



SILVIO RENATO MESSIAS DE CARVALHO

**CONTRIBUIÇÕES PARA MELHORIA NA CONFIABILIDADE DE REDES DE  
FREQUÊNCIA ÚNICA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE TV DIGITAL**

CAMPINAS  
2014





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC

SILVIO RENATO MESSIAS DE CARVALHO

## **CONTRIBUIÇÕES PARA MELHORIA NA CONFIABILIDADE DE REDES DE FREQUÊNCIA ÚNICA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE TV DIGITAL**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica na Área de Telecomunicações e Telemática.

*Orientador:* YUZO IANO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO SILVIO RENATO  
MESSIAS DE CARVALHO, E ORIENTADA PELO PROF.  
DR. YUZO IANO

---

CAMPINAS  
2014

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C253c Carvalho, Silvio Renato Messias de, 1960-  
Contribuições para melhoria na confiabilidade de redes de frequência única em sistemas de transmissão de TV digital / Silvio Renato Messias de Carvalho. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Yuzo Iano.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistema de transmissão digital. 2. Televisão digital. 3. Redes. 4. Confiabilidade. I. Iano, Yuzo, 1950-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Contributions to reliability improvement of single frequency networks for digital TV transmission system

**Palavras-chave em inglês:**

Digital transmission system

Digital television

Networks

Reliability

**Área de concentração:** Telecomunicações e Telemática

**Titulação:** Doutor em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Yuzo Iano [Orientador]

Osamu Saotome

Cristiano Akamine

Luiz César Martini

Lucas Heitzmann Gabrielli

**Data de defesa:** 10-07-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

**Candidato:** Sílvio Renato Messias de Carvalho

**Data da Defesa:** 10 de julho de 2014

**Título da Tese:** "Contribuições para Melhoria da Confiabilidade de Redes de Frequência Única em Sistemas de Transmissão de TV Digital"

Prof. Dr. Yuzo Iano (Presidente):



Prof. Dr. Osamu Saotome:



Prof. Dr. Cristiano Akamine:



Prof. Dr. Luiz César Martini:



Prof. Dr. Lucas Heitzmann Gabrieli:



### ERRATA DO TÍTULO:

"Contribuições para Melhoria na Confiabilidade de Redes de Frequência Única em Sistemas de Transmissão de TV Digital",



Prof. Dr. Pedro Luis Dias Peres  
Coordenador de Pós-Graduação  
PRECUNICAMP  
Matrícula: 20541-1



## ABSTRACT

This paper presents a new approach for the concept of single frequency networks, SFN. SFN broadcasting networks are so named because they use a single transmission channel or a single frequency. In this proposal the transmitters in a SFN network are connected together to form a real network that in turn connects to receptor sites called 'monitor point' strategically located within the coverage area. A broadcasting network that can dynamically adapt to changing channel conditions is useful because it increases network reliability. The proposed modification has advantages for television stations that have relay stations aiming to expand its coverage in a regional area with a network more controlled and secure. The concept can also be applied to gap- fillers and repeaters on channel. This work presents simulations of coverage to show variations in channel and network response.



## RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova proposta para o conceito de redes de frequência única, SFN. Redes de radiodifusão em SFN são assim chamadas por utilizarem um único canal de transmissão ou uma única frequência. Nesta proposta os transmissores de uma rede SFN são conectados formando uma rede real que por sua vez se interliga a pontos receptores chamados de pontos monitores estrategicamente localizados dentro da área de cobertura. Uma rede de radiodifusão que possa se adaptar dinamicamente às variações das condições do canal é útil porque aumenta a confiabilidade da rede. A modificação proposta apresenta vantagens para as emissoras de televisão que possuam redes de retransmissão destinadas a ampliar sua cobertura em uma área regional com várias cidades obtendo um ambiente de rede muito mais controlado e seguro. O conceito também pode ser aplicado a *gap-fillers* e repetidores de mesmo canal *on channel*. O trabalho apresenta simulações de cobertura para mostrar as variações do canal e a resposta da rede.



# Sumário

Capítulo 1- Introdução .....	1
1.1 Implantação de uma Rede SFN para radiodifusão de sons e imagens .....	3
1.2 Caracterização dos problemas da REDE SFN.....	4
Capítulo 2- Redes SFN.....	7
2.1 Modelo utilizado para rede SFN.....	8
2.2 O Fluxo BTS.....	15
2.3 Sincronismo do Fluxo BTS.....	16
2.4 Atrasos no sinal da rede SFN.....	17
2.5 Sincronização da Janela FFT.....	21
2.6 Estratégia do Sinal Mais Forte.....	22
2.7 Estratégia do Centro de Gravidade.....	24
2.8 Estratégia do Primeiro Sinal Acima do Limiar.....	25
2.9 Método "Quasi-Otimo" e Máxima Relação C/I.....	27
2.10 Ruído Impulsivo, Filtro LCF e Barreira Física.....	28
Capítulo 3- Repetitore e <i>Gap-Fillers</i> .....	32
3.1 Paradigma da Alta Potencia.....	32
3.2 Estratégias de Repetidores e <i>Gap-Fillers</i> .....	37
3.3 Polarização da Antenas Transmissora e Receptora.....	40
3.4 Recepção em áreas com Ecos.....	42
3.5 Ajustes de atrasos para o <i>Gap-Filler</i> .....	44
3.6 Ajustes com Pré-Ecos.....	44
Capítulo 4- Redes SFN Dinâmicas.....	47
4.1 Descrição das redes SFN para TV Digital Terrestre.....	47
4.2 O conceito de REDE.....	49
4.3 O Ambiente Controlado.....	51
4.4 Funcionamento do Ponto Monitor.....	53
4.5 Análise do Perfil de Atrasos.....	55
4.6 Comparação entre Unidade Móvel de Medida e o Ponto Monitor.....	59
4.7 Sinais Dessincronizados na Rede SFN.....	59
4.8 Melhoria das condições atmosféricas na Rede SFN.....	61
Capítulo 5- Resultados e Conclusões.....	62
5.1 Características do programa CRC-COVLAB .....	62
5.2 Simulação com a alteração do Intervalo de Guarda IG .....	70
5.3 Conclusões.....	75
5.4 Trabalhos Futuros.....	75
5.5 Artigos correlatos.....	75

Referências Bibliográficas.....77

*Dedico aos meus amados pais, em memória, minha família, esposa e filhos que são a luz de minha vida...*



*Agradeço a Deus.  
Agradeço ao meu orientador Yuzo Iano.  
Aos amigos e professores do Laboratório LCV-Unicamp.*

*À Financiadora de Estudos Especiais (FINEP).  
À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp).  
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).*

*Agradecimento especial ao programa CAPES RH-TVD  
que disponibilizou recursos e proporcionou o desenvolvimento  
de importantes pesquisas na área de TVD.*



# Lista de Ilustrações

Figura 1.1 Rede MFN .....	2
Figura 1.2 Rede SFN.....	2
Figura 1.3 Formação de dutos troposféricos que melhoram a propagação do sinal.....	5
Figura 1.4 Melhoria da propagação do sinal ultrapassando a distância de segurança de 67,2 km (IG).....	6
Figura 2.1 Resposta Impulsiva do meio de transmissão.....	8
Figura 2.2 Degradação abrupta do sinal digital.....	9
Figura 2.3 Degradação abrupta do sinal digital comparado ao sinal analógico .....	10
Figura 2.4 Comparação qualitativa entre o sinal analógico e o sinal digital .....	10
Figura 2.5 Ilustração de um receptor OFDM simplificado .....	12
Figura 2.6 Diferentes atrasos do sinal em sua propagação.....	14
Figura 2.7 Fluxo BTS simplificado .....	15
Figura 2.8 Exemplo de sincronismo dinâmico NEC Corp .....	17
Figura 2.9 Exemplo de sincronismo estático NEC Corp.....	17
Figura 2.10 Modelo de hipérboles para atrasos entre transmissores.....	18
Figura 2.11 Aproximações de hipérboles para atrasos constantes.....	19
Figura 2.12 Situação de transmissão conjunta através do modelo de hipérboles com posição dos transmissores maior que o intervalo de guarda .....	20
Figura 2.13 Situação de transmissão conjunta através do modelo de hipérboles com posição dos transmissores igual ao intervalo de guarda .....	21
Figura 2.14 Primeiro passo de sincronização .....	22
Figura 2.15 Sincronização no sinal mais forte.....	23
Figura 2.16 Sincronização no sinal 3, mais forte.....	23
Figura 2.17 Situação da resposta ao impulso dos sinais.....	24
Figura 2.18 Sincronização através do Método do Centro de Gravidade.....	25
Figura 2.19 Situação da resposta ao impulso dos sinais destacando o nível limiar.....	25
Figura 2.20 Sincronização do primeiro sinal acima do limiar (sinal 2).....	26
Figura 2.21 Diagramas de fluxo descrevendo a estratégia “QuasiÓtima” .....	27
Figura 2.22 LCF Filtro cancelador de elo de realimentação.....	29
Figura 2.23 Estrutura de torre de caixa de água utilizada como barreira física.....	30
Figura 2.24 Antena de Recepção utilizando barreira física.....	31
Figura 2.25 Antena de Transmissão utilizando barreira física.....	31
Figura 3.1 Comparação entre potências de um único transmissor e vários transmissores.....	33
Figura 3.2 Mancha de cobertura ilustrativa do sinal analógico.....	34
Figura 3.3 Mancha de cobertura ilustrativa do sinal digital... 35	
Figura 3.4 Detalhe de mancha de cobertura para o sinal analógico.....	36
Figura 3.5 Detalhe de mancha de cobertura para o sinal digital.....	36
Figura 3.6 Gap-Filler Básico.....	37
Figura 3.7 Repetidor de canal.....	37
Figura 3.8 Repetidor “Transposer” que pode operar com frequências diferentes.....	38

Fig.3.9 Sinal devido ao transmissor principal.....	39
Figura 3.10 Desnível do terreno em relação à instalação do <i>Gap-Filler</i> .....	40
Figura 3.11 Antena de Recepção do <i>Gap-Filler</i> em Polarização Vertical.....	41
Figura 3.12 Antena Transmissora em polarização horizontal.....	41
Figura 3.13 Sinal devido ao transmissor do <i>Gap-Filler</i> .....	42
Fig. 3.14 Sobreposição de sinal devido ao transmissor principal e o <i>Gap-Filler</i> .....	43
Figura 3.15 Sobreposição dos sinais do transmissor principal e <i>Gap-Filler</i> .....	43
Figura 3.16 Sinal útil do <i>Gap-Filler</i> .....	44
Figura 3.17 Sinal da constelação sem atuação do <i>Gap-Filler</i> .....	45
Fig 3.18 Nível do sinal sem atuação do <i>Gap-Filler</i> .....	45
Figura 3.19 Sinal da constelação com atuação do <i>Gap-Filler</i> .....	46
Figura 3.20 Nível do sinal com atuação do <i>Gap-Filler</i> .....	46
Figura 4.1- Redes SFN com Pontos Monitores.....	50
Figura 4.2 Instalação em ambiente controlado.....	52
Figura 4.3 Instalação simplificada de ambiente controlado.....	52
Figura 4.4 Acesso à Internet ou rede privada.....	53
Figura 4.5- Estratégia 'Quasi-Ótima' modificada.....	54
Figura 4.6 Perfil de atrasos do vários transmissores da rede SFN.....	55
Figura 4.7 Posição física dos transmissores e atrasos relativos.....	56
Figura 4.8 Fluxograma do Ponto Monitor.....	57
Figura 4.9 Blocação do sinal devido à interferência.....	57
Figura 4.10 Blocação do sinal devido à interferência.....	58
Figura 4.11 Situação após diminuição de potência de TX-4.....	58
Figura 4.12 Exemplo de dessincronização da rede.....	60
Figura 4.13 Propagação aumentada devido a ocorrência de dutos troposféricos.....	61
Figura 5.1 Simulação com dois transmissores no mesmo canal.....	63
Figura 5.2 Diagramas H e V das antenas transmissoras.....	64
Figura 5.3 Área de cobertura do transmissor de Campinas.....	66
Figura 5.4 Área de cobertura do transmissor de Limeira.....	66
Figura 5.5 Área de cobertura da SFN Sincronizada (Tx1+Tx2).....	67
Figura 5.6 Limeira fora do Intervalo de Guarda (adicionando atraso de 300 $\mu$ s).....	67
Figura 5.7 Situação Final com diminuição da potência de Campinas para 70W.....	68
Figura 5.8 Situação inicial da rede SFN sincronizada.....	68
Figura 5.9 Situação final da rede SFN propositalmente sem sincronismo.....	69
Figura 5.10 Interferência co-canal de um canal N.....	69
Figura 5.11 Ponto P1 sem possibilidade de recepção.....	71
Figura 5.12 Sinal de Limeira fora do intervalo de guarda.....	72
Figura 5.13 Ponto P1 interferido.....	72
Figura 5.14 Ponto P1 livre de interferência.....	73
Figura 5.15 Sinais dos transmissores dentro do intervalo de guarda.....	74
Figura 5.16 Sinal recebido em P1.....	74

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1- Intensidade do sinal em escala de cores das Figuras 3.2 e 3.3.....	34
Tabela 4.1 Inicialização do Ponto Monitor.....	55
Tabela 5.1 Intervalo de guarda e distância.....	65
Tabela 5.2 Distância e atrasos.....	71



## Lista de abreviaturas

SFN- *Single Frequency Network*  
TV- Sistema de transmissão de sons e imagens de televisão  
MFN- *Multiple Frequency Network*  
VHF- *Very High Frequency*  
UHF- *Ultra High Frequency*  
4G- Sistema de comunicação sem fio de quarta geração  
LTE- *Long Term Evolution*  
PNBL- Plano Nacional de Banda Larga  
TV 4K- Sistema de transmissão de TV de 4000 linhas  
TV 8K- Sistema de transmissão de TV de 8000 linhas  
TV 3D- Sistema de transmissão de TV de três dimensões  
ANATEL- Agencia Nacional de Telecomunicações  
HD- *High Definition*- alta definição  
SD- *Standard Definition*- definição padrão  
TDT- Televisão Digital Terrestre  
OFDM- *Orthogonal Frequency Division Multiplex*  
COFDM- *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*  
DAB- *Digital Audio Broadcasting*-  
DVB-T- *Digital Video Broadcasting-Terrestrial*  
ISDB-T- *Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*  
ATSC- *Advanced Television System Committee*  
AWGN- Ruído Gaussiano Branco Aditivo  
LCF- *Loop Canceller Filter*  
BTS- *Broadcast Transport Streaming*  
WSSUS- *Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering*  
MPEG- *Motion Pictures Expert Group*  
TS- *Transport Streaming*  
IFFT- *Inverse Fast Fourier Transform*  
TMCC- Controle de Configuração de Transmissão e Multiplexação  
IIP- ISDB-t *Information Packet*  
GPS- *Global Positioning System*  
MCT- *Master Control Terminal*  
TTL- *Tower-Tower Link*  
STL- *Studio-Tower Link*  
TX- Transmissor  
RX- Receptor  
MOD- Modulador  
DTX- Transmissor Digital  
DVB-S/S2- *Digital Video Broadcasting- Sattelite*

IG- Intervalo de Guarda  
C/I- *Carrier / Interference ratio*  
RI- Resposta ao Impulso  
ERP- *Effective Radiated Power*  
VSB-*Vestigial Side Band*  
D/U- *Desired / Undesired ratio signal*  
PBTVD- Plano Básico de TV Digital  
FI- Frequência Intermediária  
CAG- Controle Automático de Ganho  
MER- *Modulation Error Rate*  
MBSFN- *Multicast-Broadcast Single-Frequency Network*  
DSFN- *Dynamic SFN*  
STB-Scan - Projeto de Pesquisa ( Escaneamento utilizando Set-up Box)  
SNMP- *Simple Network Management Protocol*  
ID- Identificação  
CRC-COVLAB- Software de predição de cobertura

# Capítulo 1

## *INTRODUÇÃO*

Hoje o Brasil convive com dois sistemas de televisão aberta terrestre, o sistema antigo, analógico que possivelmente será desligado conforme o Decreto 8.061 que ajusta o prazo de desligamento do sinal analógico entre janeiro de 2015 e dezembro de 2018, [1] e o novo sistema digital.

Com o advento do sistema digital surgiram novas técnicas para distribuição de conteúdo, dentre elas, destacam-se as técnicas de distribuição utilizando-se somente um canal. Estas técnicas são chamadas de redes SFN (*Single Frequency Network*). Neste trabalho entende-se o termo canalização como o ato de atribuir bandas de frequência, formando o canal, para a realização do serviço.

As técnicas de redes SFN são utilizadas para radiodifusão de sons e imagens em todo o mundo. Por ser uma técnica que apresenta ganhos na utilização racional do espectro eletromagnético, vem sendo cada vez mais utilizada e assim é natural sua evolução na solução dos problemas que surgem em sua implantação prática.

No Brasil a utilização da técnica de redes SFN na radiodifusão de sons e imagens surgiu com o advento da TV digital. As primeiras transmissões da TV digital começaram em 2007 e as primeiras implantações de redes SFN começaram em 2008/2009 [2]. A distribuição via terrestre, do conteúdo da programação da TV aberta brasileira analógica é feita a partir da retransmissão deste conteúdo em diferentes canais. Este sistema é conhecido como MFN (*Multiple Frequency Network*). Para que sejam cumpridas as exigências de cobertura do serviço de uma determinada área, que pode abranger várias cidades como mostra a Figura 1.1, o conteúdo da TV analógica de uma determinada emissora é transmitido e repetido utilizando vários canais da faixa de VHF e UHF.

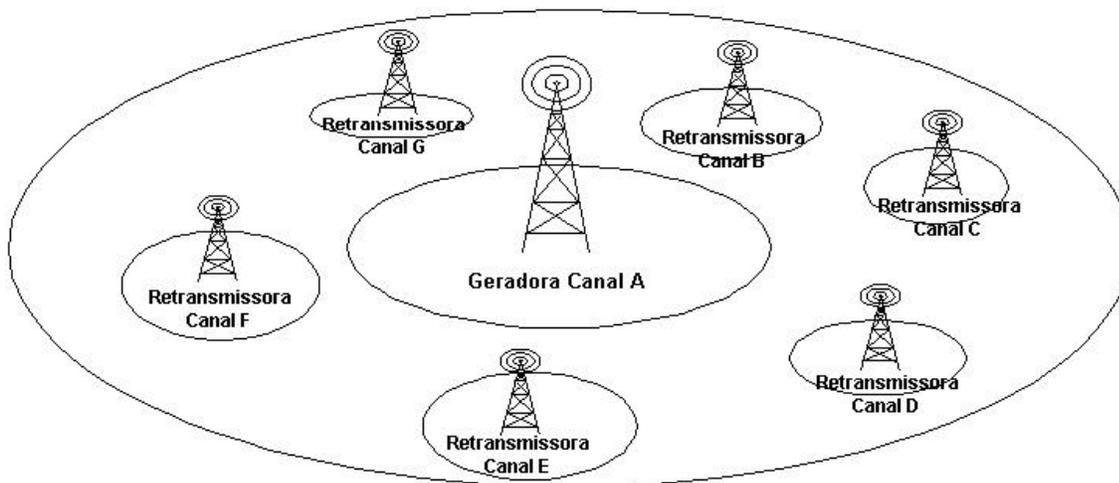


Figura 1.1 Rede MFN

O sinal digital sendo em MFN ou SFN deve alcançar a mesma área de cobertura do antigo sinal analógico que é somente em MFN. Em termos de economia de espectro a implantação da técnica de redes SFN [3], Figura 1.2, tornou-se ainda mais útil no atual cenário em que novas tecnologias de banda larga, 4G e LTE [4], começam a utilizar faixas de frequências que antes eram destinadas para a radiodifusão de canais de televisão. Estas decisões pretendem atender aos anseios governamentais do PNBL (Plano Nacional de Banda Larga).

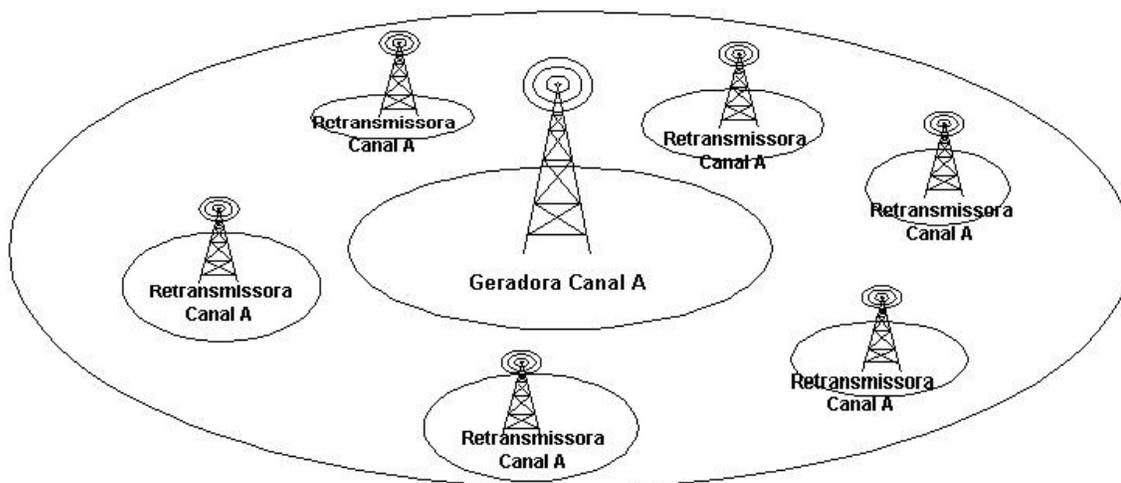


Figura 1.2 Rede SFN

A dinâmica de implantação destes novos serviços LTE obriga a radiodifusão encontrar novas soluções para retransmitir seus sinais visto que a disponibilidade de canais tende a se tornar cada vez mais escassa. A evolução das normas utilizadas pelos órgãos reguladores tende a refletir o progresso

tecnológico em busca de uma maior eficiência de utilização do espectro eletromagnético. Novas técnicas devem surgir para suprir a necessidade de uma maior banda necessária para a evolução da TV digital como a TV em super alta definição conhecida como TV 4K, a ultra-alta definição, conhecida como TV 8K e a TV tridimensional conhecida como TV 3D, sendo estes alguns exemplos recentes.

### **1.1 Implantação de uma Rede SFN para radiodifusão de sons e imagens.**

É importante explicar que uma rede SFN na radiodifusão da TV aberta (sistema de transmissão via 'ar', livre e gratuita) tem o objetivo de retransmitir o conteúdo principal gerado nos estúdios de uma emissora de televisão. Para a implantação de uma rede SFN vários parâmetros devem ser conhecidos previamente e posteriormente confirmados através de testes realizados em campo. A falta de ferramentas que auxiliem nessa implantação de forma rápida e econômica desestimula a utilização desta nova tecnologia como técnica de implantação da TV digital visto que no Brasil se trata de uma técnica nunca antes utilizada na radiodifusão de sons e imagens. O antigo sistema analógico em rede MFN é formado por conjunto de transmissores independentes em canais diferentes transmitindo o mesmo conteúdo, ou seja, o conteúdo definia uma rede de TV brasileira. Outro obstáculo à implantação de uma rede SFN é a localização dos transmissores já previamente existentes devido ao legado analógico, sendo que quase sempre não estão localizados no melhor ponto para o funcionamento ideal de uma rede SFN. Outro legado negativo é a potência de trabalho destes transmissores que geralmente é alta se comparada com a potência necessária para o ideal funcionamento de uma rede SFN. Embora a canalização digital oficial regulamentada pela ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicações) especifique potências menores para o plano de canalização digital, deve-se tomar cuidado ao operar com a máxima potência permitida se o objetivo for trabalhar com redes SFN.

As redes SFN são indicadas para utilização em regiões com espectro congestionado, mas em contrapartida exigem projetos mais elaborados de sistemas radiantes, análise apurada dos atrasos envolvidos e uma relação entre intervalo de guarda e taxa útil adequada ao serviço que se deseja executar como HD (alta definição), SD (definição padrão) ou multi-programação que não permitido pela atual legislação brasileira.

Como já mencionado, o conceito de rede para a radiodifusão está relacionado ao seu conteúdo de programação, e atualmente na transmissão digital com as redes SFN passa a ser relacionada também a

canalização. O conceito de rede mais abrangente utilizado em informática e telemática com pontos de acesso, nós, e bidirecionalidade não se aplica ao mundo da radiodifusão de televisão.

Este trabalho propõe a ideia de uma rede SFN que responda a determinadas variações do meio de transmissão, com a troca de dados entre os transmissores e seus Pontos Monitores, atuando dinamicamente nos parâmetros da rede. A rede também pode ser integrada a repetidores e *Gap-Fillers* [5]. Este trabalho também aplica o conceito de ambiente controlado para os Pontos Monitores. Redes SFN extensas podem apresentar problemas em suas bordas devido às variações das condições de propagação podendo em alguns casos interromper o serviço como ocorreu em Portugal [6]. Assim sendo este trabalho propõe uma estratégia dinâmica para que a rede continue funcionando mesmo que as condições de propagação variem dentro de determinados limites. Outra justificativa de se propor uma rede conectada bidirecional é o serviço móvel oferecido pela TV digital que deve incrementar receitas e deixar a TV aberta mais competitiva em relação a outras mídias. O serviço móvel apresenta similaridades com o sistema de telefonia celular com respeito aos problemas de recepção e neste ponto uma rede dinâmica se mostra útil se forem utilizadas técnicas de formação de feixes, *beam forming*, por exemplo.

## 1.2 Caracterização dos problemas da REDE SFN

O maior problema que pode ocorrer em uma região que é coberta por uma rede SFN é a perda de sincronismo. Isto pode ocorrer por três problemas básicos:

- Perda do sincronismo temporal, quando algum transmissor da rede perde o sincronismo temporal ou sua referência de tempo.
- Perda do sincronismo de frequência, quando algum transmissor da rede começa a transmitir fora da frequência central do canal.
- Perda do sincronismo de símbolo, quando um transmissor da rede transmite um símbolo diferente dos outros transmissores.

Estas perdas de sincronismo aparecem na rede como um sinal interferente aumentando muito a taxa de erros no receptor causando seu imediato apagamento quando o limiar de erros é alcançado. Para todos os problemas acima citados existem soluções amplamente documentadas na literatura.

Porém efeitos climáticos também interferem no funcionamento da rede, sendo um caso real o ocorrido em Portugal com sua TDT, onde estas falhas levaram à interrupção do serviço em determinadas áreas. As falhas aconteceram devido a um fenômeno natural muito conhecido, a formação de dutos na troposfera e ao fato da rede portuguesa operar em rede de frequência única em todo o território continental, rede SFN. Com a formação dos dutos troposféricos o sinal proveniente de um transmissor da rede SFN que esteja fora do intervalo de guarda acaba atingindo a área de cobertura de outro transmissor da rede e, portanto chega como um sinal interferente podendo interromper o serviço. A Figura 1.3 mostra a formação de áreas onde a ocorrência dos dutos é mais provável de acontecer [7] e a Figura 1.4 mostra a distância que ultrapassa o intervalo de guarda causando a interferência. Por fim, pode-se querer intencionalmente que se transmitam símbolos diferentes em determinado intervalo de tempo, por exemplo, a transmissão de um conteúdo diferente para um determinado transmissor da rede.

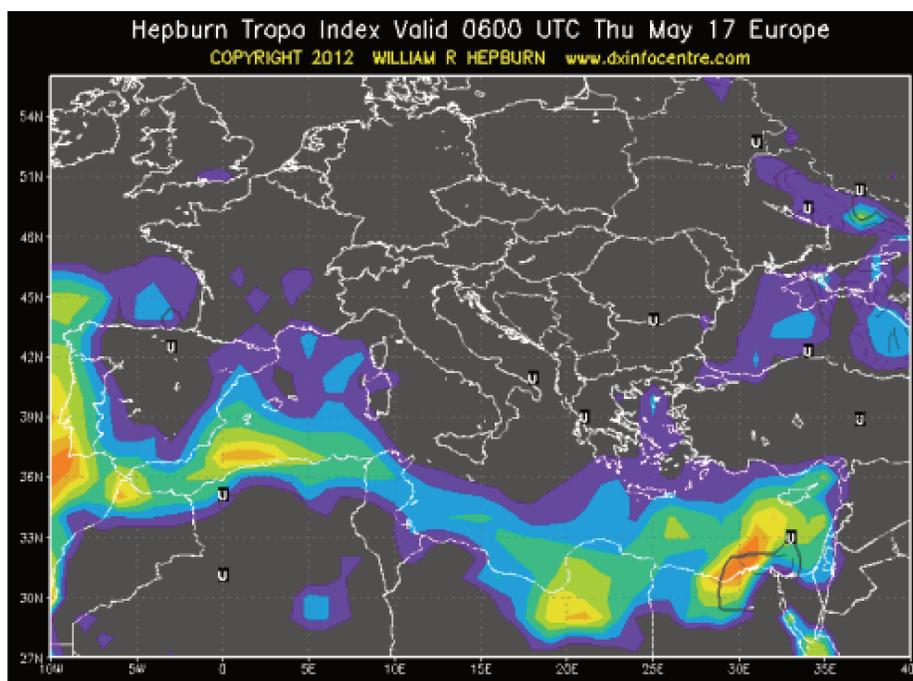


Figura 1.3 Formação de dutos troposféricos que melhoram a propagação do sinal.

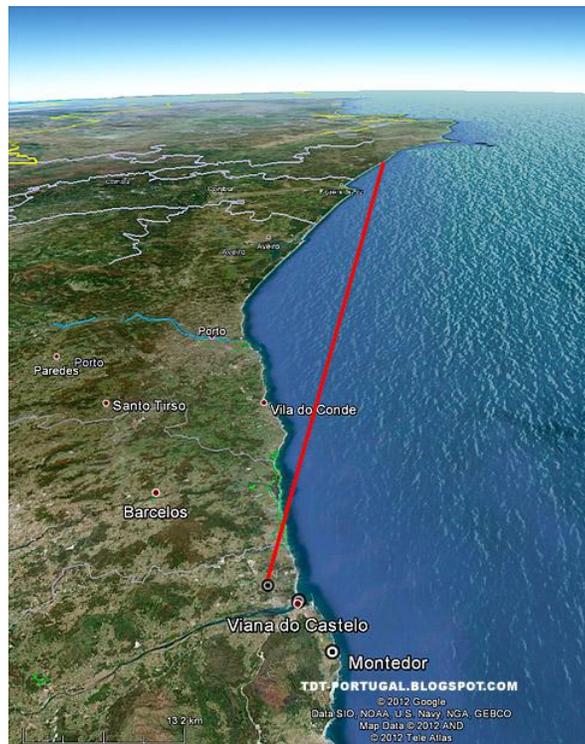


Figura 1.4 Melhoria da propagação do sinal ultrapassando a distância de segurança de 67,2 km (IG).

O texto abaixo é de autoria do Engenheiro de Telecomunicações Eliseu Macedo [6] e comenta o caso ocorrido em Portugal com a implantação da TV Digital naquele momento.

*"Podemos constatar como Portugal, sobretudo a costa litoral, é muito afetada por propagação melhorada. Isto provocou falhas generalizadas de recepção TDT, pois a distância de segurança de 67.2 km foi largamente ultrapassada pelos emissores TDT nacionais."*

A proposta deste trabalho seria uma possível solução para o caso de Portugal sendo esperado que a rede responda a este efeito ajustando seus parâmetros para evitar as áreas de interferência e as falhas de recepção afetando áreas de cobertura importantes.

# Capítulo 2

## ***REDES SFN***

Um novo significado de rede em radiodifusão vem sendo exaustivamente estudado com o surgimento das modulações OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) e COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*), [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Basicamente a definição deste novo sistema consiste em montar a rede de radiodifusão utilizando um único canal de frequência para a cobertura de uma área geográfica. De [15] a Rede de Frequência Única é composta por dois ou mais transmissores que operam na mesma frequência, irradiam o mesmo programa, no mesmo instante de tempo. Este novo tipo de rede de radiodifusão é chamado de Rede de Frequência Única ou SFN (*Single Frequency Network*). Para serviços de radiodifusão onde são necessários canais com larga faixa de frequências como, por exemplo, a TV terrestre, este sistema oferece vantagens significativas evitando o intenso uso de frequências, possibilitando um uso muito mais racional do espectro eletromagnético de frequências.

Dois fatos são fundamentais para o planejamento de uma Rede de Frequência Única. O primeiro deles é o conhecimento de como o sistema lidará com a interferência intersimbólica, que no caso da TV digital baseada em COFDM, é controlada com o uso do intervalo de guarda. O segundo ponto é a estratégia de sincronização dos receptores, mais difícil para sistemas baseados em COFDM. A área de cobertura será eficazmente alcançada se estes dois fatos forem adequadamente tratados [15]. Este conceito de rede é usado em sistemas já consagrados como o DAB (*Digital Audio Broadcasting*), DVB-T (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial*) [16], [17], ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial*), [18] e também em sistemas de comunicações 2G, 3G, 4G e LTE. Entre diversos países que utilizam redes SFN para radiodifusão cita-se Reino Unido [19], Espanha [20], Portugal e Japão. Os Estados Unidos da América utilizando o sistema ATSC (*Advanced Television System Committee*) padronizou a transmissão distribuída em analogia às redes SFN, *ATSC standard for SFN, A/110*.

## 2.1 Modelo utilizado para rede SFN

Neste trabalho será considerado sinal de eco, ou simplesmente eco, o sinal que chega a antena com um determinado atraso em relação ao sinal principal. Como esta representação é relativa podemos ter a figura do pré-eco, sinal que chega antes do sinal principal, porém isto é apenas uma convenção especificada pelo simulador ou aparelho de medida de atrasos. Um esboço de uma resposta impulsiva do meio de transmissão é mostrado na Figura 2.1 também chamado de Perfil de Atrasos ou *Delay Profile*.

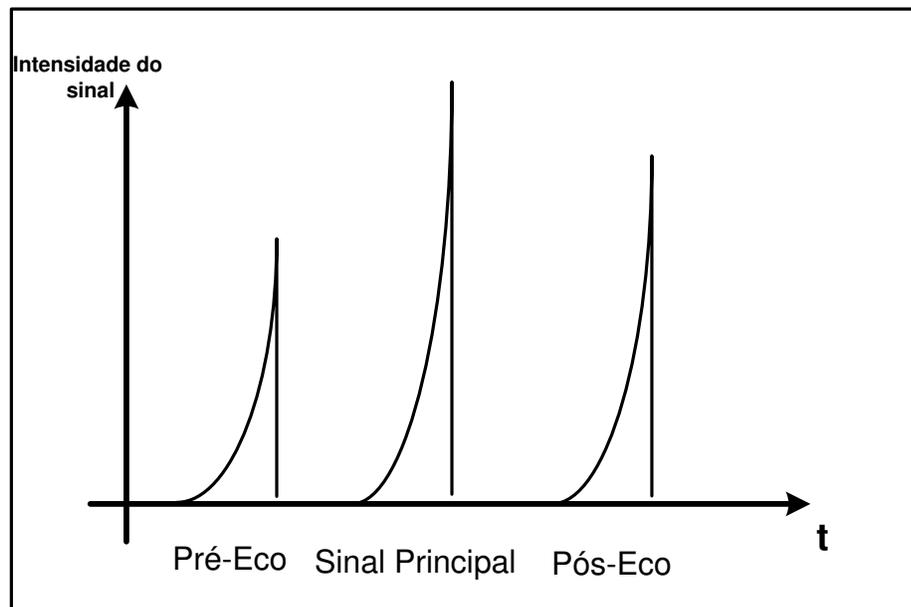


Figura 2.1 Resposta Impulsiva do meio de transmissão

Os modelos adotados para a caracterização dos sinais componentes de um sistema SFN necessitam de parâmetros muito mais restritivos, sendo que os primeiros modelos foram adotados pelo sistema DAB europeu, onde os autores concluíram que o sistema capaz de prover uma boa qualidade de serviço necessita estar mais que 90% do tempo com ótima recepção dentro da área de operação da rede [21]. Tal restrição se deve ao fato de o sinal digital sofrer degradação muito abrupta, devido às condições de

propagação, ao contrário do sistema analógico que sofre a mesma degradação de forma muito mais suave.

Na Figura 2.2 conhecida como “Efeito *Cliff*” a situação descrita é esboçada em um gráfico mostrando a degradação rápida do sinal digital quando comparado ao sinal analógico. Na Figura 2.3 está realçada as áreas de cobertura de ambos os sinais mostrando que a degradação suave do sinal analógico permite uma maior área de cobertura com um sinal fraco que embora apresentando problemas como chuviscos, ainda pode ser assistido. Nesta mesma área o sinal equivalente digital já não é mais útil para ser assistido. A Figura 2.4 de [22] esboça a mesma característica do ponto de vista do telespectador. É interessante notar a presença de som mesmo com a imagem ruim o que deixa o programa ainda possível de ser assistido.

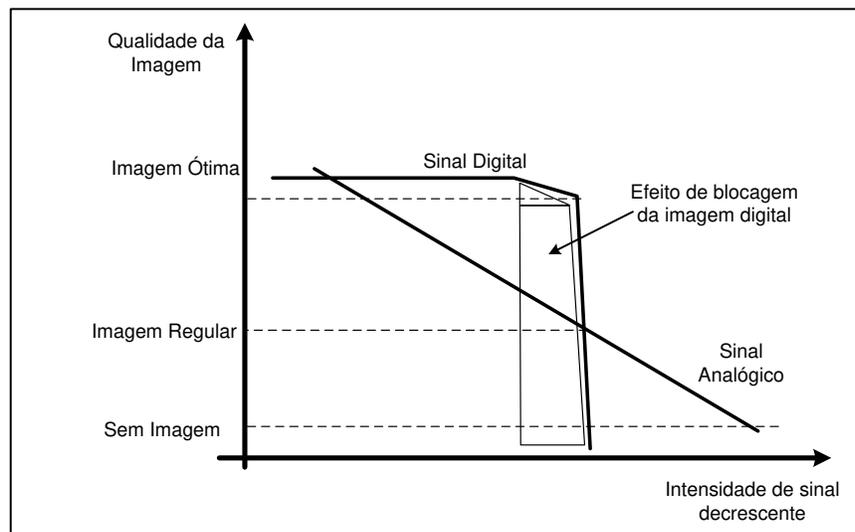


Figura 2.2 Degradação abrupta do sinal digital

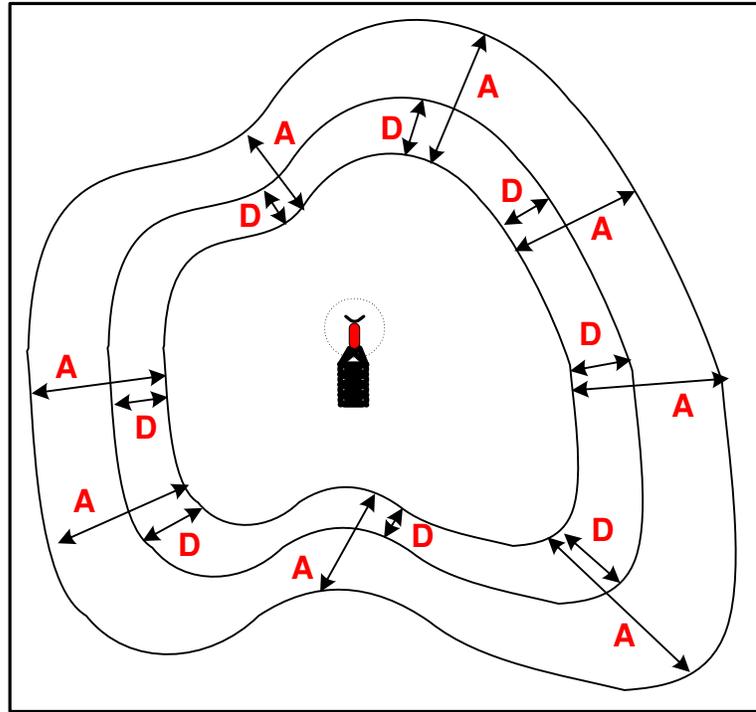


Figura 2.3 Degradação abrupta do sinal digital comparado ao sinal analógico.

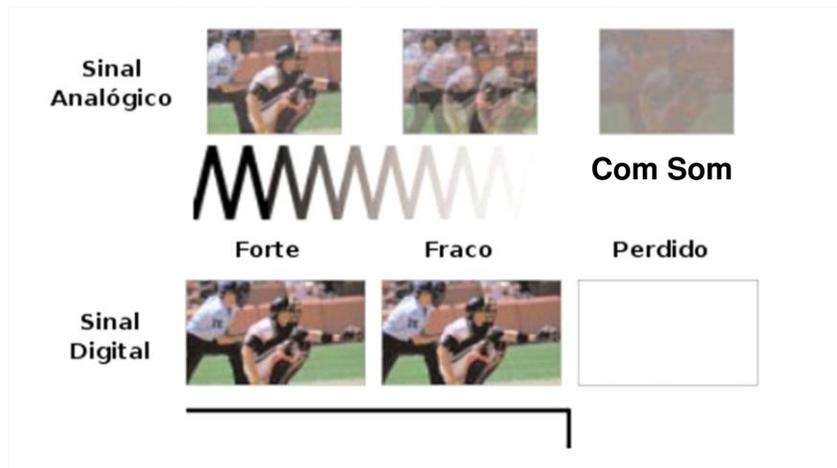


Figura 2.4 Comparação qualitativa entre o sinal analógico e o sinal digital.

Uma rede SFN pode ser modelada através da equação a seguir:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) \otimes x(t) + z(t) \quad (2.1)$$

Onde  $\otimes$  denota convolução,  $x(t)$  é o sinal OFDM transmitido,  $h_i(t)$  a resposta ao impulso do canal do transmissor  $i$ , e  $z(t)$  o Ruído Gaussiano Branco Aditivo (AWGN).

A resposta ao impulso do canal pode ainda ser definida como:

$$h_i(t) = \sum_{l=1}^M h_{i,l} \delta(t - \tau_{i,l}) \quad (2.2)$$

Onde os ganhos de cada caminho do sinal,  $\{h_{i,l}; l=1, 2, \dots, M\}$ , são processos *Rayleigh* independentes e identicamente distribuídos, com  $\tau_{i,l}$  sendo os atrasos de cada caminho.

A partir das Equações (2.1) e (2.2), nota-se que a rede proposta em SFN deverá lidar com dois tipos de atrasos: o primeiro devido às reflexões em obstáculos naturais, e o segundo tipo devido aos sinais transmitidos por outras estações transmissoras da rede. Esses atrasos podem causar uma interferência intersimbólica, que é geralmente administrada pelo uso do intervalo de guarda e estimação do canal.

Como na maioria dos modelos de sistemas de transmissão via ar, a rede SFN deverá lidar com dois tipos de desvanecimento: o primeiro chamado de desvanecimento rápido e o segundo de desvanecimento lento [23]. Essas degradações do sinal, geralmente, são modeladas em termos de funções determinísticas descrevendo as perdas em função da distância e localização dos receptores.

O desvanecimento lento é modelado em função dos grandes obstáculos naturais do terreno e o desvanecimento rápido é modelado pelo espalhamento do sinal nas vizinhanças do receptor. Outros importantes parâmetros são a diretividade das antenas (ganho), a potência efetiva irradiada e as características do terreno.

As regiões do mundo, que estão utilizando redes SFN, estão adotando os modos de transmissão 8K segundo as normas DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*) e ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*) para que os atrasos de sinais não ultrapassem os intervalos de guarda do sistema. Uma configuração possível de intervalo de guarda 1/8, usando o modo 8 K para padrões

COFDM, gera uma faixa de aproximadamente  $150 \mu\text{s}$  considerando o canal de 8MHz. Para canais de 6MHz a faixa é de  $126\mu\text{s}$ . Como o intervalo de guarda é maior do que o maior atraso dos sinais das várias estações transmissoras que chegam ao receptor, o receptor poderá combiná-los construtivamente. As técnicas de estimação de canal deverão ser suficientes para compensar os atrasos e cancelar ecos com essa ordem de dispersão temporal.

O envio do sinal da estação geradora para as estações retransmissoras pode ser realizado através de três formas principais: via satélite, enlaces de fibras ópticas, enlaces de micro-ondas ou pelo próprio sinal do canal. Devido aos custos proibitivos, os enlaces ópticos são ainda pouco utilizados para retransmissão de sinais no Brasil. A forma mais comum, utilizada aqui no Brasil, para transportar o sinal da geradora para uma retransmissora é através de um enlace de micro-ondas ou por transmissão e recepção via satélite. Outra forma é aquela em que um posto retransmissor da rede recebe o mesmo sinal que será transmitido na mesma frequência formando um sistema que é conhecido como *Gap-Filler*. Para isso, é necessário o uso de técnicas e filtros de cancelamento de realimentação (LCF - *Loop Canceller Filter*) [24]. Com esse procedimento, é possível evitar os enlaces de micro-ondas ponto a ponto que levam para o posto retransmissor o sinal da geradora como acontece em muitos casos reais. Porém é necessário observar que não se pode enviar novamente este sinal para outro posto uma vez que não há uma regeneração do sinal BTS (*Broadcast Transport Stream*) no local.

A Figura 2.5 mostra um diagrama simplificado do receptor OFDM [25].

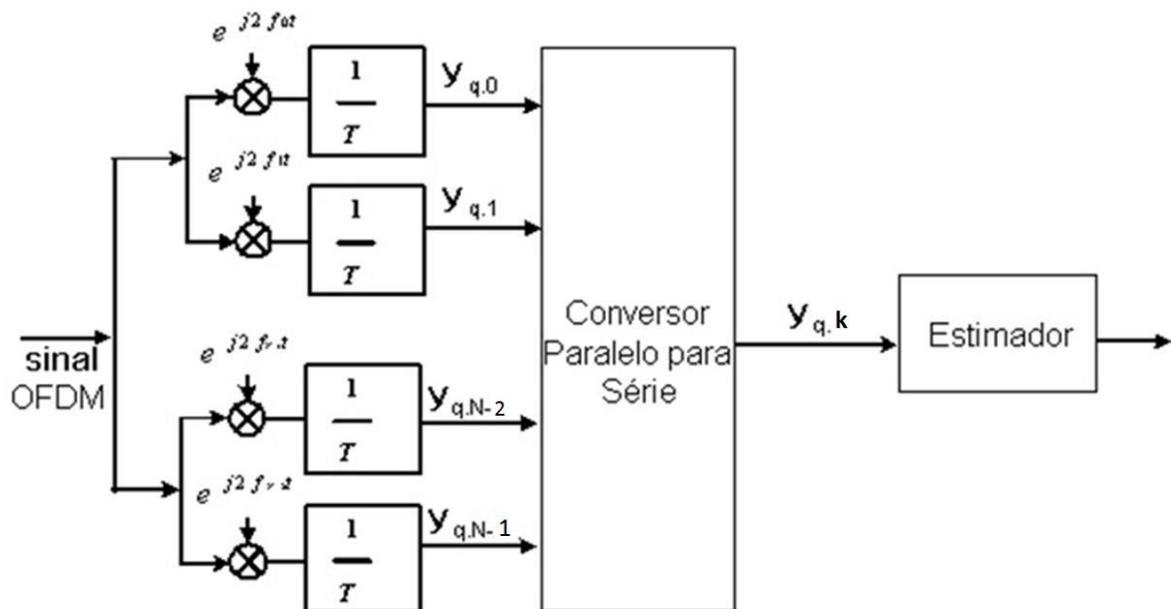


Figura 2.5 Ilustração de um receptor OFDM simplificado.

Pode-se escrever a saída complexa do  $q$ :*enésimo* campo OFDM na portadora  $k$  é representado por  $y_{q,k}$  sendo obtido como:

$$y_{q,k} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{i=1}^n h_{i(t)} \otimes \chi(t) \right) g_k^*(t) dt + z_k \quad (2.3)$$

Onde  $g_k^*(t) = e^{-j2\pi f_i t}$  para  $0 \leq t \leq T$ , assumindo  $q$ , *enésimo* campo OFDM de  $y_{q,k}$  igual a zero e  $z_k$  é a componente de ruído na portadora  $k$ , e  $h_{i(t)}$ , é a resposta ao impulso do sinal  $x(t)$ .

Em [21], e [25], o canal para o transmissor  $i$  foi modelado como um canal de desvanecimento Rayleigh WSSUS (*Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering*), ou seja, como processos de espalhamento estacionários descorrelacionados em sentido amplo entre si, descritos pela sua resposta impulsiva como mostrado em (2.2).

Assumindo que o canal apresenta uma variação muito lenta se comparada à taxa de símbolo do sinal e usando as propriedades de linearidade na Equação 2.3 é possível escrever a saída após a correlação do sinal como mostra a Equação 2.4.

$$y_{q,k} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{T} \int_0^T (h_{i(t)} \otimes x(t)) g_k^*(t) dt \right) + z_k$$

$$y_{q,k} = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^M \frac{1}{T} \int_0^T h_{i,l} x(t - \tau_{i,l}) g_k^*(t) dt + z_k \quad (2.4)$$

$$y_{q,k} = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^M \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}_{q,k}(\tau_{i,l}) + z_k$$

onde  $\hat{y}_{q,k}(\tau_{i,l})$  é a saída depois da correlação do caminho com um atraso de  $(\tau_{i,l})$ .

A Equação 2.4 mostra que é possível analisar a contribuição de sinal de cada caminho separadamente, onde foi assumido que o receptor está sincronizado no primeiro sinal que chega à antena. A análise prossegue a partir de um único caminho de cada vez depois da correlação, para que se chegue a potência útil e a potência interferente do sinal.

Duas situações distintas podem ser analisadas separadamente conforme mostra Figura 2.6.

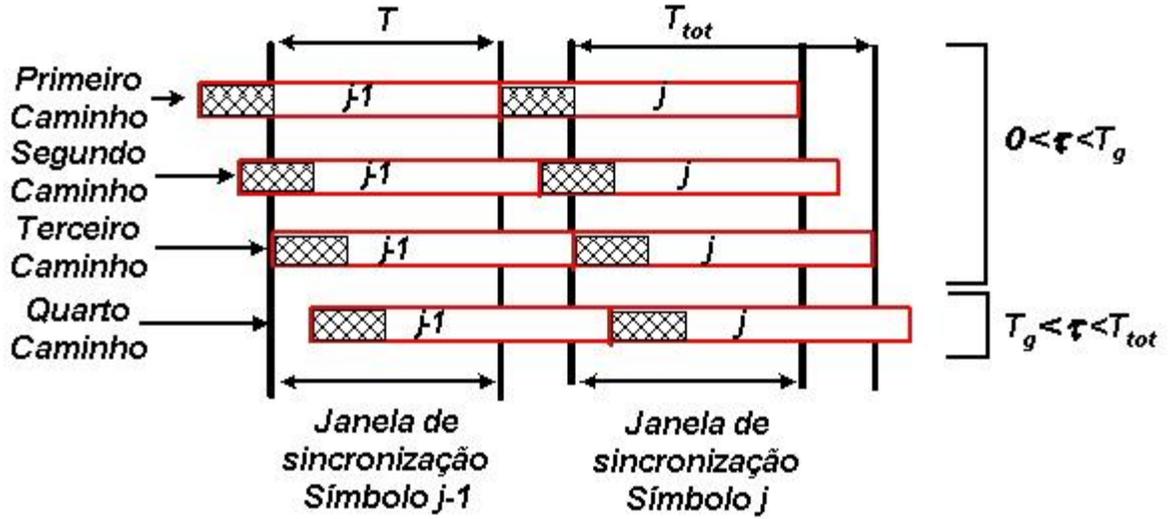


Figura 2.6 Diferentes atrasos do sinal em sua propagação

No primeiro caminho o sinal chega dentro do intervalo de sincronização do receptor e, portanto não ocorre interferência intersimbólica. No segundo caminho o sinal que chega tem parte dentro do período de sincronização do receptor e a outra parte do sinal está fora deste período sobrepondo-se na próxima janela de sincronização. Considerando um canal ideal sem ruído obtêm-se para  $0 \leq \tau \leq T_g$ .

$$\hat{y}_{q,k}(\tau) = h e^{-j2\pi f_k \tau} D_{q,k} \quad (2.5)$$

Onde  $D_{q,k}$  é o símbolo transmitido na frequência  $f_k$ . Observa-se que neste caso não ocorre perda de ortogonalidade.

No quarto caminho, que também depende da potência do eco, analisado em [21] e [25], tem-se  $T_g \leq \tau \leq T_{tot}$ , sendo que a saída depois da correlação agora depende do símbolo previamente transmitido ( $q = -1$ ) e do símbolo ( $q = 0$ ) atual, que resulta em:

$$\hat{y}_{0,k}(\tau) = h \left( \mu_{kk}(\tau) D_{0,k} + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} \mu_{lk}(\tau) D_{0,l} + \sum_{l=0}^{N-1} \lambda_{lk}(\tau) D_{-1,l} \right) \quad (2.6)$$

Na Equação 2.6, o primeiro termo dentro dos parênteses é a parcela útil do sinal, o segundo termo corresponde à interferência causada pela perda de ortogonalidade do quadro OFDM presente, enquanto o terceiro termo representa a interferência do quadro OFDM anterior.

A interferência em uma determinada portadora descrita pela Equação 2.6 consiste de um conjunto de variáveis estocásticas complexas com praticamente a mesma variância. Geralmente quando o conjunto de variáveis é muito grande, o teorema do limite central pode ser aplicado e a interferência pode ser aproximada por uma distribuição gaussiana complexa conduzindo a uma interferência com uma distribuição Rayleigh com a fase uniformemente distribuída entre  $\{-\pi, +\pi\}$ . Porém, existem autores que não consideram válida esta aproximação, admitindo que as componentes interferentes tenham diferentes variâncias seguindo uma distribuição de Rice. A literatura [26], [27] e [28] é farta em modelos estatísticos de sinais transmitidos através de canais usando a distribuição de Rice. Neste caso o modelo seria um sinal forte direto com ruído AWGN (*Aditive White Gaussian Noise*).

## 2.2 O Fluxo BTS

Para que o sinal seja adequadamente transportado de uma geradora para uma retransmissora através de um enlace de micro-ondas ele deve ser encapsulado no formato BTS (Broadcast Transport Streaming) segundo o padrão ISDB-T [29]. O sinal multiplexado/re-multiplexado do ISDB-T é chamado de *Broadcast Transport Stream* (BTS) e foi idealizado como interface entre o estúdio e transmissor dentro do padrão de transmissão ISDB-T.

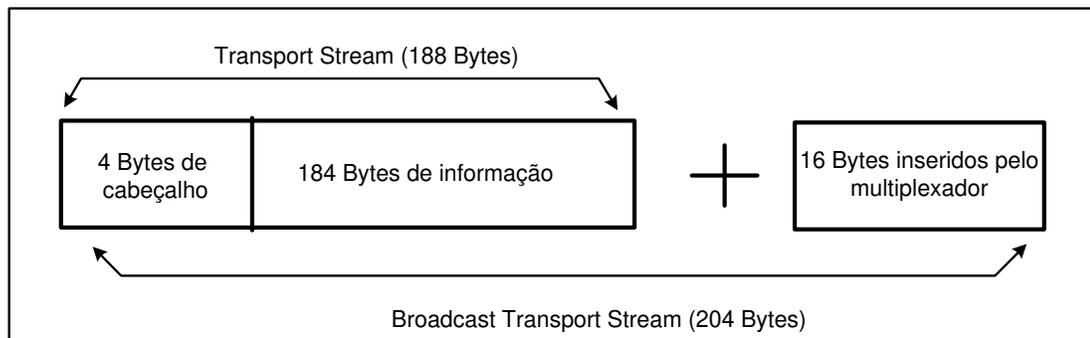


Figura 2.7 Fluxo BTS simplificado

Para sincronizar todas as camadas, entre o sistema de compressão e modulação, o MPEG-2 TS de 188 bytes [30] proveniente do multiplexador deve ser re-multiplexado. A saída do re-multiplexador é formada por um único TS com tamanho de 204 bytes e taxa de bit constante de quatro vezes a frequência de amostragem da transformada rápida inversa de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform*,

IFFT) do modulador que depende da largura de banda do canal de TV utilizado sendo de 6 MHz no caso do Brasil. Os 8 primeiros bytes dos 16 bytes adicionados são relativos ao TMCC (Controle de Configuração de Transmissão e Multiplexação) e controlam:

- Parâmetros de transmissão
- Nível, Modo e Intervalo de Guarda.
- Sinalização entre o multiplexador e o modulador
- Configuração remota dos parâmetros de transmissão e de rede SFN

Estes parâmetros encontram equivalência no sistema DVB-T na descrição do Mega-Frame em *DVB mega-frame for Single Frequency*.

## 2.3 Sincronismo do Fluxo BTS

Para que o sinal possa ser utilizado em uma rede SFN o sinal BTS deve ser sincronizado com os transmissores principais através de referências de sincronismo externas como GPS ou osciladores de precisão. O sincronismo em frequência é obtido com o sinal de 10MHz e o sincronismo temporal (referência) utiliza o sinal de 1Hz [26], formando assim o conjunto de frequências utilizadas de 10MHz e 1Hz ou seja 1PPS (Pulso Por Segundo). O sinal de 10MHz é utilizado nos multiplexadores, moduladores e demoduladores. O pulso 1PPS é utilizado no IIP (*ISDB-t Information Packet*) como referência para o cálculo do atraso do sinal possibilitando a transmissão simultânea. As Figuras 2.8 e 2.9 mostram exemplos de sincronização por GPS (*Global Positioning System*) e oscilador de alta precisão do fabricante de transmissores *NEC Corporation*. A Figura 2.8 mostra o sincronismo via GPS, também chamado de sincronismo dinâmico, na Figura 2.9 o sincronismo é feito sem o auxílio do GPS, onde um oscilador de alta precisão fornece o sinal de 10MHz para o multiplexador e transmissor principal sendo que os moduladores seguintes são alimentados por um valor de atraso fixo inseridos manualmente chamado de sincronismo estático.

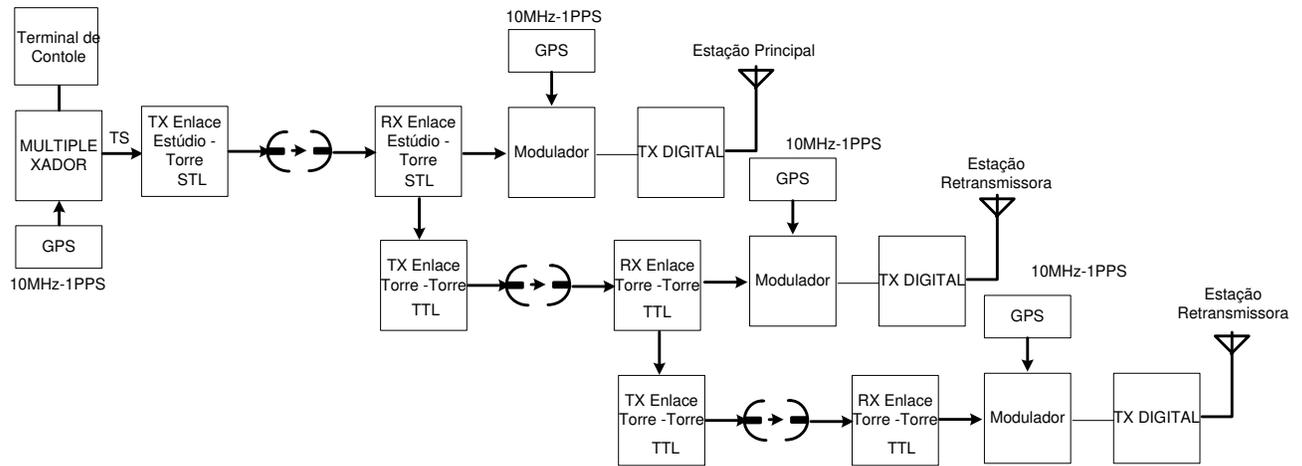


Figura 2.8 Exemplo de sincronismo dinâmico NEC Corp.

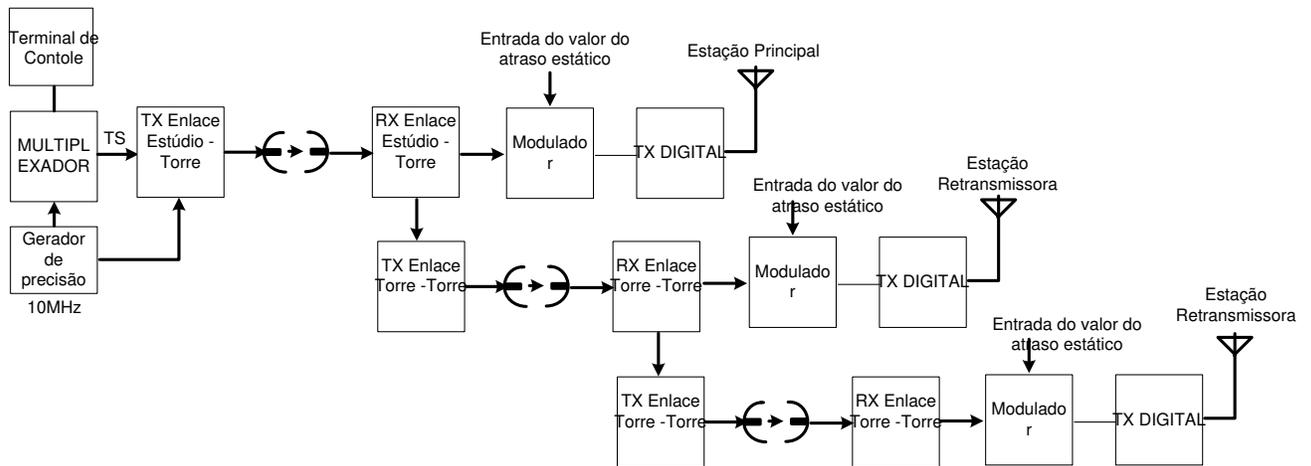


Figura 2.9 Exemplo de sincronismo estático NEC Corp.

Atualmente é comum trafegar o sinal de BTS através dos satélites. Assim sendo foi desenvolvido o 'BTS-comprimido' [31] porque os equipamentos para uso via satélite é baseada no DVB-S/S2 onde o tamanho do frame é de 188 bytes. Para se conseguir compatibilidade com este sistema o 'BTS-comprimido' faz a exclusão dos pacotes nulos que são inseridos no BTS original para que se tenha uma taxa constante.

## 2.4 Atrasos no sinal da rede SFN

Os atrasos na rede SFN podem ser devidos aos obstáculos naturais ou aos transmissores que compõem a própria rede SFN. Neste trabalho serão abordados os atrasos referentes aos transmissores

da própria rede SFN. Na análise de Anders Mattsson [32], a diferença entre dois sinais que chegam a antena receptora, depende de dois fatores: o atraso existente entre as duas transmissões simultâneas e a posição do receptor em relação aos transmissores. O modelo descrito assume dois transmissores com as coordenadas  $(+c,0)$  e  $(-c,0)$  ou seja separados pela distância de  $2c$  com a propagação das ondas com a velocidade de  $3 \times 10^8$  m/s.

Sendo a curva parametrizada da hipérbole:

$$\begin{aligned} x &= a \cosh(t), \\ y &= \sqrt{c^2 - a^2} \sinh(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Um receptor na curva parametrizada sempre verá uma diferença constante de ' $2a$ ' entre as distâncias aos dois transmissores, ou seja, um receptor em qualquer ponto pertencente a hipérbole terá um valor constante de atraso conforme mostra a Figura 2.10 ou como se trata de uma diferença constante entre tempos (consequentemente, entre distâncias), a associação com a definição de hipérbole: curva plana cujo módulo da diferença das distâncias de cada um de seus pontos  $P_n$  aos pontos fixos  $TX_1$  e  $TX_2$  (geometricamente denominados focos) é igual a um valor constante ( $|D_1 - D_2| = \text{constante}$ ).

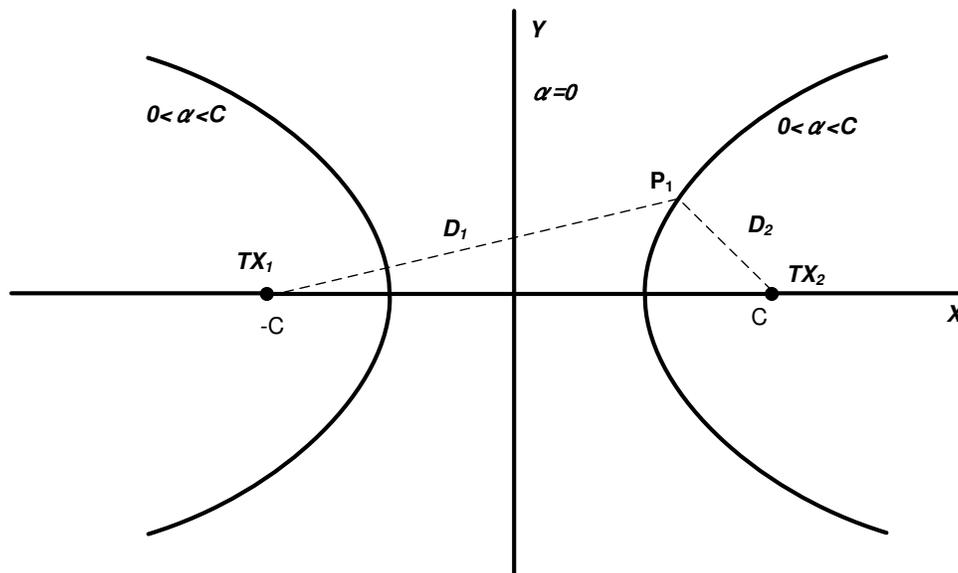


Figura 2.10 Modelo de hipérboles para atrasos entre transmissores

Desde que  $0 < a < C$  a máxima distância será de  $2C$  (dado em km) e o atraso máximo será de  $(2C/0,3)[\mu\text{s}]$  onde  $C$  é a velocidade da luz (300.000 km/s) colocada na notação de  $\mu$  (micro:  $1 \times 10^{-6}$ ) porque a ordem de grandeza usada é medida em micro segundos. Havendo atrasos,  $\tau$ , nos sinais que alimentam os transmissores o atraso máximo será de  $(2C/0,3)[\mu\text{s}] + \tau [\mu\text{s}]$ . Note-se que o máximo atraso sempre estará na área logo atrás dos transmissores na linha imaginária que os une sendo que o perfil de atrasos da rede SFN não depende do diagrama de irradiação da antena nem do relevo do terreno. Quanto mais próximo o receptor estiver da linha  $a=0$  maior será a probabilidade de ocorrerem pré-ecos devido a menor diferença de níveis de sinal no local quando os transmissores irradiarem a mesma potência.

Pode-se concluir que aumentando os atrasos nos transmissores virtualmente aumenta-se as distâncias entre ambos, fazendo os arcos das hipérboles virtuais ficarem menos acentuados conforme se aproximam do eixo  $y$  (mediatriz) como mostra a Figura 2.11.

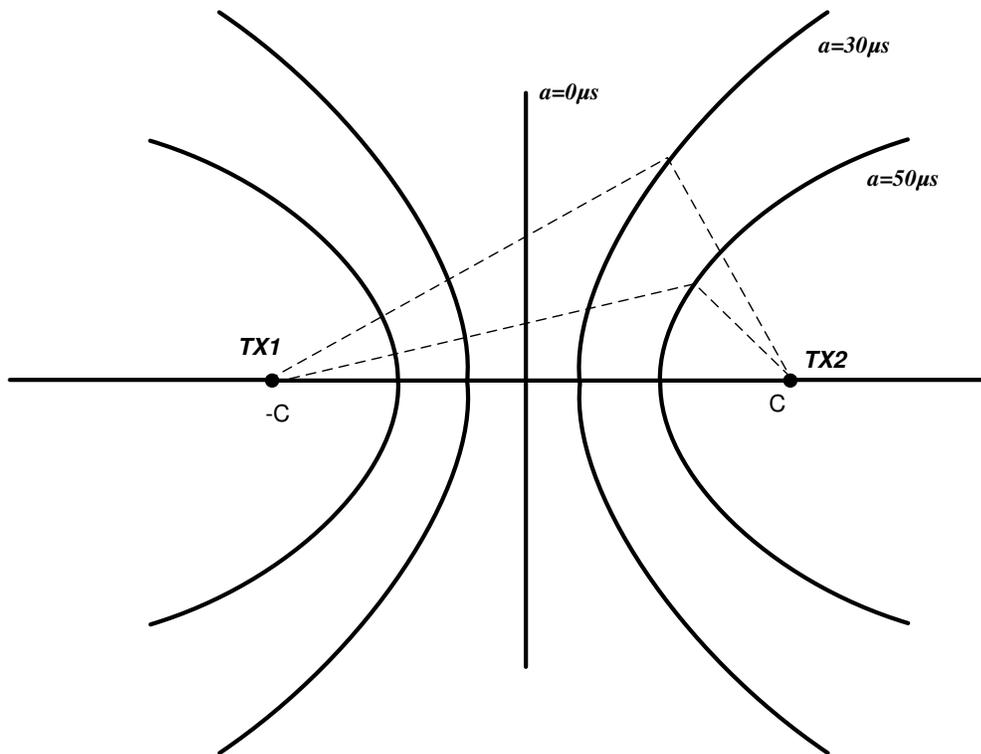


Figura 2.11 Aproximações de hipérboles para atrasos constantes

Essa análise é importante quando for necessário alterar o atraso do ponto retransmissor para alterar a conformação da área interferente. Esta é uma estratégia muito utilizada na rede SFN e será objeto de

simulação no Capítulo 5. Um esboço prático é mostrado nas Figuras 2.12 e 2.13, onde os transmissores estão colocados nos focos de uma hipérbole fictícia. Na Figura 2.12 os transmissores estão instalados em uma distância maior que a distância equivalente ao intervalo de guarda  $IG=1/8=126\mu s=38\text{km}$ . As distâncias do transmissor  $TX_2$  em direção ao  $TX_1$  são mostradas na parte superior do gráfico e do transmissor  $TX_1$  em direção ao  $TX_2$  na parte inferior. As setas indicam a direção de propagação do sinal. A indicação ' $D_$ ' é o atraso relativo devido aos dois sinais que chegam à antena do receptor. A região à esquerda de  $D_ = 126 \mu s$  até o eixo de simetria é livre de interferência intersimbólica, ou seja a interferência entre os sinais é chamada contributiva porque está dentro do intervalo de guarda.

A Figura 2.13 representa o mesmo conceito, porém com os transmissores colocados nos focos em uma distância equivalente ao intervalo de guarda. A área interferente destrutiva neste caso está à direita do transmissor  $TX_1$ , porém isso só ocorrerá se o sinal de  $TX_2$  atingir esta região com uma intensidade relativa menor que 19dB entre ambos os sinais.

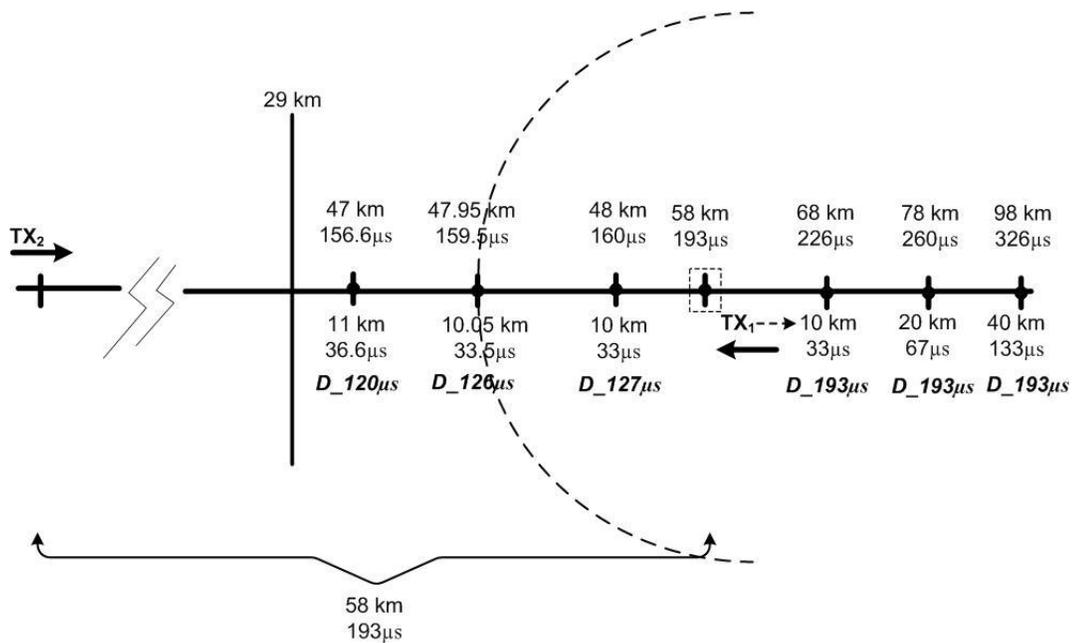


Figura 2.12 Situação de transmissão conjunta através do modelo de hipérboles com posição dos transmissores maior que o intervalo de guarda

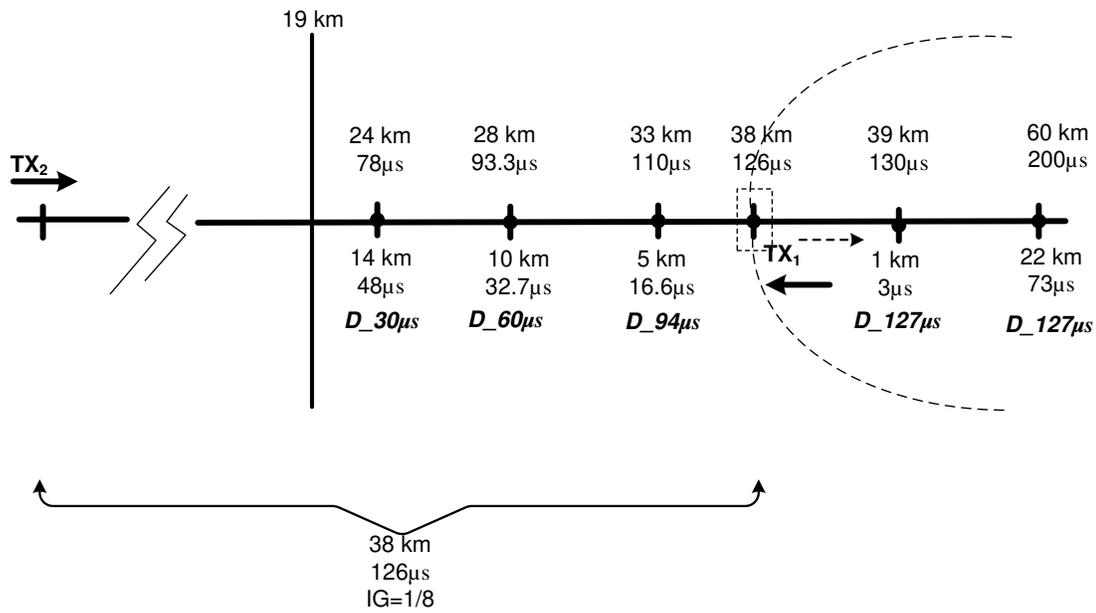


Figura 2.13 Situação de transmissão conjunta através do modelo de hipérboles com posição dos transmissores igual ao intervalo de guarda

## 2.5 Sincronização da Janela FFT

Existem vários estágios de sincronismo no receptor: frequência, amostragem, temporal, estimação de canal, e equalização. Neste trabalho serão abordados ilustrativamente os primeiros casos da evolução da sincronização da janela FFT. As soluções de sincronização dos receptores são de escolha livre dos fabricantes, já que não são normalizadas, havendo apenas recomendações sobre a recepção. Assim sendo, são segredos bem guardados e não divulgados, porém é de grande importância se conhecer as estratégias adotadas para a sincronização, visto que isto afetará diretamente o comportamento do receptor em um ambiente de rede de frequência única.

Na análise de Brugger e Hemingway [33], observa-se que o receptor OFDM pode sincronizar com o sinal recebido em dois passos iniciais, sendo o primeiro quando o receptor é sincronizado com a taxa de bits por segundo do sinal, ou seja, o receptor se sincroniza com a taxa de bits do sinal que chega na antena, e como segundo passo, o receptor posiciona sua janela de amostragem da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para demodular o sinal OFDM.

A sincronização do primeiro passo descrito acima geralmente é feita por correlação de amostras tomadas periodicamente a cada intervalo da parte útil do símbolo. Quando a forma de onda do sinal se

repete, como mostrado na Figura 2.14, a saída do correlacionador excede a um valor predeterminado, e a partir deste ponto o receptor pode detectar o início de um novo símbolo que chega à antena. Resumindo, quando a saída do correlacionador é 1, acontece a máxima correlação, o que significa dizer que o receptor está sincronizado com um único símbolo se alinhando com a taxa de bits do sinal da antena.

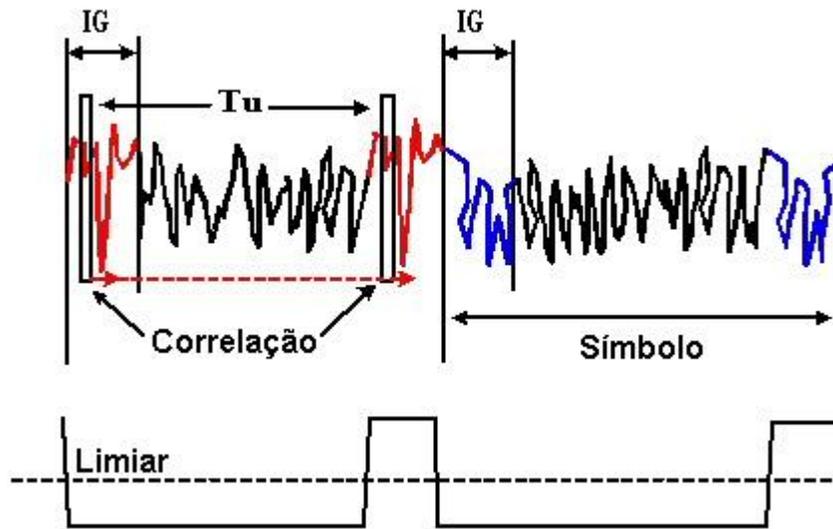


Figura 2.14 Primeiro passo de sincronização

Convém notar que a saída do correlacionador será máxima durante o intervalo de tempo igual ao intervalo de tempo de guarda. Porém o receptor ainda não achou a melhor posição para a janela FFT, ou seja, ainda necessita de um ajuste fino. Esta tarefa é mais complicada em um ambiente de muitos sinais chegando à antena, múltiplos ecos, logo várias estratégias são utilizadas pelos fabricantes de receptores para resolver o problema.

## 2.6 Estratégia do Sinal Mais Forte

No início da implementação dos receptores pelos fabricantes foram apresentadas várias estratégias de sincronização do receptor. No início a estratégia do sinal mais forte que chega a antena surgiu como a solução mais natural a ser escolhida pelos fabricantes. Na Figura 2.15, são mostrados ilustrativamente a resposta ao impulso de cinco sinais que chegam à antena de um determinado receptor através de cinco caminhos diferentes.

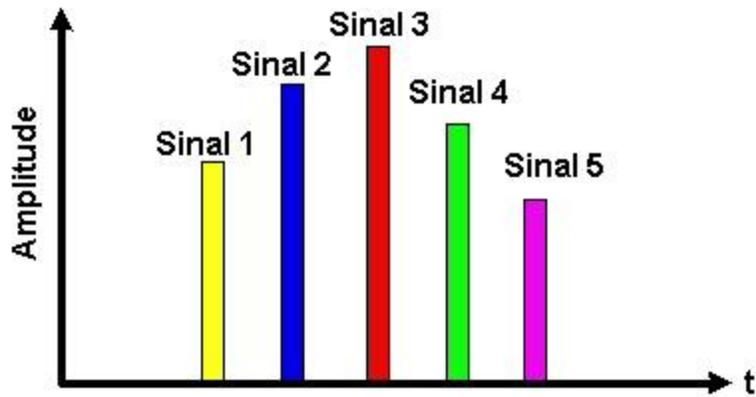


Figura 2.15 Sincronização no sinal mais forte

Neste caso, os sinais 1 e 2 aparecem para o receptor como pré-ecos, e poderiam ser provenientes de reflexões de sinal de transmissores mais próximos do receptor do que o transmissor 3. Os sinais 4 e 5 aparecem como pós-ecos para o receptor. Como os sinais apresentam amplitudes relativas próximas do sinal mais forte, será adotada a posição central do sinal 3 para posicionamento da janela FFT. A situação proposta pode ser vista na Figura 2.16.

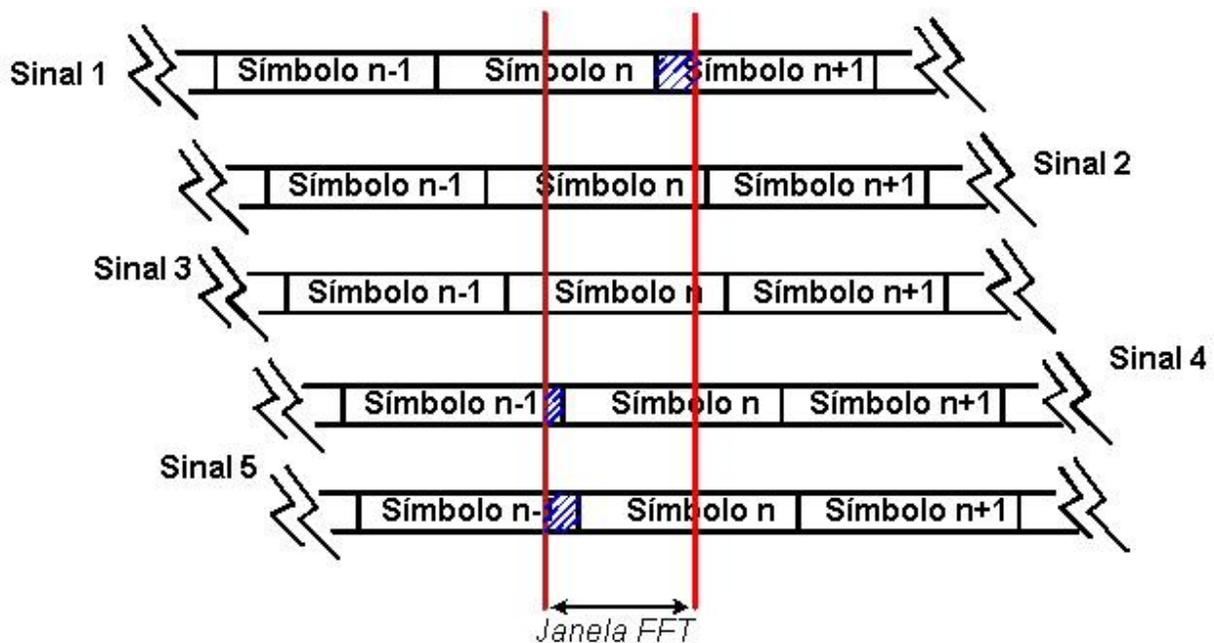


Figura 2.16 Sincronização no sinal 3, mais forte

Da Figura 2.16, pode-se observar que a sincronização fixa no centro do sinal mais forte 3, pode não ser a ideal, logo o receptor pode utilizar-se da estratégia de mover ligeiramente a janela FFT para

um ponto ótimo, onde a maioria dos sinais fosse contributiva, eliminando a maior parte da interferência intersimbólica da situação. Indo um pouco mais além, esta movimentação poderia ser dinâmica acompanhando as variações do canal no caso de uma recepção móvel, por exemplo.

## 2.7 Estratégia do Centro de Gravidade

Outra estratégia apresentada no início apresentava uma média entre os sinais que chegam a antena. Este método faz o receptor analisar a situação da resposta ao impulso dos sinais e calcular o centro de gravidade do espectro posicionando aí a janela FFT seguindo a Equação 2.8.

$$t_c = \frac{\sum_i p_i t_i}{\sum_i p_i} \quad (2.8)$$

onde  $t_c$  = centro de gravidade

$p_i$  = potência da resposta ao impulso do  $i$ -ésimo sinal

$t_i$  = instante da resposta ao impulso do  $i$ -ésimo sinal

A Figura 2.17 mostra a situação da resposta ao impulso dos sinais para o caso do centro de gravidade indicado pela linha tracejada, e a Figura 2.18 mostra a posição da janela FFT para os sinais.

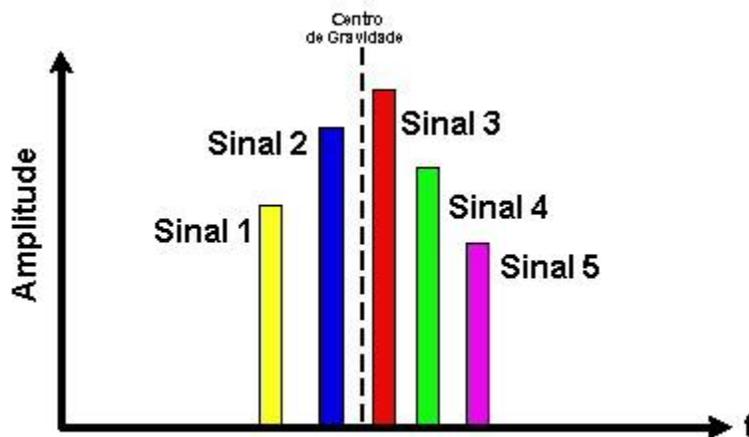


Figura 2.17 Situação da resposta ao impulso dos sinais

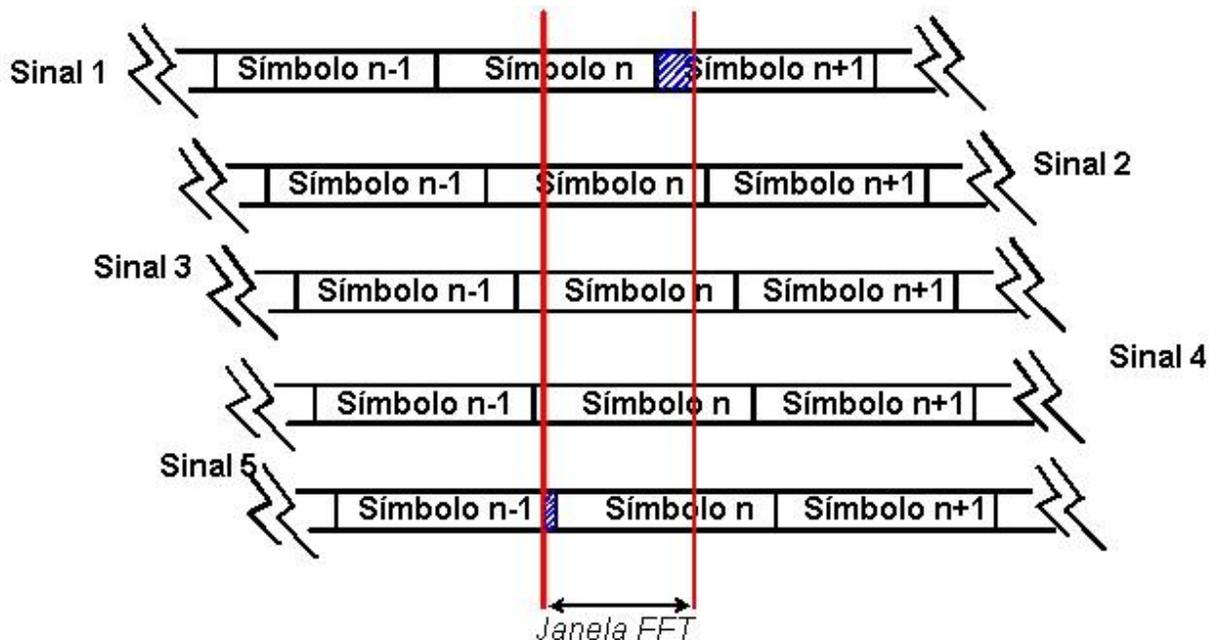


Figura 2.18 Sincronização através do Método do Centro de Gravidade

## 2.8 Estratégia do Primeiro Sinal Acima do Limiar

Esta estratégia toma o primeiro sinal do conjunto de respostas ao impulso dos sinais como referência para posicionar a janela FFT, acima de um determinado limiar. A Figura 2.19 mostra a situação para a resposta ao impulso dos sinais.

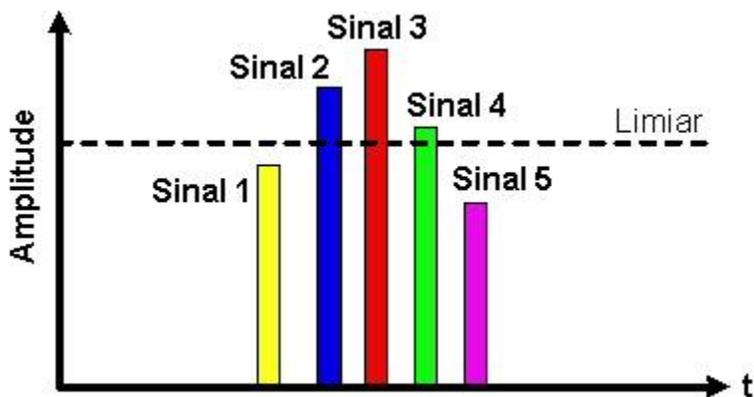


Figura 2.19 Situação da resposta ao impulso dos sinais destacando o nível limiar

A Figura 2.20 mostra a janela FFT onde o sinal escolhido para sincronização é o sinal 2.

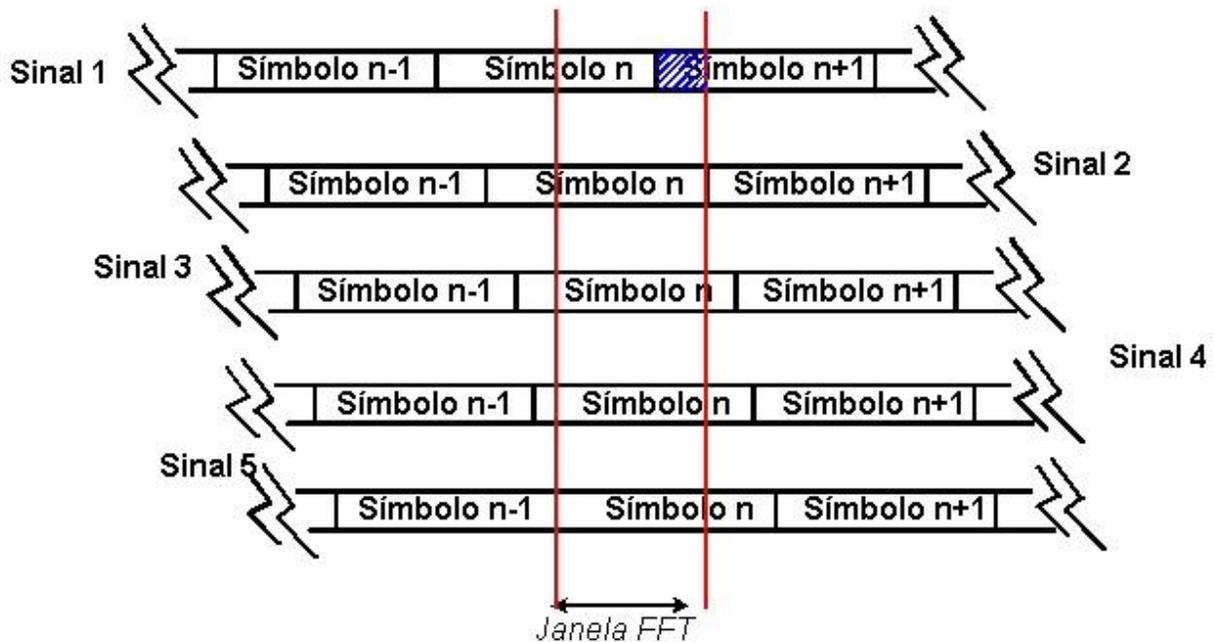


Figura 2.20 Sincronização do primeiro sinal acima do limiar (sinal 2).

Observa-se que o primeiro sinal acima do limiar é o sinal 2, que servirá para posicionar a janela FFT. Espera-se que aqui também seja utilizada a estratégia de deslocamento da janela FFT dentro da referência do sinal 2 para a melhor otimização do sincronismo. A escolha do valor limiar de sincronização pode ser tal qual a intensidade mínima de campo requerida ou, mais praticamente, um valor considerado pelos fabricantes como de 6 a 10 dB, abaixo do sinal mais forte.

## 2.9 Método “Quasi-Ótimo” e Máxima Relação C/I

A estratégia “Quasi-Ótimo” é semelhante à estratégia do primeiro sinal acima do limiar, porém levando em conta a relação  $C/I$  (*Carrier / Interference*), portadora / interferência segundo o diagrama de fluxo simplificado mostrado na Figura 2.21 apresenta somente a parte dos blocos de decisão da janela FFT. Os blocos de armazenamento, memória e laços de iteração foram suprimidos para simplificar o diagrama.

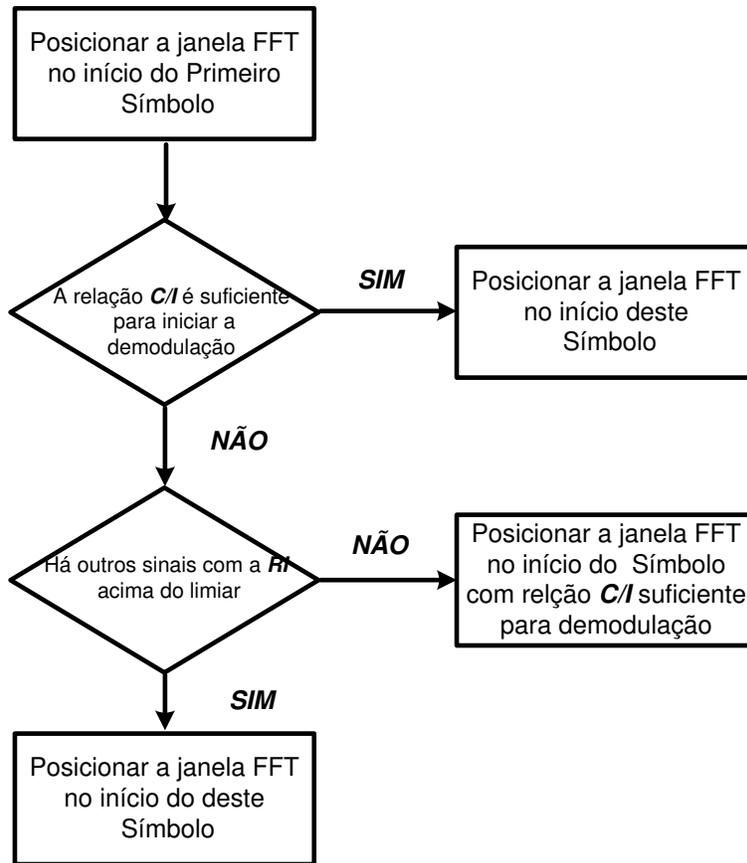


Figura 2.21 Diagramas de fluxo descrevendo a estratégia “QuasiÓtima”

A estratégia de Máxima Relação C/I, segundo os fabricantes, é complexa principalmente para grandes intervalos de guarda (IG). Um exemplo disso é quando  $IG=Tu/4$ , valor máximo permitido nas normas de padrões de TV Digital, sendo  $Tu$  o tempo útil de símbolo, onde existem dificuldades para a avaliação da relação C/I. A técnica atual usada pelos receptores é tornar a janela da FFT dinâmica que se adapta ao sinal que minimiza a interferência intersimbólica.

## 2.10 Ruído Impulsivo, Filtro LCF e Barreira Física

Fontes típicas de ruído impulsivo são as faíscas de comutação de corrente em motores elétricos, chaves, centelhas de descargas de velas em motores de automóveis, etc.

Em geral, é produzido por equipamentos elétricos ou eletrônicos, mas também pode ser produzido por descargas atmosféricas. O ruído impulsivo se caracteriza por possuir alta energia num intervalo relativamente curto de tempo. Considera-se que os impulsos de ruído se apresentam para o receptor

como uma perturbação de faixa larga com espectro plano na faixa do sinal OFDM. A cada portadora recebida será adicionado um vetor de ruído, de mesma amplitude, mas fase possivelmente diferente.

A demodulação resultará numa constelação de pontos onde ocorrem deslocamentos, de mesma distância, mas em direções diferentes. O ruído impulsivo ideal atinge todos os símbolos uniformemente, porém seu efeito sobre cada símbolo detectado pode ser feito insignificante se o tamanho dos blocos de símbolo for suficientemente grande. Em [34] pode-se avaliar o desempenho da transmissão do sistema ISDB-T.

Para que uma rede SFN seja operacional, é necessário prover meios para alimentar os postos de retransmissão com o sinal a ser irradiado. Três opções já foram comentadas: enlaces de micro-ondas, enlaces ópticos (pouco utilizado no Brasil) e alimentação através de captação do sinal no AR (sinal que é utilizado para recepção dos aparelhos de televisão comuns).

O enlace de micro-ondas é o sistema mais utilizado para a retransmissão terrestre de sinais de TV, porém apresenta como desvantagem o custo elevado. A captação do sinal do ar, quando o sistema é MFN, é realizada em um canal qualquer que o retransmite em outro canal diferente para a região de interesse. Se o sistema for SFN, esta operação torna-se complicada, porque o canal é o mesmo, portanto existe a necessidade de se evitar que o sinal transmitido no próprio posto não sature a entrada do receptor que está no mesmo local. Foi desenvolvido um filtro que cancela o elo de realimentação da antena transmissora para a antena receptora chamado de LCF (*Loop Canceller Filter*) [35], [36]. Este filtro torna possível a recepção e a transmissão no mesmo local, dispensando o uso dos enlaces de micro-ondas. A Figura 2.22 mostra um esquema básico do princípio de funcionamento deste filtro.

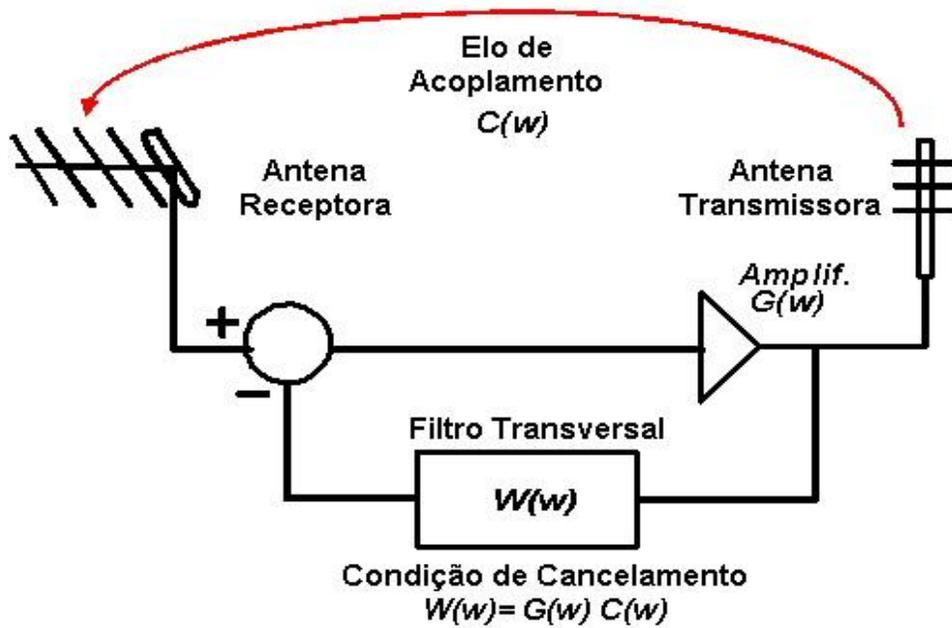


Figura 2.22 LCF Filtro cancelador de elo de realimentação

O *Gap-Filler*, que será visto no Capítulo 3, opera em modo de repetição, ou seja, na mesma frequência tanto para transmissão quanto para recepção, possuindo o recurso de cancelamento de eco que o faz “ignorar” o sinal realimentado devido ao acoplamento entre as antenas de transmissão e recepção. Caso contrário, o equipamento entra em realimentação causando oscilação, que o deixa inoperante. Deve-se salientar que o *Gap-Filler* não é um equalizador de canal, embora seja composto por um filtro adaptativo. Este filtro foi projetado para cancelar somente o eco gerado pelo próprio *Gap-Filler*, e não para equalizar os múltiplos percursos gerados pelo meio de transmissão. Isto é satisfatório considerando-se que o canal do sinal recebido será composto por uma antena receptora diretiva apontada para o transmissor principal em polarização oposta ao sinal que será transmitido.

O *Gap-Filler* opera atenuando apenas o primeiro eco, localizado após o percurso principal.

Quando primeiro é cancelado, o ciclo de realimentação é interrompido, acarretando no cancelamento de todos os demais ecos. Além disso, o *Gap-Filler* possui uma limitação chamada “janela de cancelamento de eco”. O mesmo será capaz de cancelar apenas o eco situado dentro desta janela. O centro da janela é igual ao atraso de propagação, com uma abertura de aproximadamente  $4 \mu s$  de janela. A instalação do *Gap-Filler* também deve ser mais criteriosa partindo-se do princípio de que a antena receptora não ‘enxergue’ a antena transmissora, sendo bloqueada por uma barreira física. O exemplo da instalação da Figura 2.23 mostra uma caixa de água como barreira entre as antenas receptora e transmissora. Simplificadamente pode-se escrever para a potência efetiva irradiada ERP (*Effective Radiated Power*) do *Gap-Filler*:

$P_{ERP_{GP}}$  – Pot. Acoplamento

$P_{ERP_{GP}} = \text{Att. (atenuação do espaço livre prática)} + R_{FcATx}$

Pot. Acopl = Ganho  $A_{Rx}$  -  $R_{FcATr}$  – Perdas nas Linhas

Onde:

Att.: atenuação do espaço livre prática

$P_{ERP_{GP}}$ : Potência ERP do *Gap-Filler*

$R_{FcATx}$ : Relação frente-costa da antena transmissora

$R_{FcATr}$ : Relação frente-costa da antena receptora

Ganho  $A_{Rx}$  : Ganho da antena receptora

Assumindo-se valores práticos para a atenuação no espaço livre prática (com barreira):

50dB < Att < 60dB para construções de alvenaria com distância maior que 10m.

Perda nas Linhas: 1dB

Relação Frente Costas: 20dB <  $R_{FcATrTx}$  < 25dB

Com os dados empíricos acima constatou-se a necessidade de uma isolamento entre 65dB < Isolação < 100dB para potência de transmissor na faixa de 30mW até 3W. A Figura 2.23 apresenta uma estrutura de concreto utilizada como barreira, a Figura 2.24 mostra a antena receptora e a Figura 2.25 mostra a antena transmissora situada no topo da estrutura.



Figura 2.23 Estrutura de torre de caixa de água utilizada como barreira física



Figura 2.24 Antena de Recepção utilizando barreira física



Figura 2.25 Antena de Transmissão utilizando barreira física

Como visto anteriormente as estratégias de sincronização dos receptores OFDM evoluíram muito e tendem a evoluir ainda mais. Isso é muito importante para o funcionamento do receptor em um ambiente de rede de frequência única, porque o receptor poderá tirar o máximo proveito dos sinais contributivos que chegam à antena. Então, torna-se importante que nas áreas de intersecção para um mesmo sinal aconteça um ambiente de contribuição, e para sinais diferentes, é importante que sejam observados os níveis de sinal estipulados para o serviço, evitando-se interferências.

# Capítulo 3

## ***REPETIDORES E GAP-FILLERS***

Por tradução livre *Gap-Filler* é aquele que preenche uma lacuna, ou seja, em radiodifusão uma área sem sinal poderá ser preenchida com sinal através de um *Gap-Filler*. Um repetidor por definição tem a função de repetir o sinal de entrada sendo que no caso de transmissão digital, o sinal pode ser reconstituído ou não. A grande desvantagem de um repetidor digital que regenera o sinal é o seu atraso que pode ser maior que o intervalo de guarda do sinal causando interferência intersimbólica se este sinal for irradiado em um ambiente de rede SFN.

### **3.1 Paradigma da Alta Potência**

O sistema de radiodifusão analógico sendo baseado em redes MFN priorizava a utilização de altas potências de transmissão para cobrir extensas áreas geográficas. A ideia principal era escolher e instalar o sistema de transmissão no ponto geográfico mais alto da região e utilizar a potência mais alta permitida dentro de sua classe de operação outorgada. Porém isso era vantajoso em conjunto com outros parâmetros utilizados em uma transmissão monoportadora, com modulação de amplitude (VSB-Vestigial Side Band), sincronismo vertical e horizontal em linhas e campos entrelaçados, etc. O sistema analógico utilizava quase 30% da energia do sinal para efetuar o sincronismo, ou seja, o sistema era adequado às altas potências.

Porém, trabalhando com redes SFN os paradigmas devem mudar para que se obtenham os melhores resultados possíveis. Em redes SFN a qualidade da recepção é afetada pela relação, sinal desejado / sinal indesejado, ou (razão D/U), que representa a relação entre o sinal desejado e o sinal obstrutivo dentro da área de recepção sob a influência dos atrasos dos sinais envolvidos.

O uso de potências mais baixas implica em um maior número de pontos de transmissão, porém há um ganho de diversidade [37] que implica em uma maior uniformidade de distribuição de sinal na área de cobertura facilitando tanto a recepção fixa quanto a recepção móvel. A Figura 3.1 mostra a

comparação entre as relações de potência quando se utiliza na transmissão um único transmissor de alta potência e vários transmissores de menor potência para cobertura de uma mesma área.

A maior uniformidade na distribuição de potência fica evidente se comparada com a área coberta por um único transmissor. As bordas da área a ser coberta por um único transmissor apresentam uma deficiência de sinal devido à atenuação do sinal em função da distância.

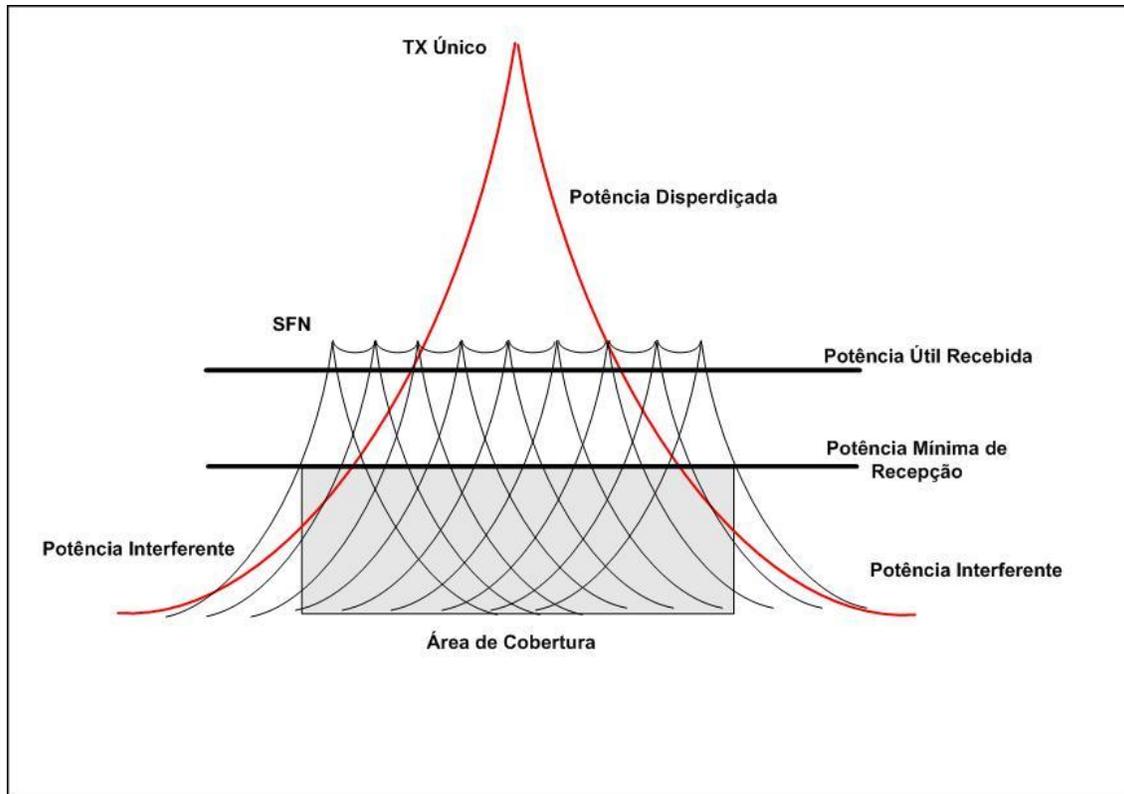


Figura 3.1 Comparação entre potências de um único transmissor e vários transmissores

Como o projeto de uma rede SFN não começa do zero, ou seja, são herdadas do sistema analógico todas as posições dos postos retransmissores já existentes, geralmente não se tem a melhor solução para uma rede SFN. Além deste problema as potências descritas e outorgadas no Plano Básico PBTVD [38], não conseguem parer a cobertura do antigo sinal analógico porque muitas emissoras que tinham um canal em VHF analógico obtiveram um canal de UHF alto então o pareamento proposto em [39] não alcançou o objetivo proposto de pareamento das áreas de cobertura. Para as áreas de sombra que surgiram foram utilizadas as técnicas de *Gap-Filler*.

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram ilustrativamente as manchas de cobertura de sinais analógico e digital. As condições de transmissão pretendem cobrir a mesma área. O transmissor da Figura 3.2 opera no sistema analógico e o transmissor da Figura 3.3 opera no sistema digital canal. As potências de transmissão são as permitidas pela legislação atual. A Figura 3.2 mostra um conjunto maior de cores significando uma maior coleção de valores de sinal. A simulação da figura 3.3 mostra a mancha sendo coberta por menos cores significando uma maior homogeneidade de sinal.

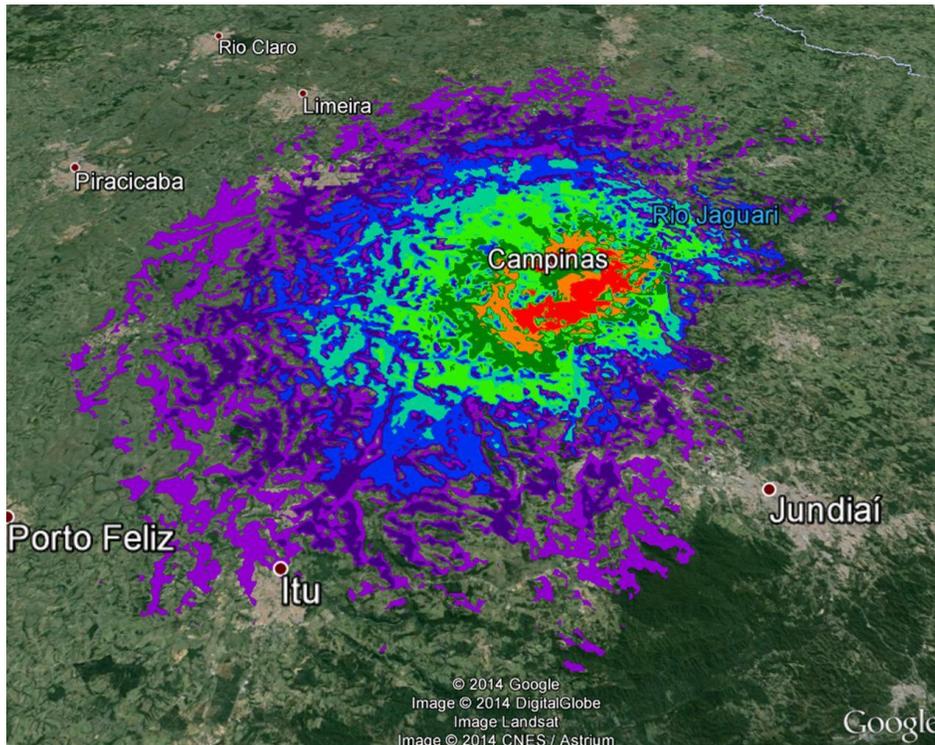


Figura 3.2 Mancha de cobertura ilustrativa do sinal analógico

Tabela 3.1

Intensidade do sinal em escala de cores das Figuras 3.2 e 3.3	
Vermelho	70dB $\mu$ V
Laranja	60dB $\mu$ V
Verde	50dB $\mu$ V
Azul	40dB $\mu$ V
Violeta	30dB $\mu$ V

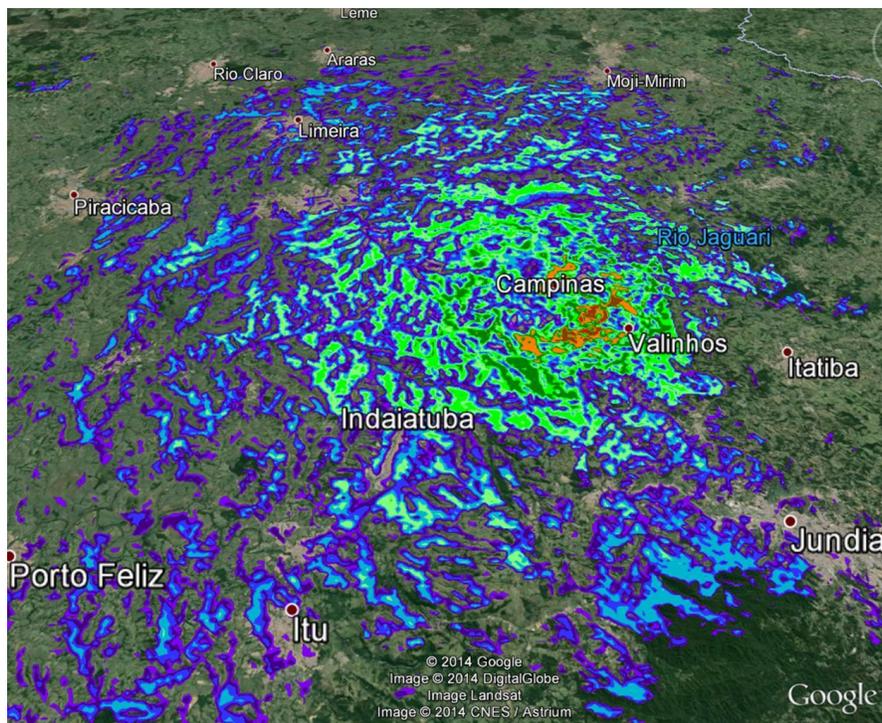


Figura 3.3 Mancha de cobertura ilustrativa do sinal digital

Porém a cobertura digital apresenta áreas de lacunas. Não significa que a transmissão digital é pior que a transmissão analógica, mas sim que para as condições permitidas pela legislação atual podem ocorrer lacunas dentro da área de cobertura. Uma das causas é a menor potência utilizada em atendimento à legislação de transmissão de TV digital. A Figura 3.4, mostra uma área servida com sinal analógico e a Figura 3.5 mostra a mesma área com uma lacuna quando a transmissão é digital. Especificamente para este caso a solução indicada foi a utilização de um *Gap-Filler* para melhorar a cobertura local.

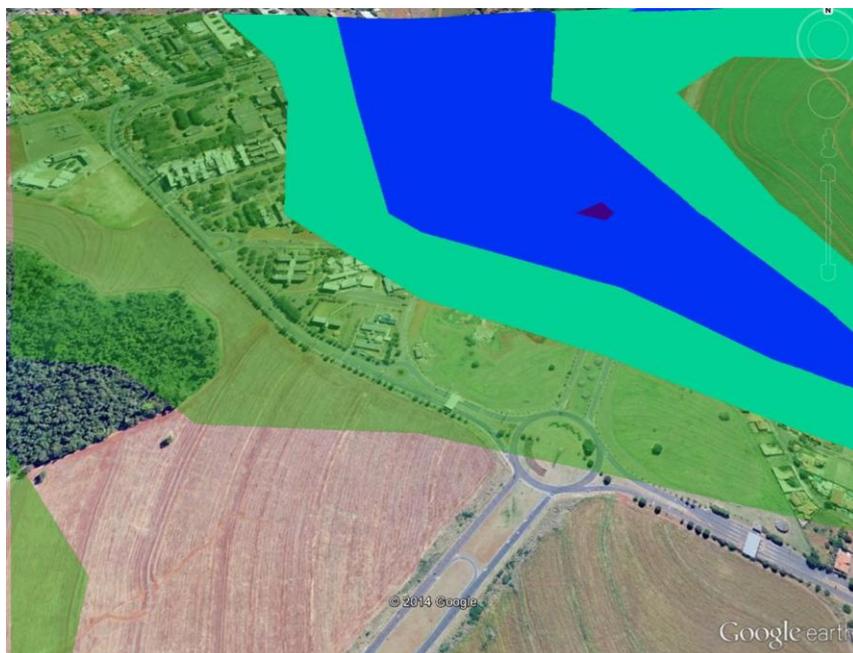


Figura 3.4 Detalhe de mancha de cobertura para o sinal analógico

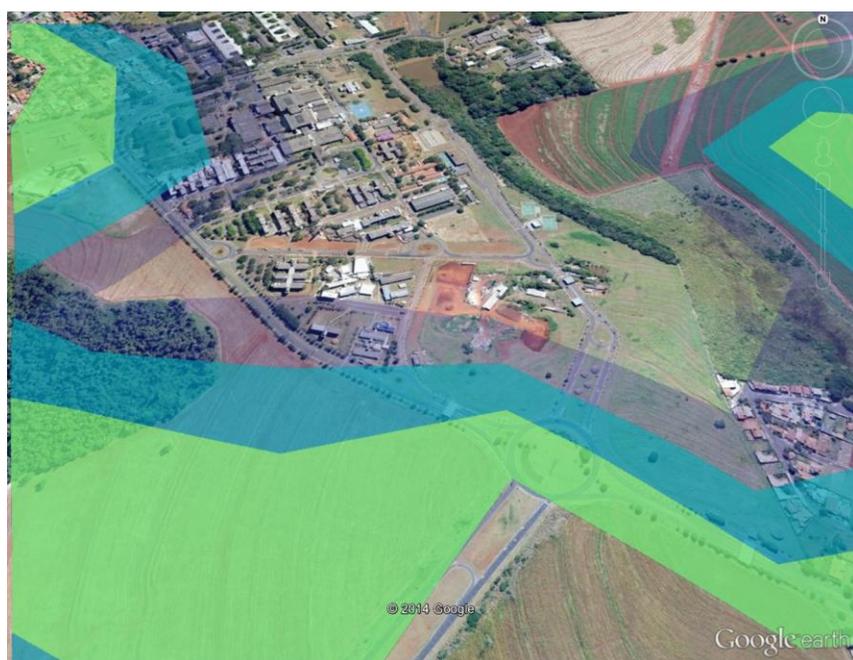


Figura 3.5 Detalhe de mancha de cobertura para o sinal digital

### 3.2 Estratégias de Repetidores e Gap-Fillers

A Figura 3.6 apresenta o diagrama de um *Gap-Filler* básico. Apresenta uma antena receptora um filtro cancelador de eco, já mostrado no Capítulo 2, um amplificador de RF e uma antena transmissora sendo que todos estes elementos operam em uma única frequência (canal).

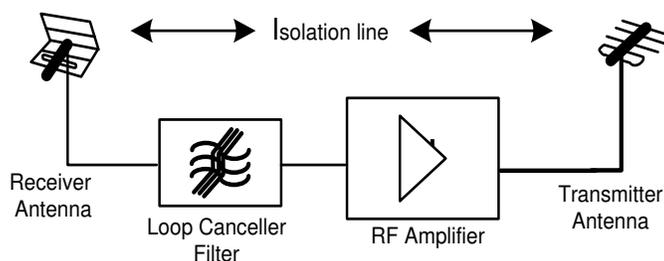


Figura 3.6 Gap-Filler Básico

A Figura 3.7 apresenta uma variação chamada de 'repetidor de canal' que se diferencia do *Gap-Filler* por não possuir um filtro cancelador de eco. Apresenta um filtro de canal, amplificador de frequência intermediária (FI), controle automático de ganho (CAG), e amplificador de saída com todos elementos operando no canal 42.

A Figura 3.8 apresenta um repetidor chamado de *Transposer* que demodula e reconstrói o sinal podendo neste caso mudar a frequência de transmissão para outro canal diferente da recepção.

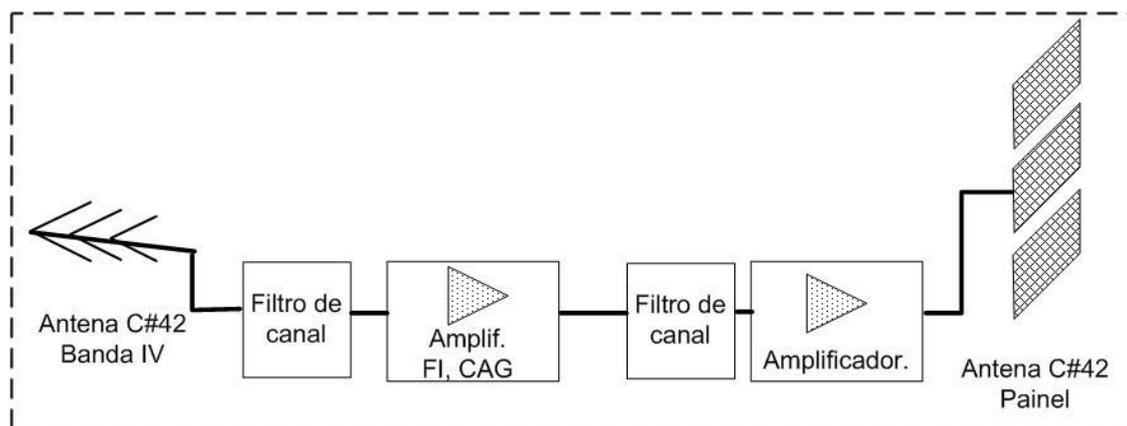


Figura 3.7 Repetidor de canal

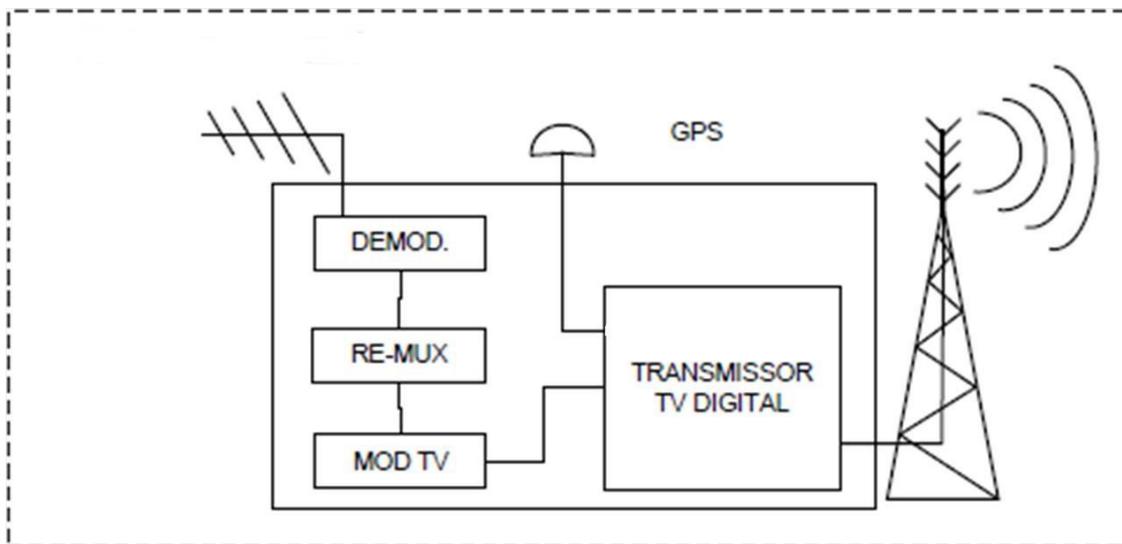


Figura 3.8 Repetidor "Transposer" que pode operar com frequências diferentes

A tecnologia empregada no *Gap-Filler* não é de um equalizador adaptativo de canal embora exista um filtro adaptativo. Este filtro é projetado para cancelar ecos dentro da realimentação do *Gap-Filler* não trabalhando com ecos dos multicaminhos do canal. Porém dentro da rede SFN podem ocorrer ecos provenientes de outros transmissores da rede logo existe a necessidade de se sincronizar o *Gap-Filler* se houver sobreposição de sinal. Sua faixa de atuação está em cancelar os ecos dentro de uma faixa limitada de até no máximo  $5\mu\text{s}$  evitando que a realimentação tenha início. Esta é a chamada janela de cancelamento do *Gap-Filler* e é muito menor que a duração de um eco de multicaminho ou de transmissor.

Das análises e simulações teóricas surgiram aplicações práticas de *Gap-Filler* feitas dentro da área de cobertura de uma rede SFN localizada na região suburbana de Campinas, São Paulo. Este experimento foi para provar a factibilidade da instalação do *Gap-Filler* dentro da área da rede SFN. Após a comprovação dos resultados o *Gap-Filler* foi mantido em operação. Baseada nas especificações do padrão ISDB-T e no atual desempenho dos receptores de TV digital foi calculado o ganho do *Gap-Filler* em (Modulation Error Rate) MER expresso em (dB). O mesmo foi feito para áreas de sobreposição do sinal principal com o sinal do *Gap-Filler*.

O objetivo principal do *Gap-Filler* é cobrir áreas de sombra que surgem dentro da área de cobertura principal devido às características muito diferentes em relação ao sinal analógico. Com a expansão e aumento de importância do sinal móvel, locais como shoppings, praças, avenidas centrais com alto fluxo de pessoas podem se beneficiar com um sinal de melhor qualidade fornecido por um *Gap-Filler*.

Os testes de campo foram feitos a partir de uma rede SFN implantada por uma emissora comercial que abrange a região metropolitana de Campinas. A rede SFN é composta de uma geradora principal situada na cidade de Campinas operando no canal de UHF 42 (638 / 644 MHz). Área de sombra é definida como uma área sem sinal utilizável dentro de uma área de cobertura maior servida por um canal de TV aberta (neste trabalho 'aberta' significa recepção via 'ar' livre e gratuita). Para recepções fixas é necessária a instalação de antenas externas ou internas. Nas áreas de sombra, mesmo com antenas externas não é possível a sintonia do canal de televisão. A área de sombra que foi objeto deste trabalho cobria o campus da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. O sinal de TV nesta área era muito fraco tornando impossível sua recepção.

A área em cor verde na Figura 3.9 foi obtida por simulação utilizando o software de previsão de cobertura CRC-CovLab. A coloração verde indica a região do sinal com -45 dBm. este sinal provém do transmissor principal mas regiões de interesse não estão adequadamente servidas por um sinal utilizável. Geograficamente o campus da universidade e uma parte da região urbana do subdistrito de Barão Geraldo estão em uma depressão em relação ao nível médio do terreno, Figura 3.10. Nesta região o sinal medido em diversos pontos obteve uma média de -97 dBm. De acordo com a teoria o uso de um reforçador de sinal *Gap-Filler* é indicado para solução deste caso.



Fig.3.9 Sinal devido ao transmissor principal.

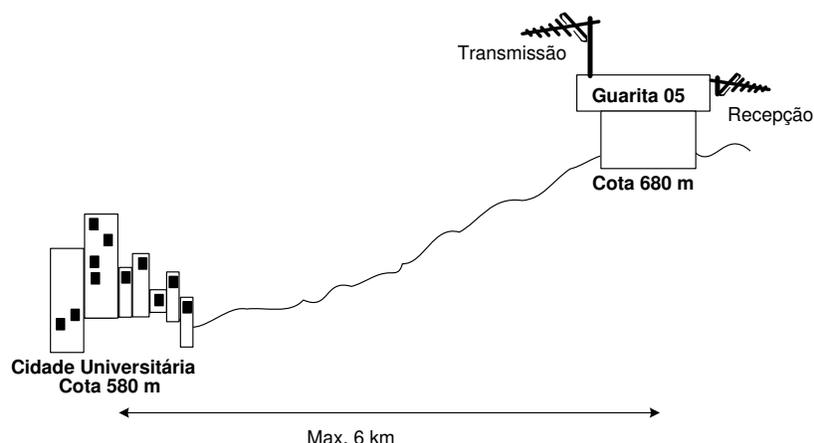


Figura 3.10 Desnível do terreno em relação à instalação do *Gap-Filler*

### 3.3 Polarização das Antenas Transmissora e Receptora

O advento da TV digital e o uso de redes SFN abrem novas possibilidades de transmissão do sinal, dentre elas a possibilidade de se mudar a polarização das antenas transmissoras e receptoras. Pode-se transmitir uma parcela da potência do sinal na polarização tradicional (horizontal) que serve à recepção fixa. Porém é possível transmitir uma parcela da potência do sinal em polarização vertical mais apropriada para a recepção móvel e recepção interna. Para alimentar o *Gap-Filler* esta polarização também é indicada por discriminar o sinal que chega à antena aumentando a isolamento do próprio *Gap-Filler*. A Figura 3.11 mostra a antena Log-Periódica de recepção do *Gap-Filler* no modo vertical [40], [41] que discrimina o sinal ajudando a evitar a interferência de acoplamento.



Figura 3.11 Antena de Recepção do *Gap-Filler* em Polarização Vertical.

A Figura 3.12 mostra a antena de transmissão Log-Periódica, banda IV-UHF (*Ultra High Frequency*) do *Gap-Filler* na polarização horizontal que cobre o campus de Barão Geraldo. Ambas as antenas de transmissão e recepção estão compartilhando a mesma estrutura de alvenaria da laje do telhado de um posto de guarita. A distância entre a antena transmissora e a antena receptora é de cerca de doze metros. O desnível em altura entre as antenas é de cerca de quatro metros.



Figura 3.12 Antena Transmissora em polarização horizontal.

A Figura 3.13 mostra a região sombreada com as cores azul e púrpura. Nesta simulação a cor azul indica um sinal com intensidade de campo entre 60 a 65 dB $\mu$ V/m e a cor púrpura um sinal com intensidade de campo entre 51 a 55 dB $\mu$ V/m. Este sinal é devido ao transmissor do *Gap-Filler* sendo que agora regiões de interesse tem sinal adequado à recepção. A antena do transmissor do *Gap-Filler* é diretiva com ganho de 10 dB.

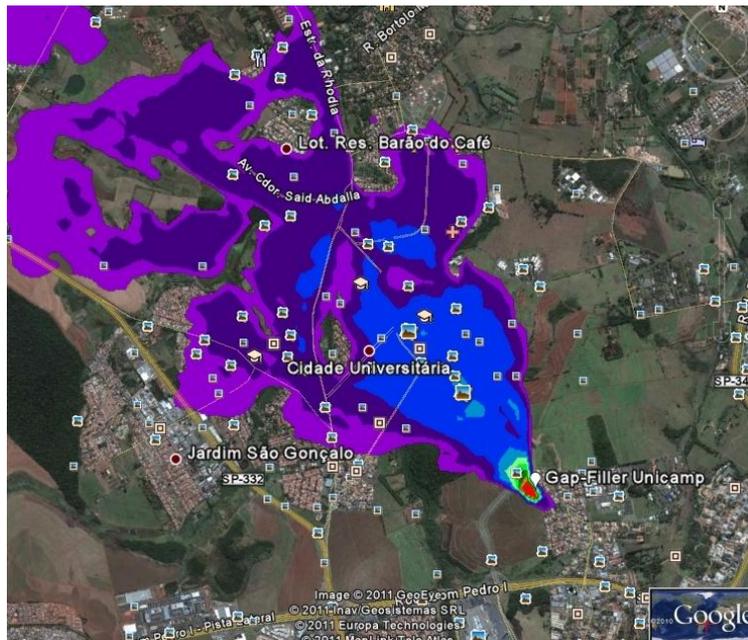


Figura 3.13 Sinal devido ao transmissor do *Gap-Filler*.

### 3.4 Recepção em áreas com Ecos

Como visto no Capítulo 2 o receptor deve lidar com os ecos de maneira eficiente para que a recepção tenha sucesso. Dois tipos de ecos são encontrados na rede SFN, ecos devido aos obstáculos do caminho e ecos devido a outros transmissores da rede.

A Figura 3.13 mostra o sinal de vido ao transmissor do *Gap-Filler* e a Figura 3.14 mostra a área de sobreposição dos sinais devidos ao transmissor principal e ao sinal do *Gap-Filler* e a Figura 3.15 mostra a resposta ao impulso dos sinais do transmissor principal e do *Gap-Filler*. A potência utilizada

nos testes de campo foram de 0,7 a 1 Watt para o transmissor do *Gap-Filler* e cerca de 2 kWatt para o transmissor principal. A Figura 3.16 mostra o sinal útil do *Gap-Filler*.



Fig. 3.14 Sobreposição de sinal devido ao transmissor principal e o *Gap-Filler*

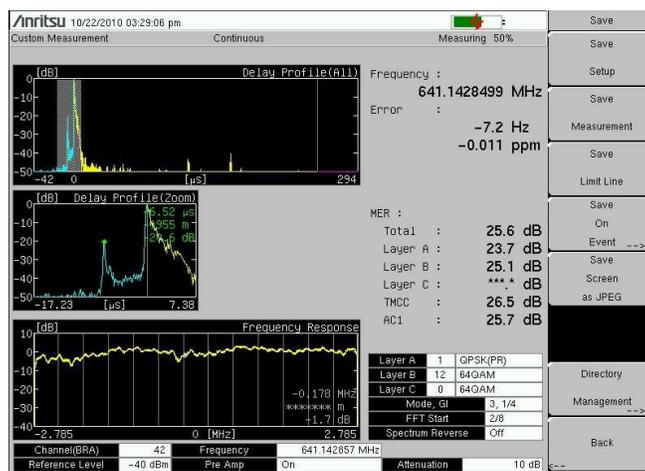


Figura 3.15 Sobreposição dos sinais do transmissor principal e *Gap-Filler*



Figura 3.16 Sinal útil do *Gap-Filler*

### 3.5 Ajuste de Atrasos para o *Gap-Filler*

Em uma rede SFN dinâmica existe a possibilidade de se atrasar o sinal transmitido pelo transmissor principal quando o sinal do *Gap-Filler* interfere na área do transmissor principal. Neste caso um Ponto Monitor da área do transmissor principal identificaria o sinal proveniente do *Gap-Filler* como interferente. Duas alternativas seriam possíveis: diminuir a potência do *Gap-Filler* ou atrasar o sinal do transmissor principal. Foi adotado como prioridade a diminuição da potência dos transmissores secundários e *Gap-Filler* e ação secundária alterar atrasos da rede.

### 3.6 Ajustes com Pré-Eco

No caso do sinal do *Gap-Filler* ser um pré-eco fora do intervalo de guarda para o receptor do Ponto Monitor, a rede SFN dinâmica aumentará o atraso do sinal do *Gap-Filler* para que ele se torne um pós-eco dentro do intervalo de guarda se o equipamento permitir este ajuste.

A Figura 3.17 e Figura 3.18 apresentam as medidas do sinal sem a atuação *Gap-Filler*. A Figura 3.19 e Figura 3.20 mostram a melhora do sinal com a atuação do *Gap-Filler* utilizando polarização vertical para recepção do sinal e polarização horizontal para transmissão do sinal.

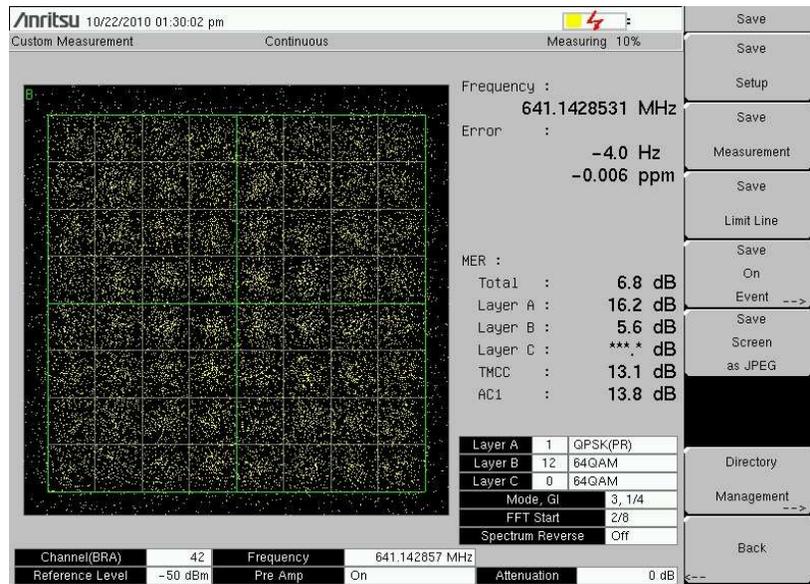


Figura 3.17 Sinal da constelação sem atuação do *Gap-Filler*

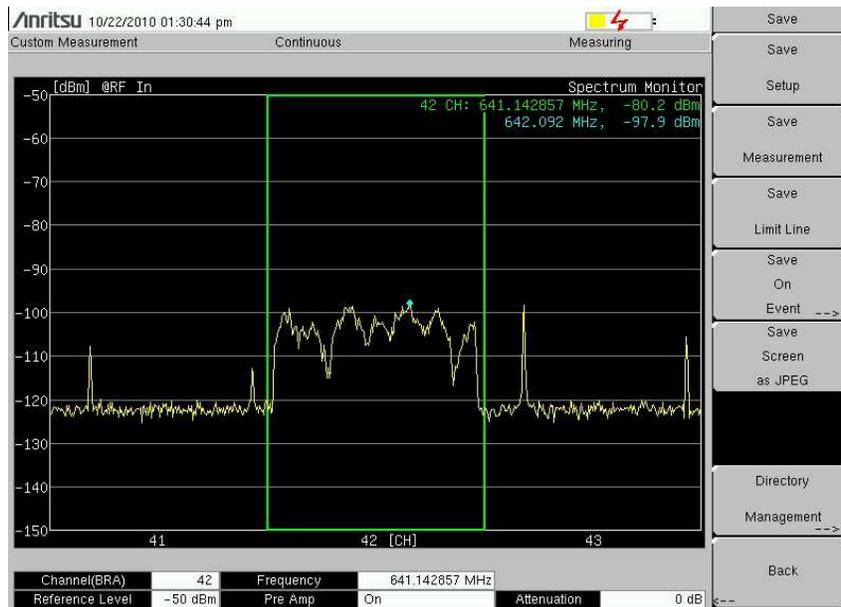


Fig 3.18 Nível do sinal sem atuação do *Gap-Filler*

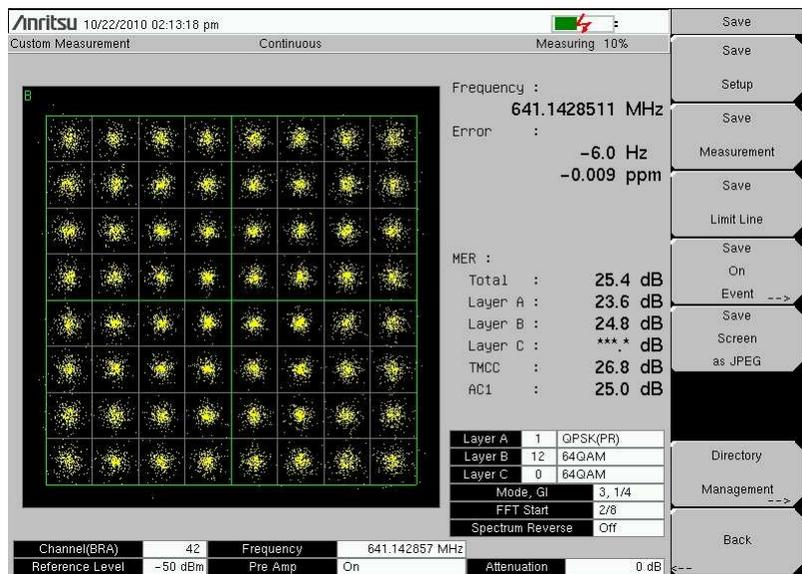


Figura 3.19 Sinal da constelação com atuação do *Gap-Filler*



Figura 3.20 Nível do sinal com atuação do *Gap-Filler*

Não foi necessária a utilização de uma outra faixa de canal para a cobertura da área de sombra. O *Gap-Filler* é uma ferramenta eficiente e de baixo custo para a solução de coberturas de área de sombra dentro da área de cobertura principal como demonstrado neste trabalho. A possibilidade de integrá-lo a uma rede SFN dinâmica também se mostrou possível conforme testes realizados em campo.

# Capítulo 4

## ***REDES SFN DINÂMICAS***

### **4.1 Descrição das redes SFN para TV Digital Terrestre**

Basicamente, alocação de canal é o ato de atribuir bandas de frequências aos serviços de telecomunicações. O mundo das telecomunicações apresenta diversos serviços destinados às comunicações entre transmissores e receptores. Assim sendo o espectro de frequências é subdividido em diversos serviços.

No caso da TV aberta o sistema é de radiodifusão ou '*Broadcasting*', ou seja, um transmitindo e muitos recebendo, portanto a universalização está em se aumentar o número de executantes do serviço, provendo-se os diversos canais de TV. Logo, o serviço de TV aberta é dividido em diversos canais de televisão que são outorgados para os executantes do serviço, no caso, as geradoras de TV e recebidos pelo telespectador nos aparelhos domésticos de televisão através de uma antena externa ou interna.

A televisão aberta terrestre no Brasil é formada por estações geradoras e estações retransmissoras, sendo que as estações geradoras são responsáveis por criar conteúdo que é chamado de 'programação' e as estações retransmissoras são responsáveis por repetir essa programação retransmitindo-a para recepção, pelo público em geral, em locais não atingidos diretamente pelos sinais da estação geradora de televisão ou atingidos em condições técnicas inadequadas.

No Brasil existem estações geradoras de TV que retransmitem o conteúdo de outra emissora e eventualmente inserem algum conteúdo diferente durante uma parte do tempo. Estas estações, também geradoras, são conhecidas como afiliadas das geradoras principais estas chamadas de 'geradoras cabeça de rede', ou simplesmente cabeça de rede. As estações geradoras afiliadas retransmitem a maior parte da programação da geradora cabeça de rede, inserindo uma programação diferenciada durante um intervalo de tempo determinado. Por sua vez, as emissoras afiliadas geralmente cobrem grandes áreas

com a mesma programação em canais diferentes. Atualmente existem porcentagens de tempo em que a estação deve cumprir com a programação gerada localmente visando uma maior regionalização.

Não existe, no mundo, uma padronização quanto ao número de canais dedicados ao serviço de TV, nem ao seu tamanho ou banda utilizada. Porém historicamente estes canais se concentram nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). Obedecendo-se às particularidades de cada país, foi adotado um número diferente de canais, assim como uma largura de banda diferente por canal.

No Brasil o uso de retransmissoras destinadas a repetir a programação de uma geradora de TV tornou-se uma prática comum, com o objetivo de se alcançar o maior número possível de telespectadores. Então, canais de TV foram destinados unicamente para a retransmissão de TV, surgindo daí a figura das retransmissoras de TV em conjunto com as geradoras de TV, cabeças de rede e afiliadas. Resumindo, passaram a existir as geradoras de TV que geram programação, aqui significando conteúdo, e as retransmissoras de TV que não geram programação e somente retransmitem este conteúdo.

O fato de existirem geradoras afiliadas acontece por diversos motivos, mas um motivo importante é o custo de produção de programas de TV, que demanda altos investimentos em pessoal e equipamentos, e muitas vezes não apresenta o retorno financeiro desejado, então o empresário detentor da outorga de uma geradora prefere se afiliar a uma grande geradora e retransmitir seu conteúdo inserindo somente pequena parte de conteúdo local. Tecnicamente cada geradora e retransmissora recebe um canal diferente para evitar interferências mútuas, formando o sistema chamado de Rede de Frequência Múltipla ou MFN (*Multi Frequency Network*), onde o mesmo conteúdo trafega em diferentes canais. O conceito de rede da televisão analógica atual é o exemplo de uma rede MFN, onde grandes áreas são cobertas com a mesma programação básica por um grande número de diferentes canais divididos entre geradoras e retransmissoras. Assim sendo as retransmissoras são destinadas à extensão da cobertura das geradoras de TV e ao atendimento de regiões de sombra, tendo seus canais estabelecidos pela ANATEL no Plano Básico de Distribuição de Canais para Retransmissão de Televisão em VHF e UHF, sendo este plano chamado de PBRTV. As redes de emissoras no Brasil com mesma programação principal abrangendo geradoras e retransmissoras possuem as seguintes características básicas [39]:

- a) Redes com geração geograficamente distribuída e penetração nacional, como exemplo as redes Globo, SBT, Record e Bandeirantes;
- b) Redes com geração centralizada e penetração nacional, como exemplo as redes Vida e Rede TV;

- c) Redes com geração centralizada e penetração regional, como exemplo a rede Cultura, além de um número de estações independentes em geral com caráter educativo ou comunitário e com penetração estritamente local que geralmente não possuem redes de retransmissão.

No caso das redes Globo, SBT, Record e Bandeirantes, existem as geradoras chamadas cabeças de rede, que geralmente se localizam em São Paulo e Rio de Janeiro e que são as responsáveis por produzir a maior parte do conteúdo de programação que será exibido em todo território nacional. Esta programação será recebida no interior (fora das capitais) pelas geradoras chamadas de afiliadas, estas por sua vez inserem um novo conteúdo de programação durante um período de tempo limitado.

As geradoras afiliadas então retransmitem este conteúdo através de sua rede de retransmissoras terrestres cobrindo assim sua área de atuação. Por força de legislação as retransmissoras não podem gerar conteúdo de programação, logo sua programação seria idêntica à programação da geradora principal.

Com o avanço tecnológico surgiram as modulações OFDM/COFDM que possibilitaram a existência de Redes de Frequência Única ou rede SFN onde o conteúdo trafega em um único canal. Neste trabalho entende-se por rede SFN, um conjunto de transmissores trabalhando com o mesmo sinal (conteúdo), a partir de sincronismo em frequência, tempo e conteúdo.

Atualmente no Brasil algumas redes de televisão utilizam as redes SFN para a retransmissão de sinais digitais. As mais diversas configurações têm sido implantadas tanto para cobertura de pequenas áreas como para grandes áreas. Também para cobertura de áreas de sombra onde existe deficiência de intensidade de sinal devido aos obstáculos.

Resumidamente a rede SFN economiza o uso do espectro eletromagnético, porém necessita de projetos mais bem elaborados em relação à cobertura, atrasos, sincronismo de rede e monitoração em, tempo real, como propõe este trabalho.

## **4.2 O conceito de REDE**

O conceito de rede para a radiodifusão está relacionado ao seu conteúdo de programação, e atualmente na transmissão digital com as redes SFN passa a ser também relacionado à canalização. O conceito de rede em informática e telemática não se aplica ao mundo da radiodifusão de televisão. Este trabalho defende a tese de que o conceito SFN possa ampliar o conceito de rede para a radiodifusão. Diferentemente do sistema celular que está integrado em uma verdadeira rede onde os transmissores enxergam os receptores e vice-versa, o sistema de radiodifusão de TV opera com o transmissor cego,

ou seja, o transmissor não enxerga o receptor, sendo que o transmissor preenche uma grande área com sinal durante todo o tempo existindo ou não receptores ativos. Interligando-se os transmissores de TV a pontos de recepção, aqui chamados de Pontos Monitores, em uma rede de comunicação onde os Pontos Monitores alimentam os transmissores com informações que ajustam parâmetros de transmissão para uma operação da rede SFN mais robusta e com menor probabilidade de falhas. Este trabalho propõe a ideia de uma rede SFN que responda a determinadas variações do canal, com troca de dados entre os transmissores e seus Pontos Monitores atuando dinamicamente nos parâmetros da rede como mostra a Figura 4.1, onde as setas azuis representam os multi-caminhos (ecos), as setas vermelhas representam os sinais diretos que chegam a antena, as setas verdes representam a comunicação bidirecional entre Pontos Monitores e transmissores e as setas pretas representam o sinal do transmissor TX 1 de alimentação para os transmissores TX 2 e TX 3. O mais novo sistema celular 4G/LTE [42], [43], [44], utiliza o conceito de redes SFN dinâmicas (DSFN) dentro de um conceito mais amplo *Multicast Broadcast Single-Frequency Network* (MBSFN) onde um grupo de transmissores operam no mesmo canal se houver receptores ativos.

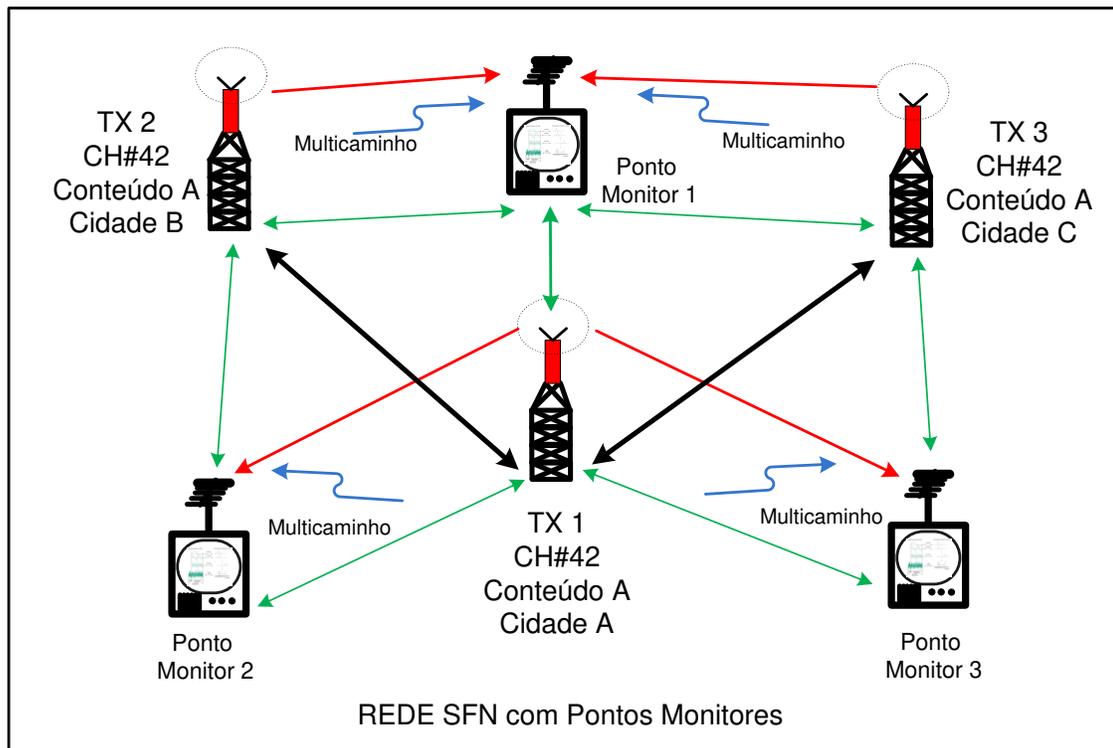


Figura 4.1- Redes SFN com Pontos Monitores

Como visto no Capítulo 1 redes SFN extensas podem apresentar problemas em suas bordas devido às variações das condições de propagação podendo em alguns casos interromper o serviço como ocorreu em Portugal. Este trabalho simula uma estratégia dinâmica para que a rede continue funcionando mesmo que as condições de propagação variem dentro de determinados limites. Outra justificativa de se propor uma rede conectada é o serviço móvel oferecido pela TV digital que deve incrementar as receitas e deixar a TV aberta mais competitiva em relação a outras mídias. O serviço móvel apresenta similaridades com o sistema de telefonia celular com respeito aos problemas de recepção e neste quesito uma rede dinâmica se mostra útil em conjunto com técnicas de formação de feixes, *beam forming*, por exemplo.

Os parâmetros da rede que podem ser alterados são:

A potência no transmissor pode ser diminuída ou aumentada conforme a solicitação da rede, porém há limitações nesta estratégia. O excesso de potência pode causar interferência e a diminuição de potência pode deixar áreas da região de cobertura sem sinal.

Atrasos no sinal transmitido podem ser incrementados e posteriormente decrementados alterando as áreas de interferência.

Antenas: Inclinação, *Tilt*, mecânico e elétrico podem ser utilizados junto a técnicas de formação de feixes, porém não serão objeto de estudo deste trabalho no momento, mas sim posteriormente para o ambiente urbano.

### **4.3 O Ambiente Controlado**

Um exemplo de ambiente controlado Figura 4.2 foi proposto no projeto STB-Scan ( Escaneamento utilizando Set-up Box). O projeto faz a coleta de dados de recepção para diversos fins, podendo também ser utilizado para coletar dados específicos e alimentar uma rede dedicada à rede SFN. Embora a Figura 4.2 mostre uma instalação dentro de um abrigo dedicado, na prática isso não é necessário, sendo a instalação dos seus componentes mostrada na Figura 4.3. Esta instalação mostra a simplicidade do lugar, sendo necessário somente que se tenha disponível um ponto de acesso à internet e possa ser instalada uma antena externa. Esta simplicidade reduz custos de instalação, porém preserva os parâmetros conhecidos de ganho de antena perdas nos cabos limiar de recepção etc. É importante que o Ponto Monitor tenha baixo custo para não impactar o projeto da rede SFN.

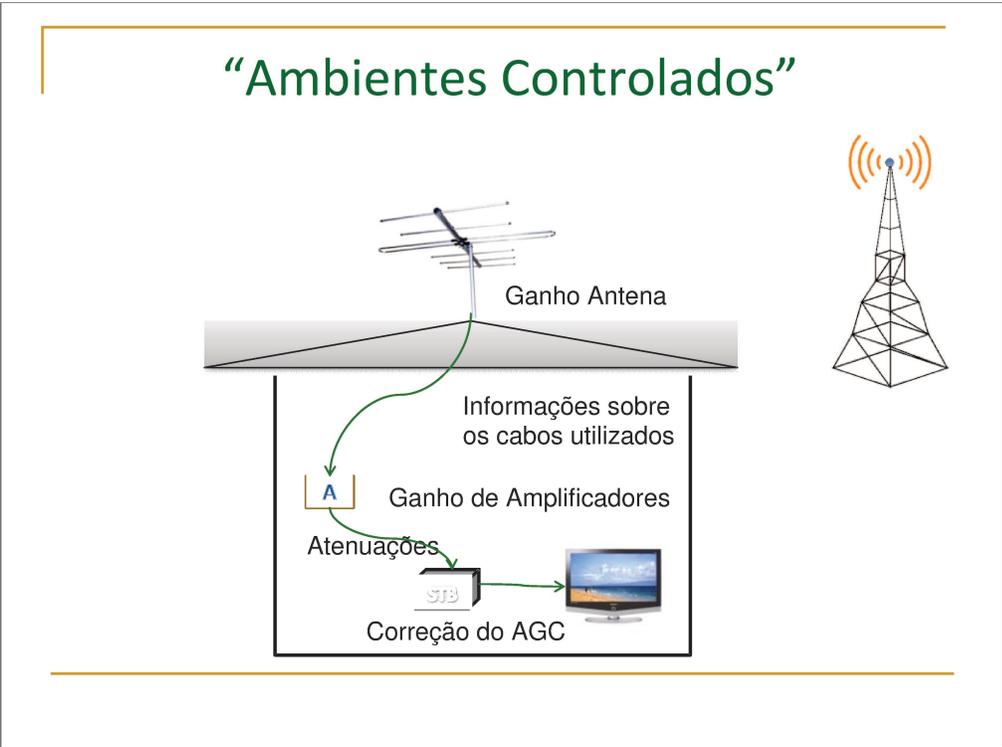


Figura 4.2 Instalação em ambiente controlado

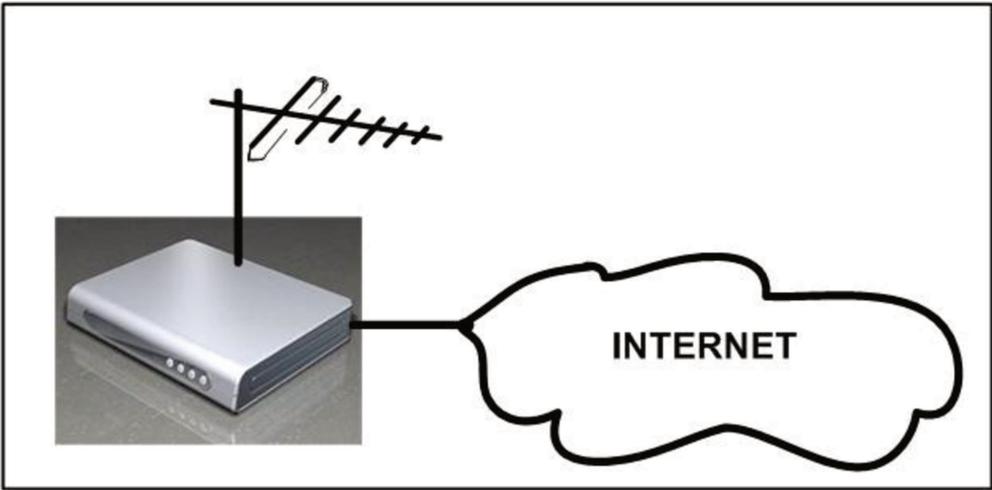


Figura 4.3 Instalação simplificada de ambiente controlado

## 4.4 Funcionamento do Ponto Monitor

Em intervalos de tempo pré-determinados o ponto monitor faz uma varredura do sinal de recepção e verifica os parâmetros de funcionamento da rede analisando o perfil de atraso, *delay profile*, do sinal [45], [46]. Se os parâmetros estiverem fora dos limiares estabelecidos, o Ponto Monitor envia uma requisição ao transmissor principal ou secundário podendo ser de diminuição da potência do transmissor que se tornou interferente ou um ajuste de atraso.

O Adaptador de Rede, Figura 4.4 pode acessar a rede pública de internet, ou uma rede privada de dados (neste caso é necessário que exista a infraestrutura de transmissão e recepção). Este adaptador pode funcionar como agente no protocolo SNMP [47] que já é usado em equipamentos para radiodifusão de televisão digital como equipamentos de retransmissão para canais diferentes, 'Transpositores', *transposers* [48].

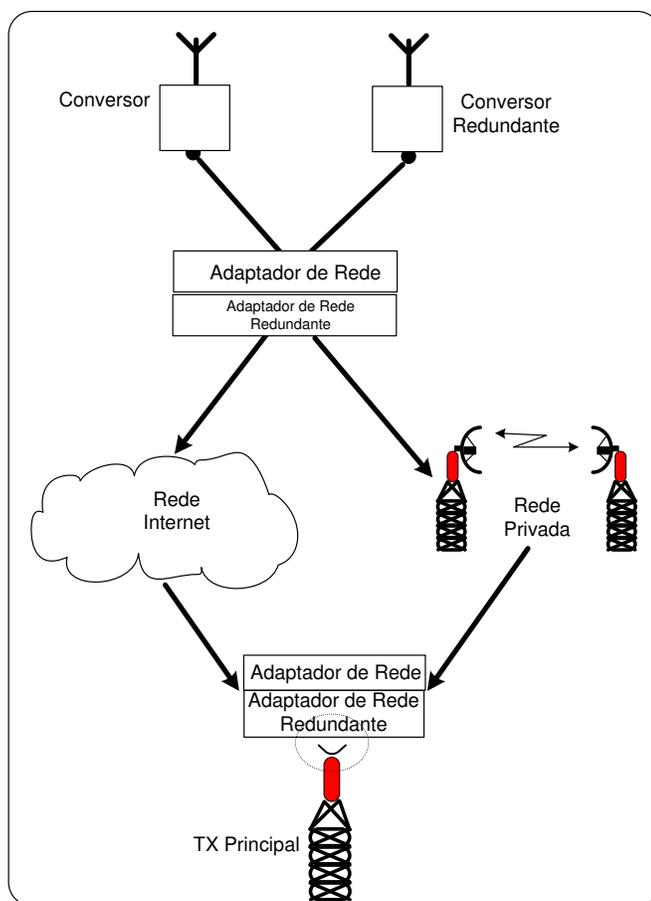


Figura 4.4 Acesso à Internet ou rede privada

O funcionamento proposto para o ponto monitor se inicia com a recepção do sinal digital pelo covertor STB-Scan ou outro receptor configurável e compatível com a disponibilização dos parâmetros desejados. Uma alternativa proposta para utilização no receptor do Ponto Monitor e foi baseada na recepção 'Quasi-Ótima' descrita no Capítulo 2 visando um melhor aproveitamento desta estratégia para facilitar o fluxograma do Ponto Monitor. Esta opção é mostrada na Figura 4.5.

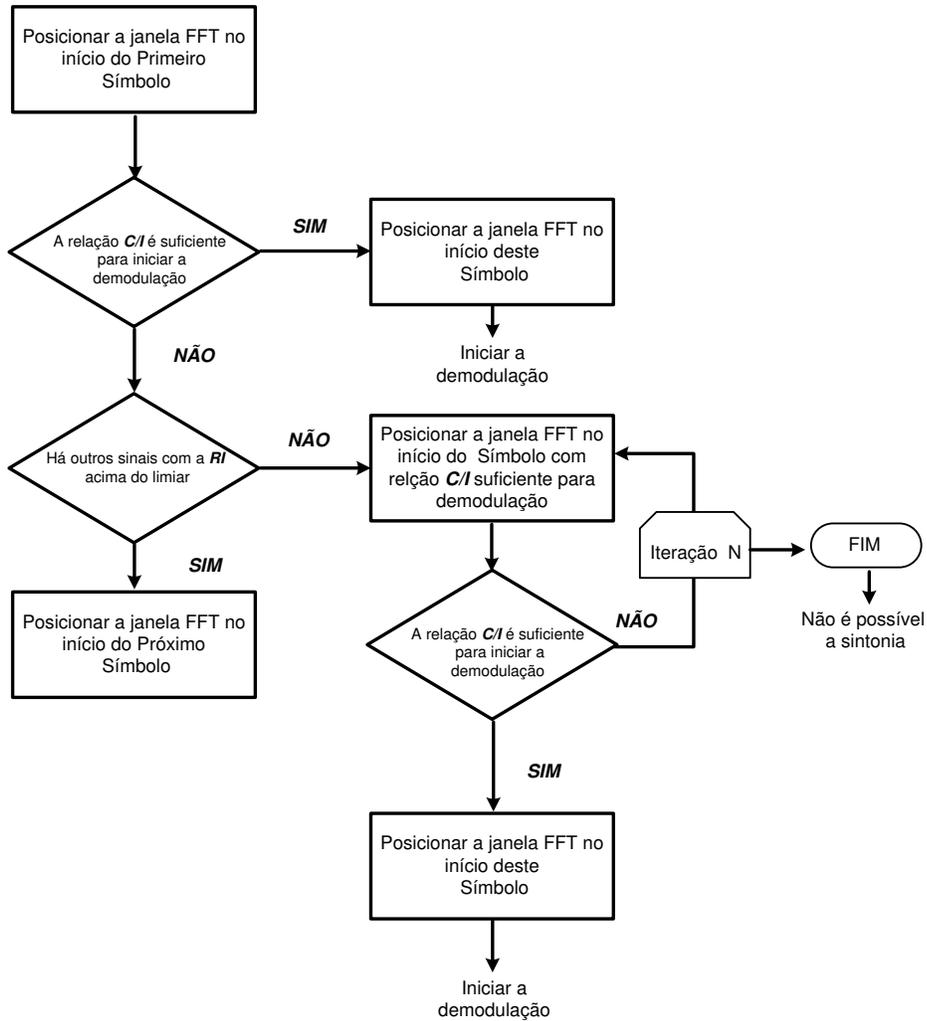


Figura 4.5- Estratégia 'Quasi-Ótima' modificada

## 4.5 Análise do Perfil de Atrasos

A tarefa mais importante do Ponto Monitor é a análise do perfil de atrasos do momento de recepção da antena. A Figura 4.6 apresenta o estado de recepção de um Ponto Monitor.

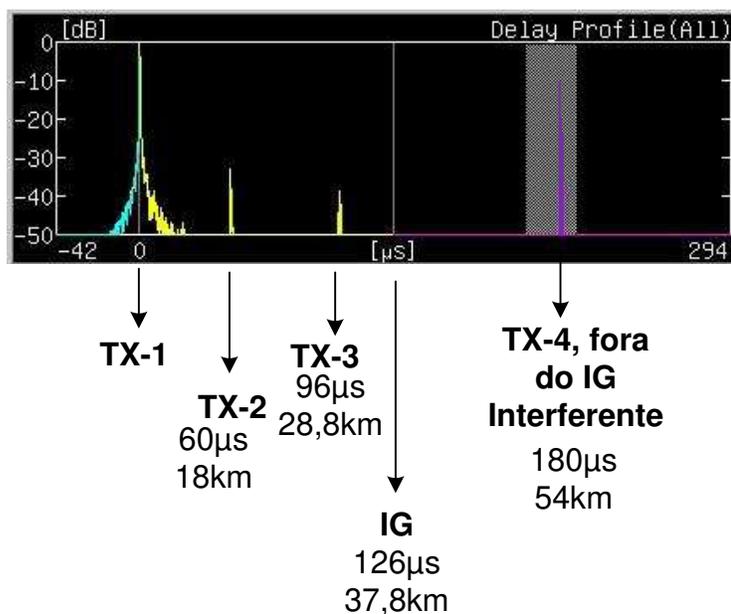


Figura 4.6 Perfil de atrasos dos vários transmissores da rede SFN

O primeiro passo é atualizar a inicialização, *Set-Up*, do Ponto Monitor que significa atribuir ao sinal de referência como sendo proveniente do transmissor principal da rede SFN. Isto é feito da seguinte maneira: A localização do Ponto Monitor é conhecida através de suas coordenadas geográficas. A partir deste dado podemos inferir distâncias aos atrasos dos sinais que chegam a antena atribuindo valores TX1, TX2, TX3, ...e assim sucessivamente, sendo que o TX1 sempre será o transmissor principal e os demais serão transmissores secundários. Assim alimentamos o algoritmo do ponto monitor com a seguinte Tabela 4.1:

Tabela 4.1 Inicialização do Ponto Monitor

Transmissor	Status	Atraso( $\mu\text{s}$ )	Distância (km)
TX1	Principal	0	0
TX2	Secundário	60	18
TX3	Secundário	96	28,8
TX4	Secundário	180	54

Esta tabela apresenta as distâncias e os atrasos normalizados porque o instrumento de medida sempre coloca o sinal principal na referência zero. A situação física real é mostrada na Figura 4.7.

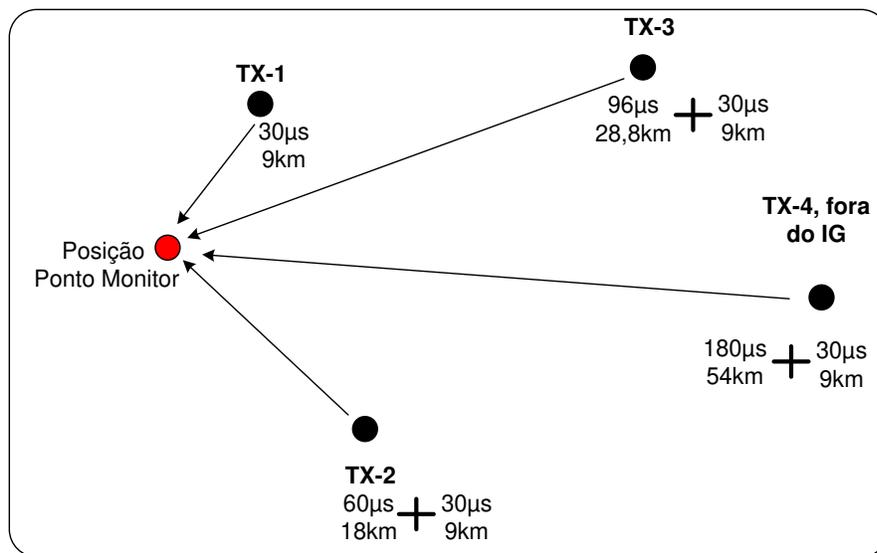


Figura 4.7 Posição física dos transmissores e atrasos relativos

O algoritmo somente precisa saber quem é o transmissor principal e os secundários e suas características de potência e atraso. A inserção dos dados da coluna 'Transmissor' pode ser feita de maneira manual, alimentando o *set-up* para ativação do algoritmo do Ponto Monitor.

Após a nomeação dos transmissores da rede é aplicado o fluxograma da Figura 4.8 iniciando-se a comunicação entre o ponto monitor e os transmissores da rede SFN. A nomeação do transmissor pode ser a mesma (*ID*) que é inserida no multiplexador do transmissor principal. Para confirmação em campo, pode-se ligar e desligar momentaneamente o transmissor respectivo para identificação correta.

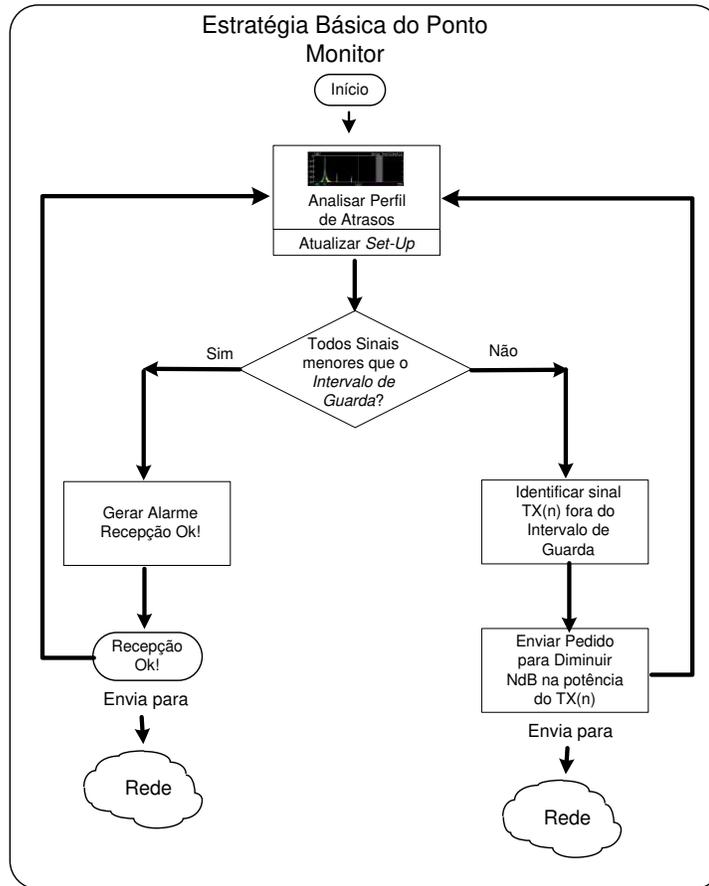


Figura 4.8 Fluxograma do Ponto Monitor

No exemplo acima o TX4 estava fora do Intervalo de Guarda e sua potência era suficiente para causar interferência destrutiva no sinal recebido pelo ponto monitor causando efeito de blocagem na recepção do sinal como mostra a Figura 4.9 e a Figura 4.10.

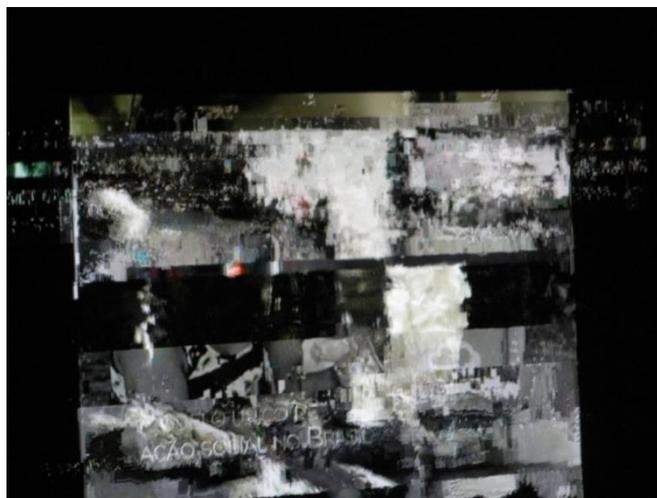


Figura 4.9 Blocagem do sinal devido à interferência

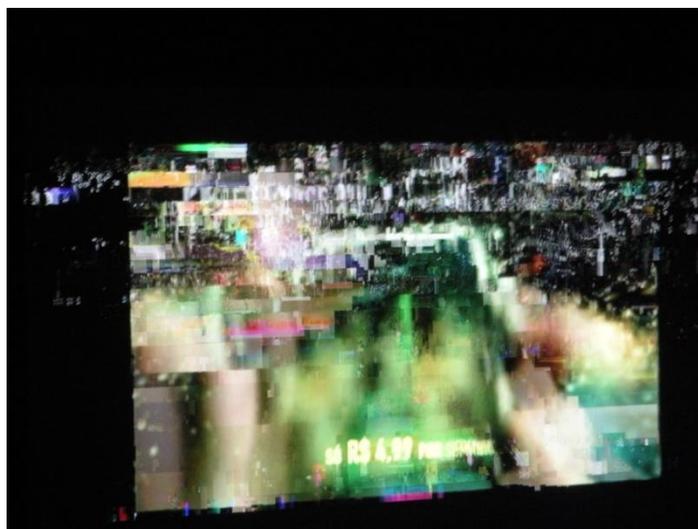


Figura 4.10 Blocagem do sinal devido à interferência

O sinal interferente sofre atenuação mais acentuada durante o dia não interferindo e permitindo períodos de operação normal na recepção no Ponto Monitor, mas durante a noite a recepção melhora e o sinal chega com maior intensidade, causando blocagens no sinal como visto nas Figuras 4.8 e 4.9. O algoritmo do Ponto Monitor faz uma requisição para diminuir a potência do TX4. Esta requisição foi aceita porque não houve apagamento de outros Pontos Monitores dentro da área de cobertura do TX4. A situação após a diminuição da potência é mostrado na Figura 4.11.

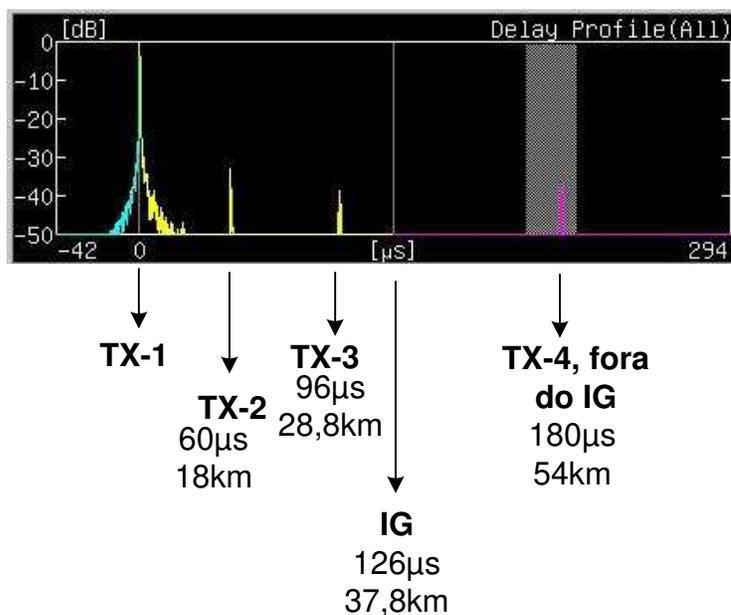


Figura 4.11 Situação após diminuição de potência de TX-4

## **4.6 Comparação entre Unidade Móvel de Medida e o Ponto Monitor**

As medições do sinal transmitido pelas emissoras são geralmente feitas em campanhas de medidas utilizando uma unidade móvel que contém um sistema padrão de recepção utilizando uma antena padrão, um analisador de espectro, demoduladores e sistemas de aquisição de dados. As vantagens são: mobilidade que permite a medição em diversos pontos e atualmente medição de trajetos de percurso. As desvantagens são: alto custo de construção e operação, inviável para pequenas e médias emissoras, medidas em um único momento do tempo, ou seja, os dados coletados mostram a situação em um determinado momento do tempo, e necessidade de intervenção humana técnica especializada para coletar os dados. Para o ponto monitor a maior desvantagem é sua instalação fixa, necessitando de um local para a instalação. Sua versão mais simples mostra uma antena, um receptor que já integra o adaptador de internet enviando os dados de recepção coletados. As suas vantagens são: uma instalação mais próxima da instalação real de recepção, baixo custo, considerando-se os equipamentos utilizados e a vantagem mais significativa que é a coleta de dados ao longo de um período de tempo. Também é possível se efetuar uma campanha de medidas para confirmação de áreas de cobertura mudando os Pontos Monitores sucessivamente nos pontos de medidas com a diferença que estas medidas podem ser coletadas durante um intervalo de tempo. Assim é possível o estudo de médias estatísticas incluindo estudos de confiabilidade de transmissão.

## **4.7 Sinais Dessincronizados na Rede SFN**

Especificamente em uma área de sobreposição de sinais provenientes de transmissores diferentes que trafegam o mesmo sinal pode haver o interesse do radiodifusor em transmitir conteúdos diferentes para localidades diferentes como, por exemplo, um filme que substitui um jogo de futebol para a cidade que sedia a partida, uma exigência comum das confederações estaduais de futebol. Outro exemplo seria a veiculação de um programa local diferente do conteúdo da rede. Neste caso seria interessante uma dessincronização intencional dos sinais para que um dos transmissores possa transmitir um símbolo diferente em um determinado intervalo de tempo.

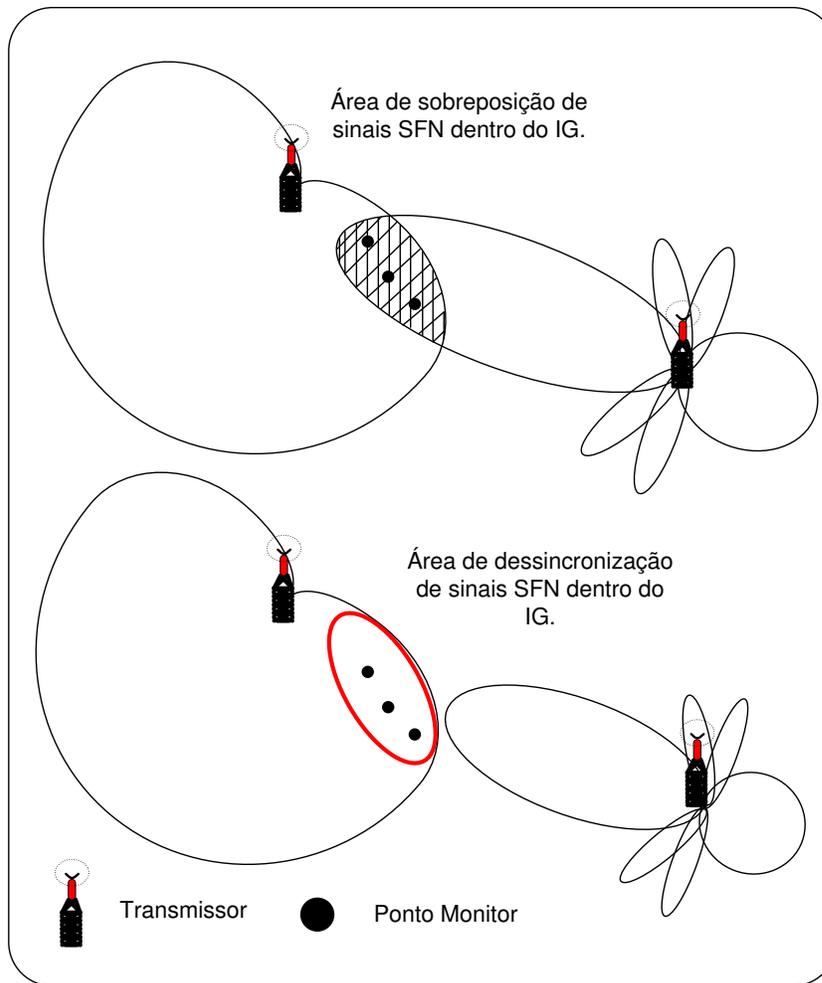


Figura 4.12 Exemplo de dessincronização da rede

Esta dessincronização será possível se a área a ser dessincronizada estiver plenamente atendida por seu transmissor, fato que será monitorado em tempo real pelos Pontos Monitores. O mesmo deve acontecer no momento de sincronizar os sinais da rede. A dessincronização dos sinais acontece por diminuição na potência de transmissão de um dos transmissores da rede extinguindo a área de sobreposição dos sinais. A Figura 4.12 mostra uma diminuição na potência de transmissão do transmissor secundário reduzindo a área de interferência. Neste momento é possível a transmissão de símbolos diferentes. Haverá como consequência uma perda no ganho da rede SFN [49].

## 4.8 Melhoria das condições atmosféricas na Rede SFN

Quando as condições atmosféricas melhoram muito e o relevo apresenta-se sem obstáculos importantes sendo que o sinal do transmissor principal se propaga para além de sua região de cobertura invadindo a região de cobertura de outro transmissor como no caso já mencionado de Portugal. Neste caso os Pontos Monitores da região afetada do transmissor secundário acusarão a perda do sinal e a rede diminuirá a potência do transmissor principal para que a interferência não ocorra. Pode-se estabelecer um prazo de tempo para que a rede restabeleça sua condição normal através de um teste aplicado pelo transmissor principal. A situação está mostrada na Figura 4.13.

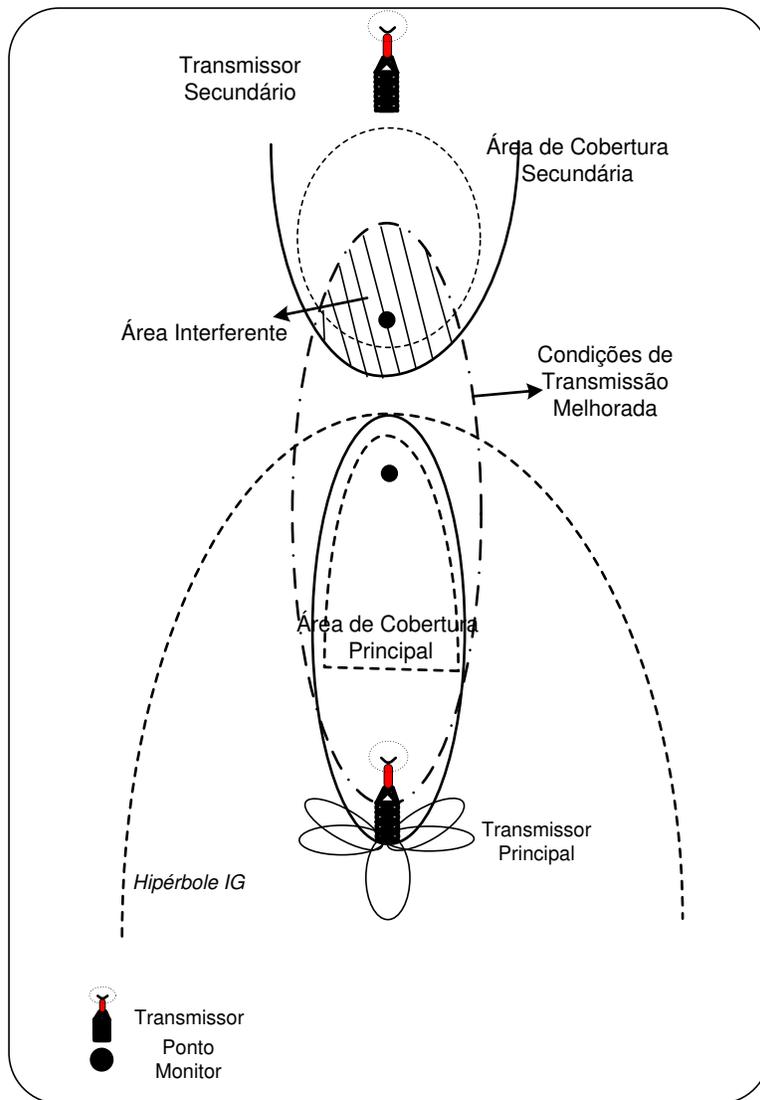


Figura 4.13 Propagação aumentada devido a ocorrência de dutos troposféricos

# Capítulo 5

## ***RESULTADOS E CONCLUSÕES***

As simulações serão feitas com o auxílio do software de análise de cobertura ***Communication Research Center Canada***, CRC-COVLAB para se verificar a eficácia dos ajustes na rede SFN. Foram simuladas as situações que representam a rede no momento antes da atuação dos Pontos Monitores e a situação após a atuação dos Pontos Monitores.

### **5.1 Características do programa CRC-COVLAB.**

Os recentes desenvolvimentos em todas as áreas das telecomunicações têm exigido projetos cada vez mais complexos de sistemas digitais que substituem os antigos sistemas analógicos. Sistemas digitais fornecem melhor qualidade de imagem e som, mas em geral apresentam degradação abrupta do sinal, e conseqüentemente degradação abrupta da qualidade, diferentemente do comportamento do sinal analógico. Esta rápida degradação do sinal digital nas bordas de uma área de cobertura associada à maioria dos sistemas digitais requerem uma maior precisão na predição de cobertura. Os sistemas digitais emergem em um cenário de cobertura mais complexo devido à larga profusão de serviços que surgem incluindo-se os sistemas móveis.

Basicamente os softwares de predição de áreas de cobertura funcionam com o método ponto área, porém no CRC-COVLAB pode-se optar pelo método ponto a ponto dentro de uma grade matricial. Dessa forma é possível escolher a localização dos Pontos Monitores e ligá-los a transmissores previamente escolhidos. Para se considerar as condições atmosféricas utiliza-se a atenuação adicional do canal *Channel Additional Attenuation* para criar uma melhora nas condições de propagação dentro da simulação.

A Figura 5.1 mostra a forma de trabalho do software de predição CRC-COVLAB para as situações desejadas de simulação.

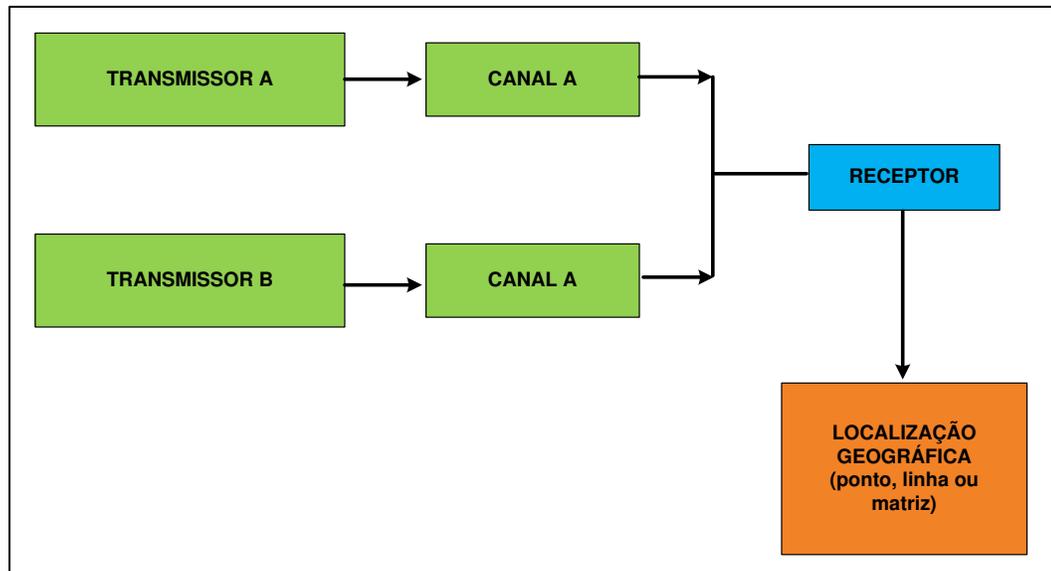


Figura 5.1 Simulação com dois transmissores no mesmo canal

Dois transmissores operando sobre o mesmo canal e um banco de dados geográfico que são designados aos receptores baseados em um ponto, linha ou matriz (uma grade de pontos).

As simulações sempre correspondem a problemas reais existentes em uma rede SFN real de uma emissora comercial. Estudo de caso:

Há um transmissor na cidade de Campinas e um transmissor na cidade de Limeira sendo que será designado o transmissor de Campinas como principal e o transmissor de Limeira como secundário.

Os transmissores possuem as seguintes características técnicas de potência:

Transmissor de Campinas, 200W de potência.

Transmissor de Limeira, 50W de potência.

As características de transmissão da estação são:

Intervalo de Guarda 1/8

Atraso Máximo; 126 $\mu$ s

Distância em linha reta 37,6 km

FEC 3/4

Modo 3, 8K portadoras

Frequência Central do canal: 503MHz

Largura do canal 'Bw' padrão ISDB-TB, 5,57MHz.

Diagramas das antenas transmissoras:

A Figura 5.2 apresenta o diagrama horizontal e vertical das antenas de transmissão.

Convém ressaltar que na transmissão digital muitas emissoras optaram pela transmissão elíptica que permite irradiar parte da potência transmitida na polarização vertical que ajuda na recepção móvel e na discriminação do sinal na recepção de repetidores e *Gap-Fillers*.

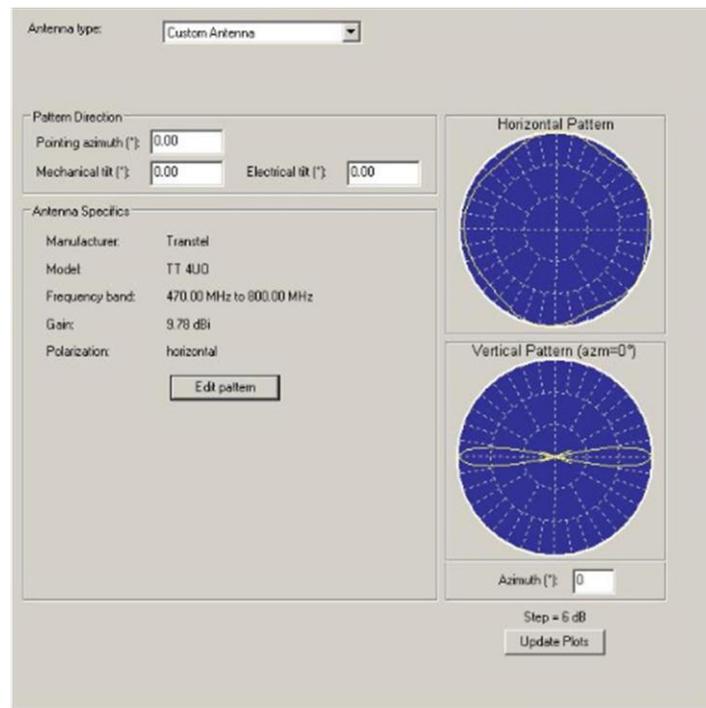


Figura 5.2 Diagramas H e V das antenas transmissoras

A Figura 5.3 mostra a área de cobertura do transmissor de Campinas operando com a potência nominal de 200W, ou 23dBW, ou 53dBm. Logo a potência efetiva irradiada será de ERP 32,78 dBW desprezando-se as perdas nos cabos.

A Figura 5.4 mostra a área de cobertura do transmissor de Limeira operando com a potência nominal de 50W, ou 17dBW, ou 47dBm. Logo a potência efetiva irradiada (potência do transmissor multiplicado pelo ganho da antena) será de ERP 26,78 dBW desprezando-se as perdas nos cabos.

Estas áreas de cobertura foram obtidas com os transmissores individuais e independentes sem estarem operando em rede SFN com o objetivo de referência com o sinal analógico.

O próximo passo foi sincronizar os dois transmissores em uma rede SFN. A sincronização no tempo é alcançada atrasando-se o sinal do transmissor de Campinas do exato tempo que o sinal demora a chegar e ser irradiado em Limeira. A distância total é de 57,6 km e um atraso de aproximadamente 192 $\mu$ s será dado no transmissor de Campinas para que aconteça uma transmissão simultânea. A Figura 5.5 mostra o resultado do sinal sincronizado entre o transmissor de Campinas e o transmissor de Limeira.

Esta é a operação normal da rede SFN, ou seja, a operação acontece com os dois transmissores sincronizados e a rede maximizada em termos de cobertura com os parâmetros de intervalo de guarda indicados na Tabela 5.1.

Para simular dois transmissores dessincronizados, operando em rede SFN e tornando-se interferentes entre si, foi adicionado ao transmissor de Limeira um atraso extra de 300 $\mu$ s. Este atraso equivale a aproximadamente 150km de distância entre ambos, como mostra a Figura 5.6.

A simulação da situação de operação da rede SFN atuando deverá obedecer a seguinte sequência de eventos.

Tabela 5.1 Intervalo de guarda e distância

Modo 3 (8k)		
Intervalo de Guarda	Máximo Atraso ( $\mu$ s)	Máxima Distância (km)
1/4	252	75,6
1/8	126	37,8
1/16	63	18,9
1/32	31,5	9,45

Hipótese: Durante o período noturno houve a formação de dutos troposféricos e conseqüentemente uma melhora de propagação na região entre Campinas e Limeira. Assim sendo, o sinal de Campinas chega a Limeira com um nível mais alto passando a ser interferente para Limeira com uma relação menor que 19dB entre ambos sinais. Para efeitos de simulação foi diminuída a atenuação do meio de transmissão artificialmente e o sinal de Campinas com maior potência atinge a região de Limeira. Este sinal estando fora do intervalo de guarda e com nível alto causa interferência intersimbólica fazendo o receptor falhar na demodulação. O Ponto Monitor instalado neste local acusa a falha de sinal e gera um alarme na rede para que seja diminuída a potência do transmissor de Campinas. Na simulação, a potência foi diminuída em passos de 10W sendo que o Ponto Monitor voltou a demodular o sinal quando a potência do transmissor de Campinas atingiu 70W, 18,5 dBW, 48,5 dBm. Esta situação pode ser vista na Figura 5.20.

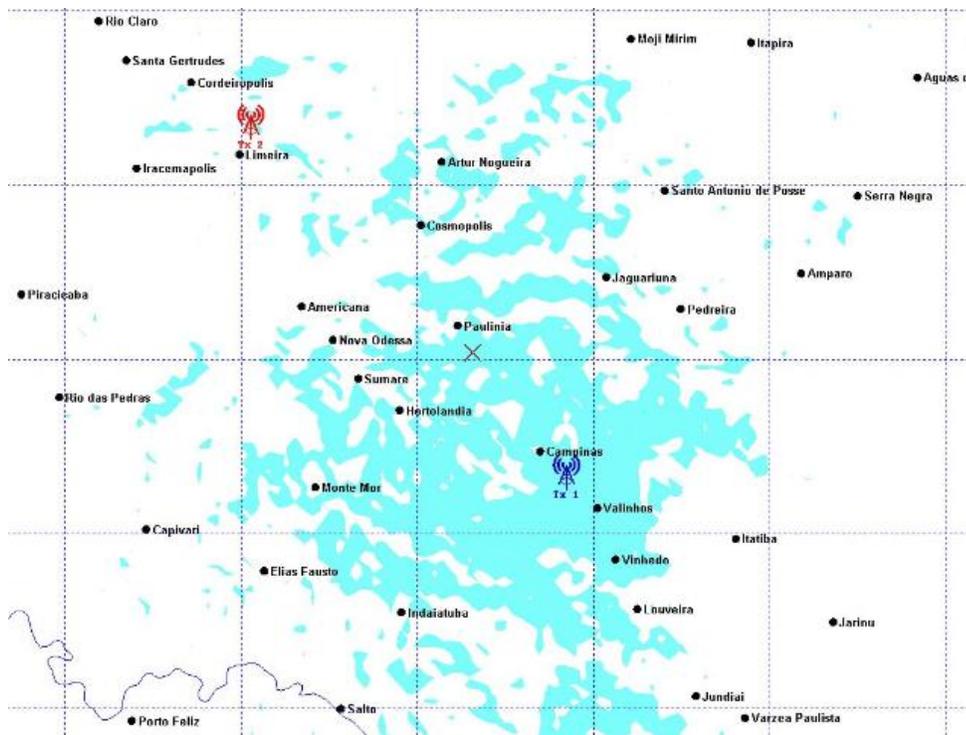


Figura 5.3 Área de cobertura do transmissor de Campinas

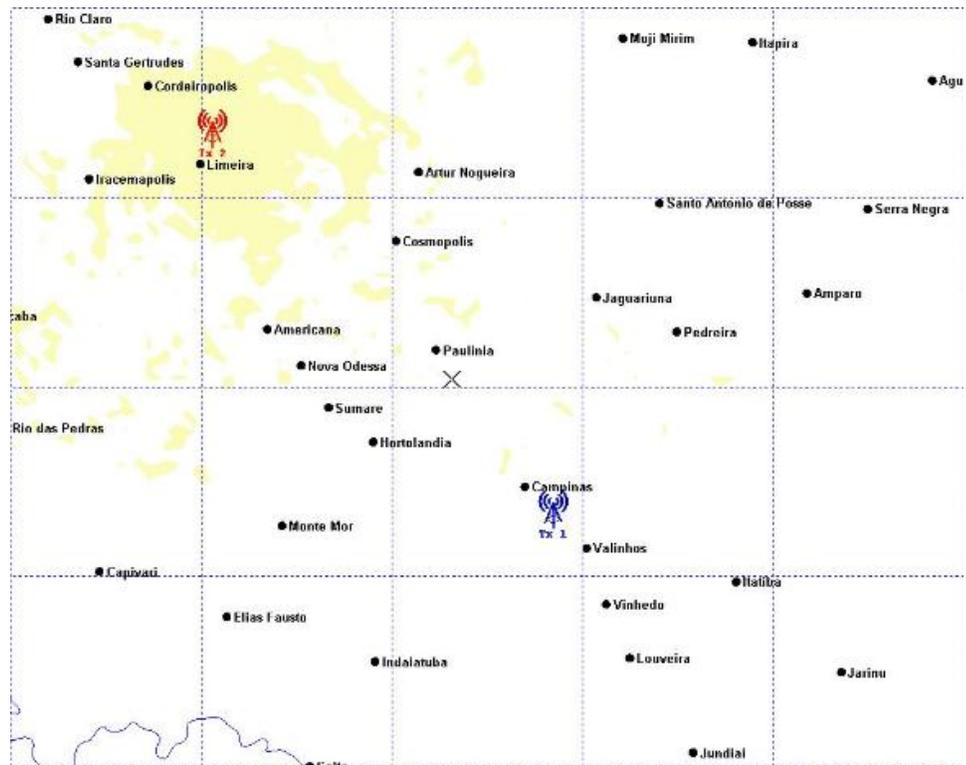


Figura 5.4 Área de cobertura do transmissor de Limeira.

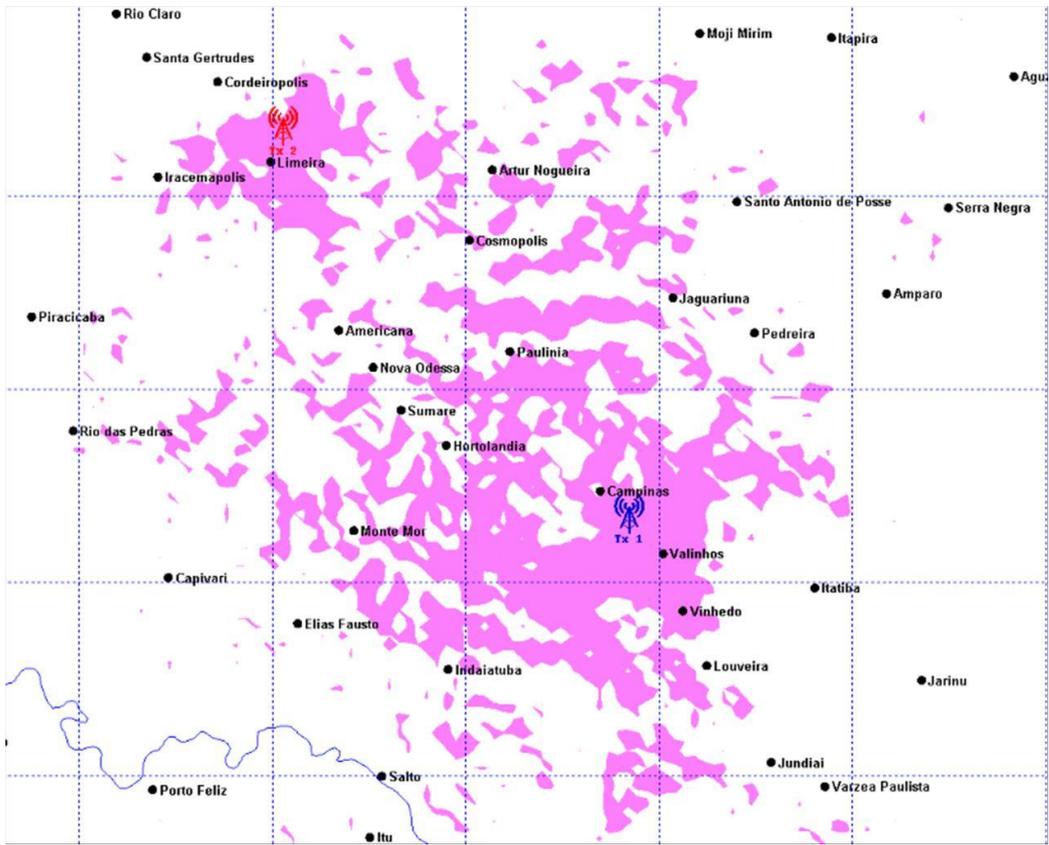


Figura 5.5 Área de cobertura da SFN Sincronizada (Tx1+Tx2)

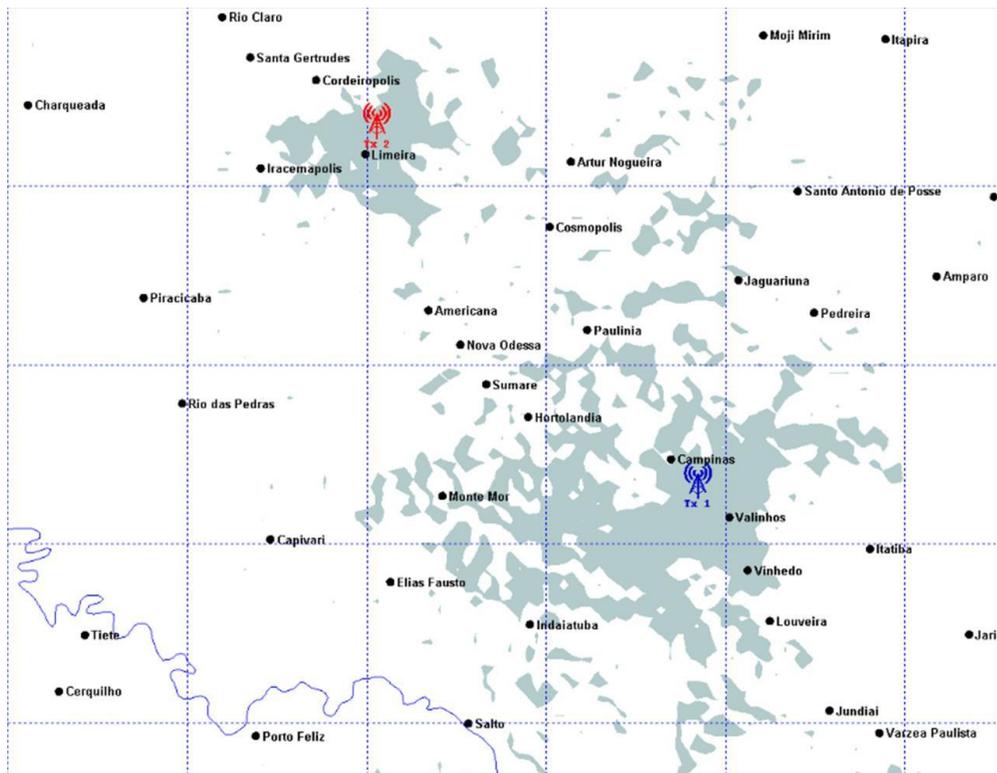


Figura 5.6 Limeira fora do Intervalo de Guarda (adicionando atraso de  $300\mu s$ )

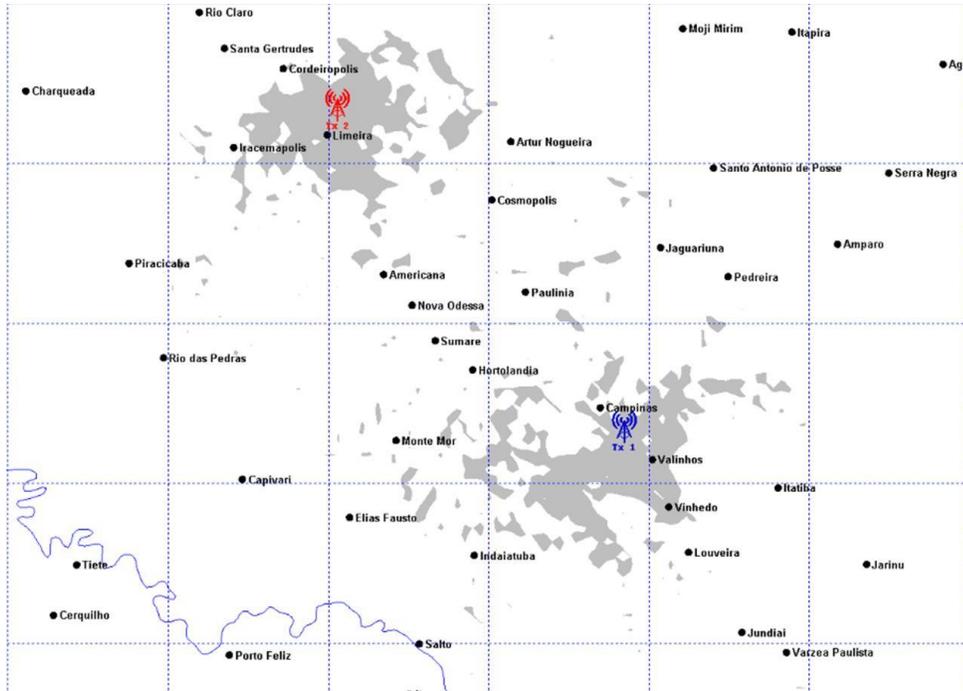


Figura 5.7 Situação Final com diminuição da potência de Campinas para 70W

Para o Ponto Monitor da simulação foi escolhido um ponto perto do transmissor de Limeira que recebe sinal de Campinas e Limeira construtivamente com sinais sincronizados em SFN, dentro do intervalo de guarda. Esta situação é anterior ao acréscimo do atraso artificial de Limeira.

O objetivo é que este ponto não fique sem recepção de sinal, ou seja, apagado com sinais interferentes sem sincronismo conforme mostra a sequência das Figuras 5.8 e 5.9.

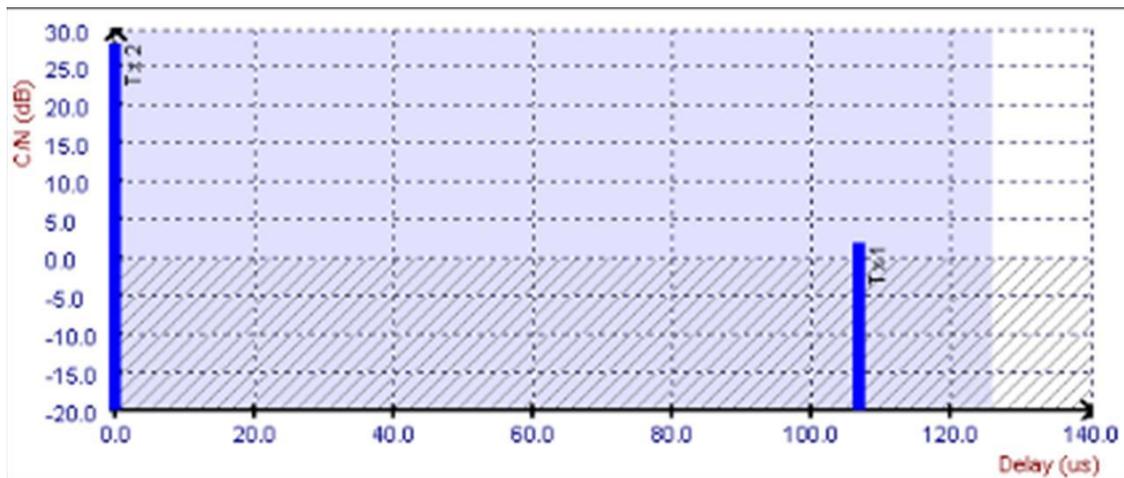


Figura 5.8 Situação inicial da rede SFN sincronizada.

A figura 5.8 mostra a situação inicial com um receptor do ponto monitor recebendo o sinal do transmissor de Limeira 28dB e um pequeno sinal de 3dB contributivo dentro do intervalo de guarda.

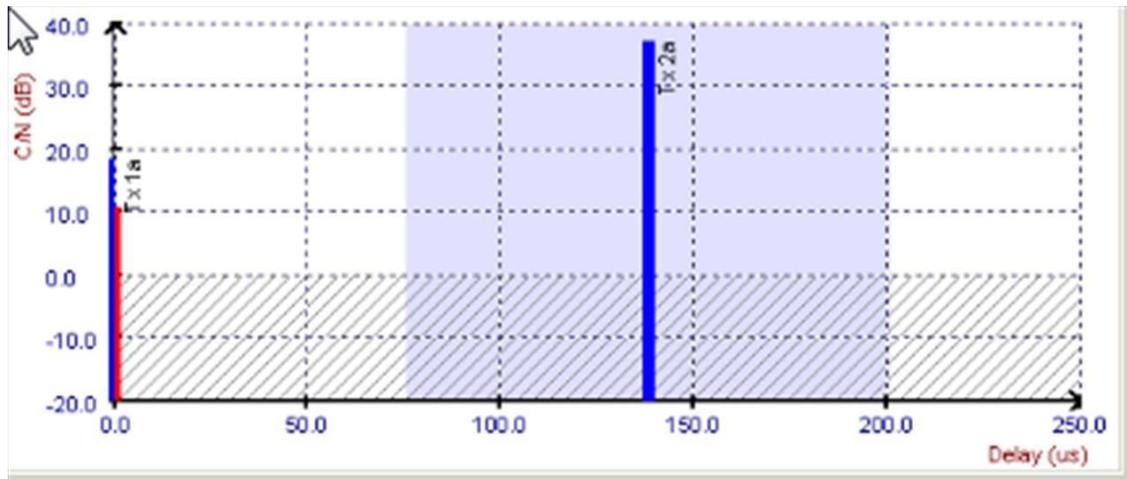


Figura 5.9 Situação final da rede SFN propositalmente sem sincronismo.

A Figura 5.9 mostra o mesmo local na situação final com o receptor do Ponto Monitor recebendo agora o sinal do transmissor de Limeira 38dB e um sinal de 18dB interferente fora do intervalo de guarda do transmissor de Campinas com sua potência diminuída para 70W. O ponto em questão não é interferido porque agora a diferença entre os sinais é maior que 19dB não causando a interferência co-canal para o sinal digital como mostra a Figura 5.10.

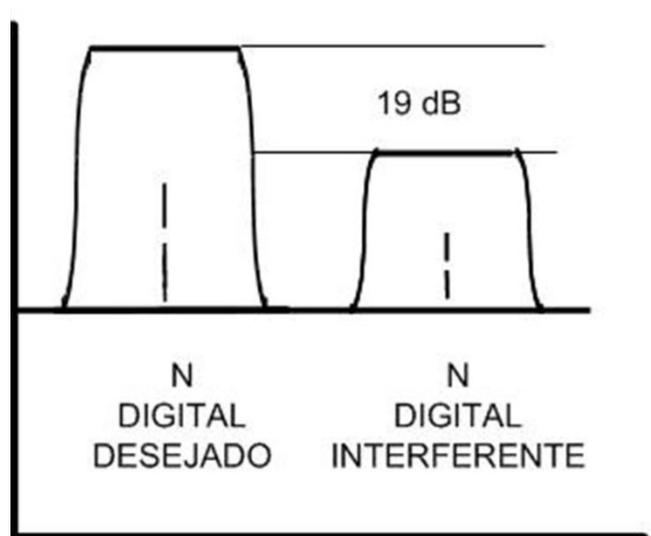


Figura 5.10 Interferência co-canal de um canal N

## 5.2 Simulação com a alteração do Intervalo de Guarda IG

A situação simulada opera com o atraso da rede SFN. Como visto no Capítulo 2, é possível alterar o valor do atraso de um transmissor da rede a fim de se alterar a região de interferência próxima a este transmissor. A simulação realizada foi baseada em um caso real que não se configurava como um problema da rede SFN, mas ao ser necessário alterar um parâmetro de transmissão, a rede foi afetada apresentando problemas de interferência. Os parâmetros de transmissão seguem os parâmetros da simulação anterior sendo que somente o intervalo de guarda está em  $IG=1/4$ . Há um transmissor na cidade de Campinas e um transmissor na cidade de Limeira sendo designado o transmissor de Campinas como principal e o transmissor de Limeira como secundário. Os transmissores possuem as seguintes características técnicas de potência:

Transmissor de Campinas, 200W de potência.

Transmissor de Limeira, 50W de potência .

As características de transmissão da estação são:

Intervalo de Guarda  $1/4$ ;

Atraso Máximo;  $252\mu s$ ;

Distância Máxima; 755,6 km

FEC  $3/4$ ,

Modo 3, 8K

Frequência Central 641MHz,

Largura do canal Bw 5,57MHz.

A operação da emissora do transmissor principal opera com as características descritas acima, mas por força da legislação vigente foi obrigada a aumentar sua carga de dados úteis para poder transmitir, junto com o sinal de TV digital, os dados referentes a áudio descrição, onde um narrador conta ao telespectador cego os detalhes da cena que compõe a imagem, além dos dados de interatividade, *closed caption*, e áudio 5.1. Estes recursos estão previstos no âmbito da TV digital aberta como um processo de universalização da acessibilidade, porém tecnicamente é necessário readequar a utilização da banda do canal. A solução adotada foi reduzir o intervalo de guarda de  $1/4$  para  $1/8$ . Isto afeta diretamente as regiões interferentes em uma rede SFN. Regiões que antes trabalhavam com o sinal de interferência construtiva passam a ter sinais interferentes destrutivos e se isto ocorrer em uma região de cobertura com telespectadores pode significar perda de grandes áreas de cobertura. As Figuras 5.11 e 5.12

mostram como o sinal de um local de recepção chamado de Ponto Monitor P1 que sintonizava e demodulava o sinal normalmente com o intervalo de guarda em 1/4 ficou sem sinal após a alteração do intervalo de guarda para 1/8. Nas Figuras 5.13 e 5.14 são mostradas as hipérboles dos atrasos constantes onde nota-se a posição do ponto monitor P1 que deixou de sintonizar o canal devido o sinal de Limeira estar fora do intervalo de guarda. Traçando-se uma linha reta entre os transmissores de Limeira e Campinas, coloca o ponto monitor P1 a 7,0 km do transmissor de Campinas e 50,6 km do transmissor de Limeira. Assim relacionando-se ao intervalo de guarda tem-se a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Distância e atrasos

Distância	Distância (km)	Máximo Atraso (µs)
TX Limeira – PMP1	50,6	167
TX Campinas- PMP1	7,0	25
Atraso Relativo IG (126 µs)		142 > 126

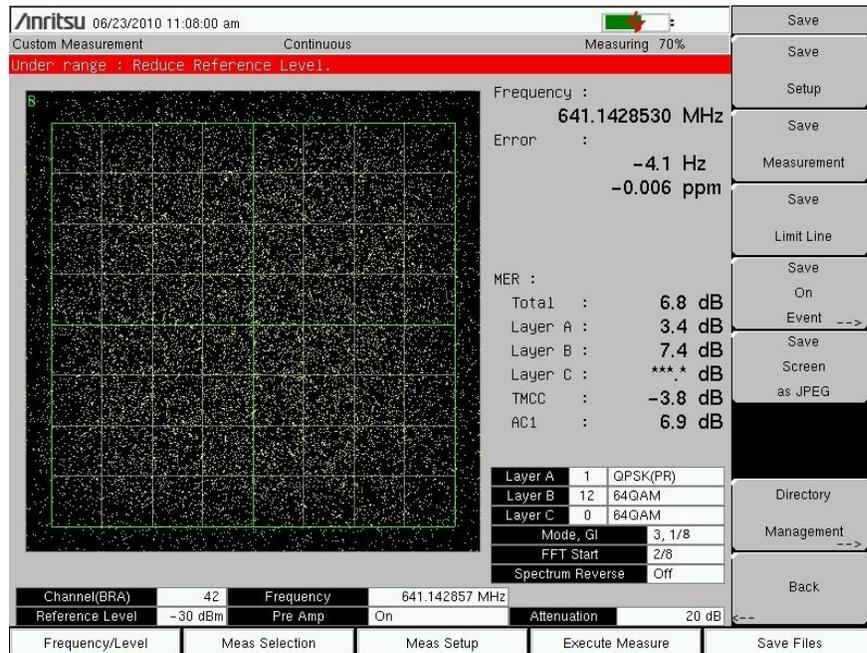


Figura 5.11 Ponto P1 sem possibilidade de recepção

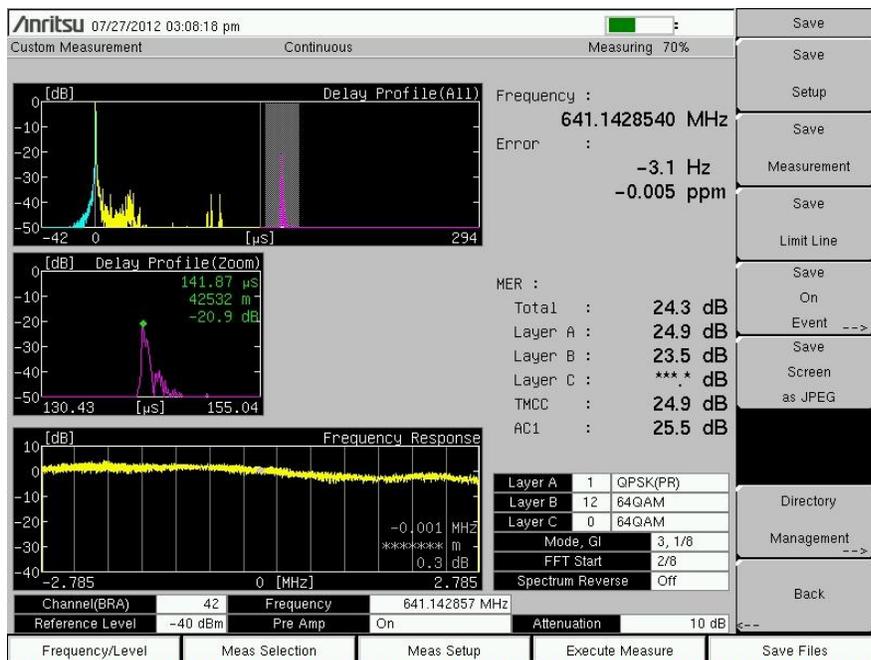


Figura 5.12 Sinal de Limeira fora do intervalo de guarda

Como primeiro passo a solução prática para o problema foi alterar a área de interferência próxima ao transmissor de Campinas adicionando-se atraso de tempo na transmissão no sinal.

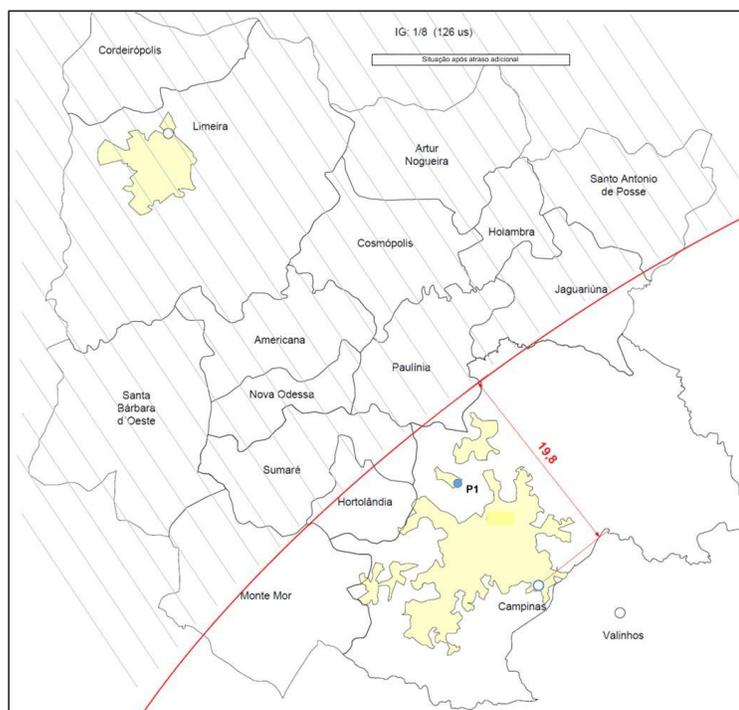


Figura 5.13 Ponto P1 interferido

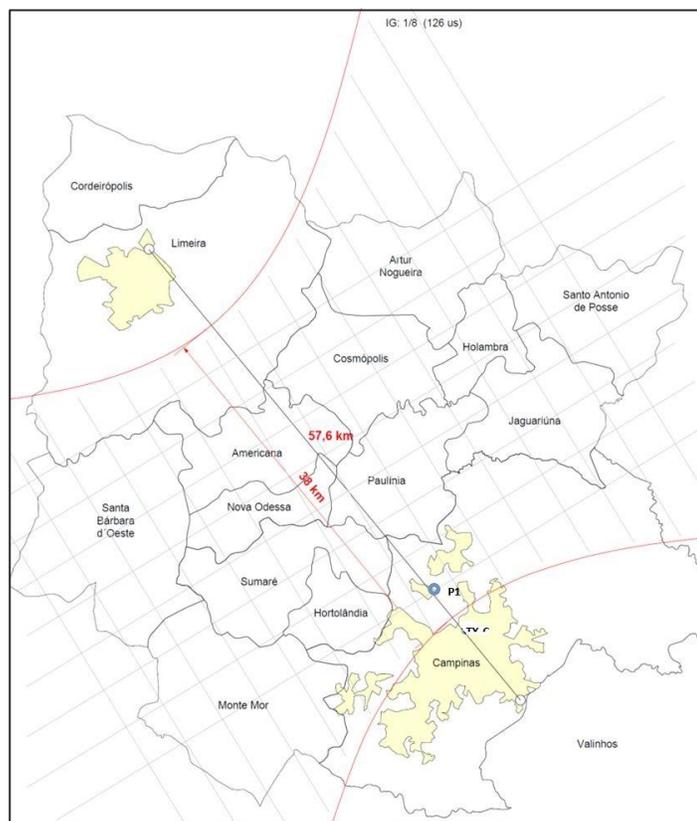


Figura 5.14 Ponto P1 livre de interferência

Nesta situação o Ponto Monitor faria uma requisição ao transmissor de Campinas para que ele inserisse um atraso na sua transmissão em passos de  $10 \mu\text{s}$  até que o ponto P1 obtivesse êxito na demodulação do sinal. Isto ocorreu com aproximadamente  $70 \mu\text{s}$  de atraso no sinal o que alterou a área de interferência próxima ao transmissor de Campinas como pode ser visto na Figura 5.14. A situação com o ponto P1 não interferido após as alterações podem ser vistas nas Figuras 5.15 e 5.16

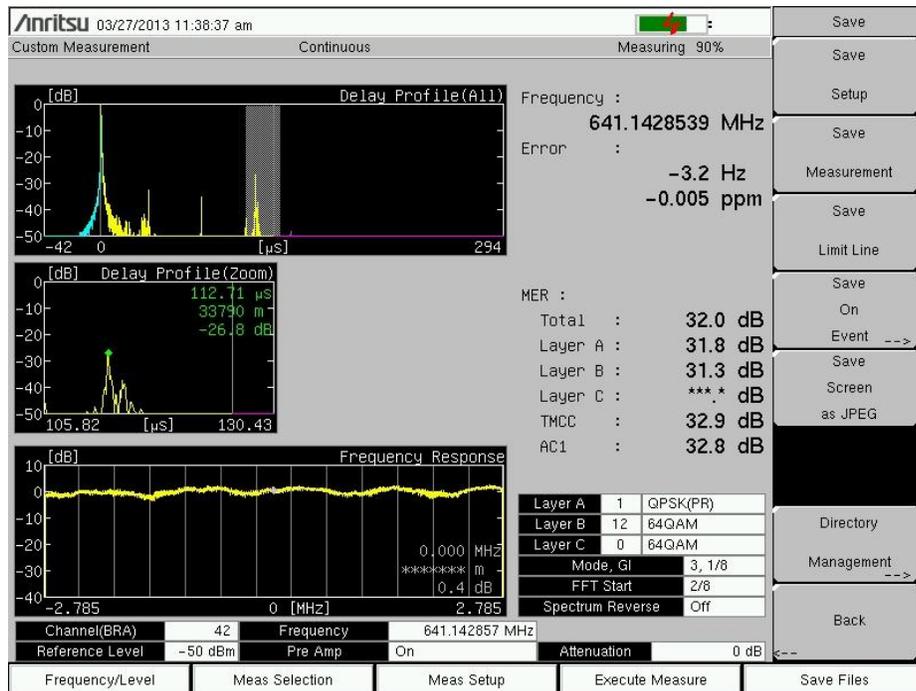


Figura 5.15 Sinais dos transmissores dentro do intervalo de guarda

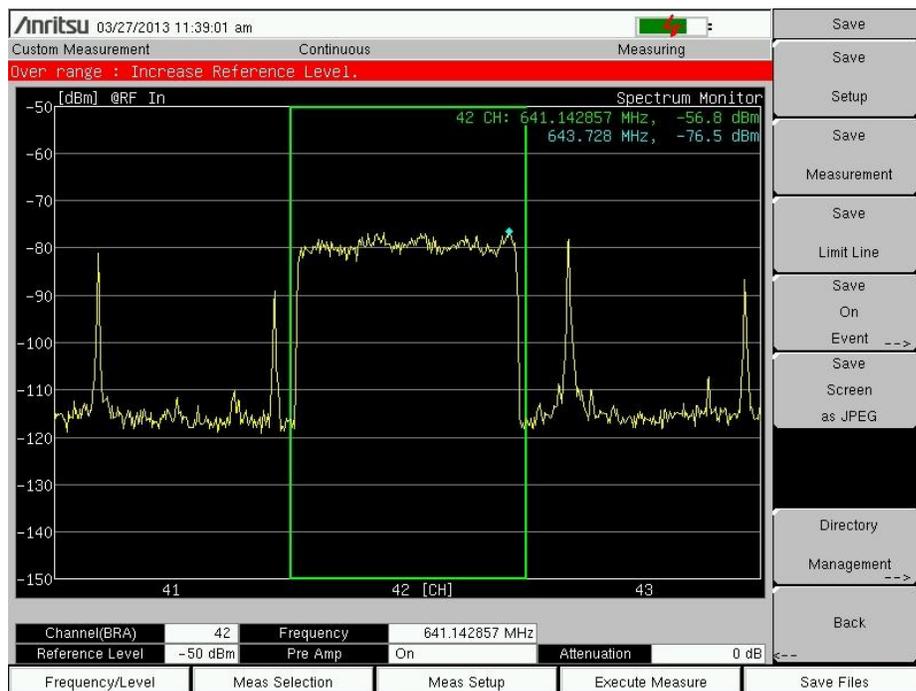


Figura 5.16 Sinal recebido em P1

### **5.3 Conclusões**

As soluções apresentadas se mostram factíveis podendo ser aplicadas nas redes SFN para a solução de problemas decorrentes de sua utilização na radiodifusão de sons e imagens de TV digital.

Os estudos de casos e as simulações apresentadas neste trabalho solucionam de forma adequada os problemas que surgiram em uma rede SFN abrangendo várias cidades e áreas conurbadas.

A contribuição de uma rede SFN dinâmica é oferecer um controle melhor sobre os parâmetros da rede e de sua área de cobertura diminuindo-se o tempo de reação quando da ocorrência de algum problema. A coleta de dados ao longo de um período fornece subsídios para estudos estatísticos de recepção. Os Pontos Monitores podem também trabalhar como sensores de alarme, sem atuação automática, para uma análise do problema.

### **5.4 Trabalhos Futuros**

A evolução do sistema móvel faz parte da TV digital e a utilização de Pontos Monitores em dispositivos móveis será objeto de trabalhos futuros. Outro ponto importante a ser considerado é a evolução das redes e sua integração e convergência com estruturas mais avançadas como as redes cognitivas.

O futuro da TV digital em termos de transmissão certamente passará de um único transmissor de alta potencia para vários transmissores distribuídos de baixa potência com receptores conectados onde será possível economizar energia de transmissão, irradiando somente para os receptores ativos. Estas são as propostas para futuros trabalhos.

### **5.5 Artigos correlatos**

São artigos correlatos do autor:

ISDB-TB Field Trials and Coverage Measurements with Gap-Filler in Suburban Environments. Silvio Renato Messias de Carvalho (IEEE BTS member), Yuzo Iano (IEEE member) and Rangel Arthur (IEEE member). mm11-94 - 2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting.

Palestra apresentada no Congresso SET 2011 intitulada 'Experiência com Gap-Filler em ambiente Urbano' durante a sessão: ***TVD: INTERIORIZAÇÃO: ANTENAS, GAP-FILLERS, SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.***

Expansion Planning of the Digital TV Broadcasting Service in Brazil using SFN dos autores Rangel Arthur, Yuzo Iano, Silvio R.M. e Roger F., foi revisado por especialistas na área e aprovado para publicação na Revista do IEEE América Latina, na edição de Dec. De 2007 no volume 5.

R. Arthur, Y. Iano, E. Carrara, S. R. Carvalho, “*Performance Evaluation of Loop Canceller Filters for OFDM TV Systems*”, International Workshop on Telecommunications 2007, Inatel, Fevereiro de 2007.

Simulação de algoritmos de Delay Profile para o sistema de transmissão de TV Digital ISDB-Tb  
*Eduardo Carrara, Yuzo Iano, Silvio R. M. de Carvalho, Rogério Seiji Higa, Rangel Arthur. Revista Ciência e Tecnologia Unisal*

Comparação entre métodos de obtenção do *Delay Profile* em sistemas de transmissão de TV Digital  
*Yuzo Iano, Rangel Arthur, Silvio R. M. de Carvalho, Paulo Henrique Beghini Congresso SET 2008*

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Governo adia prazo para desligamento do sinal analógico. Disponível em: <http://www.dtv.org.br/>. Acesso em junho 2014.
- [2] SFN da TV. Disponível em <http://www.dtv.org.br/>. Acesso em junho 2014.
- [3] Report ITU-R BT.2209(10/2010.) Calculation model for SFN reception and reference receiver characteristics of ISDB-T system.
- [4] CONSELHEIRO RODRIGO Z. LOUREIRO. Resolução e Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 698 MHz a 806MHz, Disponível em <http://www.anatel.gov.br>. Acesso em dez. 2013.
- [5] SILVIO RENATO MESSIAS DE CARVALHO (IEEE BTS member), YUZO IANO (IEEE member), RANGEL ARTHUR (IEEE BTS member), ISDB-TB Field Trials and Coverage Measurements with Gap-Filler In Suburban Environments, IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, 2011.
- [6] Os motivos que levam a imagem da tdt a falhar. Disponível em <http://www.tvdigital.wordpress.com> Acesso em maio de 2013.
- [7] WILLIAM R. HEPBURN. Hepburn Tropo Index. Disponível em: [www.dxinfocentre.com](http://www.dxinfocentre.com). Acesso em maio de 2013.
- [8] CHANG, R. W., Synthesis of Band Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission, Bell System Tech., 45 Dec 1996.
- [9] WEINSTEIN, S. B. AND EBERT, P. M., Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform, IEEE Transactions Communications, COM-19, Oct. 1971.
- [10] PELED, A. AND RUIZ, A., Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computation Complexity Algorithms, IEEE Int. Conf. Acoustic., Speech, Signal Processing, Denver, CO,1980.
- [11] NEE, R. V. AND PRASAD, R., OFDM for Wirelles Multimídia Communications, Norwood, MA: Artech House Universal Personal Communication Library, 2000.
- [12] Z.LIYI, L. DELI, Interference Suppression in Cochanel Relay Television System, D.E.I. E., University of Technology, Taiyuan, P.R. China, 1998.
- [13] EDFORS, O., SANDELL, M., BEEK, J. J. V., LANDSTROM, D. AND SJOBERG, F., An Introduction to Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Lulea University of Technology, 1996.

- [14] CIMINI L., GREENSTEIN J., *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*. In Proakis J.G. (Ed.). Wiley Encyclopedia of Telecommunications and Signal Processing. : John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [15] ANDERS MATTSSON, *Single Frequency Networks in DTV*, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 51, N°. 4, December 2005.
- [16] European Telecommunications Standard Institute, *Digital Video Broadcasting (DVB)*; ETS 1999.
- [17] Draft EN 301 191: *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization*, European Telecommunications Standards Institute, 1997.
- [18] S. NAKAHARA, S. MORIYAMA, T.KURODA, M. SASAKI, S. YAMAZAKI, O. YAMADA, *Efficient Use of Frequencies in Terrestrial ISDB System*, IEEE Transactions on Broadcasting, vol42,NO.3 sep. 2001.
- [19] M.C.D. MADDOCKS, B. TAIT, N. J. LAFLIN, G. DOEL, *The Plan for Digital Terrestrial Television in the U.K.*, International Broadcasting Convention, Conference Publication No.428, 1996.
- [20] P. CAÑIZARES, J.L.TORRES, J.A. MARTINEZ, (Retelevision): *VIDITER: Spanish experience on DTT* (20th International Television Symposium, Montreux), Record Cable/Satellite/Terrestrial, pp. 219–224, 1997.
- [21] G.MALMGREN, '*On the Performance of Single Frequency Networks in Correlated Shadow Fading*', IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 43, No.2, June,1997.
- [22] Evolução da TV digital. Disponível em <http://www.img.lx.it.pt/> . Acesso em maio 2013.
- [23] A.G. GUIMARÃES, E.L. PINTO, Técnicas de Simulação de Canais Rádio Móveis, Telecomunicações Vol. 04 No.01, 2001.
- [24] H. HAMAZUMI, K. IMAMURA, N. IAI, K. SHIBUYA AND M. SASAKI, *A Loop Interference Canceller for the Relay Stations in an Single Frequency Network for Digital Terrestrial Broadcasting*, NHK Laboratories Note No. 469, Digital Broadcasting Networks Research Division, 1994.
- [25] G.MALMGREN, *Single Frequency Broadcastin Networks'*, Trita -S3-RST-9701,ISSN 1400-9137, April,1997.
- [26] Y.MICHEL DAOUD.,*Foudation of Mobile Radio Engineering*, Boca Raton Florida, CRC, 1993.
- [27] W. C. Y. LEE, *Mobile Communications Design Fundamentals*, 2nd ed., New York, NY: John Wiley & Sons, 1993. ch. 2.
- [28] W. C. Y. LEE, *Mobile Cellular Telecommunications System*, McGraw-Hill, 19897.
- [29] ARIB STD-B31 V. 1.2 Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting ARIB Standard, Association of Radio Industries and Businesses, January 24, 2002;
- [30] C., AKAMINE Análise de Desempenho do Sistema de TV Digital DVB-T com Entrelaçador Temporal em Canais com Ruído Impulsivo, Unicamp, 2004

- [31] C., AKAMINE Contribuições para a Distribuição, Modulação e Recepção Do Sistema de TV Digital ISDB-TB, Unicamp, 2011.
- [32] A. Mattsson, *Single Frequency networks in DTV*, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 51, No.4, Dec.2005]
- [33] R.BRUGGER, D. HEMINGWAY, *OFDM Receivers-Imapact on Coverage of Inter-Symbol Interference and FFT Window Position*, EBU Technical Review, July 2003.
- [34] *Transmission Performance of ISDB-T*, ITU-R 205/11.
- [35] Y. ZUNGKON, NAOHIKO I., K. TSUCHIDA, S. MORIYAMA'NHK Laboratories Note No.476, *A Study on Adaptive Soft-Decision Decoding for QPSK-OFDM on Multipath Cannels*, 2001.
- [36] H. Hamazumi, K. Imamura, N. Iai, K. Shibuya and M. Sasaki, *A Loop Interference Canceller for the Relay Stations in a Single Frequency Network for Digital Terrestrial Broadcasting*, NHK Laboratories Note No. 469, Digital Broadcasting Networks Research Division, 1998.
- [37] DAVID PLETS, WOUT JOSEPH, *Member, IEEE*, PABLO ANGUEIRA, *Member, IEEE*, JOSÉ ANTONIO ARENAS, LEEN VERLOOCK, and LUC MARTENS, *Member, IEEE*), On the Methodology for Calculating SFN Gain in Digital Broadcast Systems, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 56, No. 3, September 2010
- [38] Decreto 5.820, de 29/06/2006, e na Portaria MC 652, de 10/10/2006-Anatel.
- [39] CPqD, Relatório Técnico: Planejamento de Canais de TV Digital, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações.Disponível em [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), setembro de 2003.Acesso em 2011.
- [40] JIN-YONG CHOI, MIN-SUNG HUR, YOUNG-WOO SUH, JONG-SEOB BAEK, YONG-TAE LEE, *Member, IEEE*, and JONG-SOO SEO, *Member, IEEE*. Interference Cancellation Techniques for Digital On-Channel Repeaters in T-DMB System, IEEE Transactions on Broadcasting, 2010.
- [41] VALENTINO TRAINOTTI, Life Fellow IEEE, and GONZALO FIGUEROA, Student Member IEEE, Vertically Polarized Dipoles and Monopoles, Directivity, Effective Height and Antenna Factor, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 56, No. 3, September 2010.
- [42] Disponível em: <http://www.computer.org/csdl/proceedings/wetice/2001/1269/00/12690060.pdf>. Acesso em junho de 2014.
- [43] Disponível em: <http://www.ambient-networks.org/>. Acesso em junho de 2014.
- [44] Disponível em: <http://www.mobilecomms-technology.com/projects>. Acesso em junho 2014
- [45] EDUARDO CARRARA, YUZO IANO, SILVIO R. M. DE CARVALHO, ROGÉRIO SEIJI HIGA, AND RANGEL ARTHUR. Simulação de algoritmos de delay profile para o sistema de transmissão de tv digital ISDB-Tb. *Revista Ciência e Tecnologia*, 12(20/21), 2009.

- [46] YUZO IANO, RANGEL ARTHUR, SILVIO R. M. DE CARVALHO, PAULO HENRIQUE BEGHINI, Comparação entre métodos de obtenção do *Delay Profile* em sistemas de transmissão de TV Digital, Congresso SET 2008.
- [47] BEETHOVEM ZANELLA DIAS , NILTON ALVES JR. Protocolo de Gerenciamento SNMP. Disponível em: <http://mesonpi.cat.cbpf.br/naj>. Acesso em 2013.
- [48] R&S@XLx8000 *UHF/VHF Transposers Efficient solutions for analog and digital broadcasting Standards.*
- [49] D. PLETS, W. JOSEPH, P. ANGUERA, J. ARENAS, L. VERLOCK AND L. MARTENS, *On the Methodology for Calculating SFN Gain in Digital B. Sytems*, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 56, No 3, Sep 2010.