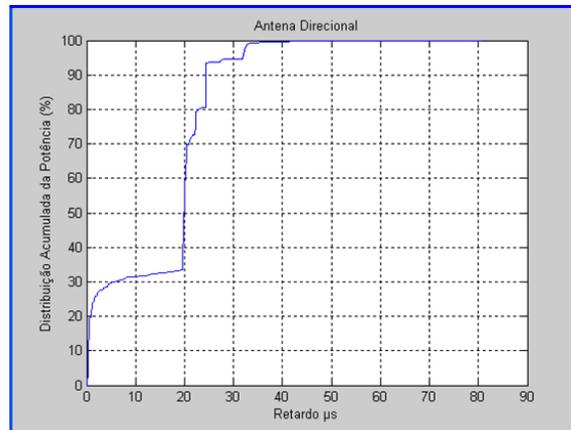


Figura 6.9 Distribuição acumulada da potência dos retardos – antena direcional

6.4.2

Perfis de Retardos Medidos - Antena Omni

Resultados semelhantes foram obtidos por uma antena omnidirecional também a uma altura de 10 m. Neste caso, o quociente entre as componentes LOS e NLOS foi de 15,8 dB e os resultados estão ilustrados nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12.

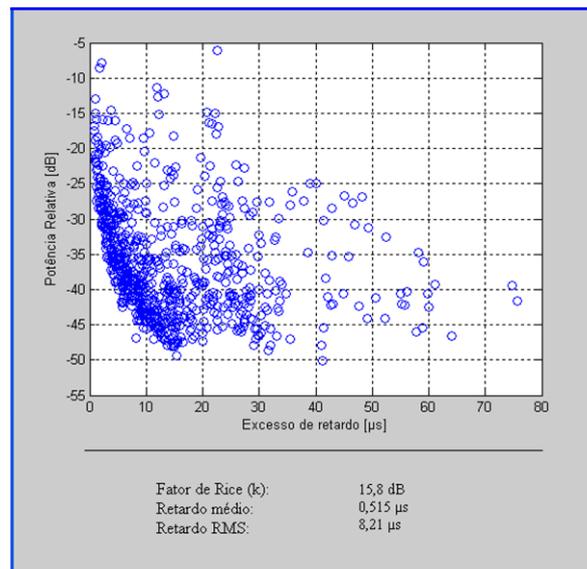


Figura 6.10 Resposta impulsional e parâmetros do canal – antena omnidirecional a 10 m de altura

As figuras 6.11 e 6.12 mostram a distribuição de potência e a distribuição acumulada da potência dos retardos da resposta impulsional da figura 6.10. É interessante observar que não existe uma correlação com a distância entre transmissor e receptor para os valores do retardo rms medidos, como pode ser observado no trabalho desenvolvido por Schmid [36]. Em vez disso, verifica-se uma relação com o ambiente nas vizinhanças do receptor e com a condição de visibilidade, isto é, com a quantidade dos espalhadores e refletores que possam estar originando as diferentes componentes de multipercurso.

Assim, pelas medições realizadas com a antena omnidirecional é possível verificar a associação do canal SFN com um canal em diversidade de espaço (*MISO*) ilustrado na figura 3.9, onde o sinal total recebido pela antena é dado pela soma dos sinais propagados através das componentes de canais presentes no sistema (*SISO*), e que neste caso, não se encontram suprimidos pelo diagrama de radiação da antena receptora omni.

Como pode ser observado, e era de se esperar, uma distribuição de potência mais abrangente é decorrente de um número maior de componentes de multipercursos incidentes que são captadas pela antena omnidirecional. É observada uma tendência do número de percursos aumentar nas medidas realizadas com a antena direcional, que pode ser atribuída ao fato desta possuir ganho superior ao da antena omni, ou seja, considerando a sensibilidade do receptor, componentes produzidas por espalhadores do canal que não ultrapassaram um nível de entrada mínimo de sinal requerido pelo receptor, não foram identificadas na recepção omni.

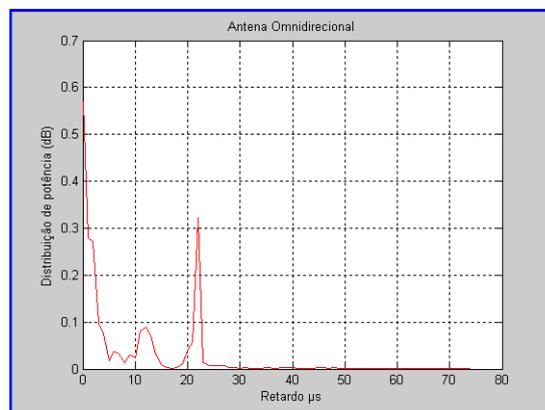


Figura 6.11 Distribuição de potência dos retardos no canal – antena omnidirecional a 10 m de altura

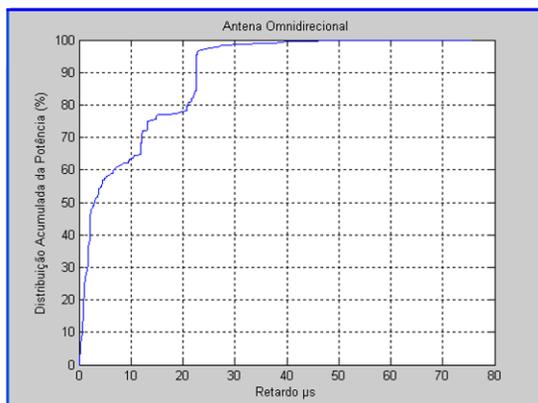


Figura 6.12 Distribuição cumulativa da potência dos retardos – antena omni

6.4.3 Parâmetros por Ponto de Medição

A tabela 6.1 apresenta o fator de Rice bem como os valores do retardo médio e valor rms de todos os perfis de retardos obtidos.

Tabela 6.1 Fator de Rice (k), valores médios de retardo e valor rms dos perfis de retardos medidos

Ponto de Medição	Tipo de Antena e apontamento	Retardo Médio TD [μs]	Delay Spread [μs]	K factor [dB]	Ponto de Medição	Tipo de Antena e apontamento	Retardo Médio TD [μs]	Delay Spread [μs]	K factor [dB]
Ponto 17	Omni	0,467	2,959	12,708	Ponto 22	Omni	0,031	1,857	21,387
Ponto 17	Diretiva - Sumaré	0,595	16,719	15,041	Ponto 22	Diretiva - Pena	0,041	2,802	18,228
Ponto 17	Diretiva - Pena	1,923	28,364	10,092	Ponto 22	Diretiva - Sumaré	0,033	1,722	18,764
Ponto 32	Omni	2,403	45,188	9,249	Ponto 18	Omni	0,080	5,665	17,029
Ponto 32	Diretiva - Sumaré	4,545	38,200	5,186	Ponto 18	Diretiva - Sumaré	0,037	3,847	20,409
Ponto 32	Diretiva - Pena	13,009	31,890	3,976	Ponto 18	Diretiva - Pena	0,086	6,017	17,617
Ponto 31	Diretiva - Pena	0,048	2,777	19,261	Ponto 16	Omni	0,014	1,075	24,700
Ponto 31	Diretiva - Sumaré	0,583	11,373	5,562	Ponto 16	Diretiva - Pena	9,628	45,688	1,739
Ponto 31	Omni	0,303	7,074	9,184	Ponto 16	Diretiva - Sumaré	3,275	38,091	7,862
Ponto 27	Omni	0,037	2,548	22,027	Ponto 14	Omni	0,173	10,119	18,082
Ponto 27	Diretiva - Pena	0,019	2,308	25,652	Ponto 14	Diretiva - Sumaré	0,018	0,499	20,097
Ponto 27	Diretiva - Sumaré	0,018	1,931	25,313	Ponto 14	Diretiva - Pena	0,024	1,827	24,246
Ponto 28	Omni	1,717	14,985	3,972	Ponto 39	Diretiva - Pena	0,024	1,827	24,246
Ponto 28	Diretiva - Sumaré	0,098	5,230	12,481	Ponto 39	Diretiva - Sumaré	0,030	2,052	23,516
Ponto 28	Diretiva - Pena	0,114	5,795	13,008	Ponto 39	Omni	0,047	3,020	22,408
Ponto 29	Omni	2,380	22,466	6,562	Ponto 26	Omni	0,691	17,520	13,904
Ponto 29	Diretiva - Pena	0,335	8,812	15,385	Ponto 26	Diretiva - Pena	0,388	15,041	13,793
Ponto 29	Diretiva - Sumaré	0,558	12,017	13,195	Ponto 26	Diretiva - Sumaré	1,663	26,404	10,403
Ponto 37	Omni	0,059	2,407	17,969	Ponto 24	Diretiva - Sumaré	0,118	1,131	4,978
Ponto 37	Diretiva - Pena	0,002	0,097	29,760	Ponto 24	Diretiva - Pena	0,634	1,533	2,978
Ponto 37	Diretiva - Sumaré	0,032	2,050	21,503	Ponto 24	Omni	0,446	1,421	3,136
Ponto 36	Omni	0,018	0,114	15,480	Ponto 12	Omni	0,042	2,978	18,434
Ponto 36	Diretiva - Sumaré	0,010	1,192	26,651	Ponto 12	Diretiva - Sumaré	0,040	2,644	20,946
Ponto 36	Diretiva - Pena	0,010	0,393	23,122	Ponto 12	Diretiva - Pena	0,015	1,338	24,939
Ponto 35	Omni	0,130	3,998	11,877	Ponto 40	Diretiva - Sumaré	0,045	1,353	13,979
Ponto 35	Diretiva - Sumaré	0,013	1,120	24,401	Ponto 40	Diretiva - Pena	0,048	1,008	12,186
Ponto 35	Diretiva - Pena	0,017	1,471	23,968	Ponto 06	Omni	0,111	2,268	18,905
Ponto 33	Omni	0,015	1,004	23,765	Ponto 06	Diretiva - Sumaré	0,029	4,700	20,755
Ponto 33	Diretiva - Pena	0,011	0,515	25,010	Ponto 06	Diretiva - Pena	6,650	66,565	4,936
Ponto 33	Diretiva - Sumaré	0,008	0,417	24,938	Ponto 13	Diretiva - Sumaré	0,021	1,485	20,728
Ponto 20	Omni	0,698	20,856	12,956	Ponto 13	Diretiva - Pena	0,042	4,708	23,785
Ponto 20	Diretiva - Sumaré	0,620	16,495	14,544	Ponto 13	Omni	0,028	3,323	20,931
Ponto 20	Diretiva - Pena	1,403	23,756	11,298	Ponto 02	Omni	0,086	6,265	11,510
Ponto 19	Omni	0,099	5,395	17,634	Ponto 02	Diretiva - Pena	0,633	24,554	5,941
Ponto 19	Diretiva - Sumaré	0,050	3,873	19,663	Ponto 02	Diretiva - Sumaré	0,034	0,425	13,627
Ponto 19	Diretiva - Pena	0,075	5,142	19,277	Ponto 03	Diretiva - Sumaré	0,143	11,629	15,643
Ponto 23	Omni	0,049	3,862	19,358	Ponto 03	Diretiva - Pena	0,006	0,327	25,709
Ponto 23	Diretiva - Sumaré	0,048	3,925	21,465	Ponto 03	Omni	0,084	2,408	18,357
Ponto 23	Diretiva - Pena	0,097	5,770	18,199	Ponto 04	Omni	0,072	2,947	17,099
Ponto 21	Omni	0,313	10,263	14,348	Ponto 04	Diretiva - Pena	0,007	0,312	26,234
Ponto 21	Diretiva - Sumaré	0,144	7,591	19,645	Ponto 04	Diretiva - Sumaré	0,741	11,119	8,236
Ponto 21	Diretiva - Pena	0,285	11,038	18,311	Ponto 07	Diretiva - Sumaré	0,237	13,261	17,917
Ponto 34	Omni	4,789	37,986	4,423	Ponto 07	Diretiva - Pena	0,029	1,744	23,934
Ponto 34	Diretiva - Sumaré	0,344	12,440	12,897	Ponto 07	Omni	0,059	2,257	18,619
Ponto 34	Diretiva - Pena	4,094	36,945	3,960	Ponto 08	Omni	0,017	2,058	28,009
					Ponto 08	Diretiva - Pena	0,015	1,197	24,929
					Ponto 08	Diretiva - Sumaré	0,335	11,204	14,540

6.5

Parâmetros de Dispersão do Canal SFN

A dispersão do retardo é geralmente caracterizada pelo excesso de retardo médio e pelo retardo RMS, que são definidos como o primeiro momento central e a raiz quadrada do segundo momento central do perfil de retardos, visto na seção 2.6.2.

Na prática, parâmetros como o valor médio e rms do retardo dependem da escolha de um limiar de ruído utilizado para processar medidas do perfil de retardo. O limiar de ruído é utilizado para diferenciar as componentes de multipercurso recebidas do ruído térmico. Logo, se o limiar for ajustado como sendo muito baixo, então o ruído também será processado como multipercurso, dando origem a um valor médio e rms do retardo que são artificialmente altos. Foram definidos limiares com 10, 15 e 20 dB abaixo do valor máximo do perfil. Assim, para cada caso, tudo abaixo dos limiares de -10, -15 e -20 dB deve ser considerado como ruído, conforme ilustrado na figura 6.13 a seguir.

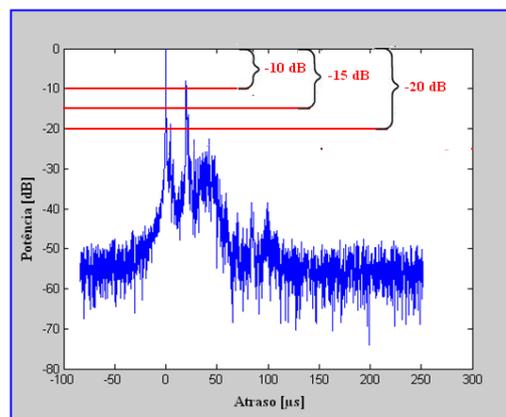


Figura 6.13 Limiares definidos para os perfis de retardos

Após o cálculo da média temporal ($\overline{|h(\tau, t)|^2}$) a partir das componentes de multipercurso válidas filtradas, o número de percursos é identificado através dos ecos que possuam as amplitudes mais significativas dentro de cada intervalo de retardo (*delay bins*) para um determinado limiar de ruído considerado. Como referência, a figura 6.14 apresenta o critério aplicado ao perfil de uma das fontes transmissoras da rede.

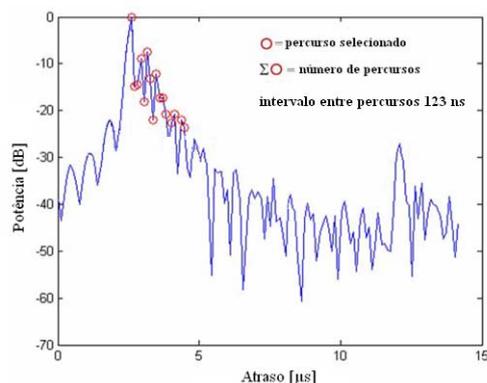


Figura 6.14 Determinação do número de percursos

Através de resultados obtidos em alguns trabalhos [28][29], é possível comparar os parâmetros de dispersão de retardo calculados em locais considerando um cenário de utilização de um único transmissor. Assim, podemos citar o documento MISBTVD (*Brazil E Estático*), onde são apresentadas algumas abordagens básicas, em caráter de revisão, sobre os principais parâmetros estatísticos que caracterizam um canal de comunicação móvel. Tais parâmetros têm influência direta no projeto do sistema MISBTVD [37].

A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos com a antena direcional considerando a recepção do sinal dos dois transmissores da SFN.

Tabela 6.2 Parâmetros de dispersão de retardo do canal SFN – antena direcional

Limiar (direcional)	Excesso de Retardo médio (μs)		Retardo RMS (μs)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
-20 dB	1,86	12,66	3,72	13,06
-15 dB	2,36	12,65	4,04	13,06
-10 dB	3,83	12,49	5,85	12,70

Tabela 6.3 Parâmetros de dispersão de retardo do canal SFN – antena omni

Limiar (omni)	Excesso de Retardo médio (μs)		Retardo RMS (μs)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
-20 dB	0,84	4,68	2,53	8,97
-15 dB	1,16	4,35	3,04	8,86
-10 dB	2,45	4,48	4,88	8,99

Pelas tabelas, é possível observar a dependência dos parâmetros de dispersão de retardo com os limiares analisados. Em geral, a diminuição do limiar leva a valores mais altos do excesso de retardo médio e do retardo RMS uma vez que mais componentes multipercurso serão consideradas, todavia esta tendência não foi acentuada para os limiares aqui analisados.

Além disso, elevados valores do excesso de retardo médio e do retardo RMS foram encontrados neste caso de transmissores distribuídos. O valor médio do retardo RMS no caso de um único transmissor é, normalmente, inferior a $1 \mu\text{s}$ [28][37], enquanto no caso de dois transmissores o retardo RMS aumentou em uma ordem de grandeza, para cerca de $13 \mu\text{s}$ no caso das medições com a antena direcional e $9 \mu\text{s}$ no caso das medições com a antena omni.

Uma observação importante com relação aos valores máximos obtidos para o retardo RMS, discriminados na tabela 6.2, refere-se à comparação com os parâmetros OFDM definidos para os sistemas de TV digital SBTVD, apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 OFDM em sistemas de TV Digital (SBTVD)

Descrição		Valor do sistema		
Número de segmento OFDM		13		
Largura de banda do segmento		428,57 kHz		
Modo		1	2	3
Portadora por segmento		108	216	432
Portadora total por canal 6MHz		1405	2809	5617
Espaçamento entre portadoras		3.968Hz	1.984 Hz	992 Hz
Comprimento do símbolo		252 μs	504 μs	1.008 μs
Intervalo de guarda μs	1/4	63	126	252
	1/8	31,5	63	126
	1/16	15,75	31,5	63t
	1/32	7,87	15,75	31,5t
Comprimento do símbolo por segmento μs	1/4	315	628	1260
	1/8	283,5	565	1134
	1/16	267,7	533,5	1071
	1/32	259,8	517,7	1039,5
Tipo de modulação		QPSK, 16QAM, 64QAM		
Símbolo por quadro		204		
Codificação interna		Codificação convolucional $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{7}{8}$		

Em aplicações móveis do sistema brasileiro de TV Digital (SBTVD), o intervalo de guarda do modo 1 prevê um comprimento do intervalo de guarda

adequado de 15,75 μs . Dado que para o sistema a diminuição do intervalo de guarda é uma das formas de se obter um ganho adicional de informação em número de bits, os dados medidos no ambiente da campanha de teste comprovaram uma capacidade extra de transmissão de 2,69 μs (15,75 - 13,06) μs , que é traduzida em termos de um decréscimo para o comprimento do intervalo de guarda mínimo exigido (15,75 μs) para o ambiente móvel.

6.6

Modelo do Canal para Recepção Fixa

Utilizando a metodologia apresentada na seção 6.2, avaliamos aqui o comportamento do canal SFN considerando os três limiares de ruído estabelecidos anteriormente, ou seja, -10, -15 e -20 dB. Os pontos de medições também procuraram abranger toda a região onde co-existiam os sinais transmitidos pelas duas fontes transmissoras da rede.

6.6.1

Descrição da Metodologia Aplicada

Conforme foi visto na seção 6.2, 279 perfis de retardo foram medidos durante as duas campanhas de medições, sendo que um terço destes perfis foram obtidos com uma antena omnidirecional fixa à altura de 10 metros. Para obtenção do modelo de canal, utilizamos o conceito apresentado na seção 2.4 onde tomando a média temporal ($\overline{|h(\tau, t)|^2}$) através de sucessivas medições realizadas ao longo do percurso com cada antena, o eixo dos retardos é discretizado em segmentos de retardos iguais [13]. Estes segmentos são conhecidos como intervalos de excesso de retardo (*Excess delay bins*) ou simplesmente *bins*.

Como foi visto na seção 2.4, o excesso de retardo é o retardo relativo da i -ésima componente de multipercurso, quando comparada à primeira componente. Nota-se no modelo que qualquer número de componentes de multipercursos recebidas dentro do i -ésimo intervalo de retardo (*bin*) são representadas através de uma única componente detectável, possuindo esta um retardo “ τ_i ”. Esta técnica de quantização dos intervalos de retardos (*delay bins*) determinará, no modelo de

canal, a resolução ou o nível de resolução do retardo. Nesta metodologia associamos esta resolução do retardo com a resolução do receptor utilizado nas medições, ou seja, $0,123 \mu\text{s}$. Assim, calcula-se uma média temporal ($\overline{|h(\tau, t)|^2}$) a partir das componentes de multipercursos válidas identificadas em cada perfil pelo processo de filtragem visto na seção 6.3, levando-se em conta o intervalo de resolução do receptor ($0,123 \mu\text{s}$) [13].

6.6.2

Modelos TDL

Uma representação mais precisa do canal é possível através de uma simulação que utilize uma linha densa de retardos incorporando, através de um modelo TDL, os efeitos provocados pelo canal [13], com um número limitado de elementos, cuja seleção é feita através do exame gráfico e identificação dos ecos com amplitudes mais significativas acima dos três limiares de ruído pré-definidos. Nota-se que os valores dos retardos encontrados são essenciais para uma simulação de canal mais precisa.

Comparando com os resultados obtidos na seção 6.4, a figura 6.15 ilustra três modelos de linha densa de retardos considerando limiares de ruído de -10, -15 e -20 dB para o ambiente das medições, utilizando uma antena direcional.

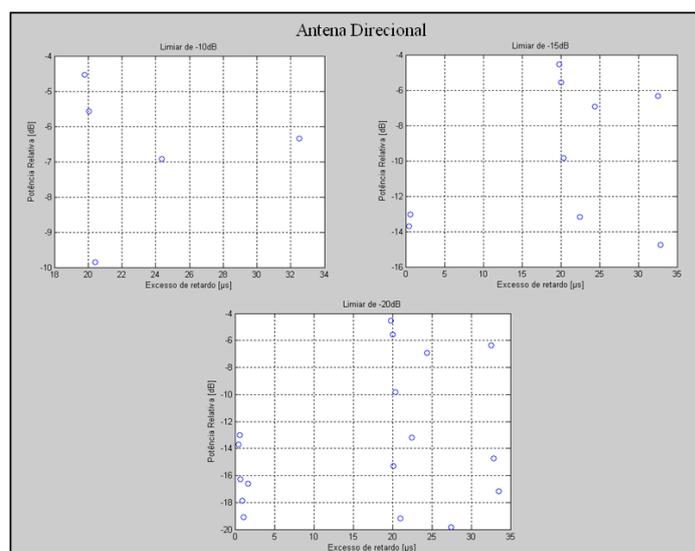


Figura 6.15 Modelos TDL para limiares de -10, -15 e -20 dB – antena direcional

Os valores do atraso e potência dos percursos para os modelos, considerando os limiares de -10, -15 e -20 dB, são apresentados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 Modelos de linhas densas de retardos para limiares de -10, -15 e -20 dB – antena direcional

Antena Direcional								
Limiar de - 10 dB			Limiar de - 15 dB			Limiar de - 20 dB		
Percurso nº	Atraso [µs]	Potência [dB]	Percurso nº	Atraso [µs]	Potência [dB]	Percurso nº	Atraso [µs]	Potência [dB]
1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	19,8	-4,5417	2	0,48	-13,712	2	0,48	-13,712
3	20,04	-5,5699	3	0,6	-13,02	3	0,6	-13,02
4	20,4	-9,8461	4	19,8	-4,5417	4	0,72	-16,29
5	24,36	-6,923	5	20,04	-5,5699	5	0,96	-17,885
6	32,52	-6,34	6	20,4	-9,8461	6	1,08	-19,065
			7	22,44	-13,1921	7	1,68	-16,5918
			8	24,36	-6,923	8	19,8	-4,5417
			9	32,52	-6,34	9	20,04	-5,5699
			10	32,88	-14,74	10	20,16	-15,2774
						11	20,4	-9,8461
						12	21	-19,1905
						13	22,44	-13,1921
						14	24,36	-6,923
						15	27,48	-19,8511
						16	32,52	-6,34
						17	32,88	-14,74
						18	33,48	-17,16

Para o ambiente de medições utilizando uma antena omni, os modelos mais representativos considerando os limiares de -10, -15 e -20 dB são mostrados na figura 6.16.

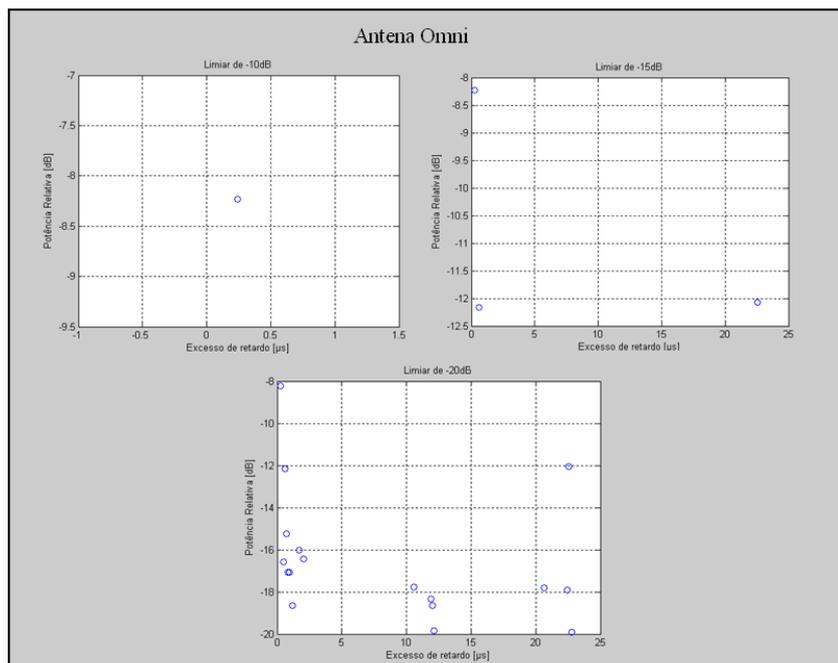


Figura 6.16 Modelos TDL para limiares de -10, -15 e -20 dB – antena omni

Neste caso, os valores do atraso e potência dos percursos, nos limiares de -10, -15 e -20 dB, são apresentados na tabela 6.6.

Tabela 6.6 Modelos de linhas densas de retardos para limiares de -10, -15 e -20 dB – antena omni

Antena Omni								
Limiar de - 10 dB			Limiar de - 15 dB			Limiar de - 20 dB		
Percurso nº	Atraso [µs]	Potência [dB]	Percurso nº	Atraso [µs]	Potência [dB]	Percurso nº	Atraso [µs]	Potência [dB]
1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	0,24	-8,23	2	0,24	-8,23	2	0,24	-8,23
			3	0,6	-12,1691	3	0,48	-16,59
			4	22,56	-12,0668	4	0,6	-12,1691
						5	0,72	-15,2548
						6	0,84	-17,0813
						7	0,96	-17,0729
						8	1,2	-18,6365
						9	1,68	-16,0142
						10	2,04	-16,4546
						11	10,56	-17,77
						12	11,88	-18,3272
						13	12	-18,6547
						14	12,12	-19,8584
						15	20,64	-17,8023
						16	22,44	-17,91
						17	22,56	-12,0668
						18	22,8	-19,9208

Analisando os modelos de canal das tabelas 6.5 e 6.6, onde três limiares de ruído foram considerados em medidas realizadas utilizando, respectivamente, uma antena direcional e omnidirecional, podemos chegar às seguintes conclusões:

Medidas realizadas com a antena direcional produziram modelos com número de percursos quase três vezes superiores em relação aos modelos obtidos com a antena omni, considerando os limiares de -10 e -15 dB. Para o limiar de -20 dB os números de percursos se igualaram.

A tendência do número de percursos aumentar nos modelos obtidos com a antena direcional pode ser atribuída ao fato desta possuir ganho superior ao ganho da omni. Considerando a sensibilidade do receptor, componentes produzidas por espalhadores do canal que não ultrapassaram um nível de entrada mínimo de sinal requerido pelo mesmo não foram identificadas na recepção omni.

Nos locais das medições não foram observados espalhadores potenciais atrás do receptor, na recepção omni, justificando-se assim um número menor de componentes recebidas.

No ambiente de medições, por não se tratar de uma região densamente urbanizada, não foram observados os longos retardos estruturais causados pela presença de outros transmissores da rede.

6.7

Estatísticas do Perfil de retardos

Nesta seção, serão apresentados os resultados referentes à caracterização do canal SFN para o ambiente onde as medidas foram realizadas na faixa de 563 MHz, correspondendo ao canal 29 UHF. Os resultados foram obtidos a partir do cálculo do retardo médio e valor de retardo rms apresentados na tabela 6.1, onde foram consideradas medidas com antena direcional e omni.

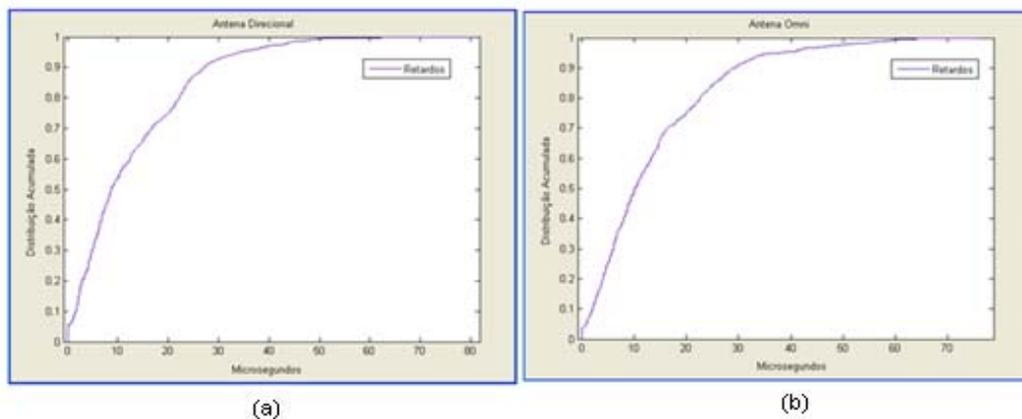


Figura 6.16 Distribuição acumulada dos retardos para todos os perfis: a) direcional e (b) omni

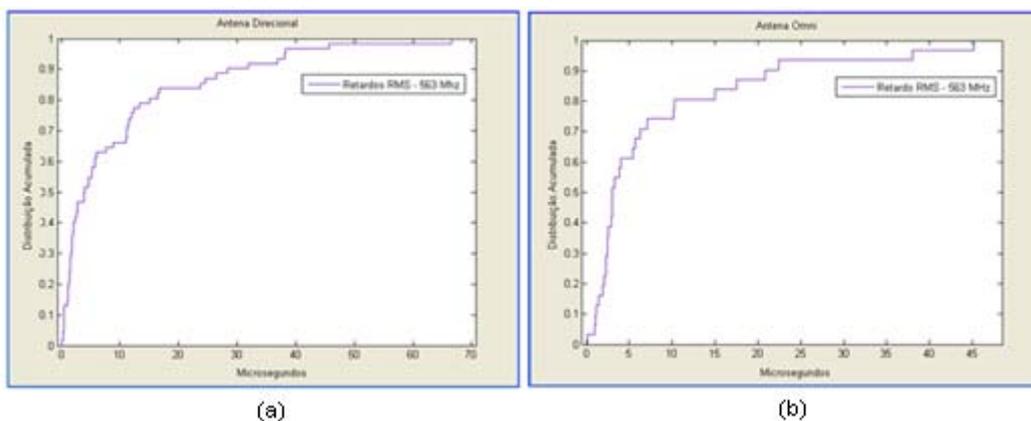


Figura 6.17 Distribuição acumulada dos valores do retardo rms para todos os perfis: (a) direcional e (b) omni

Podemos observar através dos gráficos das distribuições acumuladas das figuras 6.16 e 6.17, probabilidades ligeiramente mais altas já na ocorrência de componentes de multipercurso com pequenos retardos. Tal fato, contudo, não é tão pronunciado nas medições realizadas com a antena omni onde o ganho, a sensibilidade do receptor e o ambiente de medidas contribuíram desfavoravelmente na identificação das componentes refletidas.

6.7.1

Modelo Estatístico do Canal SFN

O modelo matemático utilizado foi originalmente proposto por Turin [13], para o canal rádio móvel urbano. O sinal transmitido é recebido como um somatório de L componentes com amplitude β e tempos de chegada τ , sendo dado por:

$$h(t) = \sum_{k=0}^{N(t)-1} \beta(t, \tau) e^{j\varphi_k(t, \tau)} \delta(t - \tau_k) \quad (6.3)$$

As estatísticas dos parâmetros do modelo do canal são determinadas através dos perfis de retardo medidos. Assumindo, à priori, que as fases do sinal são uniformemente distribuídas entre $[0, 2\pi)$ [14], o objetivo da análise é determinar o comportamento estatístico do número de componentes de multipercurso, seus tempos de chegada e a suas amplitudes relativas.

6.7.1.1

Número de Componentes de Multipercurso – Modelo de Poisson

Um modelo estatístico simples para a chegada das componentes de multipercurso é um processo Poisson [13][14].

Para um processo de Poisson, a probabilidade de receber l componentes nos N primeiros intervalos, $P_N(L = l)$, é dada por:

$$P_N(L = l) = \frac{\lambda^l}{l!} e^{-\lambda} \quad (6.4)$$

onde λ é a taxa média de chegada das componentes, dada por:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N r_i \quad (6.5)$$

Nesta equação r_i é a probabilidade de ocorrência de uma componente para o intervalo i , determinada dos dados empíricos.

Para a análise dos dados, os tempos de chegada em cada perfil medido foram divididos em intervalos de $0.123 \mu\text{s}$. O número (l) de componentes nos N primeiros intervalos de cada perfil de retardos medido foi obtido. A figura 6.18 apresenta o ajuste obtido para os dados com as medidas realizadas com as antenas direcional e omni. Utilizando o erro médio quadrático como critério de convergência, a distribuição de Poisson com parâmetro $\lambda = 18,3871$ para as medidas realizadas com a antena direcional e $\lambda = 19,5806$ para as medidas com a omni, foram as funções que chegaram aos melhores resultados nestes ajustes, produzindo os menores erros e representando estatisticamente os dados experimentais em cada caso. Em vista do ambiente onde foram realizadas as medidas, observar nos ajustes que os erros obtidos com a antena omni ainda são superiores aos obtidos com a antena direcional.

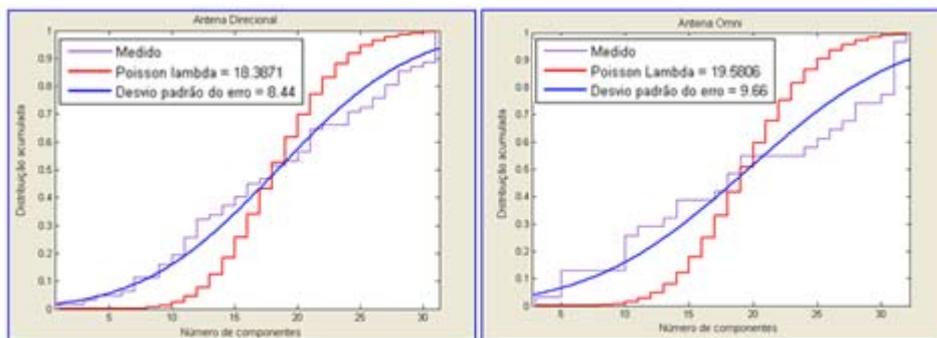


Figura 6.18 Ajuste do número de componentes de multipercurso – direcional e omni

6.7.1.2

Distribuição dos Tempos de Chegada

Seguindo o processo de modelagem do canal descrito no item 6.7.1, é necessária a definição do comportamento do tempo de chegada das componentes de multipercursos.

Para o canal sujeito a multipercursos, a sequência dos tempos de interchegada $\{x_i = t_i - t_{i-1}, i = 1, 2, \dots, L\}$ é assumida como sendo independente e uniformemente distribuída. Neste caso, o processo $\{N(t)\}, t \geq 0$ forma um processo de renovação [39]. O tempo de chegada entre a primeira e a segunda componente obedece a alguma distribuição $F_{x_1}(x_1)$ e densidade de probabilidade $f_{x_1}(x_1)$. $N(t)$ representa o número de sinais que chegam no tempo t . Para a sequência $\{X_{n=1}^L\}$, temos:

$$S_0 = 0, S_L = \sum_{i=1}^L X_i, L \geq 0 \quad (6.6)$$

$S_1=X_1$ é o tempo de chegada do primeiro sinal detectado. Na maioria dos casos é o raio direto. $S_2=X_1+X_2$ é o tempo de chegada da segunda componente que chega ao receptor e assim por diante.

Para construir a função $F_x(t)$ a partir dos dados experimentais, um procedimento de ajuste foi realizado, utilizando como critério de convergência o erro médio quadrático. Uma variedade de funções conhecidas foram consideradas para representar estatisticamente os dados experimentais, obtendo-se melhores resultados com a função de densidade de probabilidade exponencial, como proposto em [14].

A função de densidade de probabilidade exponencial é caracterizada por um único parâmetro (λ)

$$f(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (6.7)$$

A função de distribuição acumulada correspondente tem a seguinte forma:

$$F(x, \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (6.8)$$

A figura 6.19 apresenta o resultado dos ajustes da distribuição acumulada exponencial dos tempos de inter-chegada das componentes de multipercurso, com parâmetros $\lambda = 0.0022$ para as medidas realizadas com a antena direcional e $\lambda = 0.0030$, com a antena omni.

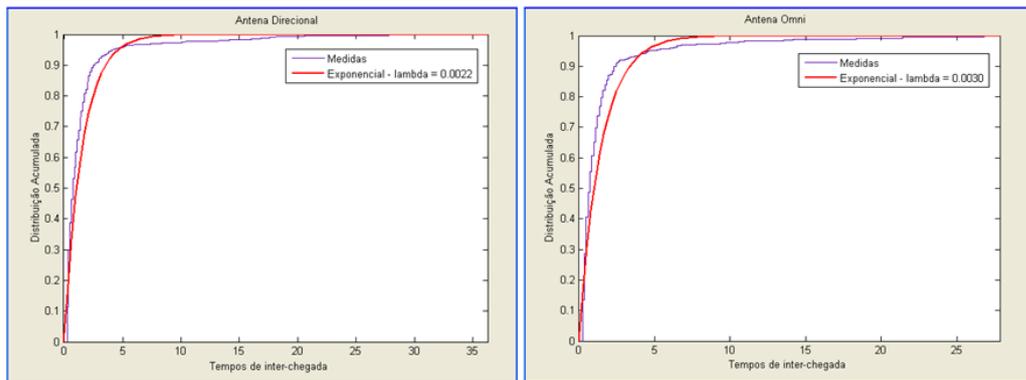


Figura 6.19 Ajuste do tempo de inter-chegada das componentes de multipercurso – direcional e omni

Nota-se que o cálculo da distribuição dos tempos de inter-chegada depende do pressuposto de que as componentes de chegada de multipercurso seguem um processo de Poisson. Em outras palavras, a variável aleatória que corresponde ao tempo de inter-chegada entre as sucessivas componentes de multipercurso que chegam no receptor segundo um processo de Poisson com $\lambda > 0$ será uma variável aleatória com distribuição exponencial com um parâmetro λ . Como era esperado, este parâmetro nas medições realizadas com a antena omni foi ligeiramente superior em relação ao mesmo parâmetro obtido com a antena direcional.

6.7.1.3

Distribuição das Amplitudes Relativas

Nesta seção, as funções densidade de probabilidade lognormal, Weibull, Nakagami e Rice, são consideradas como candidatas potenciais para o modelagem das amplitudes das componentes de multipercurso. Para a análise dos dados, os

valores das componentes foram transformadas ao seu valor em dB μ V e normalizados em relação ao valor máximo.

As tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os valores dos parâmetros ajustados das distribuições das amplitudes considerando as medições realizadas com a antena direcional e omni, respectivamente.

Tabela 6.7 Valores dos parâmetros das distribuições que serviram como ajuste das amplitudes das componentes de multipercurso – antena direcional

Antena direcional			
Distribuição		Parâmetros	
Log-normal	$f(x, \mu, \sigma) = -\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	$\mu = 4,274$	$\sigma = 0,108$
Weibull	$f(x, a, b) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{b}\right)^a$	$a = 75,58$	$b = 8,115$
Nakagami	$f(x, \mu, w) = 2 \left(\frac{\mu}{w}\right)^\mu \frac{1}{\Gamma(\mu)} x^{2\mu-1} \exp\left[-\frac{\mu}{w} x^2\right]$	$\mu = 20,778$	$w = 5280,48$
Rice	$f(x/s, \sigma) = I_0\left(\frac{x\sigma}{\sigma^2}\right) \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + s^2}{2\sigma^2}\right]$	$s = 71,759$	$\sigma = 8,097$

Tabela 6.8 Valores dos parâmetros das distribuições que serviram como ajuste das amplitudes das componentes de multipercurso – antena omni

Antena omni			
Distribuição		Parâmetros	
Log-normal	$f(x, \mu, \sigma) = -\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	$\mu = 4,260$	$\sigma = 0,111$
Weibull	$f(x, a, b) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{b}\right)^a$	$a = 75,073$	$b = 8,253$
Nakagami	$f(x, \mu, w) = 2 \left(\frac{\mu}{w}\right)^\mu \frac{1}{\Gamma(\mu)} x^{2\mu-1} \exp\left[-\frac{\mu}{w} x^2\right]$	$\mu = 19,588$	$w = 5.146,05$
Rice	$f(x/s, \sigma) = I_0\left(\frac{x\sigma}{\sigma^2}\right) \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + s^2}{2\sigma^2}\right]$	$s = 70,787$	$\sigma = 8,222$

A figura 6.20 apresenta o ajuste das curvas em relação aos dados medidos no canal 29. Nesta figura podemos observar que as distribuições lognormal, Weibull, Nakagami e Rice apresentam um bom ajuste em relação aos dados empíricos.

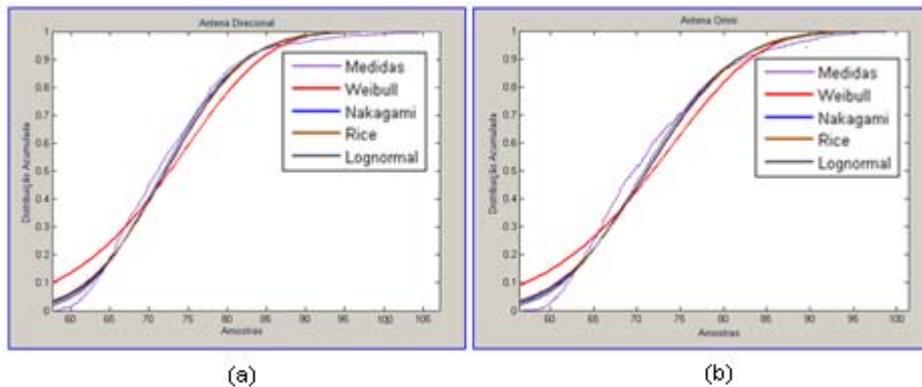


Figura 6.20 Distribuição acumulada das amplitudes relativas das componentes de multipercurso – antenas (a) direcional e (b) omni

Temos, nas distribuições da figura 6.20, uma relação de amplitudes entre as componentes em visibilidade e multipercurso para todos os pontos medidos durante a campanha. Nas medições realizadas com a antena direcional, observamos probabilidades ligeiramente mais altas já na ocorrência de um pequeno número de amostras de amplitudes. Cabe, aqui, ressaltar que esta ocorrência implica na efetiva existência de uma relação entre amplitudes, todavia, tal fato não foi tão pronunciado nas medições realizadas com a antena omni onde o ganho, a sensibilidade do receptor e o ambiente de medidas contribuíram desfavoravelmente na identificação das componentes refletidas. Outro ponto importante está ligado aos tradicionais sistemas de um transmissor. Neste caso, independente da antena que está sendo utilizada, espera-se um número inferior de componentes de multipercurso para um ambiente de medidas similar.

Através dos resultados obtidos em [22], que também considera a caracterização experimental de um canal de TV Digital na faixa de UHF, podemos ainda definir dentre as quatro funções densidade de probabilidade candidatas vistas nesta seção aquelas potencialmente mais adequadas para a modelagem das amplitudes relativas das componentes de multipercurso. Assim, comparando a média e o desvio padrão das funções densidade de probabilidade lognormal e Rice obtidas em [22], verificamos em nossas medidas, considerando estas mesmas distribuições, médias inferiores e desvios padrões superiores compatíveis com um canal SFN forçosamente mais dispersivo.