

Bruno Maia Antonio Luiz

**PLANEJAMENTO DE COBERTURA DE SISTEMAS GSM
COM USO DE REPETIDORES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica

Rio de Janeiro

Abril de 2002

BRUNO MAIA ANTONIO LUIZ

**PLANEJAMENTO DE COBERTURA DE SISTEMAS GSM
COM USO DE REPETIDORES**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre Pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Luiz A. R. da Silva Mello

Rio de Janeiro

Abril de 2002

BRUNO MAIA ANTONIO LUIZ

**PLANEJAMENTO DE COBERTURA DE SISTEMAS GSM
COM USO DE REPETIDORES**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre Pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz A. R. da Silva Mello

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof.

Prof.

Rio de Janeiro, 30 de Abril de 2002

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador

Bruno Maia Antonio Luiz

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 1999. Participou de projetos na área de Sistemas Rádios incluindo o desenvolvimento de softwares para dimensionamento de sistemas rádio e proferindo cursos na área de sistemas móveis. Responsável pela área de projetos da WiNGS Telecom onde atua como gerente de projetos.

Ficha Catalográfica

Luiz, Bruno Maia Antonio

Planejamento de Cobertura de Sistemas GSM com Uso de Repetidores/ Bruno Maia Antonio Luiz; Orientador: Luiz A. R. da Silva Mello – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2002

v.118 f: il 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Repetidores. 3 GSM. 4. Planejamento de Cobertura. 5. Interface Rádio. 6 – Aumento de cobertura. I. Silva Mello Luiz A. R. (Luiz A. R. da Silva Mello). II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título

Para meus pais e irmão, Walnir, Adélia e Ricardo,
pelo apoio e confiança

Agradecimentos

Ao meu orientador e Professor Luiz Silva Mello pelo estímulo, confiança e parceria para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-RIO, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos Erick Ferreira, Marcio Rodrigues e Alexandre Belloni pelo apoio prestado.

Aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

À minha professora Marlene Pontes, pelas importantes contribuições, e palavras de apoio.

Aos meus colegas da PUC pela amizade conquistada.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Luiz, Bruno Maia Antonio; Silva Mello, Luiz A. R. **Planejamento de Cobertura de sistemas GSM com uso de Repetidores**. Rio de Janeiro, 2002. 118p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Este trabalho aborda a utilização de repetidores na implantação de sistemas móveis celulares. Esta técnica permite estender a cobertura dos sistemas móveis celulares com baixo custo e curto tempo de implantação a áreas ou ambientes onde a utilização de estações rádio base seria dispendiosa ou demorada.

O impacto da inclusão deste elemento na interface rádio é detalhadamente analisada visando obter uma metodologia para o seu dimensionamento e para o cálculo das degradações produzidas na rede. É apresentada ainda uma metodologia completa para projetos com repetidores e descrita sua aplicação na implantação de um sistema GSM.

Palavras-chave

Engenharia Elétrica; Repetidores; GSM; Planejamento de Cobertura; Interface Rádio; Aumento de Cobertura.

Abstract

Luiz, Bruno Maia Antonio; Silva Mello, Luiz A. R. **GSM Coverage System Planning with Repeaters**. Rio de Janeiro, 2002. 118p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

This work deals with the use of active repeaters in the planning and deployment of cellular mobile systems. This technique allows the extension of the coverage of the cellular systems, with low cost and short building time, to areas where the use of radio base stations would be costly or difficult to implement.

The impact of the inclusion of the active element in the radio interface is analyzed in full detail to provide methods for the calculation of the degradations produced in the network. A complete design methodology for projects with repeaters is also presented, as well as a case study for a GSM system.

Keywords

Electrical Engineering; Repeaters; GSM; Coverage Planning; Radio Interface; Coverage Enhancing.

Sumário

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Introdução | 15 |
| 1.1. Considerações Iniciais | 15 |
| 1.2. Objetivo e Organização da Tese | 15 |
| Capítulo 2. O sistema GSM | 17 |
| 2.1. Histórico | 17 |
| 2.2. Tecnologias GSM existentes: | 21 |
| 2.3. Estrutura básica da rede GSM: | 21 |
| 2.3.1. Swicthing System (SS): | 22 |
| 2.3.1.1. MSC (Mobile Services Swicthing Center): | 22 |
| 2.3.1.2. VLR (Visitor Location Register): | 23 |
| 2.3.1.3. GMSC (Gateway Mobile Services Swicthing Center): | 23 |
| 2.3.1.4. SMS-GMSC e SMS-IWMSC: | 23 |
| 2.3.1.5. HLR (Home Location Register): | 23 |
| 2.3.1.6. AuC (Autentification Center) | 24 |
| 2.3.1.7. EIR (Equipment Identity Register) | 24 |
| 2.3.1.8. FNR (Flexible Numbering Register): | 24 |
| 2.3.1.9. ILR (Internetworking Location Register) | 24 |
| 2.3.2. Base Station Subsystem (BSS): | 25 |
| 2.3.2.1. BSC (Base Station Controler): | 25 |
| 2.3.2.2. TRC (Transcoder Controler) | 25 |
| 2.3.2.3. BTS ou RBS (Base Transceiver Station ou Radio Base Station) 25 | |
| 2.3.3. Operational and Support System (OSS) | 26 |
| 2.3.3.1. Operation and Mantaince (OMC) | 26 |
| 2.3.3.2. Network Management Center (NMC) | 26 |
| 2.4. Interfaces e Protocolos da Rede GSM: | 26 |
| 2.4.1. Interface Rádio (U_m): | 27 |
| Capítulo 3. Conceitos gerais sobre repetidores | 31 |
| 3.1. Introdução | 31 |
| 3.2. Características de Repetidores | 32 |
| 3.2.1. Classificação quanto à filtragem | 33 |
| 3.2.1.1. Repetidor de faixa larga | 33 |
| 3.2.1.2. Repetidores Seletivos em Banda | 33 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 3.2.1.3. | Repetidores Seletivos em Canal | 34 |
| 3.2.2. | Classificação quanto à transmissão | 34 |
| 3.2.2.1. | Repetidores de mesma faixa | 34 |
| 3.2.2.2. | Repetidores de faixa deslocada | 35 |
| 3.2.2.3. | Repetidores Ópticos | 36 |
| 3.3. | Isolação entre antenas do repetidor | 37 |
| 3.4. | Efeitos de Saturação do Amplificador..... | 38 |
| 3.4.1. | Repetidores de Banda Larga/Banda Seletiva: | 39 |
| 3.4.1.1. | Efeitos no enlace direto | 39 |
| 3.4.1.2. | Efeitos no canal reverso | 40 |
| 3.4.2. | Repetidores Canal Seletivo | 40 |
| 3.5. | Parâmetros típicos de repetidores | 41 |
| Capítulo 4. | Dimensionamento de enlaces com repetidores..... | 42 |
| 4.1. | Isolação entre as antenas..... | 42 |
| 4.1.1. | Cálculo da isolação..... | 42 |
| 4.1.2. | Fatores adicionais de isolação..... | 44 |
| 4.1.3. | Considerações adicionais sobre a isolação..... | 45 |
| 4.2. | Aumento da Interferência co-canal | 45 |
| 4.2.1. | Repetidores de Banda Larga (<i>broadband repeaters</i>) | 46 |
| 4.2.1.1. | Cálculo da interferência no enlace direto (<i>downlink</i>) | 46 |
| 4.2.1.2. | Interferência de <i>Uplink</i> : | 50 |
| 4.2.1.3. | Limitações no Cálculo de Interferência do Canal Reverso | 52 |
| 4.2.2. | Repetidores Seletivos em Banda (<i>Band Selective Repeater</i> s) ... | 52 |
| 4.2.3. | Repetidores Seletivos em Canal (<i>Channel Selective Repeater</i> s) | 52 |
| 4.2.3.1. | Interferência de <i>Downlink</i> : | 53 |
| 4.2.3.2. | Interferência de <i>uplink</i> :..... | 56 |
| 4.2.4. | Técnicas para redução da degradação por interferência co-canal | 57 |
| 4.3. | Dissensibilização dos Receptores: | 57 |
| 4.3.1. | Cálculo da dissensibilização para Enlace Direto (<i>Downlink</i>): | 59 |
| 4.3.2. | Cálculo da dissensibilização para o enlace reverso (<i>uplink</i>) | 61 |
| 4.4. | Efeitos de multipercurso | 62 |
| 4.5. | Cálculo de enlaces com repetidores..... | 63 |
| 4.5.1. | Cálculos Iniciais..... | 63 |
| 4.5.2. | Cálculo do enlace direto | 64 |

| | | |
|--|---|-----|
| 4.5.3. | Cálculo do enlace reverso (<i>uplink</i>)..... | 66 |
| 4.6. | Caracterização das Perdas de Propagação..... | 67 |
| 4.6.1. | Modelo de Okumura | 68 |
| 4.6.2. | Modelo de Hata (Okumura-Hata) | 69 |
| 4.6.3. | Modelo estendido de Hata para PCS (COST-231): | 70 |
| 4.6.4. | Modelo de Walfish Ikegami (COST 231)..... | 71 |
| 4.6.5. | Modelos ajustados localmente | 74 |
| 4.6.6. | Cálculo da Margem de Cobertura (CAP) | 74 |
| 4.7. | Cálculo do Raio de Cobertura..... | 76 |
| Capítulo 5. | Uso de Repetidores no Planejamento GSM..... | 77 |
| 5.1. | Considerações Iniciais: | 77 |
| 5.2. | Uso de Repetidores | 78 |
| 5.3. | Projetos de Cobertura <i>Outdoor</i> utilizando repetidores | 79 |
| 5.3.1. | Etapa Inicial – Definição do Vetor de Cobertura:..... | 79 |
| 5.3.2. | Planejamento Inicial..... | 80 |
| 5.3.3. | Dimensionamento de Tráfego GSM | 80 |
| 5.3.4. | Projeto Nominal..... | 83 |
| 5.3.5. | <i>Site Survey</i> | 85 |
| 5.3.6. | Projeto definitivo de RF | 85 |
| 5.3.7. | Qualificação | 86 |
| 5.3.8. | Instalação de Repetidores – Medições em Campo..... | 86 |
| 5.3.9. | Aceitação de RF | 87 |
| 5.3.10. | Penalidades no uso de repetidores..... | 88 |
| 5.4. | Dimensionamento do Repetidor (<i>Link Budget</i>) | 89 |
| 5.4.1. | Análise de Interferência co-canal:..... | 91 |
| Capítulo 6. | Estudo de Caso: Implantação GSM 1800..... | 92 |
| 6.1. | Considerações Iniciais: | 92 |
| 6.2. | Projeto e Implantação - Fase I..... | 92 |
| 6.3. | Projeto e Implantação - Fase II:..... | 96 |
| 6.3.1. | Cobertura das áreas de sombra com BTS | 97 |
| 6.3.2. | Cobertura das áreas de sombra com Repetidores: | 98 |
| 6.4. | Análise de custos | 101 |
| Capítulo 7. | Conclusões | 102 |
| Referências: | | 103 |
| Apêndice - Estrutura dos Canais Lógicos..... | | 104 |

| | |
|---|-----|
| Canais de Tráfego (TCH) | 104 |
| Canais de Controle: | 105 |
| Broadcast Control Channel (BCH): | 105 |
| Broadcast Common Control Channel (BCCH) | 106 |
| Frequency Correction Channel (FCCH) | 106 |
| Synchronization Channel (SCH) | 106 |
| Dummy Burst – Rajada “Vazia” | 106 |
| Common Control Channels (CCCH) | 107 |
| Random Access Channel (RACH) | 107 |
| Paging Channel (PCH) | 107 |
| Access Grant Channel (AGCH) | 108 |
| Dedicated Control Channels (DCCH): | 108 |
| Stand Alone Dedicated Control Channel (SDCCH) | 108 |
| Slow Associated Control Channel (SACCH) | 109 |
| Fast Associated Control Channel (FACCH) | 110 |
| Cell Broadcast Channel (CBCH) | 110 |
| Multiplexação dos Canais Lógicos | 111 |
| Combinações dos Canais de Lógicos: | 112 |
| Estrutura e Combinações do Multiquadro de Tráfego: | 112 |
| Estrutura do Multiquadro de Tráfego: | 112 |
| Combinações de Multiquadro de Tráfego: | 113 |
| Estrutura e Combinações do Multiquadro de Controle: | 115 |
| Estrutura do Multiquadro de Controle: | 115 |
| Combinações de Multiquadro de Controle: | 115 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.3-1 - Elementos da Rede GSM..... | 22 |
| Figura 2.4-1 – Interfaces da Rede GSM | 27 |
| Figura 2.4.1-1 - TDMA GSM | 28 |
| Figura 2.4.1-2 Defasamento entre Canal Direto e Reverso..... | 28 |
| Figura 3.1-1 - Esquema básico de um sistema com repetidor | 32 |
| Figura 3.2.2.2-1 - Esquema básico de repetidor de frequência deslocada | 36 |
| Figura 3.2.2.3-1 - Esquema básico de repetidor óptico..... | 37 |
| Figura 3.3-1 - Efeito de realimentação em repetidores | 38 |
| Figura 4.1-1 - Realimentação do Repetidor | 42 |
| Figura 4.2.1.1-1 - Interferência Canal Direto Repetidor Banda larga..... | 47 |
| Figura 4.2.1.2-1 - Interferência Canal Reverso Repetidor Banda Larga ... | 50 |
| Figura 4.2.3.1-1 - Interferência Canal Direto Repetidores Seletivos em Canal..... | 53 |
| Figura 4.6-1 - Típico Enlace com Repetidor | 58 |
| Figura 4.6-2 - Degradação do Limiar..... | 59 |
| Figura 4.6.1-1 - Cálculo de (C/N) | 60 |
| Figura 4.6.1-1 - Fatores do método de Okumura | 68 |
| Figura 4.6.1-2 - Fatores de correção do método de Okumura | 69 |
| Figura 4.6.3-1 - Parâmetros do Modelo Walfish-Ikegami | 71 |
| Figura 4.6.3-2- Parâmetros do Modelo Walfish-Ikegami: direção da onda | 72 |
| Figura 5.2-1 - Decisão sobre o uso de repetidores | 78 |
| Figura 5.2-2 - Típico Uso Externo de Repetidores..... | 79 |
| Figura 5.3.1.1-1 - Vetor de Cobertura..... | 80 |
| Figura 5.3.9-1 - Exemplo de <i>Drive Test</i> | 88 |
| Figura 5.4.1-1 - Potencialidade de Interferência do Canal Reverso | 91 |
| Figura 6.2-1 - Vetor de Cobertura | 93 |
| Figura 6.2-2 - Cobertura da Fase I..... | 95 |
| Figura 6.3-1 - Áreas de Sombra da Fase I | 96 |
| Figura 6.3.1-1 - Cobertura Fase II - Inclusões de BTS | 97 |

Figura 6.3.2-1 - Cobertura Fase II com repetidores.....99

Figura 6.3.2-2 - Cobertura Final 100

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1-1Histórico GSM | 19 |
| Tabela 2.4.1-1 - Parâmetros de BTS GSM..... | 29 |
| Tabela 2.4.1-2 - Terminais GSM 900 | 29 |
| Tabela 2.4.1-3 - Terminais GSM 1800 | 30 |
| Tabela 2.4.1-4 - Terminais GSM 1900 | 30 |
| Tabela 3.5-1 - Parâmetros típicos de repetidores | 41 |
| Tabela 4.3.2-1 – 1 Planilha com Cálculos de Dissensibilização | 62 |
| Tabela 4.6.6-1 - Margens de Cobertura para CAP 90% | 76 |
| Tabela 5.3.3-1 - Tráfego de Sinalização | 82 |
| Tabela 5.3.3-2 - Razão SDCCH/TCH..... | 82 |
| Tabela 5.3.3-3 - Exemplo de Configuração de Canais Lógicos..... | 83 |
| Tabela 5.3.10-1 - Tipo de Repetidores para Ambientes Externos..... | 89 |
| Tabela 5.4-1 - Parâmetros para Projetos com Repetidores | 90 |
| Tabela 6.2-1 - Configurações Sistêmicas | 93 |
| Tabela 6.2-2 - Características de Tráfego | 93 |
| Tabela 6.2-3 - Características de Propagação | 94 |
| Tabela 6.2-4 – Listagem das BTS projetadas para a Fase I | 95 |
| Tabela 6.3.2-1 - Características do Repetidor | 98 |
| Tabela 6.3.2-2 - Ganho Líquido do Repetidor | 98 |
| Tabela 6.3.2-3 - Tipo de localidade de cada BTS | 98 |
| Tabela 6.3.2-4 - Análise de Cobertura dos Repetidores | 99 |
| Tabela 6.3.2-5 - Análise de Tráfego dos Repetidores | 99 |
| Tabela 6.4-1 - Análise de Custo CAPEX da Solução | 101 |

Capítulo 1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

Os primeiros sistemas móveis celulares eram bastante limitados em tecnologia e qualidade de cobertura, permitindo apenas serviço de voz em áreas restritas. A demanda explosiva por comunicações móveis vem propiciando grandes avanços tecnológicos e o surgimento de uma vasta gama de novos serviços. Com um aumento exponencial no número de usuários, percebeu-se que o mercado de comunicações móveis tem um grande potencial para aplicações envolvendo dados. Os sistemas, inicialmente idealizados para tráfego de voz, estão sendo cuidadosamente adaptados para permitir o tráfego de dados. As primeiras aplicações de dados foram os serviços de mensagens curtas, que geram hoje um incremento importante na receita das operadoras¹. Atualmente estão sendo implantados sistemas 2,5G com capacidade de transmissão de até 144 kbits/s e foram iniciados os testes de sistemas de 3ª. Geração que prevêem operação a taxas de até 2 Mbits/s em situações de baixa mobilidade.

Paralelamente à evolução tecnológica dos sistemas, a massificação do uso dos celulares demanda um aumento na qualidade do serviço prestado, especialmente com relação aos tipos de facilidades oferecidas e níveis satisfatórios de cobertura. Estes níveis tornam-se mais difíceis de alcançar com o aumento das frequências utilizadas para o oferecimento dos serviços.

No intuito de atender as exigências deste novo mercado mais competitivo e com usuários cada vez mais rigorosos, o uso de repetidores para prover a melhoria de qualidade da cobertura tem-se mostrado uma boa opção [REF 9], sendo utilizados por diversas operadoras de telefonia móvel.

1.2. Objetivo e Organização da Tese

Este trabalho aborda a utilização de repetidores na implantação de sistemas móveis celulares. Esta técnica permite estender a cobertura dos sistemas móveis celulares com baixo custo e curto tempo de implantação (com

¹ No Brasil a utilização de serviços SMS está em expansão, correspondendo atualmente a uma pequena parcela da receita das operadoras.

relação à cobertura celular tradicional) a áreas ou ambientes onde a utilização de estações rádio base seria dispendiosa ou demorada.

O impacto da inclusão deste elemento na interface rádio é cuidadosamente analisada visando obter-se uma metodologia para o seu dimensionamento. É desenvolvida ainda uma detalhada metodologia para projetos com repetidores e descrita sua aplicação na implantação de um sistema GSM.

A dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 2: Neste capítulo são apresentados um histórico resumido da evolução do padrão GSM, sua estrutura básica de rede e protocolos e as características gerais da interface rádio;
- Capítulo 3: Neste capítulo são abordadas as características gerais dos repetidores, o problema da isolação entre antenas e efeitos de saturação do amplificador;
- Capítulo 4: Este capítulo aborda o dimensionamento de enlaces com repetidores com o desenvolvimento de algoritmos para os cálculos de isolação, degradação de interferências co-canal dissensibilização de receptores e uma metodologia detalhada de projeto, principais contribuições deste trabalho. São descritas também algumas técnicas para aumento de isolação e redução de interferências co-canal;
- Capítulo 5: Neste capítulo são discutidos em detalhe as etapas de realização de projetos com repetidores, incluindo critérios de custo e desempenho para escolha do melhor equipamento;
- Capítulo 6: Por fim é realizado um estudo de caso simulando uma implantação de um sistema SMP operando na faixa de 1800 MHz com tecnologia GSM. São realizadas as análises de viabilidade técnica e econômica da utilização de repetidores para o atendimento das metas de prazo e qualidade estipuladas, sendo efetuado um comparativo com relação à utilização da solução tradicional (cobertura com BTS).

No apêndice são detalhadas as estrutura dos canais lógicos da interface rádio do padrão GSM, assim como suas hierarquias de multiplexação.

Capítulo 2. O sistema GSM

2.1. Histórico

Na década de 80, quando eram utilizados os sistemas móveis celulares analógicos, a comunidade Européia vivia uma situação onde não havia uma padronização dos sistemas utilizados, ao contrário dos EUA que tinham criado uma padronização para a interface rádio dos sistemas celulares (padrão AMPS “*Advanced Mobile Phone System*”).

A falta de padronização na Europa impossibilitava que o mesmo terminal móvel fosse utilizado em diferentes países reduzindo assim a área de atuação dos telefones móveis. A falta de padrões internacionais também afetava diretamente a indústria, pois tornava sua atuação restrita a nichos de mercado, o que impossibilitava uma produção em escala a qual permitisse baratear o custo do terminal. Enfim, a falta de um padrão único representava uma forte barreira para o desenvolvimento dos sistemas celulares na Europa.

Tendo em vista estes problemas, foi idealizado um sistema de segunda geração (sistema digital) denominado GSM², com as seguintes finalidades:

- Operação em uma única faixa de frequência;
- Incentivo aos produtores de equipamentos através da padronização que permitiria sua atuação no mercado Europeu como um todo, aumentando a escala e possibilitando uma redução nos custos e maior desenvolvimento nos terminais;
- Padronização para a interface com o ISDN, redes digitais de telefonia pública;
- Aumento de capacidade para fazer frente ao forte aumento na demanda por este novo serviço. O aumento na oferta só seria possível com a introdução de um sistema que tivesse uma maior capacidade que os sistemas analógicos já instalados.

Pelo fato de não existir um padrão único de primeira geração na Europa, pode-se criar uma nova padronização para a segunda geração de forma totalmente livre, o que possibilitou o desenvolvimento de uma arquitetura

² Sigla em francês “Group Special Mobile”, associado ao grupo de trabalho que especificou o sistema; mais tarde rebatizado como “*Global System for Mobile Communication*”.

extremamente eficiente. Essa evolução para segunda geração não ocorreu da mesma forma em países que já dispunham de padronização para a primeira geração. Nestes locais os novos padrões celulares tinham que interoperar com os antigos, o que reduzia os graus de liberdade na criação do protocolo. Esta vantagem fica clara se analisarmos o padrão IS-136, que possui forte interoperabilidade com o padrão AMPS e apresenta algumas limitações como consequência.

O novo padrão celular Europeu de segunda geração trazia diversas inovações, as quais podemos destacar:

- Uma estrutura de canais lógicos mais complexas, permitindo que a sinalização trocada com o terminal móvel ocorresse de forma mais eficiente, reduzindo a perda de capacidade devido à sinalização;
- Possibilidade de oferecimento de serviços adicionais, considerando que o serviço de voz era apenas um dos inúmeros serviços que podiam estar disponíveis para o usuário, dentro da idéia de poder prover todas as facilidades que o ISDN provia para os usuários fixos;
- Aumento na capacidade, o que era um requisito de suma importância para o novo padrão, dado que o aumento na demanda estava ocorrendo de forma extraordinária;
- Nova estrutura de terminais, compostos de um Transceptor e um SIM card. O SIM card armazena todos os dados do usuário, inclusive as triplas de autenticação, a agenda pessoal e as mensagens de SMS (*short message service*). Com essa nova estrutura um terminal móvel só está completamente operacional, quando o conjunto transceptor e SIM card estão vinculados. Um usuário pode utilizar qualquer transceptor e incluir seu SIM card. O conjunto passa a ser automaticamente reconhecido como seu aparelho celular e todas as ligações efetuadas serão debitadas na conta do usuário do SIM card em questão;
- Roaming Internacional: Um dos principais objetivos da padronização era assegurar que o usuário pudesse ter seu serviço disponível, em todos os países da Europa. Este foi um dos principais mecanismos propulsores do GSM, não somente pela escala alcançada, mas também pelo fato de que na Europa em geral os países são pequenos e os usuários têm maior mobilidade entre fronteiras.

- Aumento da segurança³ – Com a inclusão de autenticação do terminal, a clonagem de terminais móveis e fraudes foram controladas, aumentando a arrecadação das operadoras. Para o tráfego de voz e/ou dados foi incluído também um modo de criptografia que adicionavam segurança à informação trafegada. Ambos procedimentos são realizados por códigos e algoritmos de altíssima confiabilidade;
- Início da integração VOZ+DADOS: Como este sistema não precisou ser idealizado para ser compatível com nenhum padrão celular na Europa, pode ser planejado para o tráfego de voz e dados, fazendo do sistema GSM o primeiro sistema celular móvel a possuir esta convergência, que mais tarde tornou-se inevitável para qualquer sistema celular do mundo. O único inconveniente é que dados são comutados por circuitos, da mesma forma que a voz. Isto está sendo suplantado pela evolução do sistema GSM.

Tem-se abaixo uma tabela que mostra a evolução histórica do sistema GSM:

| ANO | EVENTO |
|-----------|---|
| 1982-1985 | Início da especificação por parte da CEPT de um padrão de telecomunicações digital europeu na faixa de 900MHz, denominado GSM. |
| 1986 | Escolha do TDMA FDMA como tecnologia de transmissão. |
| 1987 | Operadoras de 12 países assinam um Memorando de Comprometimento, para implantação do GSM até 1991. |
| 1988 | CEPT define especificações do GSM para implementação em fases. |
| 1989 | ETSI assume a responsabilidade pela especificação do GSM. |
| 1990 | Fabricantes começam a desenvolver equipamentos de rede. |
| 1991 | Início da padronização do GSM 1800 MHz. |
| 1992 | Lançada primeira fase comercial de redes GSM. Definido primeiro acordo de roaming internacional entre a Telecom da Finlândia e a Vodafone da Inglaterra. |
| 1993 | GSM passa a ter 70 países signatários. Lançado sistema DCS 1800 na Inglaterra. |
| 1993 | Número de usuários chega a 3 milhões. |
| 1995 | Desenvolvida nos EUA a especificação para Serviços de Comunicação Pessoais (PCS), versão do GSM para a faixa de 1900MHz. |
| 1998 | Rede GSM com um total de 253 membros em mais de 100 países com 70 milhões de usuários no mundo. |
| 2000 | Definição no Brasil da faixa de 1800MHz para a implantação do SMP e conseqüente uso do GSM. |

Tabela 2.1-1 Histórico GSM

³ Está implementado no sistema GSM um banco de dados de equipamentos, onde estão cadastrados os terminais. Havendo algum problema com um aparelho (transceptor) este não realizará nenhuma operação na rede mesmo estando ligado a um SIM card válido. Isso coíbe o roubo e fraude de terminais, aumentando ainda mais a segurança do sistema.

As especificações do sistema GSM foram desenvolvidas em fases, cada uma compreendendo uma nova gama de serviços.

FASE 1

Nesta primeira fase, foram implementados os seguintes serviços:

- Telefonia de voz.
- Roaming internacional.
- Serviços básicos de fax/dados (até 9,6bit/s)
- Direcionamento e Bloqueio de chamadas.
- Serviço de Mensagem Curta.

FASE 2

Nesta fase foram adicionadas as seguintes facilidades:

- Aviso de tarifação.
- Identificação de chamada.
- Chamada em espera.
- Chamada em conferência.
- Grupos de usuários fechados.
- Capacidades de comunicação de dados adicionais.

FASE 2+

A fase 2+, que está sendo atualmente implementada, permite uma integração do sistema com uma rede de pacotes. A rede de pacotes voltada somente para dados coexiste paralelamente com a rede de comutação de circuitos que atende à parte de voz do sistema.

Esta evolução permitirá uma ampliação conjunto de serviços de dados oferecidos pelas operadoras. Estima-se que os serviços de dados irão ser os maiores responsáveis pela renda das próximas redes de sistemas móveis.

- Múltiplos perfis de serviço.
- Planos de numeração privados.

- E-mail, Internet, transferências de arquivos a taxas razoáveis taxa teórica de 144 Kb/s em ambiente controlado, atualmente alcançado de 50 Kb/s [REF 10].
- Cooperação com GSM 1800, GSM1900 e o DECT.

2.2. Tecnologias GSM existentes:

GSM 900

A banda de frequência originalmente alocada para o GSM, era a de 900MHz (890-915 e 935-960 MHz). Em alguns países uma versão estendida do GSM 900 foi utilizada, proporcionando capacidade extra à rede. Esta versão é chamada de E-GSM (880-915 e 925-960 MHz).

GSM 1800 – DCS 1800

Em 1990, de modo a aumentar a competição entre operadoras, a Inglaterra requereu o início de uma nova versão do GSM adaptada para a banda de 1800MHz. Licenças foram emitidas em vários países, incluindo o Brasil, e as redes estão em plena operação. As bandas alocadas são 1710-1785 MHz (Link Reverso) e 1805-1880 MHz (Link Direto).

GSM 1900 – PCS 1900

Em 1995, o conceito de Serviços de Comunicações Pessoais (PCS) foi lançado nos EUA. A idéia básica é permitir-se a comunicação “pessoa-a-pessoa” ao invés de “estação-para-estação”. Como o GSM 900 não poderia ser utilizado na América do Norte devido à prévia alocação de frequências de 900MHz, foi lançado um sistema em 1900 MHz. As principais diferenças entre o padrão GSM 900 e o GSM 1900 norte-americano é que este suporta a sinalização ANSI.

2.3. Estrutura básica da rede GSM:

Descreveremos a seguir a arquitetura, protocolos e interfaces existentes numa rede GSM padrão, com ênfase na interface rádio. Neste padrão tanto o tráfego de voz quanto o de dados são comutados por circuito.

Devido às características inerentes a uma rede de comunicações móveis, a estrutura requerida é extremamente complexa. Nas redes celulares a carga de sinalização é alta devido à natureza móvel dos terminais, exigindo uma série de

procedimentos que não existem na rede fixa tradicional. A rede GSM está dividida em três grandes sub-sistemas onde cada um possui uma série de elementos responsáveis pelas diversas atividades na rede (tráfego e/ou sinalização). A arquitetura da rede é ilustrada na figura abaixo.

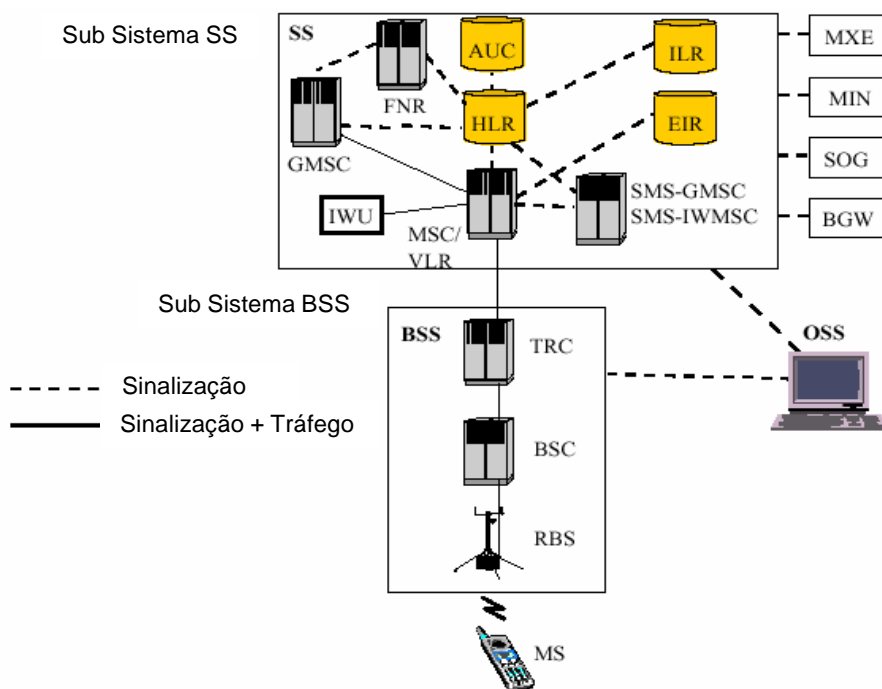


Figura 2.3-1 - Elementos da Rede GSM

2.3.1. Switching System (SS):

Responsável pelo processamento da chamada e funções relacionadas ao assinante. Este subsistema é composto por diversos elementos de rede, cujas funcionalidades são descritas a seguir.

2.3.1.1. MSC (Mobile Services Switching Center):

Esta é a central telefônica do sistema celular, responsável basicamente por:

- Estabelecimento e controle de chamadas
- Atualização da localização do assinante em diferentes registros de localização
- Atualização dos dados do assinante

- Funções que provém segurança: autenticação e cifragem
- Encaminhamento das mensagens curtas para os terminais
- *Handover*

2.3.1.2. VLR (Visitor Location Register):

É um banco de dados provisório que contém todas as informações relacionadas aos terminais móvel que se encontram dentro da área de atuação da MSC. Este bando de dados é necessário devido à mobilidade dos terminais. A todo o momento diversos terminais que são originários de outras MSC podem entrar na área de atuação de uma MSC vizinha. Para que este terminal seja reconhecido no sistema, todos os seus dados devem ser passados para a nova MSC controladora, sendo armazenados neste banco de dados provisório.

2.3.1.3. GMSC (Gateway Mobile Services Switching Center):

Em uma rede GSM existe uma única central *gateway*, que tem a função de se interconectar com as outras redes de telefonia existentes. Esta central possui um banco de dados associado permanente, denominado HLR, que informa à GMSC em que central MSC deverá ser entregue a chamada.

2.3.1.4. SMS-GMSC e SMS-IWMSC:

Estes elementos são os responsáveis pelo controle do envio de SMS. O primeiro elemento pode receber uma mensagem curta do centro de serviço, interrogar o HLR e entregar a mensagem à MSC onde se encontra o terminal que irá receber a mensagem. O segundo elemento pode receber uma mensagem originada em um terminal móvel e entregá-la ao centro de serviço.

2.3.1.5. HLR (Home Location Register):

É a base de dados onde estão armazenadas todas as informações de todos os assinantes. Nele também se encontra armazenada a informação sobre a que MSC está vinculado cada terminal móvel ativo. Esse banco de dados possui registros permanentes dos terminais móveis.

2.3.1.6. AuC (*Authentication Center*)

Tem como principal objetivo prover as informações necessárias usadas pela MSC/VLR nos procedimentos de autenticação e cifragem. As seguintes informações são geradas por este elemento:

Número aleatório – RAND

Signed response – SRES

Ciphering Key – Kc

Quando requisitado pelo HLR o Auc gera tripletos para cada IMSI que depois são enviados ao VLR via HLR.

2.3.1.7. EIR (*Equipment Identity Register*)

Também é uma base de dados que armazena o IMEI (*International Mobile Identity Equipment*) dos transceptores. Durante o acesso ao sistema, a MSC/VLR pode consultar este bando de dados para verificar se o transceptor que está sendo usado pelo SIM *card* está liberado.

2.3.1.8. FNR (*Flexible Numbering Register*):

É utilizado para possibilitar o uso da portabilidade numérica⁴ e da flexibilidade numérica.

Flexibilidade numérica → O MSISDN do usuário passa a não ter mais relação com um HLR específico. Quando a GMSC envia uma mensagem de consulta ao HLR para obter informações de um MSISDN específico à mensagem é redirecionada para o FNR que direciona ao HLR correto (no caso de outra operadora)

Portabilidade numérica → Permite que o usuário mude de operadora sem ter que trocar seu número MSISDN. As chamadas feitas para o usuário são direcionadas para a operadora correta usando as informações do FNR.

2.3.1.9. ILR (*Internetworking Location Register*)

Este elemento possibilita o *roaming* automático entre redes AMPS e GSM 1900.

⁴ Sua utilização depende da prévia autorização da agencia reguladora do país onde estão sendo implantadas as redes de telefonia móvel.

2.3.2. Base Station Subsystem (BSS):

Responsável pelo gerenciamento e controle das funções relacionadas com o sistema rádio.

2.3.2.1. BSC (*Base Station Controler*):

Este elemento não existe nos padrões norte-americanos (AMPS, IS-136 e IS-95). É responsável por gerenciar a rede rádio podendo conter diversos transceptores (BTS). A BSC centraliza a inteligência das estações base, com a vantagem de controlar um conjunto de BTS que fica apenas encarregada da transmissão na interface rádio. Esse desmembramento faz com que o custo de uma BTS caia significativamente. A BSC possui as seguintes funcionalidades:

- Configuração da rede rádio
- Controlar todos os TRU (transceptores rádio das BTS)
- Administração e controle das BTS
- Controle das conexões com os terminais móveis
- Controla todas as funções rádio: medições, *handover*, etc...

2.3.2.2. TRC (Transcoder Controler)

É responsável pela compressão e descompressão da voz pela adaptação da taxa de transmissão em conexões de dados. Este elemento está localizado entre a BSC e a MSC possibilitando uma economia nos meios de transmissão entre a BTS e a MSC.

2.3.2.3. BTS ou RBS (Base Transceiver Station ou Radio Base Station)

É o equipamento rádio (TRU e antena) responsável pelo funcionamento da interface rádio com o terminal móvel em cada célula do sistema. Possui as seguintes principais funcionalidades:

- Transmissão rádio, inclusive com *frequency hopping*;
- Recepção do sinal do terminal móvel com equalização e diversidade

- Medições de alinhamento no tempo (o sistema GSM possui sincronismo de transmissão com cada terminal móvel)
- Enviar informações gerais do sistema para o terminal móvel
- Receber pedidos de acesso dos terminais móveis
- Multiplexação, codificação de canal, entrelaçamento e cifragem.

2.3.3. Operational and Support System (OSS)

Provê acesso e é responsável pelo monitoramento de falhas nos dois sistemas acima.

2.3.3.1. Operation and Mantaince (OMC)

Um OMC é um centro de monitoração computadorizado que é conectado a outros componentes da rede como MSC e BSC via enlaces de rede de dados X.25. No OMC, recebe-se informação sobre o estado da rede e pode-se monitorar e controlar uma variedade de parâmetros do sistema. Dependendo do tamanho da rede, pode haver uma ou mais OMC.

2.3.3.2. Network Management Center (NMC)

O controle centralizado de uma rede é feito em um Centro de Gerenciamento de Rede (NMC). É necessário somente um NMC para uma rede e este controla os OMC subordinados.

2.4. Interfaces e Protocolos da Rede GSM:

Entre cada elemento da rede existe uma interface própria com protocolos específicos para a integração dos elementos. Os protocolos são estruturados em camadas cada uma com funcionalidades específicas implementando diferentes funções nos sistemas. A figura abaixo ilustra os vários elementos da rede GSM com suas interfaces específicas

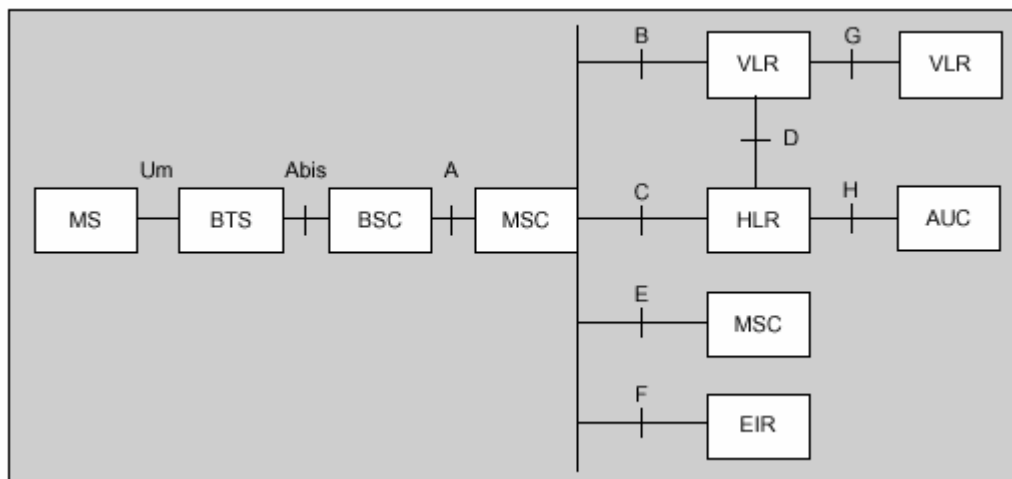


Figura 2.4-1 – Interfaces da Rede GSM

2.4.1. Interface Rádio (U_m):

A interface rádio é a conexão entre o terminal móvel e a rede, possui apenas as 3 primeiras camadas do modelo OSI/ISSO: a camada de rede (*network layer*), a camada de enlace (*data link layer*) e a camada física (*physical layer*).

Na interface rádio trafegam tanto informações dos usuários, quanto sinalização da rede para o terminal móvel, que é necessária para o funcionamento adequado do sistema. A descrição da interface rádio será concentrada na camada 1 (camada física). Nesta camada são mapeadas todas as mensagens provenientes das camadas superiores e os dados dos usuários.

O sistema GSM possui como técnica de acesso do usuário à rede o NB-TDMA⁵ híbrido com FDMA. Nesta técnica TDMA/FDMA [REF 1] cada portadora, pode transmitir (A) usuários em intervalos de tempo diferentes⁶, ou seja, a diferenciação de cada usuário é feita através da portadora e do intervalo de tempo permitido de transmissão.

No GSM, ao contrário do IS-136 [REF 6], cada terminal móvel possui seu próprio sincronismo com a base reduzindo a probabilidade de superposição. Esse sincronismo individual é denominado de *timing advance*.

O TDMA provê um aumento de capacidade se comparado com a técnica de acesso tradicional FDMA dos sistemas analógicos de primeira geração. A

⁵ NB vem de *narrow band* indicando que o canal é de faixa estreita.

⁶ Esses intervalos de tempo são denominados *time slots (TS)*

figura abaixo mostra como o acesso é compartilhado pelos diversos usuários no sistema GSM. A largura de cada portadora é de 200 KHz tendo 8 canais físicos por portadora (8 *time slots* chamadas de burst ou rajadas).

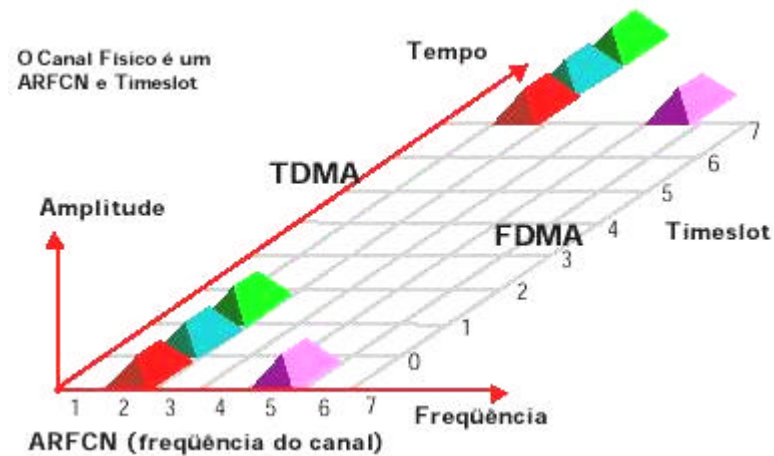


Figura 2.4.1-1 - TDMA GSM

Essa técnica de acesso mais elaborada gera um maior *overhead* de informações de controle.

Para permitir a bi-direcionalidade do enlace, é utilizada a técnica de duplexação por frequência (FDD), onde os canais direto e reverso (*downlink* e *uplink*) estão afastados de 45 MHz. No GSM os enlaces direto e reverso estão ainda defasados temporalmente por três *time slots* [REF 2]. Isso faz com que a transmissão e recepção não sejam simultâneas embora de forma transparente para o usuário devido aos curtos intervalos de tempo envolvidos. Pelo fato destas operações não ocorrem simultaneamente, os terminais móveis podem dispensar o uso de duplexadores, simplificando significativamente sua construção.

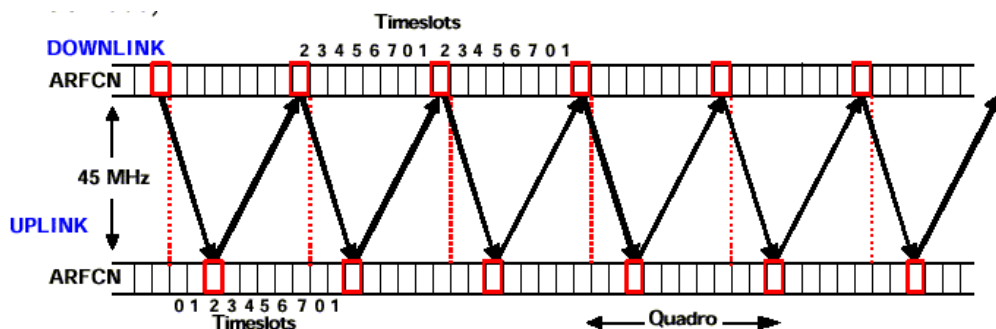


Figura 2.4.1-2 Defasagem entre Canal Direto e Reverso

No GSM é utilizada a modulação GSMK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) com um produto $BT = 0,3$, correspondendo a uma eficiência espectral de 1,354 bits/Hz. Com esta modulação permite transmitir uma taxa bruta de 270,8 Kbps em um canal com 200 KHz de faixa.

Com relação à potência de transmissão, o sistema GSM é mais robusto que os demais sistemas analógicos e digitais. Têm-se abaixo os níveis de potência de transmissão das BTS e dos terminais móveis, tomando-se como exemplo equipamentos Ericsson [REF 2]:

| RBS | CDU | TRX / Ant. | Potência Máx. (dBm) | | | Sensibilidade (dBm) | | | Separação Mínima entre Portadoras (kHz) | | |
|----------------------|-----------------|------------|---------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|---|----------|----------|
| | | | GSM 900 | GSM 1800 | GSM 1900 | GSM 900 | GSM 1800 | GSM 1900 | GSM 900 | GSM 1800 | GSM 1900 |
| 2101 2102 2202 | A | 1 | 44,5 | 43,5 | 43,5 | -110 | -110 | -110 | 400 | 400 | 400 |
| | C+ ¹ | 2 | 41 | 40 | 40 | -110 | -110 | -110 | 400 | 400 | 400 |
| | D | 2-12 | 42 | 41 | | -110 | -110 | | 600 | 1000 | |
| RBS 2302 | | 2 | 33 | 33 | 33 | -107 | -106 | -106 | 400 | 400 | 400 |
| RBS 2401 | | 2 | 19 | 22 | 22 | -100 | -100 | -100 | 400 | 400 | 400 |

Tabela 2.4.1-1 - Parâmetros de BTS GSM

| MS Power Class | Potência de Saída (dBm) | Sensibilidade (dBm) |
|----------------|-------------------------|---------------------|
| 2 | 39 | -106 |
| 3 | 37 | -106 |
| 4 | 33 | -104 |
| 5 | 29 | -104 |

Tabela 2.4.1-2 - Terminais GSM 900

| MS Power Class | Potência de Saída (dBm) | Sensibilidade (dBm) |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | 30 | -104 |
| 2 | 24 | -104 |

Tabela 2.4.1-3 - Terminais GSM 1800

| MS Power Class | Potência de Saída (dBm) | Sensibilidade (dBm) |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | 30 | -104 |

Tabela 2.4.1-4 - Terminais GSM 1900

O detalhamento sobre estruturação e funcionalidades da interface rádio estão descritas no Apêndice – Estrutura dos Canais Lógicos.

Capítulo 3. Conceitos gerais sobre repetidores

3.1. Introdução

O objetivo da inclusão de um elemento ativo na interface aérea é, basicamente, aumentar a área efetiva de cobertura de uma BTS. Existem diversas situações nas quais a utilização do repetidor é interessante, especialmente sob o ponto de vista de redução de custos e rapidez na implantação. O repetidor, devido à sua versatilidade, pode ser incluído em diversos momentos da implantação da rede, desde etapas iniciais na substituição de BTS até em fases mais avançadas de expansão, visando à redução das áreas de sombra existentes.

Como será visto, a escolha do tipo de repetidor a ser utilizado depende muito das características topográficas, morfológicas e sistêmicas (tipo de cobertura desejada), pois existem diferentes graus de penalidades associadas à inclusão do repetidor no sistema. Para cada situação existe um tipo de repetidor com características que irão melhor atender as necessidades do projeto.

A arquitetura do enlace com repetidor é simples, como ilustrado na Figura 3.1-1 - Esquema básico de um sistema com repetidor). No enlace direto o repetidor capta o sinal de uma BTS doadora, o amplifica e retransmite para a nova área de serviço provendo cobertura. No enlace reverso o repetidor capta o sinal da unidade do usuário e o retransmite amplificado para a BTS. Entretanto ocorrem neste processo, diversos efeitos de degradação que devem ser levados em consideração para que a operação do repetidor ocorra de forma satisfatória, afetando o mínimo possível na qualidade da rede.

Em geral os repetidores, permitem uma supervisão remota utilizando-se *modem*. Neste sentido, pode-se fazer monitoramento de alarmes e até gerência do sistema, onde alguns parâmetros podem ser alterados remotamente. Alguns repetidores possibilitam ainda a obtenção de estatística de tráfego cursado através dele. Esta possibilidade é vital para que a percepção de falhas no equipamento seja feita pela operadora e não oriunda de reclamações de clientes.

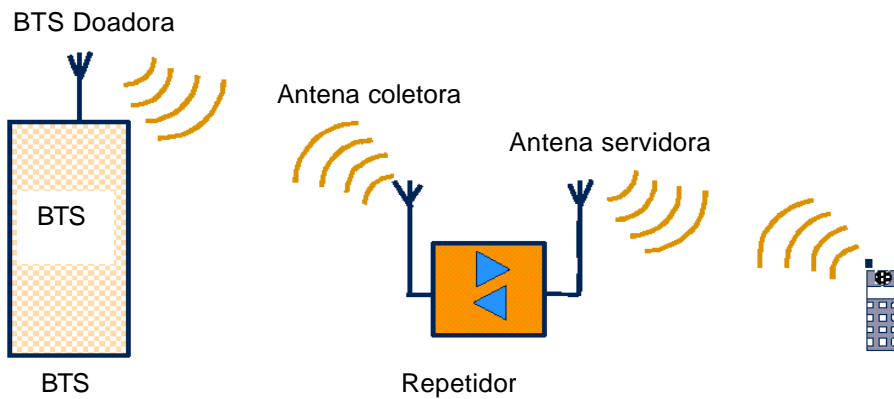


Figura 3.1-1 - Esquema básico de um sistema com repetidor

A opção pela implantação ou não do repetidor depende, em linhas gerais, de duas considerações [REF 2]:

1. A região de interesse possui BTS com folga de tráfego?

O tráfego cursado nas possíveis BTS doadoras (ou se for o caso, de um projeto inicial, o tráfego esperado nas candidatas a BTS doadora) deve ser inferior ao tráfego máximo suportado, pois o repetidor possibilita um aumento na área de cobertura sem, contudo, aumentar a capacidade de tráfego. Caso a BTS doadora esteja operando próximo do seu limite de capacidade o aumento na cobertura, irá gerar um tráfego adicional que não poderá ser suportado, acarretando num aumento no bloqueio das chamadas.

2. Os prazos de implantação são críticos?

Como o repetidor não necessita de integração à rede de transmissão, sua infra-estrutura requerida é simplificada, reduzindo assim o tempo de implantação do equipamento.

3.2. Características de Repetidores

Os repetidores atualmente utilizados nos sistemas celulares constituem-se, basicamente, de um amplificador bi-direcional com filtros para evitar recepção e transmissão de espúrios.

Os equipamentos são em geral classificados com relação a dois quesitos [REF 2]: tipo de filtragem e tipo de transmissão. Com relação ao tipo de filtragem tem-se:

1. Repetidores de banda larga (*Broadband*)

2. Repetidores seletivos em banda (*Band Selective*)
3. Repetidores seletivos em canal (*Channel Selective*)

Com relação ao tipo de transmissão tem-se:

1. Repetidores na frequência de transmissão (*On Frequency Repeater*)
2. Repetidores com deslocamento de frequência (*Frequency Shifting Repeater*)
3. Repetidores com alimentação por fibra óptica (*Fiber Optic Repeater*)

Devido às características distintas, cada tipo de repetidor possui desempenho diferente com relação à degradação causada na rede. A seguir serão apresentados, para cada tipo de repetidor, suas principais características, limitações e situações onde são comumente utilizados.

3.2.1. Classificação quanto à filtragem

3.2.1.1. Repetidor de faixa larga

Este repetidor, de mais baixo custo, tem como característica amplificar toda a faixa de frequência de operação do sistema celular. Isto faz com que canais não pertencentes a BTS doadora sejam amplificados (incluindo canais de outras operadoras), aumentando consideravelmente o nível de interferência na região em torno do repetidor. Outro problema apresentado por este tipo de repetidor é o baixo ganho por canal e a maior probabilidade do amplificador ser saturado, devido aos diversos sinais de entrada.

Por estes dois motivos sua instalação deve ser feita preferencialmente em ambientes nos quais a isolação de outras fontes de sinais além da BTS doadora seja grande, evitando uma maior degradação do sistema. Este tipo de repetidor pode ser implantado em projetos externos (*outdoor*) em áreas isoladas, longe da influência de muitas BTS, ou em ambientes internos (*indoor*).

3.2.1.2. Repetidores Seletivos em Banda

Este repetidor possui características semelhantes ao de larga faixa, apresentando basicamente os mesmos problemas citados no item anterior,

contudo permitem amplificar apenas a banda de uma operadora, evitando assim a degradação de desempenho do sistema de outras empresas. É utilizado em áreas urbanas com um planejamento cuidadoso para evitar a captação de sinais indesejados, e em projetos para ambientes interiores.

3.2.1.3. Repetidores Seletivos em Canal

Neste tipo de repetidor somente são recebidos e amplificados os canais da BTS doadora. Este repetidor garante melhor desempenho, pois pelo fato de não haver amplificação de canais indesejados, há uma redução na degradação do sistema. Em geral cada canal possui um PA (*power amplifier*) individual, fornecendo um grande ganho de amplificação por canal. No caso da utilização em um sistema com salto em frequência (*frequency hopping*), o conjunto de canais a ser amplificado deve conter todos os canais utilizados pela sequência.

Em contra-partida ao melhor desempenho, este tipo de repetidor é mais caro que os demais tendo custo próximo ao de uma BTS completa. Sua utilização depende da análise da relação custo benefício para a determinação da melhor solução.

3.2.2. Classificação quanto à transmissão

3.2.2.1. Repetidores de mesma faixa

Este repetidor pode utilizar qualquer um dos três processos de filtragem já descritos.

Nesta classe de repetidores, a interface aérea entre a BTS e o repetidor trabalha na mesma frequência de operação da interface repetidor-móvel. O sinal irradiado pela BTS para os terminais de usuário é captado por uma antena denominada de coletora, filtrado, amplificado e retransmitido pela antena servidora do repetidor, que irá atender a área de interesse. No sentido do enlace reverso o sinal proveniente do terminal móvel é captado pela antena servidora, amplificado e transmitido pela antena coletora para a BTS. Os ganhos introduzidos pelo repetidor nos enlaces direto e reverso podem ser configurados independentemente.

A utilização de uma mesma frequência de operação nas duas interfaces aéreas cria um delicado problema de isolamento entre as antenas coletora e servidora do repetidor. A possibilidade de acoplamento entre as duas antenas

limita o ganho máximo utilizável tornando a obtenção de boas condições de isolamento entre as antenas, de fundamental importância. Níveis adequados de isolamento são conseguidos através da escolha apropriada das antenas (lóbulos laterais e traseiros reduzidos) e de uma montagem eficiente. Em geral, este tipo de repetidor é utilizado também locais com boa isolamento natural ou em coberturas de ambientes interiores.

3.2.2.2. Repetidores de faixa deslocada

Este tipo de repetidor só é disponível com filtragem de canal seletivo e consiste em duas unidades: Unidade BTS e Unidade Remota.

A Unidade BTS fica fisicamente colocada na BTS doadora, podendo ser conectado diretamente à mesma utilizando-se acopladores direcionais. A função desta unidade é transladar as frequências das portadoras da BTS doadoras para que a transmissão para o repetidor ocorra em uma frequência diferente da utilizada pela BTS e pelo móvel.

A Unidade Remota desempenha a função de repetidor propriamente dita. A antena coletora recebe o sinal de frequência f_2 transladando-o novamente para a frequência inicial f_1 . O sinal é amplificado e enviado para a antena servidora, que proverá a cobertura da área de interesse. O processo análogo ocorre no reverso, de modo a manter a interface aérea entre a BTS-repetidor trabalhando em uma frequência diferente da utilizada pelo terminal móvel. A operação em frequências diferentes permite ganhos elevados no repetidor por reduzir o problema da isolamento.

Alguns cuidados devem ser tomados para que a utilização do repetidor com desvio de frequência tenham desempenho satisfatório:

1. Deve-se evitar que algum móvel utilize as frequências f_2 que estão sendo transmitidas entre a Unidade BTS e a Unidade Remota, pois isto pode causar um grande aumento na interferência de *uplink*. Para isto utilizam-se antenas muito diretivas na Unidade BTS e na antena coletora da Unidade Remota. Também nesta interface, os canais de controle possuem estruturas invertidas [REF 2] para que o móvel não tenha condições de captar e decodificar o BCCH [apêndice].
2. Para que o isolamento entre as antenas receptora e servidora seja desprezível, as frequências f_1 e f_2 devem ser separadas de uma

distância de pelo menos 4 canais [REF 2] (800 KHz para o sistema GSM). Neste sentido, a escolha da frequência f_2 deve ser cuidadosa para que não ocorra nenhuma degradação em BTS vizinhas, que poderão estar utilizando f_2 como um canal de voz ou até mesmo de controle. A utilização de antenas diretivas também reduz os problemas desta natureza.

3. O sistema de desvio de frequência necessita de sincronização, podendo ser utilizado o sinal GPS para garantir o sincronismo desta operação.

Pelo fato de permitir altos ganhos e de ser canal seletivo, este repetidor é o mais recomendado para aplicações *outdoor*, onde critérios de degradação e isolamento são críticos. Por outro lado seu custo é bastante elevado

A figura abaixo mostra, de forma esquemática, este tipo de repetidor.

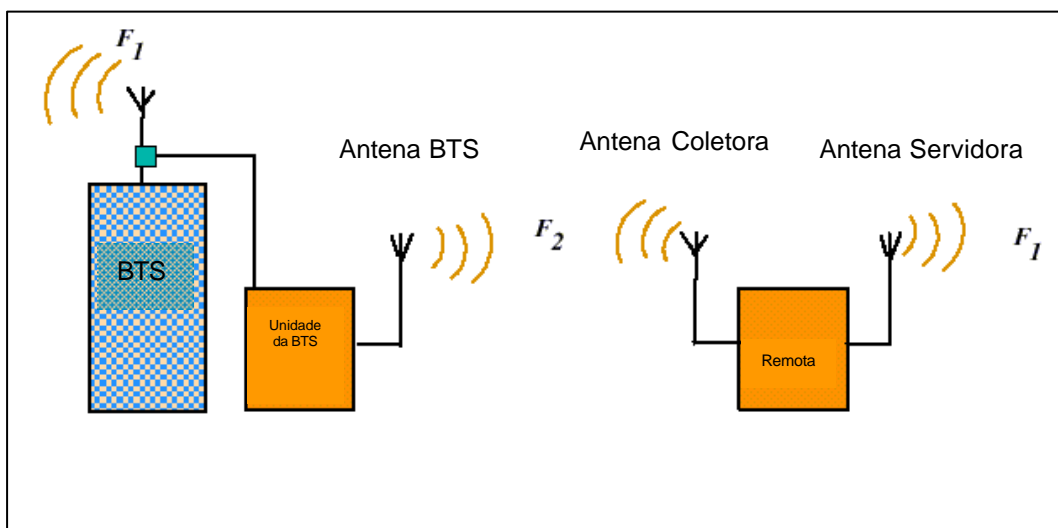


Figura 3.2.2.2-1 - Esquema básico de repetidor de frequência deslocada

3.2.2.3. Repetidores Ópticos

Os repetidores ópticos possuem uma interface de transmissão óptica entre a BTS e a estação remota. Este tipo de equipamento também possui duas unidades: a Unidade Central (*master*) e a Unidade Remota (*remote*), que irá cobrir a área desejada. Esse tipo de repetidor pode ser utilizado com qualquer tipo de filtragem, sendo os mais comuns repetidores de banda seletiva.

A Unidade Central é responsável por converter o sinal proveniente da BTS doadora em sinal óptico, que será transmitido até a unidade remota (repetidora). O mesmo ocorre no enlace reverso (*uplink*), onde sinais provenientes do repetidor são transformados em sinais ópticos para serem enviados para a BTS doadora.

As vantagens deste tipo de repetidor são claras: as perdas na transmissão para o repetidor são baixíssimas, permitindo que várias estações repetidoras (a estação central permite ligação com mais de uma remota) sejam colocadas a distâncias razoáveis da BTS doadora. Pelo fato de um dos enlaces ser óptico, a maioria das penalidades acarretadas pelo uso do repetidor é reduzida.

O maior utilização deste tipo de repetidor é na cobertura de ambientes *indoor*, pois as estações remotas podem ser espalhadas pelo ambiente sem que haja muita perda nos enlaces. A utilização destes repetidores em ambientes externos é, em geral, economicamente e operacionalmente complicada, pois há a necessidade da passagem de fibra pela rua, o que onera o projeto e aumenta o seu tempo de implantação.

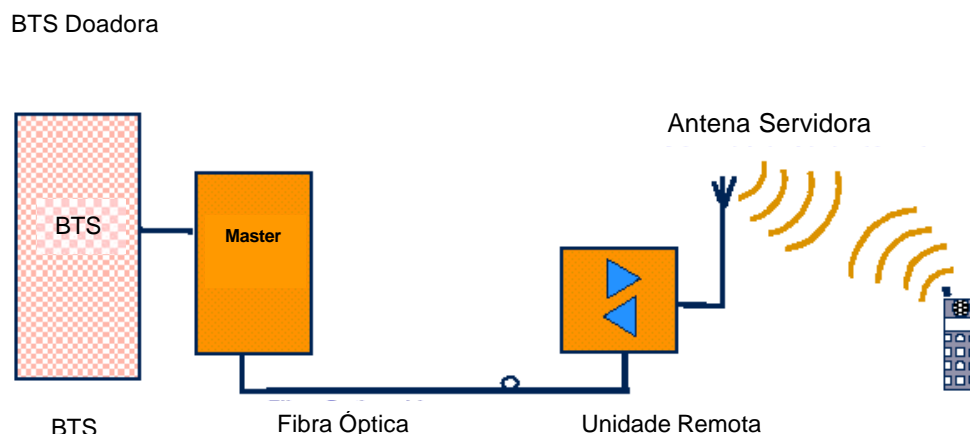


Figura 3.2.2.3-1 - Esquema básico de repetidor óptico

3.3. Isolação entre antenas do repetidor

Quando duas antenas são colocadas muito próximas uma da outra, ocorre um fenômeno denominado *acoplamento entre as antenas*, onde ambas “passam a trabalhar” em conjunto, tendo seus diagramas individuais alterados devido ao acoplamento formando então um novo diagrama.

Embora este efeito seja muito útil na construção de conjuntos de antenas em diversas aplicações, quando as antenas que trabalham com finalidades

diferentes são colocadas próximas, o efeito pode ser negativo destacando-se a alteração indesejada nos diagramas de radiação, interferência alta e, no caso de repetidores, uma realimentação que causa séria degradação do desempenho do sistema. Este problema é mais grave quando as antenas trabalham na mesma frequência. No caso de repetidores deslocados em frequência (*shift frequency repeaters*), o problema é amenizado. A figura abaixo ilustra o problema da realimentação.

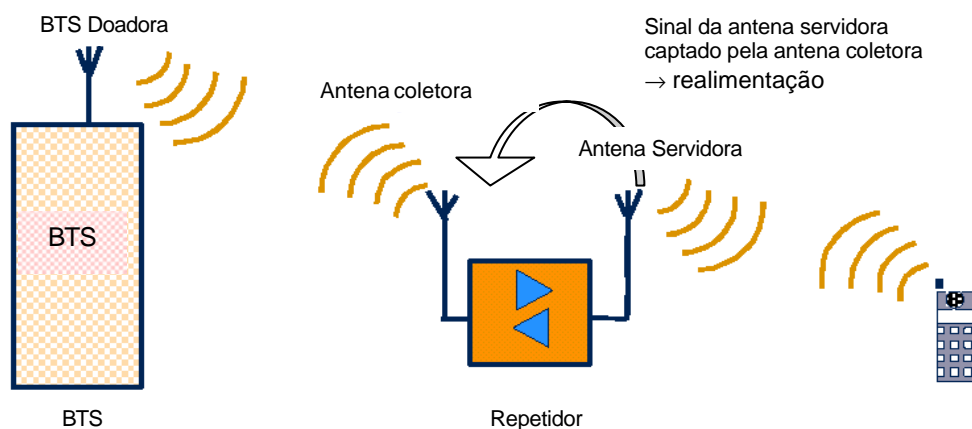


Figura 3.3-1 - Efeito de realimentação em repetidores

Caso o sinal proveniente da antena servidora chegue à antena coletora (que capta sinal proveniente da BTS doadora) com intensidade próxima ao sinal recebido pela própria coletora, pode ocorrer a auto-oscilação do repetidor. Para garantir que a realimentação não degrade o desempenho do sistema, o repetidor deve ser montado de modo a se obter uma isolação mínima entre a antena servidora e a coletora. Para assegurar um bom desempenho, o valor desta isolação deve ser igual ao ganho do repetidor mais uma margem entre 5-15 dB [REF 2].

3.4. Efeitos de Saturação do Amplificador

Todo amplificador possui uma faixa dinâmica limitada em que sua resposta é linear. A operação na região não linear provoca conversão AM/PM [REF 5] no caso de uma portadora e intermodulação no caso de mais de uma portadora.

Serão descritos a seguir os efeitos de saturação do amplificador para cada tipo de repetidor.

3.4.1. Repetidores de Banda Larga/Banda Seletiva:

Nestes tipos de repetidor, os sinais de diversos canais em conjunto com os canais da BTS doadora, causam dois importantes efeitos na qualidade do sinal amplificado:

- Operação na região não linear do amplificador
- Redução na amplificação por canal.

3.4.1.1. Efeitos no enlace direto

Dado um número de portadoras da BTS doadora, o amplificador do repetidor possui uma potência máxima de entrada que garante sua operação na região linear. Contudo, os sinais externos recebidos pelo repetidor, podem levá-lo a operar em sua região não linear acarretando distorções do sinal e degradações de desempenho da rede, em especial se este repetidor tiver montagem externa.

Pelo fato do amplificador ser de banda larga a probabilidade da recepção de sinais externos além dos da BTS doadora, aumenta significativamente tornando-os pouco eficientes em regiões densamente ocupadas por BTS.

Como o amplificador recebe N canais simultaneamente, o ganho máximo por canal⁷ é função do número de canais ativos. Em geral na região linear podemos aproximar o ganho por canal do repetidor pela expressão:

$$G_{\text{porcanal}} [\text{dB}] = G_{\text{TOTAL}} - 10 \log(N) \quad \text{eq. 3.4.1.1-1}$$

No caso do repetidor se encontrar em um ambiente onde haja elementos interferentes (canais não pertencentes a BTS doadora chegando ao repetidor), a potência de saída por canal do amplificador do repetidor é reduzida [REF 3], sendo dada por

$$P[\text{dBm}] = \frac{1}{2} \left[2I_3 - \left(\frac{C}{I} \right) - 10 \log \left(N^2 - 3 \frac{N}{2} \right) \right] \quad \text{eq. 3.4.1.1-2}$$

⁷ Para o cálculo desta expressão os canais indesejados foram desprezados, por este motivo o ganho calculado seria um ganho máximo o qual existe apenas se nenhum canal externo estiver chegando ao repetidor.

onde:

(C/I) ? É a relação sinal ruído na entrada do repetidor, quanto maior for esta relação menor será a potência de saída do repetidor. Na falta de um valor calculado, utiliza-se o valor mínimo padrão especificado para tecnologia.

I_3 ? Ponto de interceptação de terceira ordem do amplificador em dBm

N ? Número de canais da BTS doadora.

O ganho por canal decresce rapidamente em função do número de portadoras ativas e elementos interferentes.

3.4.1.2. Efeitos no canal reverso

Basicamente o *uplink* apresenta os mesmos problemas enfrentados pelo *downlink*. Contudo este enlace possui uma maior complexidade, pois suas fontes irradiantes (terminais) estão em constante movimento. Terminais muito próximos podem levar a saturação do amplificador e/ou a redução do ganho de outros terminais. Este efeito é conhecido como *near-far effect*. Existem alguns métodos para se evitar estes problemas:

- Utilização de um limitador de sinal: essa solução é utilizada apenas nos repetidores de canal seletivo [REF 2] que utilizam um amplificador comum para todos os canais.
- Uso de antenas servidoras com diagramas horizontais estreitos: estes diagramas reduzem a probabilidade de que um usuário próximo esteja sendo servido pelo lóbulo principal da antena.

3.4.2. Repetidores Canal Seletivo

Existem dois tipos básicos destes repetidores: no primeiro cada canal possui seu próprio amplificador enquanto que no segundo caso existe apenas a separada filtragem dos canais, porém sua amplificação é realizada por um mesmo amplificador.

- Amplificadores separados ? A amplificação separada em conjunto com a filtragem por canal, melhora em muito o desempenho do repetidor. Tanto a redução do nível de potência de saída por canal quanto a ocorrência da saturação do seu amplificador, só ocorrem em

função dos possíveis sinais co-canais que estejam chegando ao repetidor, reduzindo significativamente estes efeitos;

- Amplificador único ? Neste tipo de amplificação o único efeito reduzido é o dos sinais externos à BTS doadora. Contudo, como a amplificação é compartilhada, a redução da potência de saída por canal ainda existe.

3.5. Parâmetros típicos de repetidores

O ganho máximo de repetidores é limitado pela necessidade de isolamento entre as antenas. Para repetidores de mesma frequência é necessária uma isolamento mínima de aproximadamente 15 dB acima do ganho [REF 2,3]. Como em montagens reais dificilmente se obtêm isolações superiores a 100 dB, estes repetidores tanto de banda seletiva como de canal seletivo, apresentam tipicamente ganho máximo de 85 dB. Já repetidores com deslocamento em frequência, podem operar com ganhos da ordem de 100 dB [REF 2]. Parâmetros típicos de repetidores são mostrados na tabela abaixo:

| Tipo | Pot. Máx. de Tx [dBm] | Ganho Máximo [dB] |
|--|-----------------------|-------------------|
| Seletivo em Banda | 21/portadora | 85 |
| Seletivo em canal | 33 | 85 |
| Seletivo em canal c/ deslocamento em frequência | 33 | 100 |

Tabela 3.5-1 - Parâmetros típicos de repetidores

Capítulo 4. Dimensionamento de enlaces com repetidores

4.1. Isolação entre as antenas

4.1.1. Cálculo da isolamento

Os cálculos realizados nesta sessão são aplicáveis a repetidores que não deslocam a frequência, ou seja, tanto a antena coletora quanto a servidora operam na mesma frequência. No caso de repetidores com deslocamento em frequência, é razoável desprezar o efeito de realimentação.

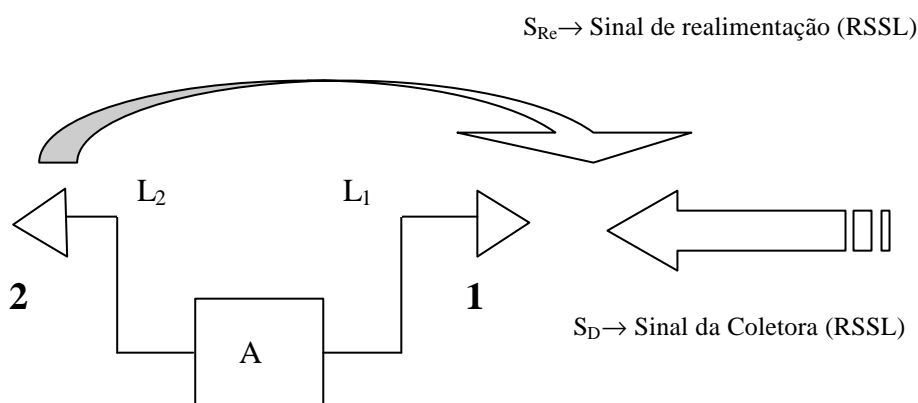


Figura 4.1.1-1 - Realimentação do Repetidor

Para o cálculo da isolamento deve-se calcular, primeiramente, o sinal de realimentação do repetidor. Este cálculo é realizado com base nas características de montagem, antenas, cabos e ganho do repetidor. A equação abaixo [REF 3,4] mostra o nível de sinal de realimentação:

$$P_{RSre} = S_D + G_{R1max} - 2 \cdot L_1 + A - L_2 + G_{T21}(\theta, \varphi) - L_0 + G_{R12}(\theta, \varphi) \quad \text{eq. 4.1.1-1}$$

Utilizando a expressão da perda de espaço livre

$$L_0 [\text{dB}] = 32.4 + 20 \log d (\text{km}) + 20 \log f (\text{MHz}) \quad \text{eq. 4.1.1-2}$$

onde:

$G_{T12}(\theta, \varphi) \rightarrow$ Ganho de transmissão da antena servidora na direção da antena coletora

$S_D \rightarrow$ Sinal Direto proveniente da BTS doadora

$G_{R1max} \rightarrow$ Ganho máximo da antena coletora.

$G_{R21}(\theta, \varphi) \rightarrow$ Ganho de recepção da antena coletora na direção da antena servidora

$L_0 \rightarrow$ Perda por espaço livre

$L_{1,2} \rightarrow$ Perda nos cabos

$P_{RSre} \rightarrow$ Potência do sinal de realimentação, o qual interage com o sinal vindo da BTS doadora.

Deseja-se que o nível deste sinal esteja abaixo do sinal proveniente da BTS doadora (sinal direto) por uma determinada margem de segurança (M). Tem-se então que:

$$P_{RSd} = P_{RSre} + M \quad \text{eq. 4.1.1-3}$$

Logo,

$$S_D + G_{1Rmax} - L_1 = S_D + G_{R1max} - 2L_1 + A - L_2 + G_{T21}(\theta, \varphi) - L_0 + G_{R12}(\theta, \varphi) + M$$

eq. 4.1.1-4

onde:

$M \rightarrow$ Margem de segurança, aproximadamente 15 dB [REF 2];

$P_{RSd} \rightarrow$ Potência recebida do sinal direto

$P_{RSre} \rightarrow$ Potência recebida do sinal realimentado.

$G_{1Rmax} \rightarrow$ Ganho máximo da antena coletora

$G_{T21}(\theta, \varphi) \rightarrow$ Ganho de transmissão da antena servidora na direção da antena coletora

$G_{R12}(\theta, \varphi) \rightarrow$ Ganho de recepção da antena coletora na direção da antena servidora.

Definindo-se a isolamento como:

$$I[\text{dB}] = L_1 + L_2 - G_{T21}(\theta, \varphi) + L_0 - G_{R12}(\theta, \varphi) \quad \text{eq. 4.1.1-5}$$

tem-se

$$A = I - M \quad \text{eq. 4.1.1-6}$$

Onde:

$A \rightarrow$ Ganho do Repetidor

$I \rightarrow$ Isolação entre antenas

$M \rightarrow$ Margem de segurança entre o sinal direto e o realimentado.

As equações acima mostram que a amplificação máxima permitida no repetidor está ligada diretamente com a isolamento atingida entre as antenas. Esta isolamento mede, basicamente, as perdas na transmissão do sinal da antena servidora que para a antena coletora, sinal este que provoca o fenômeno da realimentação.

A montagem adequada do repetidor, em conjunto com a escolha adequada das antenas, é que irão garantir um bom nível de isolamento, permitindo a utilização de ganhos elevados pelo repetidor.

4.1.2. Fatores adicionais de isolamento

Existem certas circunstâncias onde a montagem do repetidor não provê uma isolamento adequada. Para a obtenção do aumento desta isolamento podem-se utilizar telas metálicas vazadas (com aberturas inferiores a $\lambda/10$), que causarão um efeito de blindagem aumentando a isolamento. É utilizada uma tela com esta abertura, pois esta terá aproximadamente o mesmo desempenho de uma placa de contínua. Neste caso a isolamento é dada por:

$$I(\text{dB}) = +L_1 + L_2 - G_{T21}(\theta, \varphi) + L_0 - G_{R12}(\theta, \varphi) + L_{\text{Blindagem}} \quad \text{eq. 4.1.2-1}$$

O cálculo da blindagem provida pela placa metálica não é simples, e seu efeito depende das dimensões e do posicionamento da blindagem com relação à antena. Em geral a sua contribuição no aumento do isolamento, é levantada através de medições diretas em campo (ver item 5.3.8).

Na prática, a utilização de blindagem gera uma isolamento adicional entre 10-15 dB [REF 11]. Pode-se colocar blindagem em uma das antenas, ou em ambas.

Em aplicações *indoor*, a isolamento é aumentada pela perda de penetração, que varia de acordo com o tipo de construção. A perda de penetração típica fica em torno de 18-20 dB. Neste caso, a isolamento total é dada por:

$$I(\text{dB}) = +L_1 + L_2 - G_{T21}(\theta, \varphi) + L_0 - G_{R12}(\theta, \varphi) + L_{\text{Blindagem}} + L_{\text{penetração}} \quad \text{eq. 4.1.2-2}$$

Na prática, em projetos *indoor* os problemas de isolamento não acarretam redução de desempenho do repetidor.

4.1.3. Considerações adicionais sobre a isolamento

Os cálculos efetuados nas sessões anteriores possuem limitações e cuidados para seus valores, sejam coerentes com os medidos em campo.

No cálculo da isolamento, mesmo em campo distante, recomenda-se utilizar as envoltórias dos diagramas (cálculo pessimista), pois os valores fornecidos para os nulos dos diagramas são discutíveis, dado que sua existência parte do pressuposto que a antena não teve nenhum desvio na fabricação.

Para a obtenção de uma isolamento adequada, a escolha das antenas do repetidor é muito importante. Para a antena coletora, deve-se utilizar algum modelo que tenha alto ganho, alta relação frente costas e pequenos lóbulos laterais. Para a antena servidora, devido à sua funcionalidade, deve-se escolher antenas com melhor relação frente costa possível. Em geral, antenas de painéis possuem esta característica.

4.2. Aumento da Interferência co-canal

A interferência co-canal é um efeito inerente dos sistemas celulares, que operam com base no reuso de frequência. A degradação causada por esta interferência é o principal fator limitante do aumento de capacidade destes sistemas. O controle adequado dos níveis de interferência é essencial para a obtenção de um sistema de alta capacidade, caracterizado pela utilização de um baixo fator de reuso.

Nestes sistemas qualquer aumento da interferência, pode levar a sérias limitações de desempenho. Por isso, a implantação de repetidores deve ser analisada cuidadosamente tendo-se em mente o impacto que este causará na degradação da relação C/I.

Os repetidores causam aumento de interferência tanto nos enlaces diretos (*downlink*) quanto nos enlaces reversos (*uplink*). Contudo, é no enlace reverso que podem aparecer as piores degradações, devido à diretividade da antena coletora do repetidor [REF 2].

O aumento da interferência no sistema está diretamente ligado ao tipo de repetidor e a sua aplicação. Tipicamente repetidores de uso interno (*indoor*), pelo fato de possuírem um isolador natural, possuem níveis de degradação no enlace direto mais controlado, geralmente desconsiderados em projetos. Repetidores de uso externo (*outdoor*), são bem mais sensíveis à interferência.

A seguir será analisado o impacto no aumento de interferências pelo uso de repetidores externos (*outdoor*), para cada tipo de repetidor e sua aplicação.

4.2.1. Repetidores de Banda Larga (*broadband repeaters*)

Este tipo de repetidor é, em todos os sentidos o que apresenta pior desempenho. Como equipamento amplifica toda a banda A e B são gerados dois problemas:

1. A amplificação dos sinais da rede concorrente pode provocar problemas graves para a outra operadora, pois a princípio nada se conhece sobre o seu planejamento de frequências. Os níveis de interferência gerados podem causar quedas de chamadas em uma vasta área em torno do repetidor.
2. Este repetidor também amplifica toda a banda de operação da operadora que estiver utilizando este equipamento. Com isso além de amplificar os canais provenientes da coletora, recebe possíveis sinais interferentes de outras BTS que chegam fracos, amplificando-os e retransmitindo-os, causando aumentos no nível de interferência de *downlink*. A gravidade da degradação é análoga no enlace direto (*uplink*).

4.2.1.1. Cálculo da interferência no enlace direto (*downlink*)

O repetidor recebe M sinais interferentes, amplificando-os e re-emitindo para a área de interesse de cobertura. Neste processo há claramente uma penalidade nas relações C/I em torno do repetidor. A figura abaixo ilustra o impacto deste tipo de repetidor nos níveis de interferência.

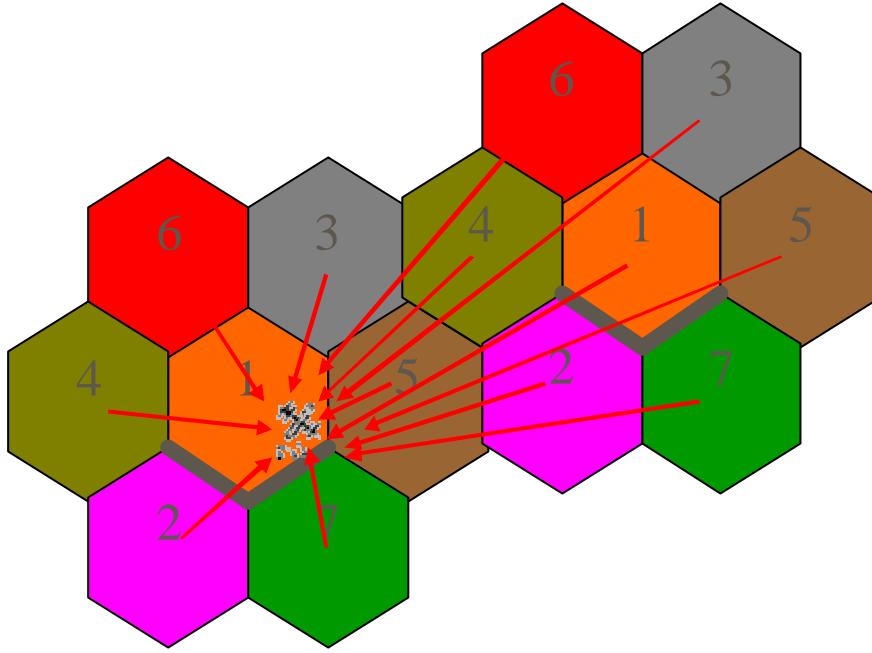


Figura 4.2.1.1-1 - Interferência Canal Direto Repetidor Banda larga

Pelo fato deste repetidor possuir um amplificador de banda larga, qualquer sinal que nele chega é amplificado e transmitido. Neste caso qualquer BTS passa a ter duas fontes de interferência, uma direta e outra realimentada pelo repetidor, independentemente destas serem co-canaís ou não a BTS coletora.

Metodologia de cálculo:

Para cada ponto do cenário, identifica-se qual a BTS é a melhor servidora (caracterizado pelo maior nível de sinal no ponto). Calcula-se então, para este ponto específico, a interferência proveniente das BTS co-canaís à melhor servidora (I_{BTS}) e, em seguida, calcula-se a interferência proveniente do repetidor (I_{Rep}). A interferência total será a soma de ambas interferências como é mostrado abaixo:

$$I_{TOTAL}[dBm] = 10Log \left[\sum_{i=1}^M 10^{\frac{I_i[dBm]}{10}} + 10^{\frac{I_{Repetidor}[dBm]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.2.1.1-1}$$

Para a determinação de I_{BTS} calcula-se a soma da contribuição de interferência de cada BTS co-canal a melhor servidora do ponto em questão.

$$I_{BTS}[dBm] = 10Log \left[\sum_{k=1}^M 10^{\frac{I_k[dBm]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.2.1.1-2}$$

O cálculo do nível de interferência proveniente da k-ésima BTS co-canal é realizado segundo a equação abaixo:

$$I_k [\text{dBm}] = P_{\text{TBTsk}} [\text{dBm}] + G_{\text{TxK}} (\theta, \varphi) - L_{\text{caboK}} - L_{\text{adicionalK}} - L_{\text{PropagaçãoK}}$$

eq. 4.2.1.1-3

onde:

I_k ? Interferência da k-ésima BTS co-canal

P_{TBTsk} ? Potência de transmissão da k-ésima BTS co-canal

G_{TxK} ? Ganho da k-ésima BTS co-canal na direção do ponto onde está sendo calculada a interferência.

L_{caboK} ? Perda no cabo da k-ésima BTS co-canal

$L_{\text{adicionalK}}$? Perdas adicionais da k-ésima BTS co-canal (*splitters*, acopladores, etc...)

$L_{\text{propagaçãoK}}$? Perda de propagação do sinal da k-ésima BTS co-canal até o ponto em questão.

Para o cálculo de I_{rep} deve-se calcular a potência com que cada BTS co-canal chega ao repetidor. A partir desse valor determina-se a potência de saída do sinal interferente do repetidor e o valor de interferência no ponto em questão.

O nível de sinal interferente que chega ao repetidor é calculado segundo a equação abaixo:

$$\text{RSSL}_K [\text{dBm}] = P_{\text{TBTsk}} [\text{dBm}] + G_{\text{TxK}} (\theta, \varphi) - L_{\text{kcabos}} - L_{\text{kadicional}} - L_{\text{kPr opagação}}$$

eq. 4.2.1.1-4

onde:

RSSL_K ? nível de sinal da k-ésima BTS co-canal na entrada da antena coletora do repetidor

P_{TBTsk} ? Potência de transmissão da k-ésima BTS co-canal

G_{TxK} ? Ganho da k-ésima BTS co-canal na direção da antena coletora do repetidor

L_{kcabos} ? Perda nos cabos da k-ésima BTS co-canal

$L_{\text{kadicional}}$? Perdas adicionais da k-ésima BTS co-canal (*splitters*, acopladores, etc...)

$L_{kpropagação}$? Perda de propagação do sinal da k -ésima BTS co-canal o repetidor

A equação abaixo determina, para cada BTS co-canal o nível de saída do seu respectivo sinal do repetidor:

$$P_{Tk} [dBm] = RSSL_K + G_{coletora}(\theta_k \phi_k) + G_{rep} - L_{cabos} - L_{adicional} \quad \text{eq. 4.2.1.1-5}$$

onde:

P_{Tk} ? potência de transmissão da k -ésima BTS co-canal na saída do repetidor

$RSSL_K$? nível de sinal da k -ésima BTS co-canal na entrada da antena coletora do repetidor

$G_{coletora}(\theta_k \phi_k)$? Ganho da antena coletora na direção da k -ésima BTS co-canal

G_{rep} ? Ganho do repetidor

L_{cabos} ? Perda nos cabos do repetidor

$L_{adicional}$? Perdas adicionais no repetidor (*splitters, acopladores, etc...*)

O nível de I_{rep} é calculado então segundo as equações abaixo:

$$I_{repk} [dBm] = P_{Tk} [dBm] + G_{Txservidora}(\theta, \phi) - L_{propagação} \quad \text{eq. 4.2.1.1-6}$$

$$I_{Rep} [dBm] = 10 \log \left[\sum_{k=1}^M 10^{\frac{I_{repk} [dBm]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.2.1.1-7}$$

onde:

I_{Repk} ? valor de interferência calculada para cada BTS co-canal que tem seu sinal amplificado pelo repetidor.

P_{Tk} ? potência de transmissão da k -ésima BTS co-canal na saída do repetidor

$G_{Txservidora}(\theta_k \phi_k)$? ganho da antena servidora do repetidor na direção do ponto onde está sendo calculada a interferência.

$L_{propagação}$? perda de propagação do repetidor até o ponto de cálculo de interferência.

Este tipo de repetidor pode ser visualizado como uma nova BTS colocada no cenário, possuindo todos os canais de transmissão sendo transmitidos com potências distintas, em função dos cada níveis de sinal interferente na entrada do repetidor.

Em ambientes urbanos a degradação causada por este tipo de repetidor é quase proibitiva. O repetidor de banda larga, assim como o repetidor de banda seletiva é utilizado preferencialmente em ambientes *indoor*. A utilização destes repetidores em ambiente externos só é viável caso estes forem implantados em ambientes controlados (isolados), onde os níveis de interferência ficam restritos.

4.2.1.2. Interferência de *Uplink*:

Da mesma forma que os níveis de interferência do canal direto (*downlink*) é aumentada, a interferência do canal reverso (*uplink*) também sofre um aumento, podendo ser fortemente degradada.

Esta interferência ocorre pelo fato da antena coletora do repetidor ter a possibilidade de transmitir sinais para uma BTS co-canal à BTS doadora. Em geral, quando este tipo de interferência ocorre é intensa, devido aos altos ganhos da antena coletora dos repetidores.

No caso de repetidores em banda larga a situação ainda é mais crítica, pois como este amplifica toda a banda de operação, qualquer terminal que esteja transmitindo nas proximidades do repetidor pode ter seu sinal captado, amplificado e transmitido no canal reverso (*uplink*). Sendo, assim além das bases co-canais serem degradadas, qualquer base pode ser vítima de interferência se um eventual sinal de um móvel co-canal for captado pelo repetidor. A figura abaixo mostra como o repetidor degrada a interferência de *uplink*.

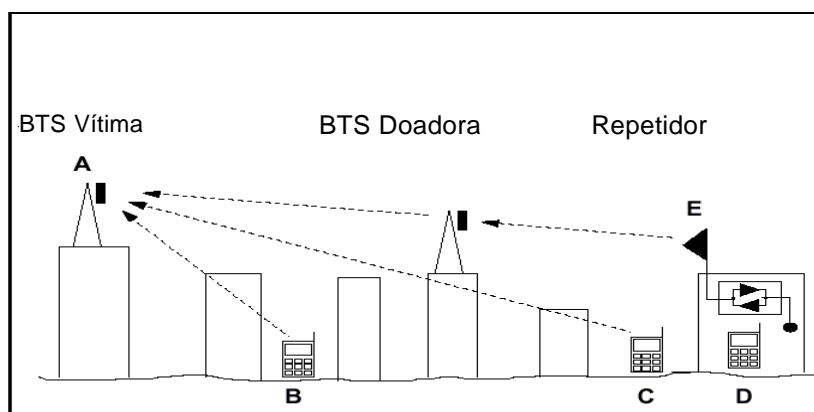


Figura 4.2.1.2-1 - Interferência Canal Reverso Repetidor Banda Larga

Quando o repetidor estiver montado no topo de um prédio, a base A estará com um novo cenário de interferência de *uplink*. Esta base “verá” o móvel D “através” do repetidor⁸ com perda de propagação aproximadamente igual à de espaço livre devido à grande probabilidade do repetidor estar em visada direta com a base co-canal.

No caso de repetidores em banda larga, o risco é aumentado drasticamente, pelo fato de que qualquer base próxima poderá ser co-canal.

O cálculo de interferência de canal direto é realizado calculando-se o nível de sinal recebido pela BTS vítima devido à transmissão de sinal de um repetidor (E).

O cálculo do nível de sinal na entrada da antena da BTS vítima é realizado segundo a equação abaixo:

$$RSSL_{IE} [dBm] = P_{Te} [dBm] + G_{Tx_E} (\theta, \varphi) - L_{Propagação} \quad \text{eq. 4.2.1.2-1}$$

onde:

$RSSL_{IE}$? nível de sinal interferente na entrada da antena BTS vítima.

P_{Te} ? potência de transmissão do repetidor no enlace reverso (*uplink*)

$G_{Tx_E}(\theta, \varphi)$? ganho de transmissão da antena coletora na direção da BTS vítima.

$L_{propagação}$? perda de propagação do repetidor até a BTS vítima.

O cálculo do nível de potência interferente recebida é realizado segundo a equação:

$$I_{vítima} [dBm] = RSSL_{IE} [dBm] + G_{RBTS} (\mathbf{q}, \mathbf{j}) - L_{cabos} \quad \text{eq. 4.2.1.2-2}$$

onde:

$I_{vítima}$? nível de sinal interferente na BTS vítima

$RSSL_{IE}$? nível de sinal interferente na entrada da antena BTS vítima.

P_{Te} ? potência de transmissão do repetidor no enlace reverso (*uplink*)

$G_{RBTS}(\theta, \varphi)$? ganho de recepção da BTS vítima na direção do repetidor.

⁸ Esta analogia pode ser usada para aumentar o entendimento da interferência de *downlink*. No caso, o móvel D vê a base A através do repetidor.

4.2.1.3. Limitações no Cálculo de Interferência do Canal Reverso

Em geral, cálculos de interferência de canal reverso não são realizados pelas ferramentas de predição, pois o problema de interferência *uplink* é de natureza complexa, dado que os elementos geradores de interferência (terminais móveis) transmitem e se movimentam de forma aleatória no cenário. Isso faz com que as diversas BTS sejam afetadas de forma independente, vinculada apenas aos níveis de sinal que chegam no repetidor.

Uma análise viável de ser realizada é a da potencialidade de interferência de canal reverso. Como em geral as antenas coletoras do repetidor são diretivas, as verificações são feitas analisando-se a existência de BTS co-canaís aos móveis que transmitem para o repetidor dentro do lóbulo principal da antena coletora do repetidor. Caso existam, o risco de interferência de canal reverso é grande, devido aos ganhos elevados desta antena⁹.

A avaliação desse potencial de interferência pode ser um fator decisivo no posicionamento da antena coletora e na escolha da BTS doadora. Deve-se procurar uma configuração que minimize o potencial de interferência no canal reverso. Em regiões povoadas de muitas BTS nem sempre um posicionamento adequado é possível. Neste caso, deve ser utilizado um repetidor seletivo em canal.

4.2.2. Repetidores Seletivos em Banda (*Band Selective Repeaters*)

Estes repetidores só amplificam uma banda de operação, evitando assim transtornos com empresas concorrentes. Contudo, pelo fato de amplificarem toda a banda de operação da operadora que o utiliza, os cálculos e comentários apresentados na seção anterior (repetidores em banda larga) se aplicam para este tipo repetidor.

4.2.3. Repetidores Seletivos em Canal (*Channel Selective Repeaters*)

O repetidor seletivo em canal, em termos de degradação por interferência, opera de uma forma muito mais eficiente. Este equipamento só amplifica canais específicos da BTS doadora. Com isso, apenas as BTS co-canaís terão o desempenho afetado.

⁹ A redução da interferência depende do tipo de antena utilizada, em especial da forma dos lóbulos secundários desta.

As metodologias de cálculo são muito semelhantes às utilizadas no repetidor de banda larga. Contudo, pelo menor número de canais amplificados (apenas os co-canais), os níveis de interferência (e a degradação causada) serão bem mais amenos.

4.2.3.1. Interferência de *Downlink*:

Apenas as BTS co-canais terão seus sinais amplificados, estando então as outras BTS vizinhas “isoladas” da influência do repetidor. A figura ilustra a nova situação com repetidor de canal seletivo

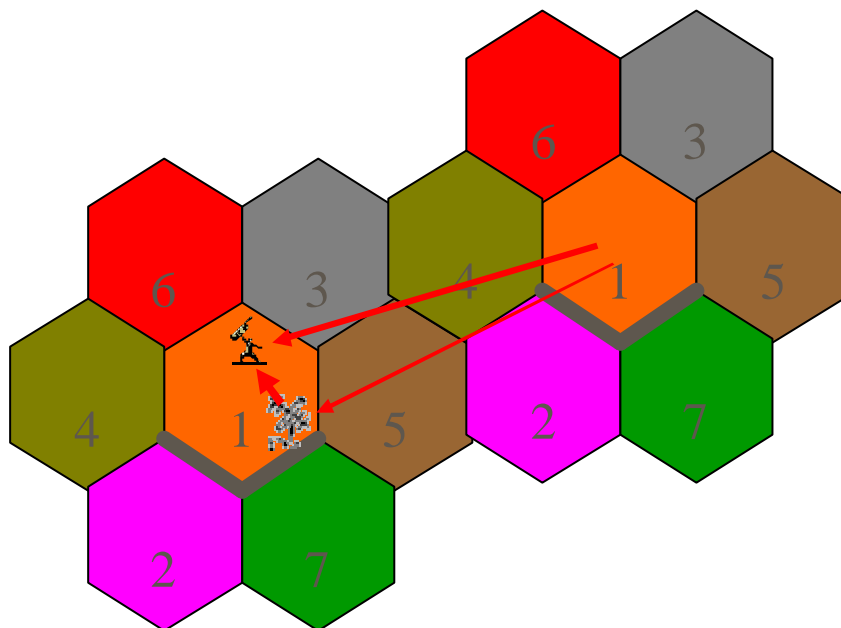


Figura 4.2.3.1-1 - Interferência Canal Direto Repetidores Seletivos em Canal

A BTS 1 possui um repetidor, o usuário da BTS 1 recebe interferência co-canal proveniente de duas fontes:

- Interferência direta proveniente da BTS co-canal;
- Sinal da BTS co-canal que passa pelo repetidor, é amplificado e novamente irradiado causando uma segunda fonte de interferência.

Os novos níveis de interferência no *downlink* também serão dados pela soma da interferência das BTS co-canais (I_{BTS}) com os sinais interferentes gerados pelo repetidor ($I_{Repetidor}$). A interferência das BTS é dada por:

$$I_{\text{BTS}} [\text{dBm}] = 10 \text{ Log} \left[\sum_{k=1}^M 10^{\frac{I_k [\text{dBm}]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.2.3.1-1}$$

O cálculo do nível de interferência proveniente da k-ésima BTS co-canal é realizado segundo a equação abaixo:

$$I_k [\text{dBm}] = P_{\text{TBTSk}} [\text{dBm}] + G_{\text{TxK}}(\theta, \varphi) - L_{\text{caboK}} - L_{\text{adicionalK}} - L_{\text{PropagaçãoKJ}} \quad \text{eq. 4.2.3.1-2}$$

onde:

I_k ? Interferência da k-ésima BTS co-canal

P_{TBTSk} ? Potência de transmissão da k-ésima BTS co-canal

G_{TxK} ? Ganho da k-ésima BTS co-canal na direção do ponto onde está sendo calculada a interferência.

L_{caboK} ? Perda no cabo da k-ésima BTS co-canal

$L_{\text{adicionalK}}$? Perdas adicionais da k-ésima BTS co-canal (*splitters, acopladores, etc...*)

$L_{\text{propagaçãoK}}$? Perda de propagação do sinal da k-ésima BTS co-canal até o ponto em questão.

Para o cálculo de I_{rep} deve-se calcular a potência com que cada BTS co-canal chega ao repetidor, a partir desse valor determina-se a potência de saída do sinal interferente do repetidor e o valor de interferência no ponto em questão.

O nível de sinal interferente que chega ao repetidor é calculado segundo a equação abaixo:

$$\text{RSSL}_K [\text{dBm}] = P_{\text{TBTSk}} [\text{dBm}] + G_{\text{TxK}}(\theta, \varphi) - L_{\text{K cabos}} - L_{\text{K adicional}} - L_{\text{K Pr opagação}} \quad \text{eq. 4.2.3.1-3}$$

Onde:

RSSL_K ? nível de sinal da k-ésima BTS co-canal na entrada da antena coletora do repetidor

P_{TBTSk} ? Potência de transmissão da k-ésima BTS co-canal

G_{TxK} ? Ganho da k-ésima BTS co-canal na direção da antena coletora do repetidor

$L_{\text{K cabos}}$? Perda nos cabos da k-ésima BTS co-canal

$L_{k\text{adicional}}$? Perdas adicionais da k-ésima BTS co-canal (*splitters, acopladores, etc...*)

$L_{k\text{propagação}}$? Perda de propagação do sinal da k-ésima BTS co-canal o repetidor

A eq. abaixo calcula para cada BTS co-canal o nível de saída do seu respectivo sinal do repetidor:

$$P_{Tk} [dBm] = RSSL_K + G_{coletora}(\theta_k, \phi_k) + G_{rep} - L_{cabos} - L_{adicional}$$

eq. 4.2.3.1-4

onde:

P_{Tk} ? potência de transmissão da k-ésima BTS co-canal na saída do repetidor

$RSSL_K$? nível de sinal da k-ésima BTS co-canal na entrada da antena coletora do repetidor

$G_{coletora}(\theta_k, \phi_k)$? Ganho da antena coletora na direção da k-ésima BTS co-canal

G_{rep} ? Ganho do repetidor

L_{cabos} ? Perda nos cabos do repetidor

$L_{adicional}$? Perdas adicionais no repetidor (*splitters, acopladores, etc...*)

O nível de I_{rep} é calculado então segundo as equações abaixo:

$$I_{repk} [dBm] = P_{Tk} [dBm] + G_{Txservidora}(\theta, \phi) - L_{Pr\text{opagação}} \quad \text{eq. 4.2.3.1-5}$$

$$I_{Rep} [dBm] = 10 \log \left[\sum_{k=1}^M 10^{\frac{I_{repk} [dBm]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.2.3.1-6}$$

onde:

I_{Repk} ? valor de interferência calculada para cada BTS co-canal que tem seu sinal amplificado pelo repetidor.

P_{Tk} ? potência de transmissão da k-ésima BTS co-canal na saída do repetidor

$G_{Txservidora}(\theta_k, \phi_k)$? ganho da antena servidora do repetidor na direção do ponto onde está sendo calculada a interferência.

$L_{propagação}$? perda de propagação do repetidor até o ponto de cálculo de interferência.

4.2.3.2. Interferência de *uplink*:

O repetidor seletivo em canal também apresenta melhor desempenho na degradação por interferência de *uplink* do que os demais repetidores.

Novamente, pelo fato de só haver recepção e amplificação de canais pertencentes a BTS doadora, o número de possíveis BTS vítimas cai significativamente reduzindo-se apenas às BTS co-canais à BTS doadora. A escolha do posicionamento da antena coletora, para ambientes povoados de muitas BTS, é de mais fácil realização.

O algoritmo de cálculo também é ao do repetidor de banda larga.

$$RSSL_{IEI}[\text{dBm}] = P_{Te}[\text{dBm}] + G_{Tx_E}(\theta, \varphi) - L_{\text{propagação}} \quad \text{eq. 4.2.3.2-1}$$

onde:

$RSSL_{IEI}$? nível de sinal interferente na entrada da antena BTS co-canal vítima.

P_{Te} ? potência de transmissão do repetidor no enlace reverso (*uplink*)

$G_{Tx_E}(\theta, \varphi)$? ganho de transmissão da antena coletora na direção da BTS co-canal vítima

$L_{\text{propagação}}$? perda de propagação do repetidor até a BTS co-canal vítima.

O cálculo do nível de potência interferente recebida é realizado segundo a equação abaixo:

$$I_{\text{vítima}}[\text{dBm}] = RSSL_{IEI}[\text{dBm}] + G_{RBTS}(\theta, \varphi) - L_{\text{cabos}} \quad \text{eq. 4.2.3.2-2}$$

onde:

$I_{\text{vítima}}$? nível de sinal interferente na BTS co-canal vítima

$RSSL_{IEI}$? nível de sinal interferente na entrada da antena BTS co-canal vítima.

P_{Te} ? potência de transmissão do repetidor no enlace reverso (*uplink*)

$G_{RBTS}(\theta, \varphi)$? ganho de recepção da BTS co-canal vítima na direção do repetidor.

4.2.4. Técnicas para redução da degradação por interferência co-canal

No caso de repetidores banda larga, devido às suas características de amplificação, a utilização em meios urbanos só é factível em locais específicos onde, onde o mesmo possa ser isolado.

Para repetidores seletivos em canal, as seguintes medidas podem ser tomadas para se atenuar ao máximo à interferência no sistema:

- Utilizar BTS doadoras baixas [REF 2], para que a antena coletora do repetidor passe a ser montada baixa e/ou com *downtilt*. Desta forma evita-se que a direção de ganho máximo esteja alinhada com alguma outra BTS co-canal, reduzindo-se assim a potencialidade de interferência de canal reverso;
- Utilizar atenuadores para que o nível de sinal no *uplink* não seja grande, evitando assim a saturação do receptor da BTS doadora e reduzindo os níveis de interferência gerados;
- A utilização de antenas coletoras diretivas com lóbulos laterais reduzidos (ex: antenas parabólicas com supressor de lóbulos laterais). A utilização deste tipo de antenas também reduz as interferências de canal reverso para repetidores da banda larga;
- Escolha adequada das antenas servidoras e seus posicionamentos pode reduzir o nível de interferência do canal direto (*downlink*), sem, contudo, comprometer a cobertura desejada. Em geral são utilizadas antenas painel.

4.3. Dissensibilização dos Receptores:

A inclusão do elemento repetidor no enlace BTS-móvel, traz também uma degradação nos limiares de recepção. Este fenômeno é conhecido como dissensibilização dos receptores [REF 2].

O aumento do limiar de recepção é resultado do aumento no ruído térmico do sistema. Esse aumento é causado pela inclusão do novo elemento ruidoso no enlace (repetidor). Essa alteração na configuração original do enlace resulta num limiar de recepção mais alto para uma mesma taxa de erro de *bits*.

A dissensibilização ocorre tanto no enlace direto (*downlink*) quanto no enlace reverso (*uplink*). Contudo, será visto que o maior efeito ocorre no enlace reverso (*uplink*).

Para efeito de contabilização do ruído (*noise budget*), enlaces celulares que utilizam repetidores podem ser analisados de forma análoga aos enlaces satélites (onde o repetidor é o próprio satélite).

Os enlaces entre BTS e repetidor e entre repetidor e terminal do usuário estão acoplados e a relação sinal-ruído em cada trecho influi na composição da relação sinal-ruído total. Esse acoplamento se deve pelo fato do repetidor não possuir um processamento (regeneração do sinal), fazendo com que os ruídos dos enlaces se acumulem.

A metodologia de cálculo permite a obtenção da relação sinal-ruído total, para o caso genérico de mais de um repetidor. A figura abaixo ilustra o acoplamento.

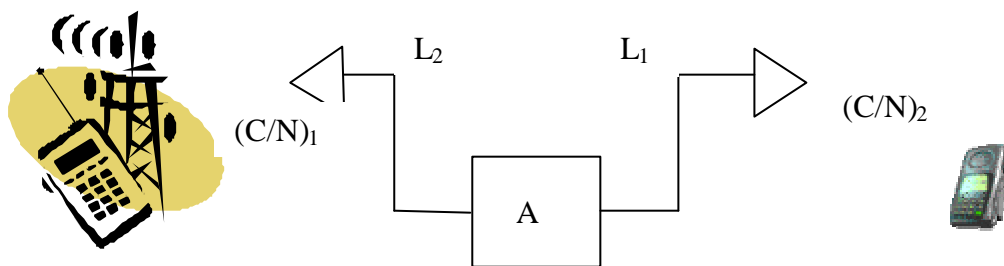


Figura 4.3-1 - Típico Enlace com Repetidor

Para o enlace BTS-terminal através do repetidor opere satisfatoriamente sua relação sinal-ruído $(C/N)_{\text{total}}$ deve estar acima de um determinado valor crítico denominado de $(C/N)_{\text{crítico}}$.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{Total}} \geq \left(\frac{C}{N}\right)_{\text{crítico}} \quad \text{eq. 4.3-1}$$

Deste modo, para que a eq. 4.3-1 seja atendida, o segundo trecho deverá possuir uma relação $(C/N)_2$ superior a crítica. Neste caso, o limiar de recepção no ponto de referência do elemento intermediário sofre um aumento, caracterizando a dissensibilização do receptor.

O valor dessa dissensibilização é a diferença entre a nova relação $(C/N)_2$ e a relação mínima requerida $(C/N)_{\text{crítica}}$ do receptor.

A qualidade do primeiro enlace influencia de forma importante o valor da dissensibilização. Isso fica evidente no cálculo da composição do ruído total:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T [\text{dB}] = -10 \log \left[10^{\frac{-(C/N_1) [\text{dB}]}{10}} + 10^{\frac{-(C/N_2) [\text{dB}]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.3-2}$$

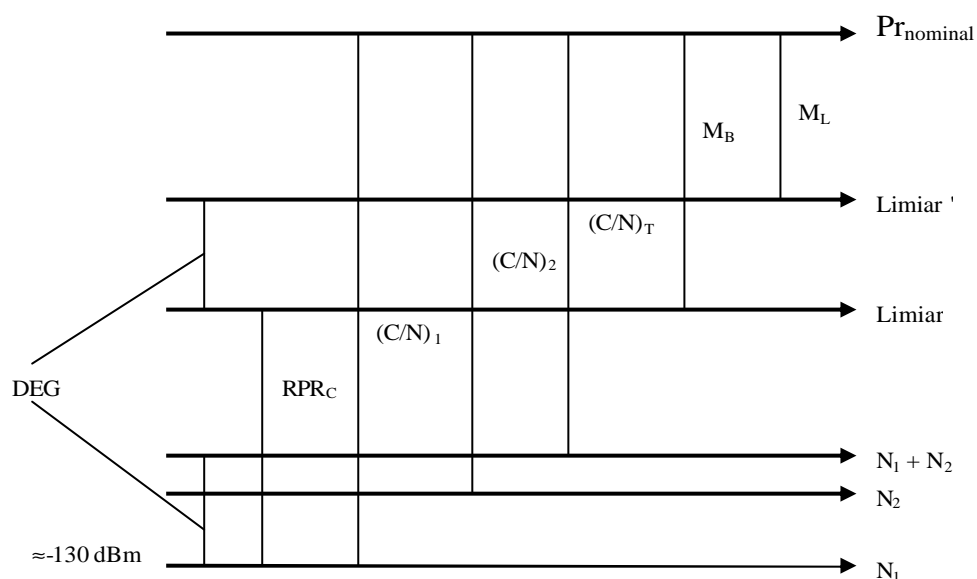


Figura 4.3-2 - Degradação do Limiar

Em geral, quando se utilizam repetidores ópticos, o enlace BTS-repetidor possui uma qualidade muito boa. Isso faz com que a dissensibilização seja pequena.

4.3.1. Cálculo da dissensibilização para Enlace Direto (*Downlink*):

Como o enlace BTS doadora repetidor é de natureza ponto-a-ponto, e como o fator determinante para a degradação é o primeiro enlace independentemente da posição do terminal, o receptor do terminal sempre experimentará a mesma dissensibilização.

A figura abaixo mostra a estrutura de *downlink*, e o ponto de referência para os cálculos.

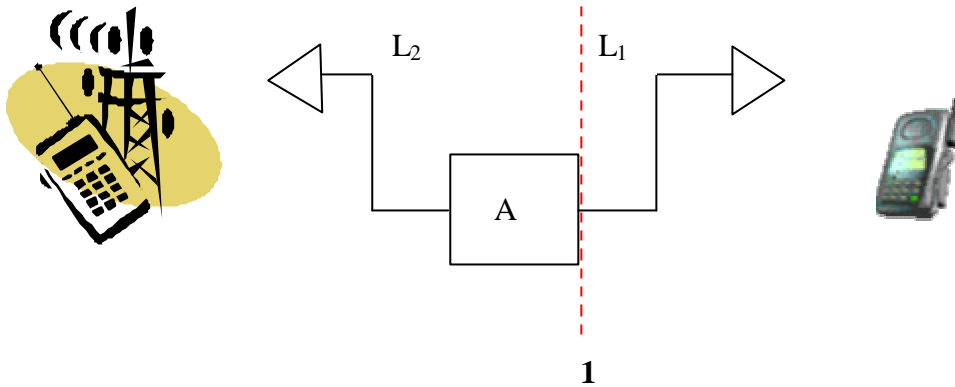


Figura 4.3.1-1 - Cálculo de (C/N)

Para o cálculo desta deve-se primeiramente calcular a relação $(C/N)_1$ do primeiro enlace. Esta relação sinal-ruído também leva em consideração a figura de ruído do repetidor (F_{rep}).

$$\left(\frac{C}{N}\right)_1 = \frac{S}{KT_0BF_{Rep}} \quad \text{eq. 4.3.1-1}$$

Baseado no conhecimento de $(C/N)_{crítico}$ e $(C/N)_1$ pode-se obter $(C/N)_2$ e conseqüentemente o valor da dissensibilização.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_2 [dB] = -10 \log \left[\left[10^{\left(\frac{C}{N}\right)_{crítico} [dB] / 10} - 10^{-A [dB] / 10} \right] \right] \quad \text{eq. 4.3.1-2}$$

A dissensibilização é calculada através da eq. abaixo:

$$D [dB] = \left(\frac{C}{N}\right)_2 [dB] - \left(\frac{C}{N}\right)_{crítica} [dB] \quad \text{eq. 4.3.1-3}$$

Será apresentado adiante um exemplo onde é evidenciado que o valor da dissensibilização para o enlace direto é na prática desprezível, dado que o primeiro enlace possui uma boa qualidade.

4.3.2. Cálculo da dissensibilização para o enlace reverso (*uplink*)

No caso de *uplink*, o cálculo torna-se mais complexo pelo fato do terminal possuir mobilidade. A mobilidade do terminal faz com que o primeiro enlace tenha qualidade variável, o que leva a uma variação na dissensibilização de acordo com a sua posição. Para fins de projeto uma estimativa da dissensibilização pode ser feita para o pior caso.

No pior caso, calcula-se a potência recebida mínima que deve chegar ao repetidor para que o sinal chegue na BTS com valor igual ao limiar de recepção. Essa potência mínima é a sensibilidade do repetidor. A equação abaixo mostra o cálculo desse valor:

$$RSL_{Min} = \text{Limiar} + L_{\text{propagação}} - [G_{R_{x_{coletora}}} - L_{Cabo1} + G_{Rep}] \quad \text{eq. 4.3.2-1}$$

Com base neste valor de potência calcula-se a relação $(C/N)_1$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_1 = \frac{RSL_{Min}}{KT_0BF_{Rep}} \quad \text{eq. 4.3.2-2}$$

Analogamente ao caso do enlace direto determina-se o valor de $(C/N)_2$ e sua dissensibilização.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_2 [dB] = -10 \log \left[10^{\left(\frac{C}{N}\right)_{crítico} [dB] / 10} - 10^{-A [dB] / 10} \right] \quad \text{eq. 4.3.2-3}$$

A dissensibilização é calculada através da equação abaixo:

$$D [dB] = \left(\frac{C}{N}\right)_2 [dB] - \left(\frac{C}{N}\right)_{crítica} [dB] \quad \text{eq. 4.3.2-4}$$

O valor do limiar de recepção deve ser então corrigido pela dissensibilização, que determinará um novo valor crítico de potência recebida no receptor.

Para efeito de demonstração da dissensibilização nos receptores, foi implementada, como exemplo ilustrativo, a tabela abaixo.

| | | | |
|---|------------|--|------------|
| Enlace BTS-repetidor | | Enlace Terminal-Repetidor | |
| Nível de sinal recebido RSL [dBm] | -51,09 | Nível de sinal recebido RSL [dBm] | -116,00 |
| Ganho da Antena Receptora [dBi] | 17,00 | Ganho da Antena Servidora [dBi] | 16,00 |
| Perdas cabo da Antena Receptora [dB] | 2,00 | Perdas cabo Antena Servidora [dB] | 2,00 |
| Figura de ruído do Repetidor [dB] | 8 | Figura de ruído do Repetidor [dB] | 8 |
| Requisitos de Desempenho: | | Requisitos de Desempenho: | |
| Limiar de recepção do terminal [dBm] | -104,00 | Limiar de recepção da Base [dBm] | -110,00 |
| figura de ruído do terminal [dB] | 6 | figura de ruído da Base [dB] | 3 |
| Cálculos Realizados: | | Cálculos Realizados: | |
| Banda Ocupada [kHz] | 200 | Banda Ocupada [kHz] | 200 |
| Cálculo de Downlink: | | Cálculo de Uplink: | |
| Potência de Ruído Térmico e Relação sinal ruído: | | Potência Ruído Térmico e Relação sinal ruído: | |
| Enlace: BTS - Rep: | | Enlace: Terminal-Repetidor: | |
| Potência recebida [dBm] | -36,09 | Potência recebida [dBm] | -102 |
| Ruído [dBm] | -112,99 | Ruído [dBm] | -112,99 |
| Relação sinal ruído [dB] | 76,90 | Relação sinal ruído [dB] | 10,99 |
| Requisitos de Desempenho ERB-Terminal: | | Requisitos de Desempenho Terminal-ERB: | |
| Ruído [dBm] | -114,99 | Ruído [dBm] | -117,99 |
| Relação sinal ruído limiar [dB] | 10,99 | Relação sinal ruído limiar [dB] | 7,99 |
| Relação sinal ruído mínima Repetidor-Terminal (dB) | 10,99 | Relação sinal ruído mínima Repetidor-ERB (dB) | 11,01 |
| Degradação do limiar (dB) | 0,00 | Degradação do limiar (dB) | 3,02 |
| Novo Limiar do Terminal [dBm] | -104,00 | Novo Limiar da BTS [dBm] | -106,98 |

Tabela 4.3.2-1 – 1 Planilha com Cálculos de Dissensibilização

4.4. Efeitos de multipercurso

Todo repetidor adiciona um atraso no sinal, em geral este atraso é de 0,5µs para repetidores de banda larga e de 5-7µs [REF 2] para repetidores de canal seletivo. Dependendo da situação, o terminal móvel pode receber o sinal proveniente do repetidor e da BTS doadora, os sinais chegam defasados podendo comprometer a qualidade do sinal, especialmente pelo fato das intensidades relativas em alguns casos serem muito próximas. O problema torna-se ainda mais grave caso o defasamento entre os sinais seja maior que a duração de um *time slot* GSM [REF 1], neste caso o sinal da BTS será tratado com uma interferência ao sinal proveniente do repetidor.

Para evitar problemas de desempenho deve-se evitar que haja sinais de multipercurso desta natureza, defasados por mais de 16µs [REF 2,3] e com menos de 9 dB de diferença de potência recebida [REF 2]. Em geral quando repetidor cobre uma área sem nenhuma intercessão com a BTS, o problema de multipercurso é desprezível.

4.5. Cálculo de enlaces com repetidores

Nas sessões anteriores, foram vistos em detalhes, todos os aspectos que devem ser analisados com a inclusão do repetidor no enlace rádio. Veremos agora como cada elemento de cálculo descrito se encaixa no dimensionamento dos enlaces (*link budget*). Para o cálculo da cobertura radioelétrica apenas a dissensibilização, isolamento e tipo de amplificação são relevantes, ficando a análise de interferência separada do *link budget*. Algumas das equações desenvolvidas serão repetidas no texto abaixo para facilitar o entendimento do procedimento passo-a-passo.

4.5.1. Cálculos Iniciais

Como visto anteriormente, para repetidor de mesma frequência a isolamento deve ser calculada utilizando-se a equação abaixo:

$$I(\text{dB}) = G_{T21}(\theta, \varphi) - L_0 + G_{R12}(\theta, \varphi) - L_{\text{Blindagem}}$$

eq. 4.5.1-1

O ganho máximo permitido será de:

$$G_{\text{Max Rep}} = I - 15$$

eq. 4.5.1-2

No caso de amplificadores de banda larga, devido ao compartilhamento do ganho, o ganho máximo por canal é dado pelas seguintes equações:

$$G_{\text{maxRep}} = I - 15 - 10 \log(n)$$

eq. 4.5.1-3

ou

$$P[\text{dBm}] = \frac{1}{2} \left[2I_3 - \left(\frac{C}{1} \right) - 10 \log \left(N^2 - 3 \frac{N}{2} \right) \right] - 15$$

eq. 4.5.1-4

Com a isolamento e o ganho máximo por canal calculados, pode-se efetuar o balanceamento do enlace.

4.5.2. Cálculo do enlace direto

Para a determinação da potência de transmissão do repetidor é necessário conhecer a potência recebida pelo repetidor. Esta potência recebida (RSSL) na antena coletora do servidor é dada por:

$$RSSL_{Rep} [dBm] = P_{TBTS} [dBm] - L_{cabo} + G_{TBTS}(\theta, \varphi) - L_{propagação}$$

eq. 4.5.2-1

onde:

$P_{TBTS} [dBm]$? Potência de transmissão da BTS doadora na saída do rádio

L_{cabo} ? Perda no cabo da BTS doadora

$G_{TBTS}(\theta, \varphi)$? Ganho de transmissão da antena da BTS doadora na direção da antena coletora

$L_{propagação}$? Perda de propagação entre a BTS doadora e o repetidor.

A EIRP é calculada então com base no nível de sinal recebido usando a seguinte equação:

$$EIRP [dBm] = RSSL_{Rep} [dBm] + G_{Coletora}(\theta, \varphi) - L_{cabo} + A_{AMP} - L_{Cabo_i} - L_{Adicional} + G_{servidora}$$

eq. 4.5.2-2

onde:

$EIRP [dBm]$? Potência Efetivamente Irradiada do repetidor

$G_{coletora}(\theta, \varphi)$? Ganho da antena coletora na direção da BTS doadora. Em geral está montada de forma a possuir seu ganho máximo nessa direção.

L_{cabo} ? Perda no cabo da antena coletora até o repetidor

A_{amp} ? Ganho do repetidor

L_{cabo} ? Perda no cabo do repetidor à antena servidora

$G_{servidora}$? Ganho da Antena servidora.

Tendo sido calculado o nível de potência transmitido pelo repetidor, calcula-se a degradação do limiar do terminal móvel. Para isso deverá ser calculada a relação sinal ruído do enlace BTS-Repetidor.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_1 [dB] = P_R [dBm] - 10 \log(KT_0 B) - F_{Rep} [dB] \quad \text{eq. 4.5.2-3}$$

Com base nesse valor calcula-se então a relação $(C/N)_2$ mínima para que o enlace Repetidor-Terminal opere. A degradação do limiar é a diferença entre a relação $(C/N)_{crítica}$ especificada para o terminal e $(C/N)_2$ mínimo do enlace Repetidor-Terminal.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_2 [dB] = -10 \log \left[10^{\frac{\left(\frac{C}{N}\right)_{crítica} [dB]}{10}} - 10^{\frac{-A [dB]}{10}} \right] \quad \text{eq. 4.5.2-4}$$

$$D = \left(\frac{C}{N}\right)_2 - \left(\frac{C}{N}\right)_{crítica} \quad \text{eq. 4.5.2-5}$$

Onde:

$A [dB]$? é a relação C/N calculada para o enlace BTS-Repetidor

$(C/N)_{crítica}$? É a relação sinal ruído crítica de operação do terminal móvel.

O limiar efetivo do terminal móvel é dado por:

$$\text{Limiar}_{eff} = \text{Limiar}_{terminal} + \text{Desensibilização} \quad \text{eq. 4.5.2-6}$$

Dado que a qualidade do enlace BTS-Repetidor em geral é muito boa, a degradação do limiar em termos de dimensionamento é desprezível para o *downlink*.

Com o valor do limiar efetivo do terminal e da potência de transmissão do repetidor, pode-se também calcular qual a perda máxima permitida no enlace direto entre o repetidor e o terminal:

$$L_{max\ down} = EIRP - (\text{Limiar}_{efetivo} - G_{Tx\ móvel}) \quad \text{eq. 4.5.2-7}$$

onde:

$L_{maxdown}$? Perda máxima do enlace direto

EIRP ? Potência efetivamente radiada pelo repetidor

$G_{Txmóvel}$? Ganho da antena do móvel

4.5.3. Cálculo do enlace reverso (*uplink*)

O enlace reverso é calculado com base no limiar de recepção da BTS. O valor mínimo de nível de sinal que deve chegar ao repetidor é dado por:

$$P_{R_{MIN}} = (Limiar_{BTS} + Margem) - G_{BTS}(q, j) + L_{Cabo_{BTS}} + L_{prop} - G_{Coletora}(q, j) + L_{Cabo} - G_{Amp}$$

eq. 4.5.3-1

onde:

$P_{R_{rep}}$? Potência mínima recebida pelo repetidor, para que a BTS doadora receba níveis de sinais dentro do seu limiar.

$Limiar_{BTS}$? Limiar da BTS doadora

Margem? Margens de desvanecimento

$G_{BTS}(\theta, \varphi)$? Ganho da Antena da BTS doadora na direção do repetidor

$L_{cabo_{BTS}}$? Perda no cabo da BTS doadora

L_{prop} ? Perda de propagação do enlace BTS-Repetidor, em geral este enlace opera em visada direta

$G_{coletora}$? Ganho da antena coletora do repetidor, em geral esta está alinhada com a BTS doadora oferecendo seu ganho máximo.

L_{cabo} ? Perda no cabo entre a antena coletora e o repetidor.

G_{amp} ? Ganho do Amplificador do enlace reverso (*uplink*)

Para determinar o valor mínimo de sinal no repetidor deve-se calcular primeiramente a degradação do limiar. Esta degradação é obtida a partir da relação $(C/N)_1$ do enlace terminal-repetidor e do valor crítico $(C/N)_{crítico}$ da BTS. O cálculo da relação $(C/N)_1$ e da dissensibilização foi descrito em detalhes no item 4.3.

Com a degradação (D) calculada, determina-se então a potência mínima efetiva que deve chegar ao repetidor:

$$P_{R_{MinEff}} = P_{R_{MIN}} + D$$

eq. 4.5.3-2

onde:

$P_{R_{repEff}}$? Potência mínima efetiva recebida pelo repetidor

$P_{R_{rep}}$? Potência mínima do repetidor

D? Degradação do limiar

Conhecendo-se o valor da potência mínima efetiva, pode-se determinar RSL mínimo na entrada do repetidor para se garantir o desempenho do sistema:

$$RSL_{\min} = P_{R_{\text{Míneff}}} - G_{\text{servidora}} + L_{\text{cabo}} \quad \text{eq. 4.5.3-3}$$

Onde:

RSL_{\min} ? Nível mínimo de sinal na entrada da antena

$P_{R_{\text{effRep}}}$? Potência mínima recebida pelo repetidor

$G_{\text{servidora}}$? Ganho da antena servidora do repetidor

L_{cabo} ? Perda do cabo entre antena servidora e o repetidor.

Com este valor pode-se também calcular qual a perda máxima permitida no enlace reverso entre o repetidor e o terminal:

$$L_{\max up} = P_{t_{\text{móvel}}} + G_{T_{x\text{móvel}}} - RSL_{\min} \quad \text{eq. 4.5.3-4}$$

onde:

$L_{\max up}$? Perda máxima do enlace reverso

$P_{t_{\text{móvel}}}$? Potência transmitida pelo móvel

$G_{T_{x\text{móvel}}}$? Ganho da antena do móvel

RSL_{\min} ? Nível de sinal mínimo na entrada da antena servidora.

Pode-se ainda verificar a existência de balanceamento nos enlaces ($L_{\max down} = L_{\max up}$). No caso de desbalanceamento devem-se ajustar os ganhos do repetidor.

4.6. Caracterização das Perdas de Propagação

O ambiente no qual se dá à propagação do sinal celular apresenta topografia variada, vegetação e construções distribuídas de forma aleatória. Embora o cálculo da perda de propagação possa ser realizado, ainda que com precisão limitada, utilizando técnicas como a do traçado de raios ou soluções numéricas para aproximações da equação de onda (como a equação parabólica), os métodos mais utilizados para cálculo de cobertura são empíricos ou semi-empíricos. Os principais métodos deste tipo são apresentados a seguir.

4.6.1. Modelo de Okumura

Este modelo, um dos mais citados na literatura técnica, foi desenvolvido com base em um grande número de medidas realizadas na região de Tóquio, em frequências na faixa de UHF e na faixa de SHF até 1920 MHz [REF 12]. O método de cálculo baseia-se na introdução de correções, obtidas graficamente, sobre o valor da atenuação de espaço livre. A expressão básica do método é:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{bf}} + A(f, d) - G_{\text{AREA}}(f, \text{morf}) - G_{\text{T}}(h_{\text{Te}}, d) - G_{\text{R}}(h_{\text{R}}, d)$$

eq. 4.6.1-1

$$\text{para } 1 \leq d \leq 100 \text{ km} \quad 100 < f < 3000 \text{ MHz}$$

O termo $A(f, d)$ corresponde a uma atenuação adicional média para áreas urbanas, com altura efetiva da antena transmissora de 200 m e altura da antena receptora de 3m, função da frequência (limitada entre 100 e 3.000 MHz) e do comprimento do enlace (limitado entre 1 e 100 Km), dada pela figura 4.6.1-1a. O ganho $G_{\text{AREA}}(f, \text{morf})$ é uma correção também função da frequência para áreas de morfologia suburbana, quase-aberta e aberta (rural) e é dado pela figura 4.6.1-2b.

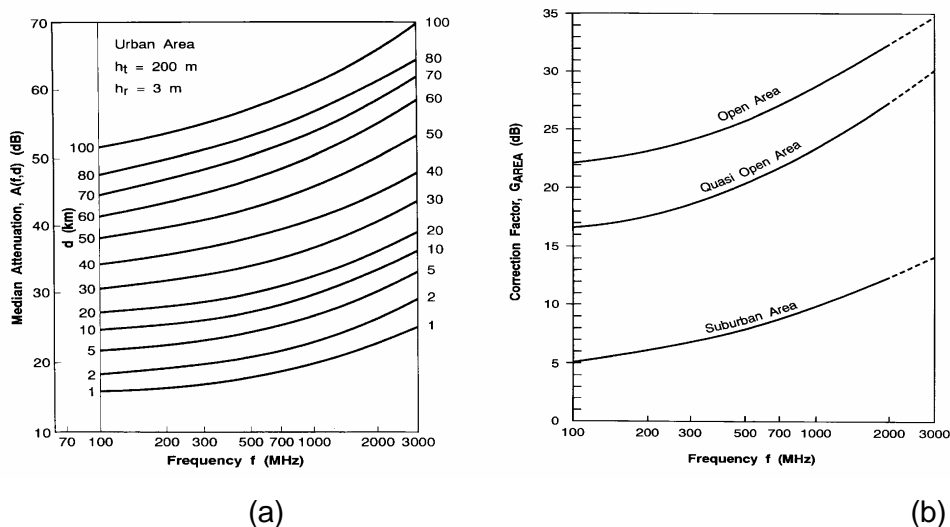


Figura 4.6.1-3 - Fatores do método de Okumura: (a) atenuação adicional média para área urbana; (b) correções para outras morfologias.

Os fatores $G_{\text{T}}(h_{\text{Te}}, d)$ e $G_{\text{R}}(h_{\text{R}}, d)$ são fatores de correção para antenas com alturas diferentes das de referência, funções também da distância e obtidos da figura 4.6.1-4, que mostra também como determinar a altura efetiva da antena de transmissão.

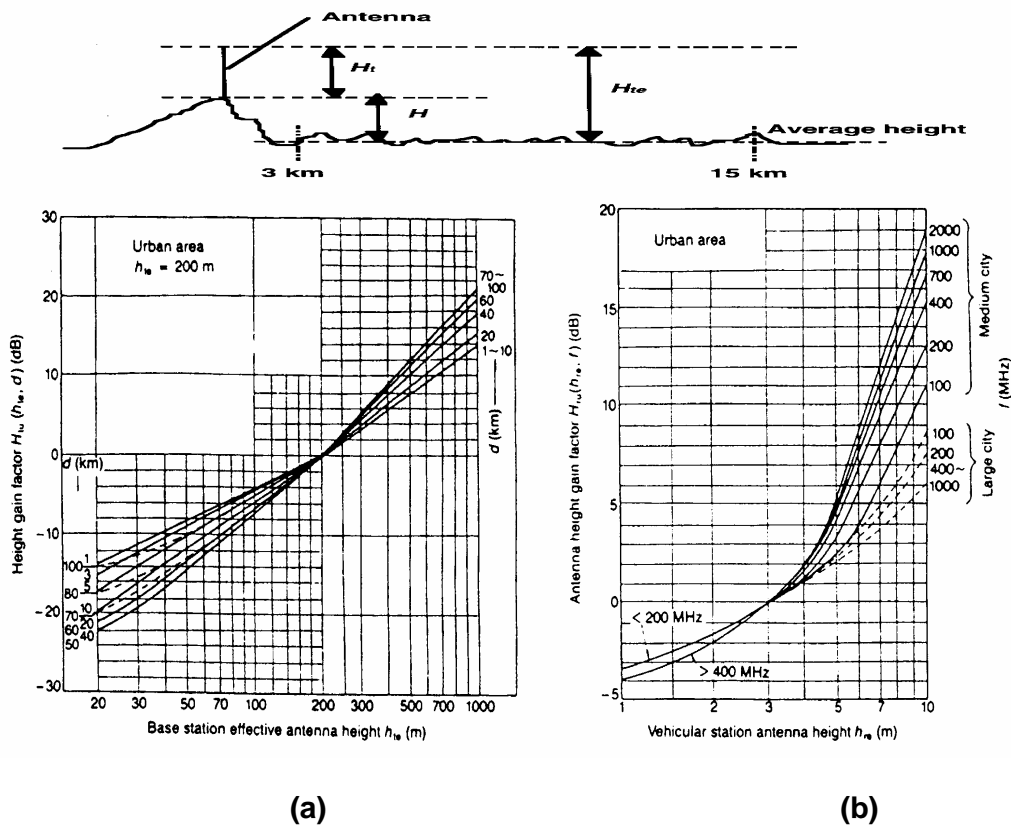


Figura 4.6.1-5 - Fatores de correção do método de Okumura: (a) para a altura da antena transmissora; (b) para a altura da antena receptora.

4.6.2. Modelo de Hata (Okumura-Hata)

O modelo de Hata é uma formulação empírica do modelo gráfico de Okumura. A atenuação em áreas urbanas pode ser calculada por [REF 12]:

$$L_{\text{urbana}} = 69.55 + 26.16 \cdot \log f - 13.82 \cdot \log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \cdot \log h_t) \cdot \log d$$

eq. 4.6.2-1

onde: L = atenuação em dB

f = frequência em MHz – $150 \leq f \leq 1500$ MHz

d = distância em km – $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$

h_t = altura do transmissor em metros – $30 \text{ m} \leq h_t \leq 200 \text{ m}$

$a(h_r)$ = fator de correção em dB

h_r = altura do receptor em metros – $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$

- fator de correção para cidades pequenas e médias:

$$a(h_r) = (1.1 \cdot \log f - 0.7)h_r - (1.56 \cdot \log f - 0.8) \quad \text{eq. 4.6.2-2}$$

- fator de correção para cidades grandes

$$a(h_r) = 8.29(\log 1.54 \cdot h_r)^2 - 1.1 \quad \text{para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad \text{eq. 4.6.2-3}$$

$$a(h_r) = 3.2(\log 11.75 \cdot h_r)^2 - 4.97 \quad \text{para } f \geq 300 \text{ MHz} \quad \text{eq. 4.6.2-4}$$

Para obter a perda de propagação em áreas suburbanas e rurais modifica-se a equação para área urbana das seguintes formas:

$$L_{\text{suburbana}} = L_{\text{urbana}} - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad \text{eq. 4.6.2-5}$$

$$L_{\text{rural}} = L_{\text{urbana}} - 4.78(\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad \text{eq. 4.6.2-6}$$

4.6.3. Modelo estendido de Hata para PCS (COST-231):

Este modelo é a extensão do modelo de Hata para a faixa de PCS (*Personal Communication System*), desenvolvido pelo programa COST, de colaboração da comunidade europeia nas áreas de ciência e tecnologia.

A atenuação pode ser calculada por [REF 12]:

$$L = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log d + C_M$$

eq. 4.6.3-1

onde: L = atenuação em dB

f = frequência em MHz – $1500 \leq f \leq 2000$ MHz

d = distância em km – $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$

h_t = altura do transmissor em metros – $30 \text{ m} \leq h_t \leq 200 \text{ m}$

$a(h_r)$ = fator de correção em dB

C_M = fator de correção

h_r = altura do receptor em metros – $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$

- fator de correção para cidades pequenas e medias:

$$a(h_r) = (1.1 \cdot \log f - 0.7)h_r - (1.56 \cdot \log f - 0.8) \quad \text{eq. 4.6.3-2}$$

- fator de correção para cidades grandes:

$$a(h_r) = 8.29(\log 1.54 \cdot h_r)^2 - 1.1 \quad \text{para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad \text{eq. 4.6.3-3}$$

$$a(h_r) = 3.2(\log 11.75 \cdot h_r)^2 - 4.97 \quad \text{para } f \geq 300 \text{ MHz} \quad \text{eq. 4.6.3-4}$$

$C_M = 0 \text{ dB}$ para cidades de tamanho médio e áreas suburbanas

$C_M = 3 \text{ dB}$ para centros metropolitanos

4.6.4. Modelo de Walfish Ikegami (COST 231)

Este modelo estatístico é aplicável tanto em células grandes quanto em microcélulas, em terrenos planos e urbanos.

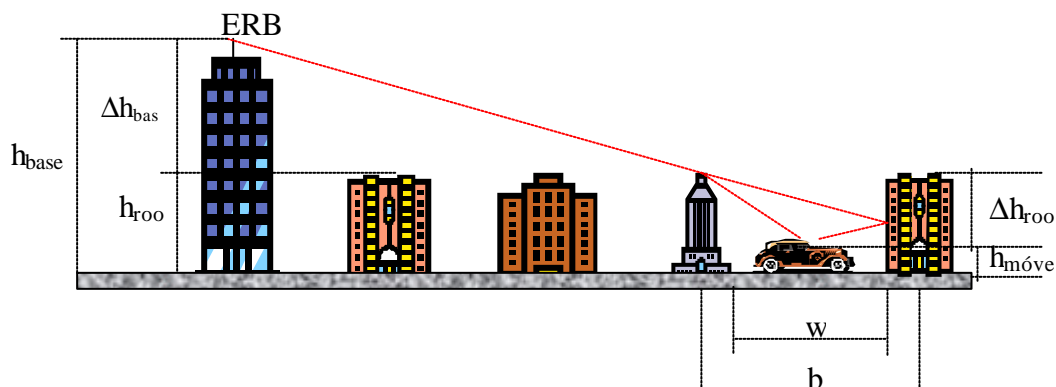


Figura 4.6.4-1 - Parâmetros do Modelo Walfish-Ikegami

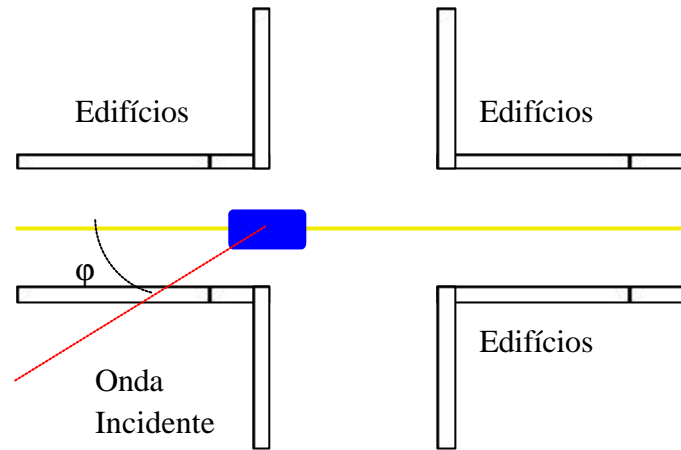


Figura 4.6.4-2- Parâmetros do Modelo Walfish-Ikegami: Direção da Onda Incidente

onde: h_{roof} = altura dos edifícios, em metros

h_{movel} = altura da antena do móvel, em metros;

w = largura das ruas, em metros;

b = separação entre os edifícios, em metros;

φ = orientação da estrada com relação ao enlace, em graus.

Se houver linha de visada direta entre o móvel e a radio base o modelo de perda se resume à eq. 4.6.4-1. Caso contrário, a perda deve ser calculada pelas equações eq. 4.6.4-2 a 4.6.4-3.

$$L_{\text{LOS}} = 42.6 + 26\log d + 20\log f \quad \text{eq. 4.6.4-4}$$

Onde: f = frequência, em MHz, $800 \text{ MHz} \leq f \leq 2000 \text{ MHz}$;

d = distância da ERB ao móvel, em km, $d \geq 20 \text{ m}$.

$$L_{\text{NLOS}} = L_0 + L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} \quad \text{para } L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} \geq 0 \quad \text{eq. 4.6.4-5}$$

$$L_{\text{NLOS}} = L_0 \quad \text{para } L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}} < 0 \quad \text{eq. 4.6.4-6}$$

Onde: L_0 = perda de propagação em espaço livre, em dB;

L_{rts} = perda devido a difração e espalhamento, em dB

L_{msd} = perda devido a múltiplas difrações, em dB.

$$L_0 = 32.4 + 20\log d + 20\log f + L_{\text{ori}} \quad \text{eq. 4.6.4-7}$$

$$L_{rts} = -16 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_{move1} \quad \text{eq. 4.6.4-8}$$

$$L_{rts} = 0 \quad \text{para } L_{rts} < 0 \quad \text{eq. 4.6.4-9}$$

$$L_{ori} = -10 + 0.35\varphi \quad \text{para } 0 \leq \varphi < 35^\circ \quad \text{eq. 4.6.4-10}$$

$$L_{ori} = 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ) \quad \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \quad \text{eq. 4.6.4-11}$$

$$L_{ori} = 4 - 0.114(\varphi - 55^\circ) \quad \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad \text{eq. 4.6.4-12}$$

$$\Delta h_{move1} = h_{roof} - h_{move1} \quad \text{eq. 4.6.4-13}$$

$$\Delta h_{base} = h_{base} - h_{roof} \quad \text{eq. 4.6.4-14}$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad \text{eq. 4.6.4-15}$$

$$L_{msd} = 0 \quad \text{para } L_{msd} < 0 \quad \text{eq. 4.6.4-16}$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_{base}) \quad \text{para } h_{base} > h_{roof} \quad \text{eq. 4.6.4-17}$$

$$L_{bsh} = 0 \quad \text{para } h_{base} \leq h_{roof} \quad \text{eq. 4.6.4-18}$$

$$k_a = 54 \quad \text{para } h_{base} > h_{roof} \quad \text{eq. 4.6.4-19}$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_{base} \quad \text{para } d \geq 0.5 \text{ km e } h_{base} \leq h_{roof} \quad \text{eq 4.6.4-20}$$

$$k_a = 54 - 1.6 \Delta h_{base} \cdot d \quad \text{para } d < 0.5 \text{ km e } h_{base} \leq h_{roof} \quad \text{eq 4.6.4-21}$$

$$k_d = 18 \quad \text{para } h_{base} > h_{roof} \quad \text{eq. 4.6.4-22}$$

$$k_d = 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_{\text{base}}}{h_{\text{roof}}} \quad \text{para} \quad h_{\text{base}} \leq h_{\text{roof}} \quad \text{eq. 4.6.4-23}$$

Para cidades de tamanho médio e centros suburbanos com densidade moderada de árvores:

$$k_f = -4 + 0.7 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{eq. 4.6.4-24}$$

Para centros metropolitanos

$$k_f = -4 + 1.5 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \text{eq. 4.6.4-25}$$

onde: k_a representa o aumento da perda de propagação devido a antenas das estações radio base localizadas abaixo do topo dos edifícios adjacentes

k_d e k_f controlam a dependência da múltipla difração com a frequência.

Restrições do modelo:

$$800 \text{ MHz} \leq f \leq 2 \text{ GHz}$$

$$4 \text{ m} \leq h_{\text{base}} \leq 50 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} \leq h_{\text{movel}} \leq 3 \text{ m}$$

$$20 \text{ m} \leq d \leq 5 \text{ km}$$

4.6.5. Modelos ajustados localmente

A precisão do modelo de propagação utilizado no processo de planejamento celular é fundamental para a execução de um projeto eficiente, tanto do ponto de vista da qualidade do sistema como sob o aspecto de custos de implantação. Na prática é muito comum selecionar um modelo de cálculo para o anteprojeto mas, antes da execução do projeto definitivo, realizar medidas de campo em um grande número de pontos da região a ser coberta e ajustar os parâmetros (coeficientes) do método de cálculo de modo a minimizar o erro de previsão

4.6.6. Cálculo da Margem de Cobertura (CAP)

O raio de uma célula num sistema celular é determinado considerando requisitos de qualidade, características de equipamento e a perda mediana de

propagação. A percentagem da área coberta no interior deste raio depende, por sua vez, do comportamento estatístico das variações de larga e pequena escala da perda de propagação em torno deste valor mediano.

Considerando um sistema com limiar $SL(dB)$, margem para desvanecimentos $M_f(dB)$, uma célula de raio R e a perda de propagação dada por $L(dB)=L_0+10 \gamma \log(r)$ a probabilidade de cobertura de área é dada por [REF 13]:

$$p_{CA} = \frac{2}{R^2} \int_0^R \int_{S_L}^{\infty} p(S) r dS dr \quad \text{eq. 4.6.6-1}$$

onde $p(S)$ é a função densidade de probabilidade da potência do sinal recebido $S(dB)$.

Para um sinal com distribuição log-normal de valor mediano \bar{S} e variância sS , ou seja

$$p(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S-\bar{S}}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad \text{eq. 4.6.6-2}$$

tem-se [REF 13]:

$$p_{CA} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}(a) + \exp\left[\frac{2ab+1}{b^2}\right] \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{ab+1}{b}\right) \right] \right\} \quad \text{eq. 4.6.6-3}$$

onde:

$$a = \frac{M_f}{\sqrt{2}\sigma_s}; \quad b = \frac{10\gamma \log e}{\sqrt{2}\sigma_s} \quad \text{eq. 4.6.6-4}$$

A tabela abaixo ilustra alguns valores de margem para probabilidade de cobertura de 90% em para diversos ambientes de propagação:

CAP=90%

| Desvio Padrão S (dB) | Margem M_f | | | | | | |
|------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | n=2.5 | n=2.7 | n=2.9 | n=3.1 | n=3.3 | n=3.5 | n=3.7 |
| 6.0 | 4.2 | 4.0 | 3.8 | 3.7 | 3.5 | 3.3 | 3.2 |
| 6.5 | 4.8 | 4.6 | 4.4 | 4.2 | 4.0 | 3.9 | 3.7 |
| 7.0 | 5.3 | 5.1 | 4.9 | 4.7 | 4.6 | 4.4 | 4.2 |
| 7.5 | 5.9 | 5.7 | 5.5 | 5.3 | 5.1 | 4.9 | 4.7 |
| 8.0 | 6.5 | 6.2 | 6.0 | 5.8 | 5.6 | 5.5 | 5.3 |
| 8.5 | 7.0 | 6.8 | 6.6 | 6.4 | 6.2 | 6.0 | 5.8 |
| 9.0 | 7.6 | 7.4 | 7.2 | 7.0 | 6.7 | 6.6 | 6.4 |
| 9.5 | 8.2 | 8.0 | 7.7 | 7.5 | 7.3 | 7.1 | 6.9 |
| 10.0 | 8.8 | 8.6 | 8.3 | 8.1 | 7.9 | 7.7 | 7.5 |
| 10.5 | 9.4 | 9.1 | 8.9 | 8.7 | 8.5 | 8.2 | 8.0 |
| 11.0 | 10.0 | 9.7 | 9.5 | 9.3 | 9.0 | 8.8 | 8.6 |
| 11.5 | 10.6 | 10.3 | 10.1 | 9.8 | 9.6 | 9.4 | 9.2 |
| 12.0 | 11.2 | 10.9 | 10.7 | 10.4 | 10.2 | 10.0 | 9.7 |

Tabela 4.6.6-1 - Margens de Cobertura para CAP 90%

4.7. Cálculo do Raio de Cobertura

Com o balanceamento dos enlaces efetuado, consideradas margens para a qualidade de cobertura desejada (CAP desejada), pode ser feito um cálculo do raio de cobertura da célula. Este raio será uma estimativa da extensão de área que a BTS ou repetidor irá cobrir, dentro dos limites de qualidade especificados.

Em geral os modelos de perda por propagação podem ser expressos da seguinte forma:

$$L = L_0 + 10\gamma \text{Log}(d) \quad \text{eq. 4.7-1}$$

onde:

L_0 ? termo que contém os elementos de perda independentes da distância

γ ? coeficiente de perda com a distância. Cada modelo de propagação tem sua metodologia de cálculo deste parâmetro.

O raio de cobertura é dado por:

$$R = 10^{\left(\frac{L_{\text{BAL}} - \beta - L_0}{10\gamma} \right)} \quad \text{eq. 4.7-2}$$

onde:

β ? é a perda de obstrução corpo humano (≈ 4 dB).

Capítulo 5. Uso de Repetidores no Planejamento GSM

5.1. Considerações Iniciais:

Nos primeiros sistemas celulares, implantados antes da privatização, o projeto era ditado predominantemente pela cobertura radioelétrica. As técnicas para avaliação de áreas potenciais para a implantação de serviços e estudo de perfis de usuários estavam apenas em estágios embrionários e a área de *marketing* possuía apenas um papel marginal no amplo processo de projeto dos sistemas.

A realidade do mercado mudou, com as operadoras celulares cada vez mais buscando identificar perfis de potenciais usuários, fazendo com que o foco do planejamento das redes das empresas mudasse. Num mercado privatizado, com um crescente aumento de competitividade, este foco passa a ser a qualidade do serviço e a redução de custos [REF 9].

Com esta alteração na postura das operadoras, a área de *marketing* ganhou espaço no planejamento das implantações, realizando o planejamento estratégico na identificação detalhada das áreas de interesse de cobertura (nos chamados vetores de cobertura). Aliada à identificação do vetor de cobertura, está uma correta caracterização do perfil de usuários da região, que levará a uma estimativa inicial do tráfego demandado.

Por outro lado estão sendo implantados serviços em faixas de frequência de operação mais elevadas e os critérios de qualidade de cobertura estão cada vez mais rigorosos. No intuito de atender as exigências deste novo mercado mais competitivo e com usuários cada vez mais exigentes, o uso de repetidores para prover a melhoria de qualidade da cobertura tem-se mostrado uma boa opção.

Serão descritas abaixo as etapas de planejamento do sistema celular com uso de repetidores. Em seguida será apresentado um estudo de caso de implantação de um sistema para o Serviço Móvel Pessoal (SMP) com a tecnologia GSM em 1800 MHz.

5.2. Uso de Repetidores

As características de sistemas empregando repetidores tornam sua utilização adequada em dois tipos de situação:

- Projetos para redução de áreas de sombra ? Neste tipo de projeto, a região já possui uma rede operacional, previamente instalada, que provê cobertura na maior parte da área. Dependendo das características da região (relevo + morfologia) algumas áreas de sombra estarão presentes. Para a solução deste problema podem ser utilizados repetidores. Nos ambientes urbanos além da supressão de áreas de sombra, os repetidores são muito utilizados para prover cobertura em ambientes interiores (*indoor*);
- Projetos para ampliação de cobertura ? Este tipo de projeto ocorre em geral em ambientes suburbanos ou rurais, que ainda não possuem uma cobertura radioelétrica. Estes locais periféricos têm como característica uma baixa demanda de tráfego e pequenas edificações. A cobertura de largas áreas com estas características, sob o ponto de vista de receita, não é interessante para as operadoras, pois o investimento demandado para a cobertura possui um retorno demorado devido aos baixos tráfegos cursados nestas BTS. Estes ambientes são em geral rodovias, cidades pequenas, vilarejos e comunidades rurais.

A figura [REF 2] abaixo mostra um organograma que expressa os principais pontos a serem analisados na implantação de soluções com repetidores.

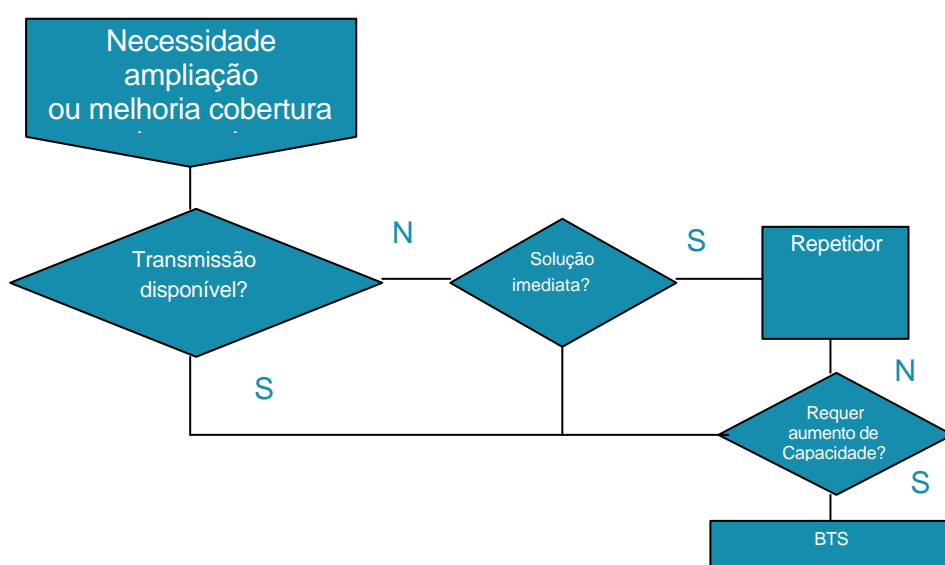


Figura 5.2-1 - Decisão sobre o uso de repetidores

A figura abaixo mostra um exemplo da utilização de repetidores em ambientes externos (*outdoor*).

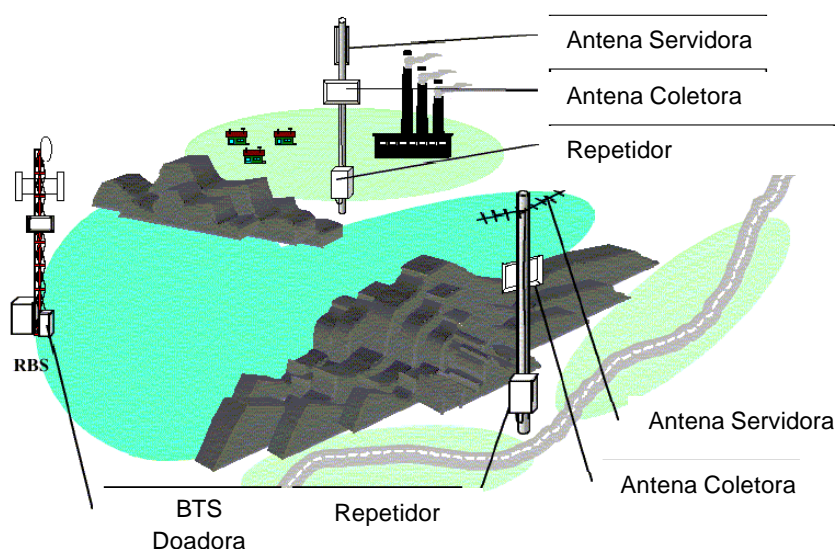


Figura 5.2-2 - Típico Uso Externo de Repetidores

5.3. Projetos de Cobertura *Outdoor* utilizando repetidores

O projeto de um sistema celular é realizado em etapas bem definidas, onde em cada uma são gerados parâmetros que servirão de dados de entrada para as etapas posteriores. Estas etapas podem sofrer algumas alterações dependendo do tipo de projeto que está sendo realizado. Descreveremos a seguir, em linhas gerais, as etapas mais importantes de um projeto.

5.3.1. Etapa Inicial – Definição do Vetor de Cobertura:

Baseado no plano de negócios da empresa é definido o tipo de perfil (ou perfis) alvo do serviço a ser prestado e um vetor de cobertura. Com base nas prioridades de atendimento este vetor pode ser seccionado em etapas de expansão, partindo-se da maior para a menor prioridade.

A obtenção desse vetor é realizada através de uma análise de mercado e da condição sócio-econômica da região. Atualmente, mapas digitalizados com este tipo de informação enriquecem e otimizam a identificação da área de cobertura desejada, aumentando assim a rapidez de realização das metas da empresa. Segue abaixo um exemplo (cidade de Garanhuns-PE) de vetor de

cobertura tendo por base um mapa geo-referenciado das regiões censitárias da cidade.

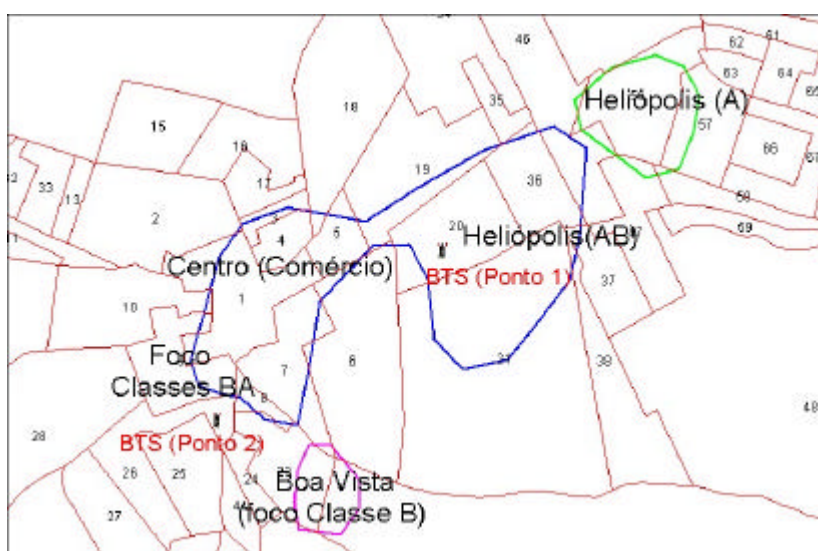


Figura 5.3.1-1 - Vetor de Cobertura

5.3.2. Planejamento Inicial

Com o vetor de cobertura definido, inicia-se planejamento de RF. Esta etapa engloba não somente o projeto de cobertura radioelétrica, como também o planejamento inicial de tráfego, dado que em sistemas GSM este tem impacto profundo nas configurações de canais lógicos e planejamento de frequências da rede.

Com base nas características técnicas dos equipamentos a serem utilizados, é realizado um posicionamento aproximado das BTS com auxílio de uma ferramenta de projeto. São feitas estimativas iniciais da configuração de cada BTS e do número total necessário. É elaborado um relatório contendo estas informações e a memória de cálculo correspondente.

5.3.3. Dimensionamento de Tráfego GSM

Como já mencionado, uma das etapas mais delicadas no planejamento de sistemas celulares diz respeito ao dimensionamento de tráfego.

Dado que as etapas de levantamento tenham sido devidamente concluídas e estando a rede em fase de projeto, deve-se efetuar o planejamento de

freqüências [REF 2] para que as condições de contorno de tráfego sejam atendidas.

No sistema GSM, devido às suas características sistêmicas, o planejamento freqüências está associado também à escolha de configuração dos canais lógicos utilizados pela BTS [REF 2]. Basicamente, a escolha da configuração destes canais irá determinar quantos *times slots* serão destinados para tráfego dados do usuário e quantos serão destinados para carga de sinalização. Neste sentido, para a realização da escolha da configuração destes canais, além da análise da carga de tráfego do usuário é necessário que seja efetuada uma avaliação da carga de sinalização demandada por estes, uma vez que existem diversas situações as quais no terminal móvel trafegam dados de sinalização, para a realização de atividades sistêmicas (ex: atualização da localização, estabelecimento de chamadas, registro do usuário, etc.). Há uma relação de compromisso entre capacidade de tráfego e demanda por sinalização, onde quanto maior for o tráfego cursado maior será a demanda por sinalização.

As atividades de sinalização ocorrem com diferentes demandas, dependendo do tipo de BTS para a qual está se realizando o dimensionamento. Esta demanda (especialmente com relação à atualização da localização) nas BTS podem ser classificadas em três tipos [REF 2]:

- IC – *inner cell* ? células com poucas atualizações de localizações;
- AC – *average cell* ? células com número médio de atualizações de localizações;
- BC – *border cell* ? células com até três vezes mais procedimentos atualizações de localizações.

A tabela abaixo [REF 2] lista a demanda de recursos para algumas atividades de sinalização que necessitam da utilização de canais de controle.

| Evento | Tempo de Retenção (s) | Número de Ocorrências (por assinante na HMM) | Tráfego gerado (mE/Assinante) |
|----------------------------|-----------------------|--|-------------------------------|
| Atualização de Localização | 3,5 | AC 1,0 IC 0 BC 3,0 | AC 1,0 IC 0 BC 2,9 |
| IMSI Attach /Detach | 3,5/2,9 | 2,0 | 1,9/1,6 |
| Registro Periódico | 3,5 | 0,5 | 0,5 |
| Call set-up | 2,7 | 0,8 | 0,6 |
| SMS p-p | 6,2 | 1,0 | 1,7 |

Tabela 5.3.3-1 - Tráfego de Sinalização

Dado que a necessidade de sinalização por usuário em cada tipo de BTS foi identificada, sabendo-se o tráfego médio cursado por usuário, pode-se estabelecer qual a percentagem de tráfego de sinalização com relação ao tráfego do usuário que se faz necessária em cada BTS. Essa percentagem é denominada de razão **SDCCH/TCH**. A tabela abaixo [REF 2] exemplifica a razão TCH/SDCCH para um usuário que demanda em média 29 mE de tráfego:

| Tipo de Célula | Tráfego de Sinalização (mE) | SDCCH/TCH [%] |
|----------------|-----------------------------|---------------|
| AC | 7,1 | 24 |
| IC | 5,9 | 20 |
| BC | 9,5 | 33 |

Tabela 5.3.3-2 - Razão SDCCH/TCH

Com o SDCCH/TCH definido pode-se escolher uma configuração de canais lógicos adequada tanto às necessidades de tráfego quanto às de sinalização.

A tabela abaixo foi obtida através da utilização da metodologia descrita nesta sessão, mostrando um exemplo ilustrativo comparando diversas configurações de canais lógicos, onde deve ser escolhido o que apresenta melhor desempenho de tráfego, mantendo-se a condição de contorno da demanda mínima de sinalização (Tabela 5.3.3-2 - Razão SDCCH/TCH).

Exemplo de Dimensionamento de Canais Lógicos

Parâmetros do Sistema:

| | |
|-------------------------|-----------------------|
| Tráfego/Usuário | 25 mE |
| Número de TRU's | 8 |
| Área Total de Cobertura | 200 Km ² |
| Densidade de Tráfego | 1.2 E/Km ² |
| Prob Bloqueio de TCH | 2 % |
| Prob Bloqueio de SDCCH | 1 % |

| | Razão SDCCH/TCH | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|---------------|--------|--------|-----|------------|-------------|-------------|
| | Canais SDCCH | Tráfego SDCCH | IC | A/C | BC | Canais TCH | Tráfego TCH | SDCCH Ratio |
| SDCCH/4 + SDCCH/8 | 12 | 5,88 | 23,60% | 28,40% | 38% | 62 | 51,5 | 11,41% |
| SDCCH/4 + 2SDCCH/8 | 20 | 12 | 23,60% | 28,40% | 38% | 61 | 50,6 | 23,71% |
| 2SDCCH/8 | 16 | 8,88 | 23,60% | 28,40% | 38% | 61 | 50,6 | 17,54% |
| 3SDCCH/8 | 24 | 15,3 | 23,60% | 28,40% | 38% | 60 | 49,6 | 30,84% |
| 4SDCCH/8 | 32 | 22 | 23,60% | 28,40% | 38% | 59 | 48,7 | 45,17% |

Escolha das Configurações de SDCCH:

| | |
|--------------|------------------|
| Tipo de BTS: | |
| IC | SDCCH/4+2SDCCH/8 |
| AC | 3SDCCH/8 |
| BC | 4SDCCH/8 |

Tabela 5.3.3-3 - Exemplo de Configuração de Canais Lógicos

Com as ferramentas de predição também é possível identificar quais áreas apresentam cobertura abaixo do especificado. Nestas regiões serão feitos estudos de viabilidade de implantação de repetidores.

5.3.4. Projeto Nominal

O projeto nominal é realizado a partir de simulações utilizando-se ferramentas de predição (os cálculos de balanceamento dos enlaces foram descritos no item 4.8) que utilizam bases de dados digitalizadas do terreno com resolução adequada ao tipo de projeto realizado. É definida a posição nominal prevista para cada BTS, número de setores, modelo e altura de antenas e outras informações necessárias para a realização do *site survey*.

Para estudos de projetos com repetidores, estas ferramentas devem realizar todas as análises de cobertura, tráfego e interferência pertinentes a este tipo de equipamento.

Alguns resultados gerados também serão utilizados pelos engenheiros de campo no *site survey*. Abaixo são indicados que estudos deverão ser feitos:

- Listagem com os melhores servidores e seus respectivos posicionamentos ? Permite engenheiro de campo sugerir outra BTS doadora à escolhida através da ferramenta de predição.

- Dados da BTS doadora escolhida através da ferramenta de predição com as seguintes análises:
 - Posicionamento da BTS doadora;
 - Níveis de sinal esperados no repetidor ? O nível de sinal proveniente da BTS doadora deve ser o suficiente para excitar o repetidor e levá-lo a transmitir com níveis de potência adequadas. Em geral procura-se uma candidata com visada direta;
 - Posicionamento das BTS co-canais a BTS doadora pré-escolhida – Informação relevante para verificar potencialidade de interferência de uplink. Em conjunto com essa listagem deve ser analisado se o apontamento da antena coletora do repetidor poderá gerar grandes interferências de canal direto. Lembramos que a escolha da BTS doadora deve ser feita de modo a minimizar a potencialidade dessa interferência;
 - Análise de cobertura e de interferência de canal direto (downlink) ? Neste momento são experimentados, pela ferramenta de predição, os tipos de repetidores, verificando-se qual possui o desempenho adequado para a localidade especificada;
 - Planejamento de frequência das BTS vizinhas ? em especial se o equipamento utilizado for de banda larga;
 - Estimativa de tráfego agregado à BTS doadora ? A folga de tráfego da BTS doadora é indispensável para que o tráfego absorvido pelo repetidor não gere penalidades nela;
- Dados sobre repetidor:
 - Posicionamento do equipamento (LAT, LONG);
 - Tipo de equipamento;
 - Configuração sugerida para a montagem:
 - Posicionamento das antenas coletoras e servidoras;
 - Ganhos do repetidor utilizados na predição.

Estes dados terão uma importância fundamental em campo para a análise da implantação do repetidor, em especial na etapa de comissionamento do equipamento (configuração dos equipamentos).

5.3.5. *Site Survey*

É a ida a campo com o objetivo validar análises feitas pela ferramenta de predição e determinar as posições exatas de cada BTS ou do repetidor, confirmando ou ajustando as configurações previstas anteriormente. Caso seja necessário são realizados testes de propagação para validação da área de cobertura.

No caso de uso de repetidores, o *site survey* tem o objetivo de determinar as configurações finais de montagem do repetidor e a escolha final da BTS doadora, tendo por base os estudos de melhor servidor e análise de tráfego, previamente realizados nas etapas de projeto inicial e nominal. O posicionamento adequado do repetidor pode influenciar significativamente na degradação por interferência. Por isso alguns cuidados devem ser tomados:

1. Escolha ou validação da BTS doadora: Em campo deve-se procurar verificar os seguintes dados sobre o repetidor
 - a. Potencialidade de interferência ? verificar se o apontamento da antena coletora está realmente minimizando as chances de ocorrer interferência de canal reverso.
2. Posicionamento e montagem do repetidor ? Verificar se montagem sugerida é a melhor possível para o atendimento dos critérios de isolamento;
3. Apontamento da antena servidora ? deve-se verificar se a antena servidora está configurada de modo a prover a cobertura necessária, para isso deve-se analisar:
 - a. Se o tipo de antena sugerida é adequado;
 - b. Se o Azimute está correto;
 - c. Se o Downtilt é suficiente para reduzir a interferência de canal direto, sem penalizar a cobertura requerida.

5.3.6. Projeto definitivo de RF

Nesta etapa é gerado, para cada sítio, um relatório com informações sobre o site survey e um projeto definitivo. O projeto inclui um mapa da região, ponto central e raio de área aceitável para o sítio (*search ring*), indicações de prédios

candidatos situados no *search ring*, fotos do local e previsões de cobertura mostrando a situação prevista.

5.3.7. Qualificação

Cada local proposto para a instalação do sítio é qualificado por um dos engenheiros de RF que participou da elaboração do projeto definitivo. A qualificação inclui aceitação ou rejeição e ordenação em ordem de prioridade dos candidatos aceitados.

5.3.8. Instalação de Repetidores – Medições em Campo

Devido à simplicidade do equipamento, a infra-estrutura requerida para a instalação do repetidor é reduzida. Como consequência, as etapas de comissionamento e integração do repetidor são rápidas.

Após a realização da instalação, é necessário que sejam efetuadas medições verificando-se o desempenho do equipamento, dentre estas podemos ressaltar:

1. *RSL de entrada na antena receptora do repetidor* ® Esta medida visa determinar se o nível de sinal que chega ao repetidor, é aproximadamente aquele o qual foi estimado através da predição. Caso seja detectado em campo que este nível de sinal medido é inferior ao esperado (não possuindo valores aceitáveis) deve-se verificar o alinhamento da antena. Pode ser necessária a troca da antena coletora por uma com maior ganho, ou até mesmo a alteração da posição da antena coletora;
2. *Medida da Isolação entre as Antenas Servidora e Receptora* ® Embora haja toda uma metodologia de cálculo para a isolação, deve-se efetuar medições para validar os cálculos efetuados. Para garantir que a isolação não seja fonte de problemas de desempenho é necessário que se façam diversas medidas do nível de isolação com e sem blindagem;
3. *Potência recebida na entrada do amplificador do repetidor* ® Esta medida visa determinar se a inclusão de algum elemento de blindagem causou um descasamento de impedância entre a antena e o cabo, acarretando perda de potência transferida para o

amplificador do repetidor. Também pode se verificar o nível de sinal RSL na antena receptora, validando se este é o suficiente para permitir a potência de transmissão máxima pelo repetidor;

4. Potência de saída da Antena Servidora → Com esta medida, verifica-se a existência de problemas na amplificação do sinal. Em repetidores que possuem ajuste automático de ganho, uma má montagem e orientação das antenas, pode resultar em um baixo nível de potência transmitida, devido ao baixo ganho do amplificador;
5. *Scanning de Freqüências* – Essa medida tem o objetivo de verificar se existem muitos sinais interferentes chegando na região de montagem do repetidor.

É bom ressaltar que todas as mudanças na antena servidora ou coletora devem ser acompanhadas de uma análise cuidadosa de alguma possível alteração na isolação entre a antena servidora e coletora do repetidor.

5.3.9. Aceitação de RF

São verificados os parâmetros de RF na BTS ou repetidor instalado e a altura, azimute, tilt e disposição das antenas. São tiradas fotos de visão de cada setor e de qualquer aspecto considerado relevante.

É realizado um *drive test* por toda a região de cobertura prevista do novo *site* com o objetivo de verificar a área total e a qualidade de cobertura (qualidade de BER).

Verifica-se com isso se a área demanda foi atendida de forma aceitável. No caso de repetidores, alguns parâmetros podem ser alterados visando uma melhora na qualidade do sinal na área:

- Realocação da Altura da Antena Servidora;
- Alteração na Abertura da Antena Servidora;
- Alteração no downtilt da Antena Servidora.

Caso as informações colhidas na auditoria e no *drive test* sejam satisfatórias, a BTS/repetidor é liberada para operação comercial.

A figura abaixo mostra um exemplo real de *drive test* (cortesia da ATL).

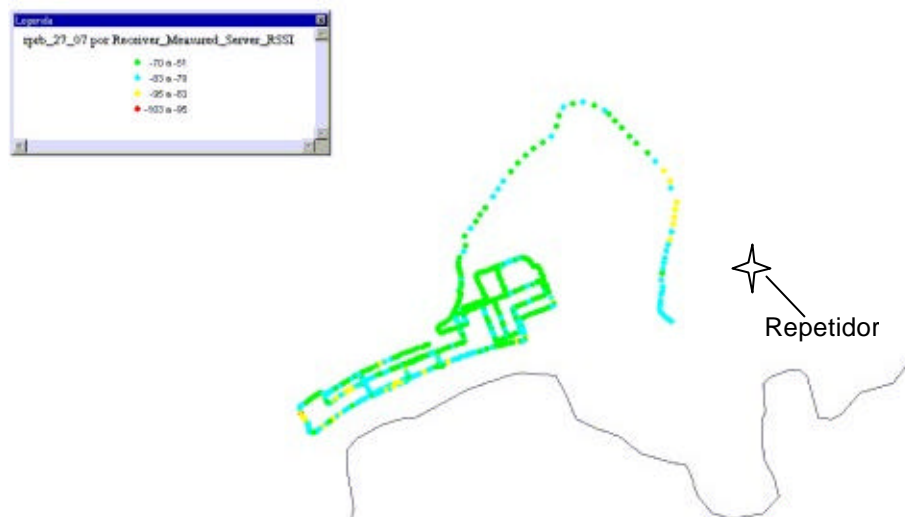


Figura 5.3.9-1 - Exemplo de *Drive Test*

5.3.10. Penalidades no uso de repetidores

A escolha do equipamento adequada, baseada em critérios de desempenho e custo, é de fundamental importância no projeto, especialmente na utilização de repetidores, dado que estes podem gerar penalidades as quais reduzirão o *desempenho* da rede. As principais causas de penalidades são as seguintes:

- Isolação ? Em qualquer ambiente *outdoor* a isolamento é um fator limitante para o ganho do repetidor. Portanto a montagem do repetidor é um passo crítico na implantação destes em áreas externas;
- Ganho do Amplificador e Potência Tx/canal ? O efeito da redução do ganho por canal na utilização de amplificadores de banda larga, ocorre em todos os ambientes externos, contudo sua gravidade é função da densidade de BTS instaladas nas imediações do repetidor. Deve-se também evitar a saturação do amplificador, pois em ambientes abertos o ruído de intermodulação pode provocar sérios danos à qualidade da rede;
- Degradação da Relação C/I ? Em ambientes externos, pelo fato do repetidor não estar isolado das outras BTS, a repetição de sinais interferentes podem causar degradações de desempenho. Esta penalidade é fortemente influenciada pela escolha do tipo de amplificação utilizada. Para o controle desta degradação o

posicionamento adequado do repetidor é de fundamental importância (ver item 3.4.1.2);

- Dissensibilização do Receptor ? Efeito inerente a inclusão do repetidor na interface rádio, independentemente do tipo de aplicação do repetidor (ver 4.3);
- Multipercurso ? Sinais provenientes da BTS doadora podem chegar ao terminal móvel (o qual está sendo servido pelo repetidor) causando degradações de desempenho. Deve-se garantir que este nível de sinal esteja pelo menos 9 dB [REF 2] abaixo do sinal do repetidor e que o atraso entre estes não seja superior a duração de o *time slot*.

O repetidor mais recomendado para aplicações externas em regiões com grande povoamento de BTS é o de amplificação seletiva em canal, o que oferece melhor desempenho permitindo a utilização de maiores ganhos.

Aplicações em regiões rurais com poucas BTS podem-se utilizar repetidores de banda seletiva, pois estes estarão bem isolados das outras BTS não oferecendo grande risco a degradação ao sistema. Em algumas aplicações urbanas, este repetidor pode ser utilizado desde que esteja devidamente “isolado” das outras BTS.

A tabela abaixo indica equipamentos mais usados para cada caso.

| Equipamento | Rural | SubUrbano | Urbano | Urbano Denso |
|---------------------------------|----------|-----------|--------------|--------------|
| Banda Larga | indicado | indicado | não indicado | não indicado |
| Canal Seletivo s/ desv. Freq | indicado | indicado | indicado | indicado |
| Canal Seletivo c/ desv. Freq | indicado | indicado | indicado | indicado |

Tabela 5.3.10-1 - Tipo de Repetidores para Ambientes Externos

5.4. Dimensionamento do Repetidor (*Link Budget*)

O balanceamento dos enlaces tem o objetivo de calcular a perda máxima de propagação nos enlaces direto e reverso, verificando a existência de discrepância de valores de perdas. Essas discrepâncias devem ser corrigidas de modo que se obtenha coberturas iguais em ambos os sentidos.

O projetista pode configurar alguns parâmetros sistêmicos (ex: potência de transmissão) para que seja alcançado o balanceamento, ou pode utilizar alguns artifícios para esta correção, tal como a inclusão de TMA's (*tower mounted amplifier*) que têm o objetivo de melhorar a sensibilidade do receptor¹⁰, sendo utilizados caso o desbalanceamento esteja ocorrendo no enlace reverso.

Em geral, projetos com repetidores apresentam desbalanceamento no canal direto, pois em alguns casos a utilização de repetidores banda seletiva faz com que a potência de transmissão seja baixa (devido ao compartilhamento do ganho), tornando-se inferior a do terminal móvel (28 dBm).

Após a perda balanceada calculada pode-se estimar o raio de cobertura para diferentes margens. Com base na potência de transmissão e tipo de antena do repetidor pode-se calcular, através da utilização de ferramentas de predição, a cobertura do repetidor.

A tabela abaixo mostra os dados sistêmicos importantes para um projeto *outdoor* com repetidores. Esta tabela encontra-se preenchida com valores típicos em caráter ilustrativo.

Planejamento de Repetidores:

Dados da BTS Doadora:

| | |
|------------------------------------|----------------------|
| Setor Doador: | A |
| Azimuth da Antena Doadora: | 180 |
| Número de Canais no Setor: | 14 |
| EIRP do Setor Doador: | 51 |
| Altura da Antena Doadora: | 30 |
| Coordenadas da BTS Doadora: | 24,245 S 46,753 W |

Dados do Repetidor:

| | |
|------------------------------------|----------------------|
| Antena Coletora | Yagui |
| Ganho máx da Antena: | 17 |
| Azimuth da Antena Coletora: | 0 |
| Altura da Antena Coletora: | 9 |
| Tipo de repetidor: | Canal Seletivo |
| tipo de Antena Servidora: | Painel - 60 |
| Ganho máx da Antena: | 16 |
| Azimuth da Antena Servidora | 135 |
| Ganho do repetidor | 65 |
| Posição do Repetidor | 24,247 S 46,754 W |

Tabela 5.4-1 - Parâmetros para Projetos com Repetidores

Após o cálculo de cobertura do repetidor, é necessário que se faça uma análise da interferência no sistema, com o objetivo de verificar se a inclusão do repetidor causou uma degradação na qualidade da cobertura.

¹⁰ No caso de projetos com repetidores, caso seja necessária a utilização de TMA este deve ser montado junto à antena servidora do repetidor.

5.4.1. Análise de Interferência co-canal:

Ao contrário do dimensionamento de repetidores *indoor*, repetidores montados em ambientes abertos, devem ter uma análise cuidadosa do impacto no aumento do ruído de interferência (acarretando uma degradação de C/I). A metodologia de cálculo para esta degradação foi descrita no item 4.2.

Para se reduzir o aumento dos níveis de interferência deve-se escolher e montar¹¹ a antena servidora de modo a esta servir exclusivamente a área de interesse, evitando assim a transmissão de sinal para outras localidades.

Para controlar a interferência de *uplink*, deve-se garantir que a uma distância considerável não existam elementos potencialmente interferidos (BTS co-canais a doadora, por exemplo) dentro do lóbulo principal da antena doadora do repetidor. A figura abaixo, uma ortofoto de parte da cidade de São Paulo ilustra esta situação.

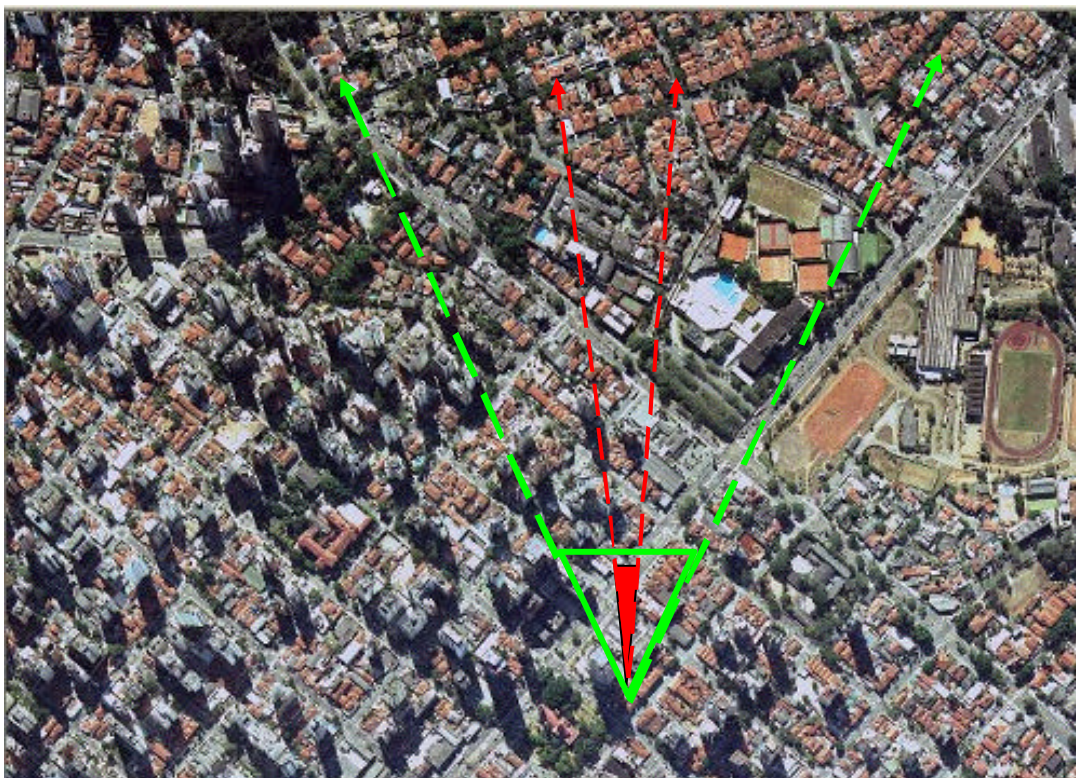


Figura 5.4.1-1 - Potencialidade de Interferência do Canal Reverso

¹¹ A montagem da antena implica na escolha de azimute e *downtilt* adequados para o atendimento da área em questão.

Capítulo 6. Estudo de Caso: Implantação GSM 1800

6.1. Considerações Iniciais:

Como estudo de caso de utilização de repetidores para ampliação de cobertura com baixos custos, será estudado o caso hipotético da implantação de uma rede GSM na faixa de 1800 MHz para uma nova operadora SMP.

Esta nova operadora tem em seu plano de negócios para o primeiro ano, a implantação inicial da rede em duas fases distintas:

Fase I – Cobertura Inicial da Rede – Atendimento ao vetor de cobertura primário

Fase II – Melhoria da cobertura da Fase I

Os prazos e metas de implantação do sistema são extremamente reduzidos, demandando soluções de rápida implementação e de baixos custos.

Uma análise inicial indica que, para o atendimento das metas exigidas, deve-se implantar a rede com as seguintes características por fase:

Fase I – Implantação de BTS com infra-estrutura simplificada, dando preferência à montagem em topo de prédios.

Fase II – Melhoria da qualidade de cobertura, dando preferência à implantação de repetidores de canal seletivo, com infra-estrutura similar à usada nas BTS da Fase I.

6.2. Projeto e Implantação - Fase I

Para a realização desta implantação, algumas premissas com relação aos equipamentos a serem utilizados e às estimativas iniciais de tráfego são realizadas. As estimativas de tráfego são levantadas através de uma análise de marketing, cujos resultados são: densidades médias de tráfego demandado na região central e na periférica do vetor de cobertura e requisitos de qualidade mínima para atendimento dos clientes.

As tabelas abaixo mostram as especificações para os equipamentos e as estimativas de tráfego:

| Características | BTS | Terminal |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Potência de Transmissão | 41 [dBm] | 30 [dBm] |
| Limiar de Recepção | -110 [dBm] | -104 [dBm] |
| Número de portadoras | 8 | - |
| Antenas utilizadas | Painel 60 ⁰ (16 dBi) | Dipolo (2 dBi) |

Tabela 6.2-1 - Configurações Sistêmicas

| Características de tráfego | Urbana | Periférica |
|----------------------------|----------------------|---------------------|
| Densidade de tráfego | 10 E/km ² | 7 E/km ² |
| Prob. Bloqueio TCH | 2% | 2% |
| Prob. Bloqueio SDCCH | 1% | 1% |

Tabela 6.2-2 - Características de Tráfego

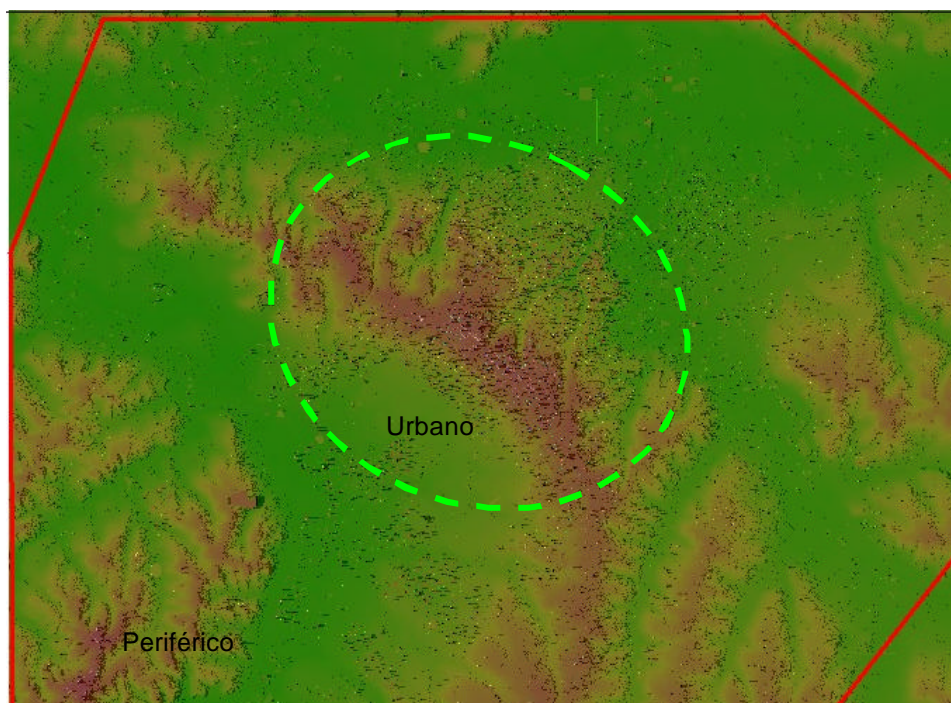


Figura 6.2-1 - Vetor de Cobertura

A área em vermelho mostra o vetor de cobertura primário a ser coberto, enquanto a área pontilhada em verde evidencia a área caracterizada por uma maior densidade de tráfego.

O estudo de tráfego realizado utilizando as técnicas descritas no capítulo 5 com base na demanda requerida e na seguinte configuração sistêmica:

- Fator de reuso: $N = 4$ com setorização tripla
- Tabela 6.2-2 - Características de Tráfego
- Razão SDCCH/TCH: 23% (para tipo AC de BTS)
- Configuração canais SDCCH: para atender aos requisitos de razão mínima SDCCH/TCH utiliza-se a seguinte configuração de canais lógicos: **SDCCH/4 + 2 SDCCH/8**.

Esta configuração fornece 23,71% de razão SDDH/TCH para um setor com até 8 TRX's.

- Capacidade por setor: 50,6E (8 TRX's a 2% de bloqueio)

Para o dimensionamento do sistema, foram adotados os seguintes critérios para o cálculo de cobertura radioelétrica:

| Características de Propagação | Valores |
|-------------------------------|---------------|
| Frequência de operação | 1800 Mhz |
| Modelo de propagação | Cost 231-Hata |
| Margens de sombreamento | 5,5 dB |
| Perda do corpo humano | 4 dB |

Tabela 6.2-3 - Características de Propagação

Utilizando a metodologia de cálculo de enlace descrita no capítulo 4, dadas as características de equipamento e as margens utilizadas para o dimensionamento da cobertura radielétrica, o raio de cobertura obtido para cada BTS é de aproximadamente 2 Km. Com isso cada setor absorve no máximo um tráfego de 41,8 E para áreas urbanas e 29,26 E para áreas periféricas.

Para esta fase, foram projetadas apenas BTS com montagens outdoor (preferencialmente em topos de prédios). As BTS foram posicionadas de modo a minimizar o número total de equipamentos, procurando atender o vetor de cobertura requerido.

O cálculo de cobertura foi realizado utilizando uma base de dados de 2 metros de resolução da cidade de São Paulo e um *software* de predição (programa NetDimension) que inclui as metodologias de cálculo de cobertura descritas neste trabalho. A figura abaixo mostra a cobertura obtida na Fase I de implantação da rede GSM.

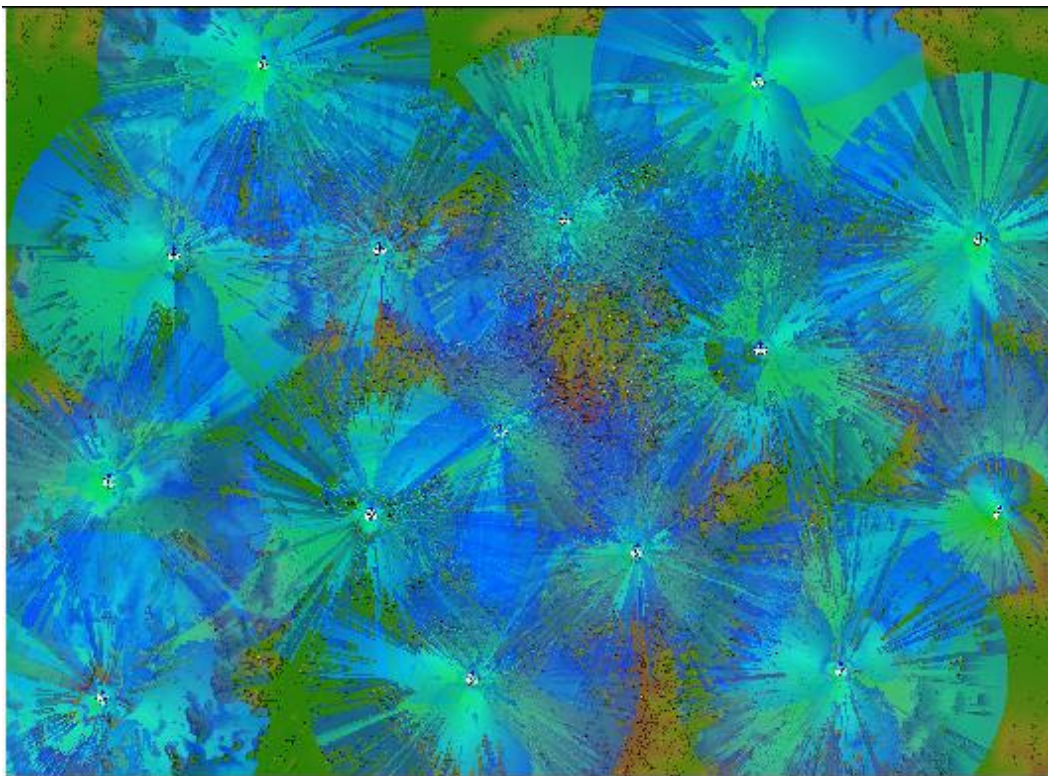


Figura 6.2-2 - Cobertura da Fase I

| BTS | | Urbanização | Tráfego [E/km ²] |
|---------------|----------------|-------------|---------------------------------|
| Número da BTS | Cluster da BTS | | |
| 1 | 1 | Urbana | 10 |
| 2 | 1 | Periférica | 7 |
| 3 | 1 | Urbana | 10 |
| 4 | 1 | Periférica | 7 |
| 1 | 2 | Urbana | 10 |
| 2 | 2 | Urbana | 10 |
| 3 | 2 | Urbana | 10 |
| 4 | 2 | Periférica | 7 |
| 1 | 3 | Urbana | 10 |
| 2 | 3 | Periférica | 7 |
| 3 | 3 | Periférica | 7 |
| 4 | 3 | Periférica | 7 |
| 1 | 4 | Periférica | 7 |
| 2 | 4 | Periférica | 7 |
| 1 | 5 | Periférica | 7 |

Tabela 6.2-4 – Listagem das BTS projetadas para a Fase I

6.3. Projeto e Implantação - Fase II:

Após a implantação da Fase I, a existência de regiões de sombra dentro do vetor de cobertura primário, além das indicadas no próprio projeto, deve ser verificada através da realização de *drive tests* para analisar a qualidade da cobertura atingida e identificar quais necessitam de atendimento. Será suposto que este levantamento resultou em algumas áreas de atendimento prioritário para a fase II, que se encontram assinaladas na figura abaixo.

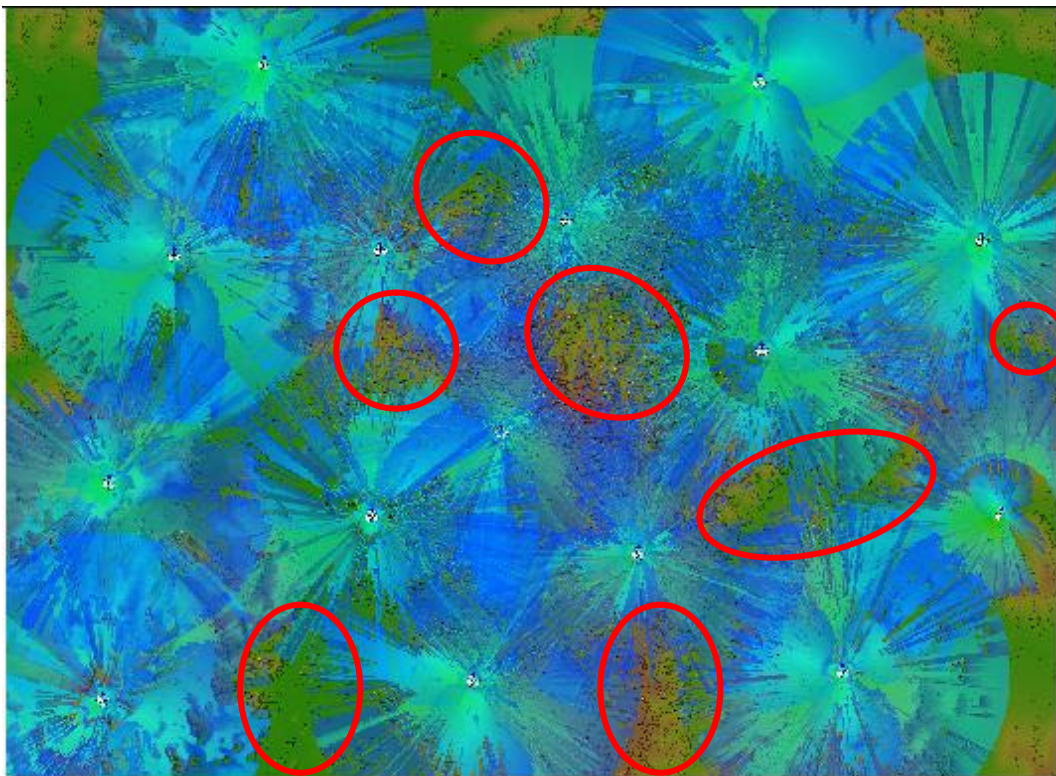


Figura 6.3-1 - Áreas de Sombra da Fase I

Tendo em mente a preferência pelo uso de repetidores para a extensão de cobertura e o atendimento das áreas de sombra, será realizado um estudo para se determinar a melhor solução para a implementação da Fase II.

Esse estudo envolve duas etapas:

1. Cobertura das áreas de sombra com apenas novas BTS:
 - a. Projeto de cobertura.
 - b. Levantamento de custo desta cobertura.

2. Cobertura das áreas de sombra com repetidores:
 - a. Levantamento de viabilidade de tráfego e projeto de cobertura para cada repetidor.
 - b. Projeto de novas BTS onde for necessário (onde repetidores mostrarem ser inadequados)
 - c. Levantamento final do custo.

6.3.1. Cobertura das áreas de sombra com BTS

Foram projetadas mais 7 BTS para o atendimento das áreas de sombra, que foram dispostas de forma a reduzir ao máximo as regiões não servidas com o mínimo de estações possível.

Afigura abaixo mostra a cobertura atingida na Fase II com a implementação apenas de novas BTS. As novas estações estão assinaladas com setas vermelhas.

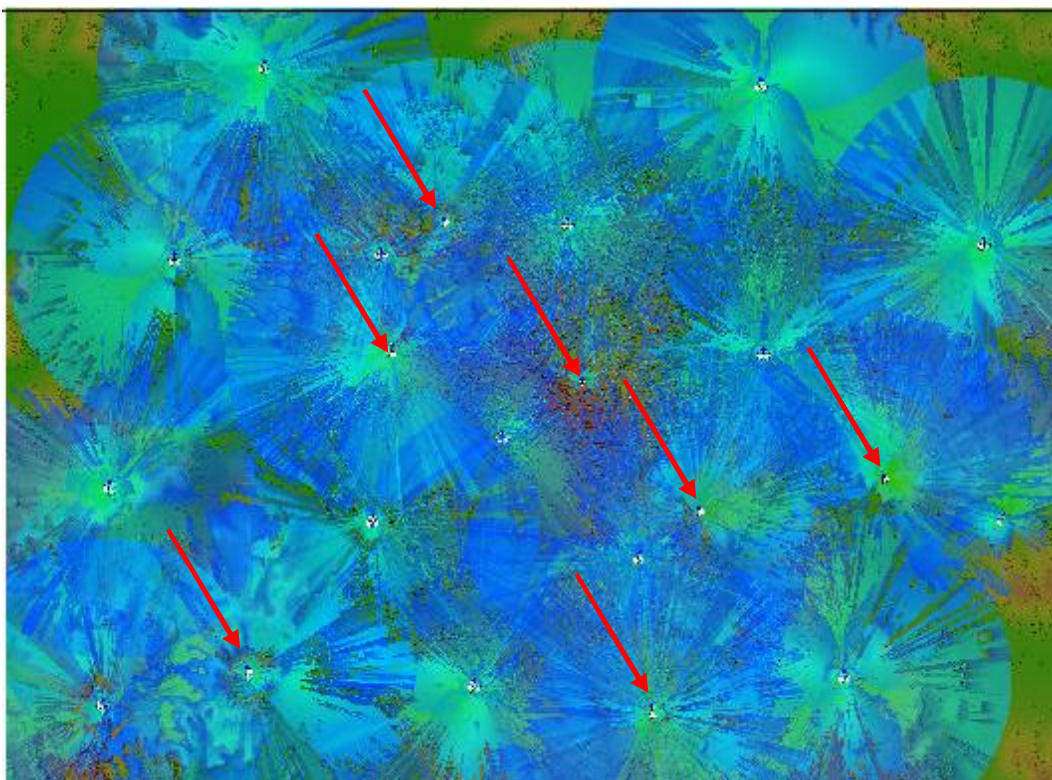


Figura 6.3.1-1 - Cobertura Fase II - Inclusões de BTS

6.3.2. Cobertura das áreas de sombra com Repetidores

O uso de repetidores requer uma análise da escolha das BTS doadoras, de modo que cada repetidor não cause penalidades de bloqueio e qualidade de cobertura à doadora. Como critério de seleção, o repetidor que causar penalidade de tráfego ou de cobertura na BTS doadora, será substituído por uma nova BTS. O repetidor utilizado no projeto possui as seguintes características:

| Características | Repetidor |
|--|---------------------|
| Tipo de Repetidor | Canal Seletivo |
| Potência máxima de Transmissão por canal | 36 [dBm] |
| Ganho máximo combinado | 85 dB |
| Perda de compartilhamento de ganho | 9 dB |
| Antena Coletora | Parabólica (17 dBi) |
| Antena Servidora | Painel 60° (16 dBi) |

Tabela 6.3.2-1 - Características do Repetidor

| Características de Montagem | Valores |
|-----------------------------|----------------------------|
| Infra-estrutura | Montagem em poste com 15 m |
| Uso de blindagem | SIM |
| Espaçamento entre antenas | 10 m |
| Isolação média obtida | 85 |
| Ganho líquido do Repetidor | 65 dB |

Tabela 6.3.2-2 - Ganho Líquido do Repetidor

Os cálculos de estimativa de tráfego cursado nos repetidores, foram realizados com base na estimativa de sua área de cobertura e da densidade de tráfego de sua respectiva região, no caso urbana ou periférica. A tabela abaixo lista os tipos de área para cada repetidor.

| Repetidor | Urbanização | Tráfego [E/km ²] |
|--------------|-------------|------------------------------|
| Repetidor 1 | Urbana | 10 |
| Repetidor 3 | Periférica | 7 |
| Repetidor 5 | Urbana | 10 |
| Repetidor 6 | Periférica | 7 |
| Repetidor 7 | Urbana | 10 |
| Repetidor 8 | Periférica | 7 |
| Repetidor 9 | Periférica | 7 |
| Repetidor 10 | Periférica | 7 |

Tabela 6.3.2-3 - Tipo de localidade de cada BTS

As tabelas seguintes mostram as análises de potência de transmissão de cada repetidor projetado (*link budget* do canal direto), o respectivo tráfego absorvido e uma análise na penalidade de tráfego das doadoras. Também é indicado o ganho líquido¹² obtido na montagem do repetidor:

¹² O ganho líquido do repetidor é caracterizado pelo ganho da antena coletora, perda no cabo e ganho por canal usado no repetidor.

| Repetidor | BTS Doadora | Distância (Km) | visada | RSL (dBm) | Ganho Líquido do Repetidor | Potência Tx (dBm) |
|-----------|-------------|----------------|--------|-----------|----------------------------|-------------------|
| Rep1 | 1A_2 | 1,3 | sim | -42,82 | 78,97 | 36 |
| Rep3 | 2B_2 | 1,25 | sim | -42,48 | 78,97 | 36 |
| Rep5 | 1A_2 | 1,29 | não | -57,76 | 78,97 | 21,21 |
| Rep6 | 1C_3 | 1,5 | sim | -44,07 | 78,97 | 34,90 |
| Rep7 | 1B_3 | 1,3 | sim | -42,82 | 78,97 | 36 |
| Rep8 | 1A_4 | 1,69 | sim | -45,10 | 78,97 | 33,87 |
| Rep9 | 2C_2 | 2,21 | sim | -47,43 | 78,97 | 31,54 |
| Rep10 | 1A_5 | 2,48 | sim | -48,43 | 78,97 | 30,53 |

Tabela 6.3.2-4 - Análise de Cobertura dos Repetidores

| Repetidor | BTS Doadora | Tráfego Estimado | Tráfego Cursado na BTS | Tráfego Max na BTS (GOS 2%) | Folga de Tráfego | Penalidade | Comentário |
|-----------|-------------|------------------|------------------------|-----------------------------|------------------|------------|------------|
| Rep1 | 1A_2 | 20 | 46 | 50,6 | 4,6 | SIM | tráfego |
| Rep3 | 2B_2 | 20 | 30,2 | 50,6 | 20,4 | NÃO | |
| Rep5 | 1A_2 | 5,4 | 34 | 50,6 | 16,6 | NÃO | cobertura |
| Rep6 | 1C_3 | 17 | 41 | 50,6 | 9,6 | SIM | tráfego |
| Rep7 | 1B_3 | 20 | 28,7 | 50,6 | 21,9 | NÃO | |
| Rep8 | 1A_4 | 17 | 23 | 50,6 | 27,6 | NÃO | |
| Rep9 | 2C_2 | 12 | 36 | 50,6 | 14,6 | NÃO | cobertura |
| Rep10 | 1A_5 | 10 | 22,8 | 50,6 | 27,8 | NÃO | |

Tabela 6.3.2-5 - Análise de Tráfego dos Repetidores

A figura abaixo mostra a cobertura da Fase II utilizando-se apenas repetidores para prover a melhoria na qualidade de cobertura.

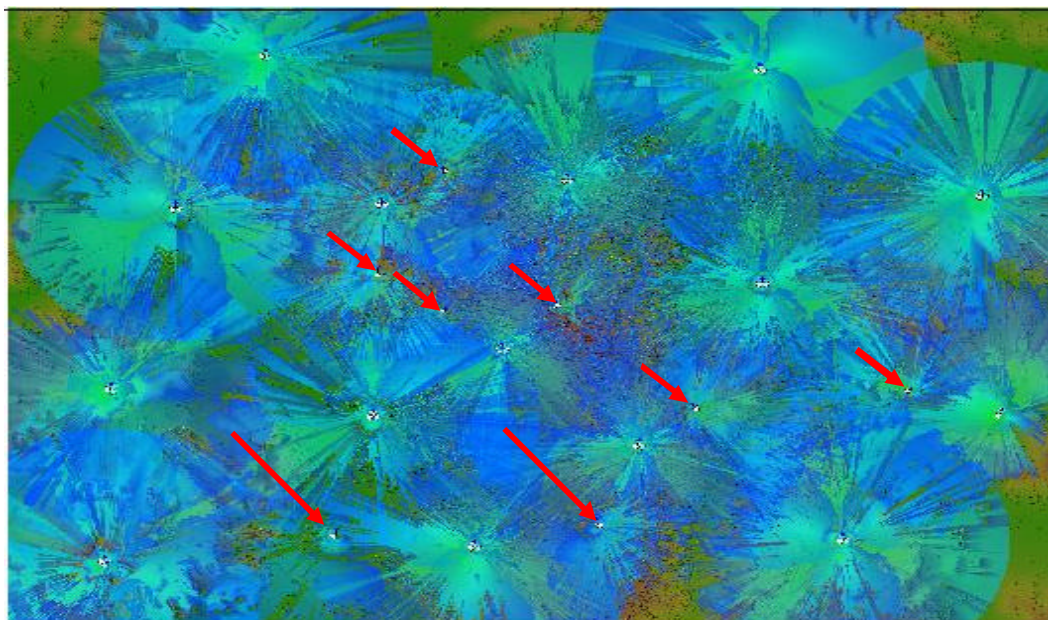


Figura 6.3.2-1 - Cobertura Fase II com repetidores

Através das análises realizadas foi verificado que os repetidores 1, 5, 6 e 9 não apresentaram desempenho adequado. Assim sendo serão substituídos por novas BTS.

A solução final será o uso de repetidores em áreas de menor tráfego e a inserção das novas BTS nas áreas de maior tráfego. A figura abaixo mostra a cobertura final obtida para a Fase II.

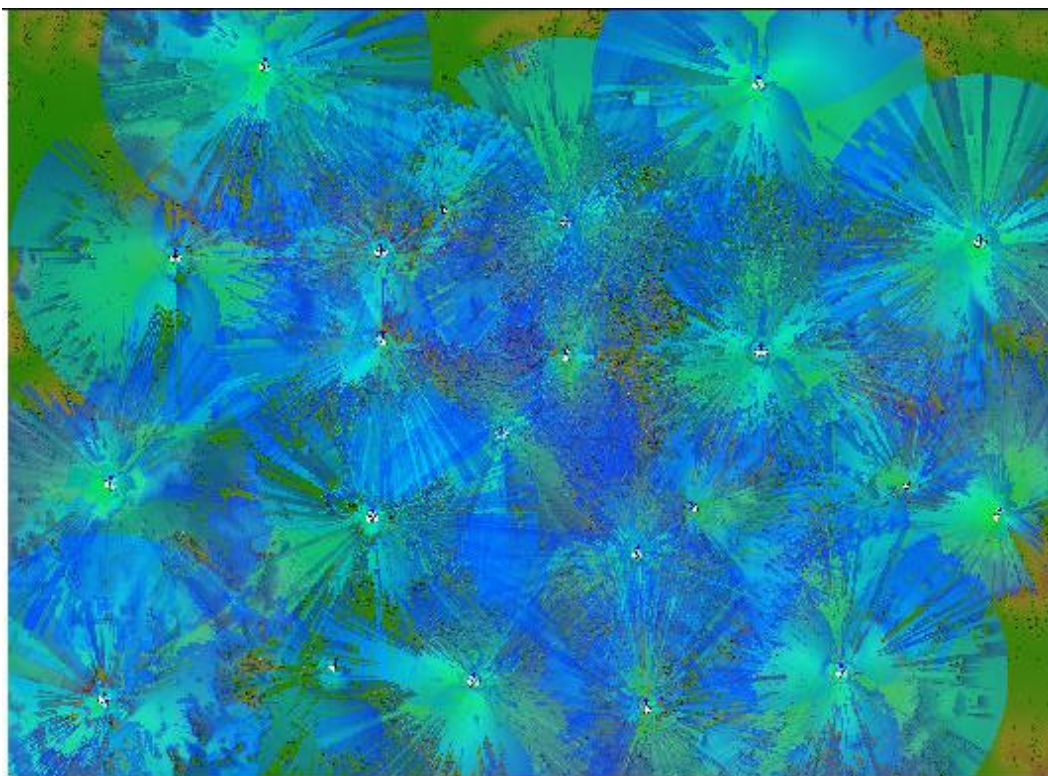


Figura 6.3.2-2 - Cobertura Final

6.4. Análise de custos

A inclusão dos repetidores na fase II permitiu que a implantação fosse realizada dentro dos prazos estipulados e com as metas de qualidade asseguradas.

Segue abaixo uma tabela comparativa mostrando a redução nos custos (CAPEX) com a implementação híbrida de BTS e Repetidores:

| Custo de Equipamentos: | | |
|-----------------------------------|--------------|-----|
| Custo/BTS | 250.000,00 | R\$ |
| Custo/Repetidor | 50.000,00 | R\$ |
| Cobertura I: Somente BTS´s | | |
| Nº BTS | 22,00 | |
| Custo | 5.500.000,00 | R\$ |
| Cobertura II: BTS´s e Repetidores | | |
| Nº BTS | 18,00 | |
| Nº Repetidores | 4,00 | |
| Custo | 4.700.000,00 | R\$ |
| Comparativo de Custos: | | |
| Redução de Custo | 800.000,00 | R\$ |

Tabela 6.4-1 - Análise de Custo CAPEX da Solução

Capítulo 7. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo do uso de repetidores no planejamento de cobertura de sistema de comunicação móvel celular.

Sua principal contribuição consiste na análise detalhada das degradações introduzidas pela inclusão do repetidor na rede. Em particular, foram estudados os efeitos de dissensibilização do receptor da BTS devido à inclusão de repetidor nos enlaces reverso e o aumento da interferência causado pela amplificação pelo repetidor de sinais de outras BTS e estações móveis que não as desejadas. Foi também analisado detalhadamente o problema da isolação entre antenas do repetidor.

Foi desenvolvida ainda uma metodologia completa para dimensionamento de cobertura de sistemas celulares TDMA utilizando repetidores. Com base nesta metodologia foi realizado um estudo de caso de projeto de um sistema GSM para a cidade de São Paulo, considerando aspectos de cobertura e tráfego.

O uso de repetidores para melhoria e ampliação da cobertura radioelétrica mostrou-se uma solução vantajosa, com relação à metodologia de cobertura tradicional, para a evolução e implantação das redes celulares. O estudo de caso hipotético para a faixa de SMP mostrou uma significativa redução no número de BTS instaladas, permitindo uma redução nos custos e tempo de implantação, levando a uma economia de até 15% nos custos de equipamento da interface rádio. Contudo, como foi visto, a utilização dos repetidores exige uma análise cuidadosa de seu impacto na rede, tanto sob o aspecto de tráfego quanto sob o aspecto de qualidade de cobertura.

Nos sistemas celulares atuais, os repetidores além de sua funcionalidade de extensão de cobertura em ambientes rurais e suburbanos, estão ganhando maior aplicação nas operadoras (como, por exemplo, a ATL) para a redução de áreas de sombra nas regiões urbanas e urbanas densas. Nestas regiões há ainda grande aplicação em soluções *indoor*, para locais onde a cobertura de origem externa não atende adequadamente.

Sugestões para trabalhos futuros são as análises do uso dos repetidores em ambientes interiores (*indoor*) e em sistemas CDMA.

Referências Bibliográficas

- 1 An Introduction to GSM, S. M. Redl, M. K. Weber and M. W. Oliphant, Artech House, 1995.
- 2 Advanced Cell Planning. Publicação da Ericsson, Suécia, 1999.
- 3 Wang, TNC. On Application of Cellular or PCS Off-Air On- Frequency Repeaters. Proceedings of 1997 Asia pacific Microwave Conference.
- 4 Drucker, H. Development and Application of a Cellular Repeaters, IEEE, 1998.
- 5 Apostila de Sistemas de Comunicação via Satélite. José Mauro Pedro Fortes. Publicação do CETUC PUC/Rio.
- 6 Goodman, D. Wireless Personal Communications Systems. Addison Wesley Longman, Inc., USA
- 7 GSM System Engineering, A. Mehrotra, Artech House, 1997.
- 8 GSM and Personal Communications Handbook, S. G. Redl, M. K. Weber, M. W. Oliphant, Artech House, 1998.
- 9 Comunicação privada com a operadora ATL.
- 10 GPRS: General Packet Radio Services, Regis J. B. Bates, Wiley, 2001.
- 11 Informações obtidas pela Allen Mikom – Fabricante de Repetidores
- 12 Radio Propagation in Cellular Networks, Nathan Blaunstein, Artech House, 2000.
- 13 Theodore S. Rappaport, Wireless Communications – Principles and Practice, Prentice Hall, 1996

Apêndice - Estrutura dos Canais Lógicos

O GSM possui dois grandes grupos de canais lógicos¹³ que são mapeados nos canais físicos, com uma estrutura peculiar as suas funcionalidades. Os canais lógicos são classificados como:

Canais de Tráfego:

- *Full rate, Half rate Random Access Burst*
- Canais para dados de 9.6 4.8 e 2.4 Kbps

Canais de Controle:

- *Broadcast Control Channel (BCH)*
- *Common Control Channel (CCCH)*
- *Dedicated Control Channel*
- *Stand Alone Dedicated Control Channel (SDCCH)*
- *Random Access Channel – RACH*
- *Slow Associated Control Channel – SACCH*
- *Fast Associated Control Channel – FACCH*

Canais de Tráfego (TCH)

Os canais de tráfego são os canais lógicos responsáveis pelo tráfego de informação do usuário, tanto na parte de voz quando de dados. Devido à demanda continua de sinalização, estes canais não trafegam apenas informação do usuário, sendo também transmitidas algumas mensagens de sinalização da rede.

Existem dois tipos de canais para tráfego de voz: *Full rate (13 Kbps) TCH/F* e o *Half rate (6,5 Kbps) TCH/H*. Ambos são mapeados no mesmo tipo de canal físico, tendo como única diferença a frequência com que são transmitidos os *bursts*.

No início do estabelecimento de uma chamada ou durante um *handover*, o móvel não tem conhecimento suficiente da rede para transmitir em modo sincronizado, durante o tempo decorrente até a ocorrência do sincronismo, o

¹³ O canal lógico é um ente abstrato, possuindo sua função na rede. Dependendo de sua função, seu mapeamento em um canal físico (que corresponde a um par de frequências e um número dentre os 8 time slots disponíveis) é realizado de uma maneira diferente.

terminal móvel utiliza um *burst* de tamanho reduzido denominado canal de tráfego curto [REF 2]. Este canal reduz as chances de ocorrência de superposição. A estrutura do *slot* é bem similar ao canal normal.

Canais de Controle:

Os canais lógicos de controle são também mapeados nos slots físicos do GSM, estes canais têm o objetivo de trocar informação de sinalização do sistema.

Existem 4 classes de canais de controle:

- Broadcast Channels
- Commom Control Channels
- Dedicated Control Channels
- Associated Control Channels

Cada classe de canal possui suas funcionalidades e mapeamentos específicos, que serão descritos abaixo.

Broadcast Control Channel (BCH):

Esta classe de canal é transmitida somente pela base para todos os terminais móveis em sua área de cobertura (em uma estrutura ponto-multiponto), objetivando a transmissão de informações suficientes para que o terminal do usuário ganhe acesso à rede.

Existem três tipos de BCH:

Broadcast Commom Control Channel (BCCH)

Frequency Correction Channel (FCCH)

Sincronization Channel (SCH)

Todos esses três canais lógicos são obrigatoriamente transmitidos na mesma portadora (C0) e no mesmo *time slot*

Broadcast Common Control Channel (BCCH)

Este canal informa a todos os móveis de sua área de cobertura, parâmetros específicos para que estes possam identificar a rede e acessar esta. Abaixo são listados alguns parâmetros e informações passados aos terminais:

- LAC – location área code;
- Potência máxima permitida na célula;
- Portadoras BCCH das células vizinhas para que os terminais móveis possam efetuar as medições de intensidade de sinal, para possíveis processos de *handover* ou *reselect*;

Este canal lógico é mapeado em uma estrutura idêntica ao canal de tráfego *full rate*.

Frequency Correction Channel (FCCH)

Este canal provê a referência de frequência do sistema aos terminais, para que estes possam identificar a portadora que está transmitindo o canal BCCH. Essa referência é feita transmitindo-se apenas um tom senoidal (seqüência de zeros) durante toda a duração do *slot*.

Synchronization Channel (SCH)

Basicamente este canal fornece para os terminais móveis a *training sequence*, que está sendo utilizada na base.

Dummy Burst – Rajada “Vazia”

Este canal é transmitido na portadora C0 quando nenhum outro tipo de *burst* precisa ser enviado. Neste caso nenhuma mensagem válida está sendo enviada pela rede aos terminais.

Este procedimento faz com que a portadora C0 esteja sempre “no ar”, possibilitando as medições de intensidade de sinal pelo terminal móvel.

Common Control Channels (CCCH)

Estes canais de controle têm a função de estabelecer e suportar um enlace dedicado entre o terminal móvel e a BTS, provendo as ferramentas para o estabelecimento das chamadas. Existem três tipos de canais CCCH:

- Random Access Channel (RACH);
- Paging Channel (PCH);
- Access Grant Channel (AGCH).

Random Access Channel (RACH)

Esse canal é utilizado pelo terminal móvel para requerer a base, um canal dedicado de controle.

A transmissão destes *bursts* é realizada de forma aleatória, onde possivelmente vários terminais estão “disputando a atenção” da BTS para a obtenção de um canal dedicado de controle. Em geral esta disputa é modelada pelo método de acesso *S-ALOHA*,

A estrutura deste *slot* é reduzida para se minimizar as colisões entre os estes.

Este canal lógico é mapeado no *random access burst* que tem uma estrutura idêntica ao canal de tráfego curto.

Paging Channel (PCH)

Este canal é utilizado apenas pela BTS para interrogar um específico terminal móvel na rede, afim de que este responda alguma requisição feita pela rede.

O terminal móvel periodicamente “escuta” o *time slot* onde é transmitido o canal PCH calculado¹⁴. Neste procedimento, é verificado se o seu ID (TMSI ou IMSI [REF 2]) está sendo transmitido. Caso seja, o móvel (utilizando um canal RACH) irá requisitar um canal dedicado de sinalização.

O dimensionamento ótimo dos canais de *paging* é muito importante para se evitar excesso sinalização na rede. Procedimentos de atualização da área de

¹⁴ PCH calculado é simplesmente o *time-slot* que deve ser escutado pelo terminal móvel, este valor é calculado com base no tipo de multiplexação que está sendo utilizado, no ID transmitido pelo PCH e o número de terminais ativos por PCH, este processo será visto com mais detalhes adiante.

localização e o dimensionamento do tamanho das áreas de localização [REF 2], são de extrema importância no desempenho deste canal.

Access Grant Channel (AGCH)

Este canal é uma resposta da BTS ao canal RACH enviado pelo terminal, mostrando o sucesso no recebimento deste. O AGCH tem a função única de informar ao terminal móvel, qual o canal dedicado de sinalização (SDCCH) será alocado para ele. O terminal deve sintonizar imediatamente neste canal, a partir do recebimento das informações provenientes do canal AGCH.

Dedicated Control Channels (DCCH):

Estes canais são utilizados para transferência de mensagens de controle entre a rede e o terminal móvel. São os únicos canais bi-direcionais de controle. Existem quatro tipos de canais dedicados

- Stand Alone Dedicated Control Channel (SDCCH)
- Slow Associated Control Channel (SACCH)
- Fast Associated Control Channel (FACCH)
- Cell Broadcast Channel (CBCH)

Stand Alone Dedicated Control Channel (SDCCH)

Este canal é requisitado para troca de mensagens de controle, quando o terminal móvel não está com uma chamada em andamento (está em espera na rede).

Os terminais móveis sintonizam no *time slot* de um SDCCH em uma das seguintes situações:

- Procedimentos de gerenciamento de mobilidade: Atualização da localização, registro periódico, autenticação;
- Gerenciamento de conexão: Estabelecimento de chamada, SMS, Fax, e demais serviços suplementares.

Este canal de controle possui as seguintes configurações:

SDCCH/4→ Somente multiplexado na portadora C0 e *time slot* zero (TS0), tendo então apenas um por setor de BTS.

SDCCH/8 → Este tipo de canal pode ser mapeado em qualquer outra portadora, onde o fator limitante são 16 canais deste tipo ou igual ao número de TRU's da BTS (no caso o que for menor).

Note que este canal de controle é o único que pode ser mapeado num canal físico que não esteja na portadora C0. A nomenclatura xxx/8 ou xxx/4 ficará clara quando descrevermos com detalhes os esquemáticos de multiplexação de canais de controle, pois estes números se referem a sua periodicidade nas estruturas de multiplexação superiores.

O uso deste canal faz com que a troca de mensagens de sinalização seja realizada de forma bem mais eficiente do que se fosse feita utilizando-se apenas o canal RACH (como no caso do IS-136 [REF 6]). Outra grande vantagem da utilização deste canal é a otimização da utilização do recurso rádio. Como em geral as mensagens de controle não precisam de taxas elevadas e constantes a utilização destes canais que são multiplexados de uma forma diferente (sem a periodicidade demandada pelos canais de tráfego), reduzindo assim o desperdício de utilização dos recursos.

Os esquemas de mapeamentos destes canais na multiplexação dos canais de controle dependem fortemente da carga de sinalização demandada. Os dimensionamentos destes canais de controle foram vistos em detalhes no capítulo (Dimensionamento de Tráfego GSM)

Slow Associated Control Channel (SACCH)

Este canal de controle é responsável por trocas de mensagens de sinalização não prioritárias quando o terminal móvel esta com uma chamada em andamento. Esse canal opera com uma taxa de transmissão baixa e seu mapeamento (diferentemente do IS-136 [REF 6]), não é feito dentro de um campo do *slot* de tráfego e sim multiplexado dentro de um multiquadro de tráfego (detalhes deste mapeamento serão vistos adiante).

O SACCH pode estar associado a um canal TCH ou a um canal SDCCH. Por trocar sinalização sem interromper a troca de dados do usuário, é comumente chamado de canal de sinalização *out band*.

No enlace reverso este canal é utilizado pelo terminal móvel para enviar a média das medidas feitas no *downlink* da servidora (BER e RSSI) e das vizinhas (RSSI). Estas medições são fundamentais para se atualizar constantemente a

qualidade do enlace rádio e monitorar os possíveis candidatos ao *handover*. No *downlink* este canal é utilizado pela BTS, para enviar ao terminal móvel informações sobre a potência de transmissão a ser usada e instruções para o avanço temporal (*timing advanced*).

Este canal quando associado ao SDCCH tem o único objetivo de enviar medidas feitas pelo terminal durante o modo *idle*.

Fast Associated Control Channel (FACCH)

Este canal de controle tem os mesmo objetivos do SACCH e também é utilizado quando o terminal está com chamada em andamento. Contudo, as informações trocadas por ele são de altíssima prioridade, devido a esta prioridade o tempo para a troca de mensagens deve ser o menor possível, para isto, os dados são enviados pelo canal de tráfego do usuário, substituindo por completo a transmissão de dados deste numa técnica conhecida como *blank and burst* [REF 6].

A diferenciação entre dados do usuário e dados de sinalização no *slot* de tráfego é realizada através do campo *stealing flag*. O sistema IS-95 [REF 6] neste aspecto apresenta uma vantagem sobre o GSM, pois o tráfego de sinalização durante uma chamada, é realizada de forma adaptativa variando-se a taxa de transmissão, desde uma transmissão *out-band* até uma transmissão *in-band* [REF 6], permitindo assim maior flexibilidade no uso de sinalização durante a conversação.

Este tipo de sinalização é denominado de *in-band*, pois interrompe o fluxo de dados do usuário, ocorrendo em alguns casos um *click* na conversação. Um exemplo típico de mensagem que é trafegada por este canal é a mensagem *handover command*.

Cell Broadcast Channel (CBCH)

Este canal de controle é utilizado somente no *downlink* (contrariando as características dos canais DCCH), para transmitir *SMS broadcast* e usa o mesmo canal físico do SDCCH. Em certos momentos quando a rede deseja transmitir mensagens SMS para todos os terminais, um *slot* do SDCCH é substituído para que a mensagem seja enviada.

Multiplexação dos Canais Lógicos

Após os canais lógicos serem mapeados nos seus referidos *time slots*, estes são ordenados em quadros (*frames*). Cada portadora possui um *frame* (quadro) que pode suportar até 8 *time slots*. Estes quadros são cuidadosamente multiplexados em combinações de quadros denominadas multiquadros (*multiframes*). Estes multiquadros possuem certas combinações e regras de formações as quais dependem da aplicação que está sendo feita (ver item 5.3.3).

Os multiquadros são multiplexados em estruturas superiores denominadas superquadros (*superframes*) que enfim são novamente multiplexados em uma estrutura final de multiplexação chamada de hiperquadro (*hyperframe*). Note que toda a estrutura de multiplexação parte da unidade básica (*basic physical channels*) que são os *time slots*.

Na figura abaixo ilustra como é o esquema de multiplexação.

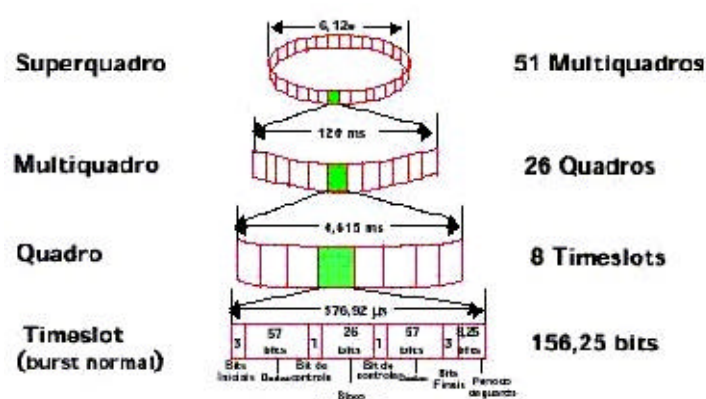


Figura 1 Estruturas de Multiplexação

A estrutura de multiplexação apresenta uma importância fundamental no funcionamento do sistema. Devido à estruturação periódica do *multiplex*, as informações lidas pelo terminal móvel só se alteram em intervalos de tempo definidos, otimizando assim sua leitura, fazendo com que haja uma economia na bateria dos terminais e redução de carga de sinalização na rede.

A organização desta estrutura também permite que as diversas funções da rede sejam realizadas de forma mais eficiente.

Combinações dos Canais de Lógicos:

Os canais de tráfego e de controle possuem combinações peculiares dos seus canais lógicos. Essas combinações geram os multiquadros de tráfego e de controle [REF 2]. Veremos agora as possíveis combinações suas características e funcionalidades:

Possíveis combinações dos canais de tráfego

I – TCH/FS + FACCH/FS + SACCH/FS

II – TCH/HS (0, 1) + FACCH/HS (0, 1) + SACCH/HS (0,1)

III - TCH/HS (0) + FACCH/HS (0) + SACCH/HS (0) + TCH/HS (1)

O FACCH embora colocado como elemento da combinação do multiquadro, não aparece neste pois compartilha o mesmo *slot* do TCH

Possíveis combinações dos canais de controle:

I – FCCH + SCH + CCCH + BCCH

II – FCCH + SCH + CCH + BCCH + SDCCH/4 + SACCH/4

III – CCCH + BCCH

IV – SDCCH/8 + SACCH/8

Estrutura e Combinações do Multiquadro de Tráfego:

Estrutura do Multiquadro de Tráfego:

Basicamente esse multiquadro é formado por 26 quadros de canais de tráfego (lembrando que em cada quadro temos 8 *slots* de TCH). A estruturação deste multiquadro foi feita da seguinte forma:

Dos 26 quadros apenas 24 transportam dados dos terminais, onde os dois *frames* restantes transportam os canais SACCH associados aos canais TCH.

O padrão GSM permite que sejam utilizadas duas taxas distintas de codificação de voz do usuário. A escolha da penetração de canais com meia taxa, fica a critério da operadora, com o compromisso qualidade x capacidade de tráfego.

A multiplexação é realizada **slot a slot**, → É importante ressaltar que no modo *full rate*, cada usuário é “dono” de um multiquadro, superquadro e hiperquadro, ou seja, cada usuário tem sua própria estrutura de multiplexação

Tem-se abaixo um esquemático de um multiquadro de tráfego. Se um usuário estiver alocado na portadora C1 no *time slot* zero (TS0), o multiquadro formado para este terminal terá a seguinte característica:

Em cada *frame* do multiquadro, haverá a transmissão de apenas o *time slot* zero, referente ao usuário ficando o restante do tempo o terminal mudo. Neste intervalo de tempo onde outros terminais transmitem, onde os terminais “mudos” executam operações de rotina tais como medições da qualidade das BTS vizinhas e da própria BTS.

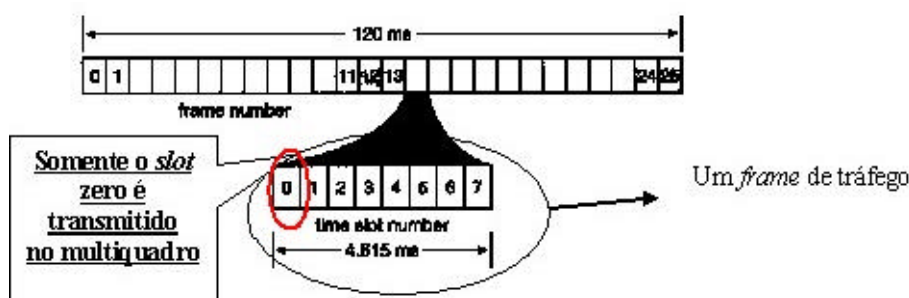


Figura 2 Multiquadro de Tráfego

Combinações de Multiquadro de Tráfego:

Combinação I: *TCH/FS* + *FACCH/FS* + *SACCH/FS*

Nesta combinação somente um canal *TCH/FS* é transmitido no multiquadro. Os primeiros 12 quadros transportam dados de tráfego, o décimo terceiro quadro transporta o *slot* do *SACCH* associado a esse canal de tráfego. Nessa combinação o último quadro fica em *idle*.

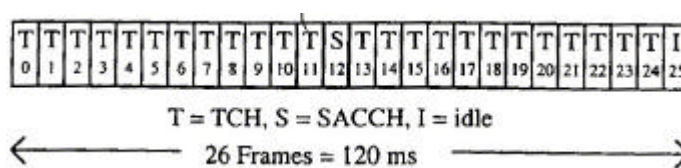


Figura 3 Combinação I - Multiquadro de Tráfego

Combinação II: *TCH/HS (0,1)* + *FACCH/HS (0,1)* + *SACCH/HS (0,1)*

Esta combinação é utilizada quando a rede possui terminais com *vocoder* de meia taxa, que utilizam canais *TCH/HS*. Como a taxa de transmissão cai pela metade, a periodicidade na transmissão pode ter seu tempo dobrado, isto faz com que se possa alocar mais uma transmissão de um usuário sem comprometer o desempenho do sistema.

Com isso aloca-se o dobro de usuário numa mesma portadora, ou seja, aonde se podia alocar no máximo 8 usuários TCH/FS, agora podem ser alocados até 16 usuários TCH/HS. O preço a se pagar, é a degradação na qualidade de voz dos terminais (por utilizarem codificadores com metade da taxa). Quando se utilizam canais *half rate*, alocam-se dois usuários distintos para uma mesma estrutura de multiquadro.

Com o número de usuários dobrado, será necessário também o dobro de SACCH's associados, este novo quadro de SACCH ficará alocado no quadro 25 que anteriormente estava em *idle*.



Figura 4 Combinação II - Multiquadro de Tráfego

A nomenclatura da combinação TCH(0,1) indica que nesta estrutura existem 2 usuários (0 e 1) distintos, onde cada um necessita de seu próprio canal SACCH e FACCH associado.

Combinação III: TCH/HS (0) + FACCH/HS (0) + SACCH/HS (0) + TCH/HS(1)

Nesta última combinação, é utilizada por terminais que trafegam no canal de meia taxa de forma idêntica a combinação II, exceto por uma diferença. O segundo canal TCH não possui canais associados SACCH nem FACCH.

Esta discrepância se dá pelo fato, de que neste caso o outro canal TCH/HS não pertence a outro terminal e sim a um mesmo terminal para transmissão de dados, não havendo necessidade de se transmitir dois canais de controle para este.



Figura 5 Combinação III- Multiquadro de Tráfego

Estrutura e Combinações do Multiquadro de Controle:

Estrutura do Multiquadro de Controle:

Basicamente este multiquadro é composto por 51 quadros TDMA de controle. A estrutura de controle apresenta uma variedade maior de combinações, pois estas mensagens não necessitam de uma taxa de transmissão constante. A estrutura de multiplexação é montada da seguinte forma:

- Qualquer canal de controle (excluindo o SDCCH/8) é sempre transmitido pela portadora C0, ou seja, nesta portadora “abrigará” a estrutura de multiplexação pertencente a quase todos os canais de controle.
- Em uma mesma portadora podem ser transmitidos *time slots* de controle e tráfego, por isto a melhor forma de se entender este processo é imaginando-se a unidade básica de multiplexação um *slot* (que corresponde a um canal físico).
- A estruturação dos canais de controle em multiquadros apresentam diferenças entre *uplink* e *downlink*. Devido ao fato de existirem canais que só a BTS transmite ou só o terminal transmite.
- O tipo de combinação utilizado está intimamente ligado com as características de tráfego existentes na célula. Esta dependência será melhor analisada no capítulo de Dimensionamento de Tráfego GSM

Combinações de Multiquadro de Controle:

Combinação I: FCCH + SCH + CCCH + BCCH

Esta combinação apresenta diferentes estruturas nos enlaces direto e reverso. Nesta estão sendo transmitidos os canais de controle da classe BCH (*broadcast control channels*) e CCCH (*common control channels*). Todos estes canais de controle desta estrutura de multiplexação são transmitidos pela portadora C0 no TS0.

Esta combinação é responsável por transmitir as informações gerais de controle da BTS (canais BCH) e informações de canal comum (canais CCCH).

Os quadros reservados para os canais CCCH podem transmitir qualquer canal desta classe.

Note que nesta combinação não há a presença de canais SDCCH, com isso esta combinação deve ser sempre usada com alguma outra que possui canais SDCCH, caso contrário a rede não terá recursos disponíveis para troca de sinalização com os terminais.

No *uplink* são transmitidos os canais *RACH*, onde os terminais disputam os canais dedicados de controle. A figura abaixo ilustra a estrutura de canal reverso dessa combinação.

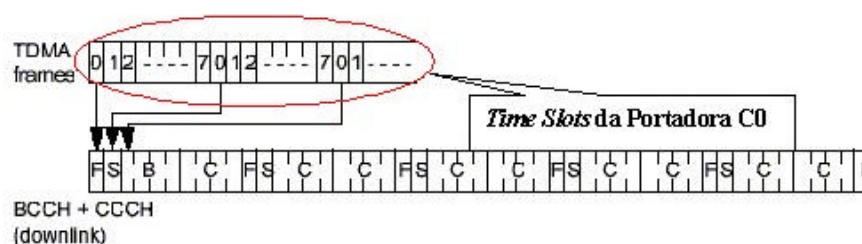


Figura 6 Combinação I - Multiquadro de Controle

A seqüência de 4 quadros CCCH é conhecida por bloco de *paging* (*paging block*). Nesta combinação existem 9 *paging blocks*.

O *time slot* TS0 transmite 4 tipos de canais diferentes, isto somente é possível pelo fato de que estes canais necessitam de taxas mais baixas de transmissão.

Combinação II: FCCH + SCH + CCH + BCCH + SDCCH/4 + SACCH/4

Esta estrutura é conhecida como CCCH combinado. Nesta combinação são transmitidos os mesmos canais lógicos da combinação I, com a inclusão de canais dedicados SDCCH/4. Isso permite que todas as trocas de mensagens necessárias para o funcionamento da rede sejam realizadas.

Esta combinação é utilizada por células que necessitam de pequenas cargas de sinalização (especialmente de SDCCH e CCCH). Pois alguns *paging blocks* são substituídos por canais SDCCH/4, os quais podem sinalizar para até 4 móveis alternadamente.

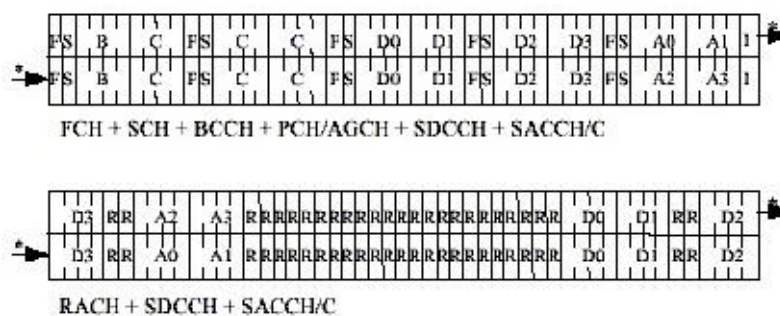


Figura 7 Combinação II - Multiquadro de Controle

Com relação às estruturas de canais direto e reverso, as transmissões de ambos estão defasadas permitindo que o terminal processe as informações oriundas do canal SDCCH/4 e emita uma resposta. No canal reverso, são transmitidos agora os canais *RACH* e os canais de retorno do SDCCH/4.

C – Combinação III: CCCH + BCCH

Esta combinação visa aumentar a capacidade de *paging* de uma célula em geral, é utilizada em conjunto com a combinação I para prover este aumento de *paging*.

Podem ser utilizados no máximo até três novos blocos de *paging*, excluindo aqueles utilizados na combinação I, os quais estão mapeados na portadora C0 TS0.

Os canais adicionais de CCCH são também transmitidos pela portadora C0 (mantendo o comportamento de que todos os canais de controle são transmitidos por esta portadora exceto o canal SDCCH/8), contudo cada novo bloco é transmitido nos *time slots* 2,4 e 6 respectivamente. Como age em conjunto com a combinação I, não há a necessidade de novos campos para FCCH e SCH.

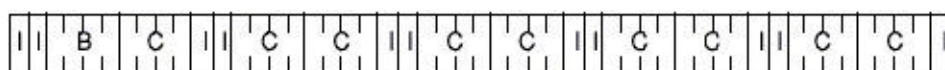


Figura 8 Combinação III - Multiquadro de Controle

D – Combinação IV: SDCCH/8 (0...7) + SACCH/8 (0...7)

Essa estrutura tem a finalidade de aumentar a capacidade de sinalização dos canais SDCCH. Por esta estrutura não possuir todos os canais de controle necessários, estes devem ser utilizados em conjunto com outras combinações,

onde juntas possam desempenhar toda as trocas de sinalização necessárias na rede.

São utilizadas então em conjunto com as combinações I e II. Nesta combinação cada *slot* adicional é alocado para o SDCCH/8 pode-se sinalizar para até oito terminais móveis e seus respectivos SACCH.

Este multiquadro é o único que possui um ciclo completo que dura na realidade 2 multiquadros, ou seja, possui ao todo ao invés de 51 quadros 102 quadros TDMA. Outro diferencial é que esta combinação de multiplexação não precisa estar sendo transmitida na portadora C0, podendo ocupar *time slots* de qualquer portadora, obedecendo ao limitante de 16 canais SDCCH/8, ou igual ao número de TRU's que existam na célula. Nesta estrutura, a transmissão de *uplink* e *downlink*, também está defasada para garantir um tempo entre comando-resposta do canal.

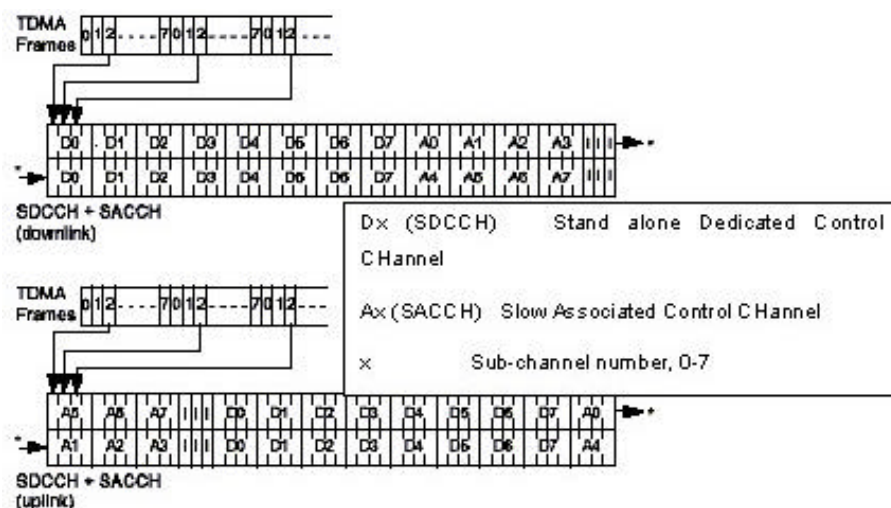


Figura 9 Combinação IV - Multiquadro