

7

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal a caracterização do canal de rádio propagação de banda larga na faixa UHF para sistemas de televisão digital usando redes SFN. Vimos que um canal SFN, na realidade, é um sistema em diversidade de *site* ou fonte, onde cada componente deste canal é representada pela propagação entre o *l*-ésimo transmissor da rede e o receptor. Foram utilizados resultados de duas campanhas de medições realizadas em condições externas na cidade do Rio de Janeiro, com o intuito de se obter a perda de propagação no percurso e a resposta impulsiva do canal para fins de cálculo de um modelo adequado para recepção estacionária.

As principais contribuições do trabalho, além do banco de dados de medidas obtido, foram:

- Caracterização da perda de propagação no percurso em função da distância considerando um caso de obstrução e atenuação adicional por difração em múltiplos obstáculos sofrida pelo sinal do transmissor principal (Sumaré), sua comparação com os valores previstos pela Recomendação ITU-R P.1546-3 e análise utilizando o parâmetro da perda de transmissão na SFN. Este foi introduzido a fim de ampliar o conceito da perda de percurso para o caso de uma SFN e confirmar o desempenho de um sistema de transmissão distribuído;
- Obtenção de perfis de retardo do canal, a distribuição de potência dos ecos e sua distribuição cumulativa, avaliando medições realizadas, respectivamente, com uma antena direcional e omnidirecional.
- Modelagem estatística do canal, feita através de uma linha densa de retardos, onde foram comparados, para a recepção fixa, sistemas com e sem diversidade de sites.

- Parâmetros do canal SFN tais como o fator de Rice K e os valores médio e rms do retardo, para diferentes pontos de recepção, localizados dentro da área de cobertura dos transmissores da rede.

Os principais resultados obtidos são resumidos e discutidos nas seções seguintes.

7.1

Perda de Propagação com a Distância

A perda de propagação foi analisada para os dados das duas campanhas de medições. Mesmo existindo mais de uma contribuição do sinal desejado no receptor, apenas o sinal proveniente do transmissor principal do Sumaré foi considerado para o cálculo do modelo de cobertura apropriado [1].

Vimos que apesar da topologia plana da região das medições e a conformidade entre os pontos medidos e previstos pela recomendação 1546, a atenuação adicional por difração em múltiplos obstáculos decorrente dos grandes obstáculos existentes para o transmissor do Sumaré explicam perdas de transmissão mais elevadas e inversamente proporcionais em relação à distância.

Portanto, para cada caso o coeficiente de decaimento com a distância foi calculado e as medidas foram ajustadas utilizando a equação

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL} + 10 * n * \log(d) \quad (7.1)$$

Os valores obtidos de PL e n são resumidos a seguir:

Tabela 7.1 Valores dos parâmetros de ajuste da perda média

	PL	n
LOS	72,19	0,6107

Contrariamente ao que é esperado vimos que a perda total de propagação apresenta uma tendência de redução com a distância dado que esta considera uma atenuação adicional por difração em múltiplos obstáculos que é decrescente com a distância visto na figura 5.4. Como era esperado, observamos que retirando esta

componente de atenuação por difração dos valores medidos a perda de propagação se torna crescente para pontos cada vez mais distantes do transmissor principal.

Vimos que o conceito da perda de percurso utilizado em sistemas de transmissão ponto a ponto não seria adequado no caso de uma SFN, pois a potência recebida não poderia ser definida caso existisse mais de um transmissor presente. Assim, para caracterizar a variação da intensidade do sinal na SFN um parâmetro de perda de transmissão na SFN foi introduzido a fim de ampliar o conceito de perda de percurso e verificar o desempenho que um sistema de transmissão distribuída é capaz de produzir.

Considerando as perdas mais elevadas verificadas nos pontos medidos mais próximos do *site* principal, ou seja, os pontos onde o sinal do Sumaré encontrava-se mais atenuado pelas obstruções, obtivemos uma diferença da perda de transmissão entre SFN e o cenário de um único transmissor (Sumaré) superior a 20 dB, para a probabilidade de 10%, todavia, para 90% de probabilidade a perda de transmissão foi diminuída em cerca de 5 dB.

Estes resultados confirmam o fato de que a SFN oferece múltiplas oportunidades para que o receptor possa receber o sinal transmitido pelas diversas fontes, mesmo se uma ou várias delas estejam bloqueadas. Neste caso, outros *sites* poderão encontrar um percurso de transmissão desobstruído para chegar ao receptor.

7.1.1

Parâmetros do Canal

Os parâmetros de dispersão do canal (excesso de retardo médio e retardo RMS) bem como o fator de Rice K foram calculados para cada uma das medidas obtidas nas duas campanhas de medições. Assim, a tabela 7.2 resume as variações obtidas destes parâmetros, segundo a metodologia de filtragem do sistema vista na seção 6.2.

Tabela 7.2 Parâmetros do canal obtidos no ambiente de medidas

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

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

Fator de Rice K [dB]	Transmissor	Direcional		Omni	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Sumaré		4,99	26,94	3,14	30,26
Pena		0,75	26,13	1,56	23,32

Os parâmetros de dispersão de retardo foram calculados para cada uma das medidas obtidas das campanhas de medições num cenário de recepção fixa utilizando antena direcional e omni, três limiares de ruído foram considerados, sendo ignoradas as componentes com amplitudes inferiores a estes limiares. Verificamos, também, através dos resultados obtidos em [28][29] uma comparação destes parâmetros de dispersão de retardo com aqueles produzidos pelo documento MISBTVD (*Brazil E* Estático) [37], onde é considerado um ambiente de propagação com um único transmissor.

Foi possível observar a dependência dos parâmetros de dispersão de retardo com o número de transmissores e os limiares analisados, onde um grande aumento nos valores destes parâmetros (excesso de retardo médio e retardo RMS) foram encontrados para o caso de transmissores distribuídos, ou seja, os valores médios do retardo RMS para o ambiente com um único transmissor, em média, são menores do que $0,86 \mu\text{s}$ [28][37], enquanto que para um ambiente com dois transmissores, o retardo RMS é aumentado em 15 vezes, chegando a $13,06 \mu\text{s}$.

Comparando os resultados obtidos na campanha de medições com resultados de outros ambientes de propagação, observamos, também, a dependência dos parâmetros de dispersão de retardo com o número de transmissores da rede e os limiares de ruído considerados.

Tabela 7.3 Comparação dos parâmetros obtidos em outros ambientes de propagação, para 1 e 2 transmissores

Referência [29] - 1 Tx	Excesso de Retardo [μs]		Retardo RMS [μs]	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
-20 dB	0,26	0,86	0,27	1,17
-15 dB	0,23	0,82	0,24	1,14
-10dB	0,18	0,50	0,19	0,68

Referência [29] - 2 Tx	Excesso de Retardo [μs]		Retardo RMS [μs]	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
-20 dB	9,91	30,87	8,24	19,98
-15 dB	9,76	27,51	8,13	19,91
-10dB	9,70	18,99	7,45	15,89

Referência [3] (-30 dB)	Excesso de Retardo [μs]	Retardo RMS [μs]
1 Tx	3,94	0,36
2 Tx	11,34	1,07
3 Tx	27,2	4,94

No caso de um transmissor, os valores médios dos retardos rms considerando todos os limiares para os ambientes de medidas apresentados nas referências [3] e [29], mostrados na tabela 7.3, são inferiores a $0,4 \mu\text{s}$ enquanto que no caso de dois transmissores, conforme discriminado na tabela 7.2, este valor é aumentado em 30 vezes.

Observa-se que a diminuição do limiar leva a valores maiores para o excesso de retardo e o retardo rms, em ambos os casos, uma vez que mais componentes de multipercurso são consideradas. Não obstante, podemos também observar resultados equivalentes e coerentes para o excesso de retardo médio máximo considerando o ambiente de medidas da tabela 7.2 com antena direcional e o ambiente de propagação da referência [29], apresentado na tabela 7.3.

Diferente do esperado, no caso das medidas realizadas com a antena omni a diminuição do limiar de ruído não se traduziu diretamente em valores mais altos para o excesso de retardo médio e retardo RMS uma vez que mais componentes multipercurso estariam sendo consideradas. Entretanto, levando-se em conta a sensibilidade do receptor, vimos que componentes produzidas por espalhadores do canal que não ultrapassaram um nível de entrada mínimo de sinal requerido na recepção não foram identificadas pelo receptor quando a antena omni foi utilizada. Isto pode ser observado comparando-se os parâmetros obtidos na tabela 7.2 com a antena omni com aqueles obtidos com a antena direcional.

7.1.2

Modelagem Estatística – Antenas Direcional e Omni

Neste trabalho, propomos a obtenção de um modelo de canal específico para recepção fixa e apropriado para uma real e constante expansão do número de transmissores de uma SFN, levando-de em conta que atualmente, a maioria dos modernos simuladores de canal lida com seis ou doze percursos. Deste modo, os modelos de canal abordados e comparados propõem uma linha densa de retardos, com base na identificação dos ecos que possuam as amplitudes mais significativas e que estejam acima de limiares de ruído pré-definidos. Nota-se que os valores dos retardos encontrados são essenciais para uma simulação de canal precisa.

Inicialmente, observamos que a densidade de potência da resposta impulsional do canal sondado se apresentou considerável para atrasos inferiores a $10 \mu\text{s}$ e que os multipercursos naturais são causados por espalhadores e refletores próximos ao receptor. Verificamos, entretanto, que é o movimento dos espalhadores e refletores mais próximos uma das principais causas do desvanecimento rápido observado. Vimos que, para um sistema de transmissão distribuído, o perfil de retardo poderia estar também caracterizado pela presença dos longos retardos causados pela existência de múltiplas fontes na rede, entretanto, dado o ambiente sondado e seu grau de urbanização, os retardos estruturais não foram identificados durante as campanhas de medição.

Quanto à metodologia utilizada para a obtenção dos modelos de canal apropriados, dois parâmetros foram analisados a partir dos dados obtidos nas medições: o limiar de ruído para -10, -15 e -20 dB e o número de percursos do modelo considerando medidas realizadas com antenas direcional e omni. Foi visto que, 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, ou seja, o limiar de ruído é utilizado para diferenciar as componentes de multipercurso recebidas do ruído térmico e se o limiar for ajustado como sendo muito baixo, o ruído também será processado como multipercurso, dando origem a um valor médio e rms do retardo que são artificialmente altos. Assim, para cada caso, tudo abaixo dos limiares de -10, -15 e -20 dB foi considerado como ruído na obtenção dos modelos.

Vimos que a metodologia utilizou a técnica de quantização dos intervalos de retardos que determina no modelo um nível de resolução de retardo associado ao nível de resolução do receptor utilizado nas medições. Logo, o número de percursos foi determinado com base no cálculo de uma média temporal realizado a partir das componentes de multipercurso válidas que foram identificadas considerando três limiares de ruído pré-definidos.

Assim, através das figuras 6.15 e 6.16 e, respectivamente, das tabelas 6.5 e 6.6, chegamos às seguintes conclusões com relação ao modelo:

- Medidas realizadas com antena direcional produziram modelo 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 receptor não foram identificadas na recepção omni.
- Nos locais de medições não foram observados espalhadores potenciais localizados atrás do receptor na recepção omni, justificando-se assim um número menor de componentes recebidas.
- No ambiente sondado, por não se tratar de uma região densamente urbanizada, não foram observados os longos retardos causados pela presença de outros transmissores da rede.

Deste modo, apesar dos modelos de canal vista na tabela 6.5 apresentarem um número superior de percursos, estes apresentam maior capacidade de lidar com a dispersão estrutural imposta pela presença de outros transmissores que não foram observadas nas medições. A tendência do número de percursos aumentar nos modelos obtidos com a antena direcional é atribuída ao fato desta possuir ganho superior ao ganho da antena omni.

Assim, justifica-se a metodologia do modelo de canal da seção 6.6 como aquela que bem aproxima uma situação real de recepção fixa e ao mesmo tempo é adequada para o cálculo de um modelo de canal apropriado, considerando um sistema com diversidade de fontes transmissoras e os modernos simuladores de canal atuais que suportam no máximo até doze percursos.

7.1.3

Caracterização Estatística do Canal SFN

O número de componentes de multipercurso foi definido como um processo Poisson onde os eventos são estatisticamente independentes e identicamente distribuídos. Através do *software* Matlab® os dados foram ajustados segundo uma distribuição de Poisson, que forneceu um bom ajuste em relação ao número de componentes de multipercurso. O intervalo de chegada das componentes de multipercurso foi ajustado utilizando a distribuição exponencial. Foi observado que o modelo exponencial pode ser utilizado no ajuste do intervalo de chegada das componentes. Para a distribuição de amplitudes, foram testadas varias distribuições de ajuste tais como Nakagami, log-normal, Rice e Weibull. Para as amplitudes relativas, apenas as distribuições Nakagami e Weibull apresentaram resultados menos compatíveis com um canal SFN. Tendo como objetivo uma simulação do canal SFN, a distribuição de Rice seria a distribuição ideal para o ajuste dos dados.

7.2

Considerações Finais

Com relação aos modelos apresentados neste trabalho, podemos acrescentar que, dependendo da localização do receptor, o usuário normalmente direciona sua antena para o *site* transmitindo o melhor sinal. Apesar de não colocar nulos na direção dos longos retardos como as técnicas de formatação de feixe propõem [32], a metodologia de filtragem apresentada na seção 6.2 pode ser considerada eficiente pelos seguintes fatores:

1) Conformidade com a recepção estacionária fixa, onde o direcionamento do feixe da antena receptora para a fonte com o melhor sinal torna o sistema mais robusto em relação aos efeitos de propagação decorrentes da dispersão temporal do canal SFN, melhorando, assim, a qualidade de recepção do sinal. Apesar de existirem resultados distintos entre as medições realizadas com as antenas direcional e omni, para efeito da caracterização de canal e projeto de receptores e sistemas mais apropriados, devem ser utilizados os parâmetros obtidos que sempre representem o pior caso.

2) Em conjunto com o modelo TDL atende de forma mais adequada a esperada expansão do número de fontes transmissoras das redes SFN, que por sua vez sugere o emprego de simuladores com um número cada vez maior de percursos.

7.3

Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando que os parâmetros obtidos na tabela 6.2 comprovaram que para aplicações móveis do sistema brasileiro de TV Digital (SBTVD) existe uma capacidade extra de transmissão de $2,69 \mu\text{s}$ ($15,75 - 13,06$) μs , atingível com a diminuição do intervalo de guarda mínimo exigido, sugere-se como trabalho futuro, a realização de novas campanhas de medições com o intuito de se ampliar a base de dados existente, incluindo mobilidade. Medidas do canal de banda larga em ambientes externos utilizando outras técnicas de sondagem podem ser realizadas para comparação com os dados obtidos neste trabalho.

Podem, ainda, ser utilizadas outras metodologias de modelagem, como a proposta por Tang e Yang [29]. Uma outra sugestão é o estudo das técnicas de formatação de feixe que requer um sistema de medições mais sofisticado [32].