

MARCIO ANTONIO PROTZEK



**ESTUDO SOBRE OS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR
SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Descardecí

CURITIBA
2001

MARCIO ANTONIO PROTZEK

**ESTUDO SOBRE OS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR
SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Descardecí

CURITIBA
2001

U-32



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE MESTRADO

Aos vinte nove dias do mês de novembro de 2001, na sala PK-03 do Depto de Eletricidade no Centro Politécnico-UFPR, foi instalada pelo Prof. David Alexander Mitchell, coordenador do PIPE – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, a Banca Examinadora para a vigésima terceira Dissertação de Mestrado área de concentração: Telecomunicações. Estiveram presentes no Ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes.

A Banca Examinadora, atendendo determinação do Colegiado do Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, ficou constituída pelos Professores Doutores **José Ricardo Descardec** (Orientador Depto. De Eletricidade da UFPR), **Humberto Remigio Gamba** (CEFET - PR), **Eduardo Parente Ribeiro** (Depto. de Eletricidade - UFPR).

Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o(a) Candidato(a) **Marcio Antonio Protzek** a fazer a apresentação da dissertação intitulada “Estudo Sobre os Sistemas de Comunicação por Satélites Geoestacionários”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes.

Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca atribuiu as seguintes notas: Prof. Dr. José Ricardo Descardec Nota: 10.0, Prof. Dr. Humberto Remigio Gamba, Nota: 10.0. Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro Nota: 9.0. A média obtida: 9.7, resulta na APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos Artigos 61,62,63,64 da Resolução 38/96 de 14.06.96), e corresponde ao conceito A/B/C/D.

Curitiba, 29 de novembro de 2001.

Prof. Dr. José Ricardo Descardec

Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro

Prof. Dr. Humberto Remigio Gamba

**A Deus,
que é Pai e é Bom!**

**A Dilma, querida esposa
que, sem sua paciência, serenidade e força,
esse trabalho não seria possível.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. José Ricardo Descardecí, pelo acompanhamento, revisão e críticas ao estudo, que permitiram o sucesso desse trabalho . Agradeço, em especial, pelo grande incentivo.

Aos professores do curso de mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná pelo profissionalismo, dedicação e apoio.

Aos colegas do curso de mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná pelo companheirismo e colaboração.

Ao professor Gilberto Branco, coordenador dos cursos de Tecnologia e Técnico do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, pelo incentivo.

Ao Departamento de Eletrônica e Telecomunicações do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná por fornecer as condições necessárias para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

*Qualquer tecnologia
suficientemente avançada
é indistinguível da magia.*

Arthur C. Clarke

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | viii |
| LISTA DE QUADROS | x |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xi |
| RESUMO | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.2 A ESTRUTURA DO TRABALHO | 2 |
| 2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES | 4 |
| 2.1 O SEGMENTO ESPACIAL | 8 |
| 2.1.1 A órbita geoestacionária | 8 |
| 2.1.1.1 Condição de altitude para órbita geoestacionária | 14 |
| 2.1.1.2 Características e problemas da órbita geoestacionária | 16 |
| 2.1.1.3 Área de cobertura de um satélite geoestacionário | 18 |
| 2.1.1.4 Latitude máxima permitida para as estações terrenas | 21 |
| 2.1.1.5 Principais perturbações na órbita dos satélites geoestacionários | 21 |
| 2.1.1.6 Eclipse do Sol pela Terra para um satélite geoestacionário | 23 |
| 2.1.2 O satélite | 25 |
| 2.1.2.1 Preliminares | 25 |
| 2.1.2.2 O subsistema de comunicações | 27 |
| 2.1.2.2.1 O receptor | 28 |
| 2.1.2.2.2 Os filtros e multiplexadores | 29 |
| 2.1.2.2.3 O amplificador de alta potência | 30 |
| 2.1.2.2.4 As antenas | 33 |
| 2.2 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO E MÚLTIPLO ACESSO | 39 |
| 2.2.1 Técnicas de transmissão/multiplexação | 40 |
| 2.2.2 Técnicas de múltiplo acesso | 45 |
| 2.2.2.1 Preliminares | 45 |
| 2.2.2.2 O FDMA | 46 |
| 2.2.2.3 O TDMA | 53 |
| 2.2.2.4 O CDMA | 64 |
| 2.2.2.5 A alocação fixa e sob demanda | 69 |
| 2.2.2.6 O acesso randômico | 75 |
| 2.2.2.6.1 A técnica Aloha Pura | 75 |
| 2.2.2.6.2 A técnica Aloha Discreta | 79 |
| 2.3 O ENLACE DE SATÉLITE | 81 |
| 2.3.1 Considerações | 81 |
| 2.3.2 A análise básica do enlace | 82 |
| 3 A TECNOLOGIA ASSOCIADA ÀS ESTAÇÕES TERRENAS | 90 |
| 3.1 A ESTAÇÃO TERRENA PADRÃO | 90 |
| 3.1.1 O subsistema de banda básica | 92 |
| 3.1.2 O subsistema de frequência intermediária | 95 |
| 3.1.3 O subsistema de radiofrequência | 97 |
| 3.1.4 O subsistema de antena | 97 |
| 3.1.4.1 O ganho da antena | 98 |
| 3.1.4.2 Os tipos de antenas | 102 |
| 3.1.4.2.1 A antena com refletor parabólico simétrico | 103 |
| 3.1.4.2.2 A antena com refletor parabólico <i>Offset</i> | 105 |
| 3.1.4.2.3 A antena com montagem Cassegrain | 105 |
| 3.1.4.2.4 A antena com montagem Gregoriana | 108 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.4.3 Os sistemas com dupla polarização | 109 |
| 3.1.5 Exemplo de composição entre subsistemas | 112 |
| 3.1.6 O subsistema de rastreamento | 113 |
| 3.1.7 O subsistema de energia | 117 |
| 4 APLICAÇÕES, SERVIÇOS E ARQUITETURAS DE REDE | 119 |
| 4.1 AS REDES VSAT | 119 |
| 4.2 SERVIÇOS DE DIFUSÃO VIA SATÉLITE | 132 |
| 4.3 SERVIÇO MÓVEL VIA SATÉLITE | 137 |
| 4.4 SERVIÇOS IP SOBRE PLATAFORMAS DE SATÉLITE | 141 |
| 4.5 SISTEMA DE SATÉLITE PARA SERVIÇOS MULTIMÍDIA | 143 |
| 4.6 EXEMPLO DE SERVIÇO MULTIMÍDIA INTERATIVA APLICADO À MEDICINA | 146 |
| 4.7 EXEMPLO DE NOVAS ARQUITETURAS DE REDES DE SATÉLITES | 149 |
| 4.7.1 Redes de satélites transparentes | 150 |
| 4.7.1.1 Redes fixas ATM | 150 |
| 4.7.1.2 Redes ATM para terminais móveis | 151 |
| 4.7.1.3 Redes ATM móveis | 152 |
| 4.7.2 Redes de satélites com processamento de bordo | 153 |
| 5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES | 155 |
| 5.1 DISCUSSÕES | 155 |
| 5.2 CONCLUSÕES | 165 |
| 5.3 TRABALHOS FUTUROS | 168 |
| REFERÊNCIAS | 170 |
| ANEXO 1 - ÁREA DE SUPERFÍCIE DE FIGURA SÓLIDA (SEGMENTO DE ESFERA) | 176 |
| ANEXO 2 - CONSÓRCIOS DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE | 178 |
| ANEXO 3 - DADOS SOBRE SATÉLITES DE COMUNICAÇÃO | |
| GEOESTACIONÁRIOS | 184 |
| PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS | 187 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| FIGURA 1 - ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE | 4 |
| FIGURA 2 - ÂNGULOS DE ELEVAÇÃO E DE AZIMUTE..... | 9 |
| FIGURA 3 - O DIA SIDERAL E SOLAR | 10 |
| FIGURA 4 - ÓRBITAS GEOSSÍNCRONAS E GEOESTACIONÁRIAS..... | 13 |
| FIGURA 5 - ÁREA DE COBERTURA DE UM SATÉLITE GEOESTACIONÁRIO | 19 |
| FIGURA 6 - GEOMETRIA APROXIMADA DE UM ECLIPSE | 24 |
| FIGURA 7 - DURAÇÃO REAL DOS ECLIPSES EM FUNÇÃO DO CALENDÁRIO | 25 |
| FIGURA 8 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE <i>TRANSPONDER</i> NA BANDA C | 27 |
| FIGURA 9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM RECEPTOR DE 6 GHZ | 29 |
| FIGURA 10 - EXEMPLO DE UM CONJUNTO FILTRO-MULTIPLEXADOR PARA BANDA C | 30 |
| FIGURA 11 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM TUBO DE ONDAS CAMINHANTES..... | 32 |
| FIGURA 12 - CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DO TWTA..... | 32 |
| FIGURA 13 - EXEMPLO SIMPLIFICADO DE UMA CORNETA | 33 |
| FIGURA 14 - REDE DE CORNETAS USADA PELO TRANSMISSOR DO SATÉLITE..... | 34 |
| FIGURA 15 - EXEMPLO DE <i>FOOTPRINT</i> DO SATÉLITE | 36 |
| FIGURA 16 - DIAGRAMA DO <i>TRANSPONDER</i> DO INTELSAT VA | 38 |
| FIGURA 17 - CONCEITO DO SISTEMA FDMA..... | 47 |
| FIGURA 18 - CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO SISTEMA FDMA..... | 54 |
| FIGURA 19 - ESTRUTURA DO QUADRO TDMA..... | 55 |
| FIGURA 20 - ESTRUTURA DO <i>BURST</i> TDMA | 57 |
| FIGURA 21 - ESTRUTURA DO QUADRO TDMA..... | 60 |
| FIGURA 22 - CONCEITO BÁSICO DO SISTEMA SS-TDMA..... | 63 |
| FIGURA 23 - EXEMPLO DO DS - (<i>DIRECT SEQUENCE SPREADING</i>)..... | 66 |
| FIGURA 24 - SISTEMA DAMA DE CONTROLE CENTRALIZADO..... | 71 |
| FIGURA 25 - SISTEMA DAMA DE CONTROLE DISTRIBUÍDO | 72 |
| FIGURA 26 - PLANO DE FREQUÊNCIA SPADE..... | 73 |
| FIGURA 27 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM TERMINAL SPADE..... | 74 |
| FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DE UM PROTOCOLO ALOHA DE MÚLTIPLO ACESSO | 76 |
| FIGURA 29 - PERÍODO DE VULNERABILIDADE DE UM PROTOCOLO ALOHA..... | 77 |
| FIGURA 30 - THROUGHPUT VERSUS TRÁFEGO DE CANAL PARA SISTEMA ALOHA | 78 |
| FIGURA 31 - RETARDO MÉDIO DE PACOTES VERSUS <i>THROUGHPUT</i> PARA UM CANAL ALOHA..... | 79 |
| FIGURA 32 - PERÍODO DE VULNERABILIDADE DE UM PROTOCOLO <i>SLOTTED</i> ALOHA | 80 |
| FIGURA 33 - <i>THROUGHPUT</i> VERSUS TRÁFEGO DE CANAL PARA <i>SLOTTED</i> ALOHA | 81 |
| FIGURA 34 - ENLACE BÁSICO DO SATÉLITE..... | 82 |
| FIGURA 35 - DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DE UMA ESTAÇÃO TERRENA..... | 92 |
| FIGURA 36 - EXEMPLO DO GANHO DE UMA ANTENA PARABÓLICA..... | 99 |
| FIGURA 37 - POSSÍVEL DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM UMA ANTENA SIMÉTRICA..... | 100 |
| FIGURA 38 - ANTENAS TIPO CORNETA..... | 103 |
| FIGURA 39 - ANTENA COM REFLETOR PARABÓLICO SIMÉTRICO | 104 |
| FIGURA 40 - ANTENA COM REFLETOR PARABÓLICO <i>OFFSET</i> | 105 |
| FIGURA 41 - A ANTENA CASSEGRAIN | 106 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 42 - O REFLETOR EQUIVALENTE DE UMA ANTENA CASSEGRAIN | 107 |
| FIGURA 43 - A ANTENA GREGORIANA..... | 109 |
| FIGURA 44 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM ALIMENTADOR COM POLARIZAÇÃO ORTOGONAL | 110 |
| FIGURA 45 - EXEMPLO DE MONTAGEM DE ANTENA E EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÃO..... | 113 |
| FIGURA 46 - DIAGRAMA POLAR COM OS PONTOS DE MÁXIMO DOS GUIAS DE ONDA SECUNDÁRIOS | 115 |
| FIGURA 47 - ALIMENTADOR DE RF USANDO SISTEMA EBS..... | 116 |
| FIGURA 48 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA EBD..... | 117 |
| FIGURA 49 - EXEMPLO DE REDE VSAT | 122 |
| FIGURA 50 - CONCEITO DOS DISPOSITIVOS DA REDE VSAT | 123 |
| FIGURA 51 - ARQUITETURAS LÓGICAS VSAT EM ESTRELA E MESCLA TOTAL | 124 |
| FIGURA 52 - CONCEITO DOS EMULADORES DE <i>POLLING</i> EM UMA REDE VSAT | 126 |
| FIGURA 53 - REDE VSAT OPERANDO COM FDMA E TDMA..... | 130 |
| FIGURA 54 - REDE VSAT CHRYSLER PENTASTAR NETWORK..... | 132 |
| FIGURA 55 - SERVIÇO DBS <i>BROADCASTING</i> DE TV E DADOS KOREASAT | 135 |
| FIGURA 56 - SISTEMA DBS EMPREGADO NO JAPÃO | 136 |
| FIGURA 57 - SISTEMA MSS DO TIPO REDE TELEFÔNICA..... | 139 |
| FIGURA 58 - SISTEMA MSS DO TIPO REDE PRIVATIVA..... | 140 |
| FIGURA 59 - SERVIÇOS IP EM PLATAFORMA DE SATÉLITE..... | 143 |
| FIGURA 60 - REDE OPERANDO COM SERVIÇOS MULTIMÍDIA | 145 |
| FIGURA 61 - SISTEMA MULTIMÍDIA <i>BROADCAST</i> COM APLICAÇÃO EM MEDICINA..... | 149 |
| FIGURA 62 - EXEMPLO DE REDES DE SATÉLITES TRANSPARENTES..... | 152 |
| FIGURA 63 - EXEMPLO DE REDE DE SATÉLITE MULTISERVIÇO COM ALOCAÇÃO DE BANDA SOB DEMANDA..... | 154 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| QUADRO 1 - ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS NO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO..... | 7 |
| QUADRO 2 - ÓRBITAS PRIMÁRIAS DE TELECOMUNICAÇÕES | 13 |
| QUADRO 3 - COMPARAÇÃO ENTRE O PERÍODO E VELOCIDADE DE SATÉLITE PARA DETERMINADAS ALTITUDES..... | 16 |
| QUADRO 4 - PORCENTAGEM DA SUPERFÍCIE DA TERRA VISÍVEL POR UM SATÉLITE EM ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA COM UM ÂNGULO MÍNIMO DE ELEVAÇÃO ϕ | 20 |
| QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS DOS ESQUEMAS DE MÚLTIPLO-ACESSO | 68 |
| QUADRO 6 - EXEMPLOS DE SERVIÇOS E APLICAÇÕES PARA REDES VSAT | 120 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| A_{ef} | - área efetiva de uma antena |
| A_z | - ângulo de azimute verdadeiro |
| b_c | - largura de banda do canal telefônico onde o ruído tem maior valor |
| B | - largura de banda para o sinal FM |
| B_s | - taxa de bits por símbolo |
| β | - índice de modulação em FM |
| BO_i | - <i>backoff</i> de entrada |
| BO_o | - <i>backoff</i> de saída |
| c | - velocidade da luz no vácuo |
| C | - potência da portadora |
| C_w | - relação largura de banda / taxa possível de símbolos |
| C/N_e | - relação portadora/densidade efetiva de ruído |
| $(C/N)_d$ | - relação portadora/ruído de <i>downlink</i> |
| $(C/N)_i$ | - relação portadora/ruído de intermodulação |
| $(C/N)_s$ | - relação portadora/ruído total do sistema |
| $(C/N)_u$ | - relação portadora/ruído de <i>uplink</i> |
| d | - distância |
| d_H | - diâmetro do refletor auxiliar da antena Cassegrain |
| d_k | - conjunto de dados variáveis |
| d_s | - diâmetro do alimentador da antena Cassegrain |
| D | - diâmetro da antena |
| Δf_o | - desvio de frequência |
| e | - excentricidade |
| E_o | - amplitude da portadora |
| E_b/N_0 | - taxa de erro de bit |
| η | - distância angular percorrida pelo satélite entre o ponto intermediário do eclipse até emergir das sombras |
| η_a | - eficiência da abertura da antena |
| η_q | - eficiência do quadro |
| η_s | - eficiência do alimentador primário |
| f | - frequência |
| f_o | - frequência da portadora |
| f_d | - comprimento focal do refletor parabólico para antena Cassegrain |
| f_e | - comprimento focal para o parabolóide equivalente da antena Cassegrain |
| f_{el} | - comprimento focal do elipsóide para a antena Gregoriana |
| f_m | - frequência do sinal modulante |
| f_r | - desvio de frequência para um ponto de referência de 0 dBm |
| f_s | - comprimento focal do refletor hiperbólico para antena Cassegrain |
| F | - comprimento focal para a possível distribuição de potência em uma antena simétrica |
| F_1 | - primeiro foco do refletor auxiliar hiperbólico para antena Cassegrain |
| F_2 | - segundo foco do refletor auxiliar hiperbólico para antena Cassegrain |
| ϕ | - fase inicial da portadora |

| | | |
|--------------|---|---|
| ϕ_e | - | ângulo formado entre a reta centro da Terra/estação terrena e a reta centro da Terra/satélite |
| ϕ_{eq} | - | ângulo sólido do refletor equivalente para a antena Cassegrain |
| ϕ_i | - | ângulo de elevação |
| ϕ_o | - | metade do ângulo sólido |
| φ | - | densidade de potência irradiada por uma antena isotrópica |
| G | - | constante gravitacional universal |
| G_m | - | tráfego médio no canal do satélite (em pacotes) |
| G_t | - | ganho da antena transmissora |
| G/T | - | relação do ganho e temperatura de ruído |
| h | - | altitude |
| k | - | constante de Boltzmann |
| K_c | - | taxa de pacotes por segundo |
| L | - | atenuação no espaço livre |
| λ_o | - | comprimento de onda da frequência |
| m | - | massa do satélite |
| M | - | massa da Terra |
| M_e | - | margem de enlace total do sistema |
| N | - | potência de ruído térmico |
| N_o | - | densidade de ruído |
| N_e | - | potência efetiva de ruído |
| P_{co} | - | componente de co-polarização |
| P_{cross} | - | componente de polarização cruzada |
| P | - | probabilidade de pacotes no canal do satélite |
| P_r | - | potência entregue à carga pela antena |
| P_t | - | potência do HPA |
| P_L | - | perda de trajeto do <i>downlink</i> |
| r | - | distância do satélite ao centro da Terra |
| R | - | distância do satélite ao ponto P (estação terrena) |
| R_b | - | taxa de bits do enlace |
| R_e | - | raio da Terra |
| R_p | - | taxa de bit do enlace de transmissão do satélite |
| S_c | - | <i>throughput</i> do canal |
| S/N | - | relação sinal/ruído |
| t_s | - | tempo (período) para que o satélite complete uma volta em sua órbita |
| $t_{s(geo)}$ | - | tempo (período) para que o satélite complete uma volta na órbita geoestacionária |
| T | - | temperatura (K) |
| T_f | - | tempo total do quadro |
| T_g | - | tempo de guarda entre <i>bursts</i> |
| $T_{p,i}$ | - | preâmbulo do i -ésimo <i>burst</i> |
| T_x | - | <i>overhead</i> do quadro |
| τ | - | tamanho do pacote |
| τ_s | - | tempo de vida médio do satélite |
| θ | - | direção do máximo de irradiação da antena |
| V_s | - | vetor velocidade tangencial do satélite |
| W | - | largura de banda do <i>transponder</i> do satélite |
| ω_s | - | velocidade angular |

RESUMO

Este trabalho compreende um estudo sistêmico sobre a tecnologia da comunicação por satélites geoestacionários. Um extenso e exaustivo trabalho de levantamento bibliográfico foi inicialmente desenvolvido, para a coleta do material relacionado ao tema de pesquisa. Posteriormente, este material foi trabalhado, gerando como produção de conhecimento uma nova abordagem sobre a tecnologia envolvendo o sistema de comunicação por satélites (em particular, satélites geoestacionários). O trabalho aborda as principais características da órbita geoestacionária e do subsistema de comunicação dos satélites. São estudadas as principais técnicas de transmissão, multiplexação e acesso, sendo feita, inclusive, uma análise básica do enlace de radiocomunicação satélite/estação terrena. O estudo engloba, em adição, a estrutura das estações terrenas e são tomados vários exemplos que ilustram o emprego das diversas características do sistema de satélite, constituindo redes e fornecendo serviços. Por fim, são apresentadas discussões sobre o tema, análises conclusivas e perspectivas futuras do estudo em questão.

Palavras-chave: Telecomunicações; Comunicação via Satélite.

ABSTRACT

This thesis comprises a systemic study of satellite communication systems in geostacionary orbit. A comprehensive bibliographic research was initially performed to collect all relevant matherial. This matherial was compiled and studied in order to produce a broad overview of satellite communication systems (mainly for geostacionary satellites). This thesis verify the major features of geostacionary orbit and the communication subsystem of the satellites. It shows the most important transmission, multiplexation and access techniques. The basic link between the satellite and the ground station is also analysed. In addition, the structure of ground stations were also considered together with several examples of services and networks of geostacionary satellite communication systems. Finally, are done discussions about the subject and a conclusive analisys is performed with suggestions for future work.

Key-words: Telecommunications; Satellite communications.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Entre as diversas áreas do conhecimento humano, a de telecomunicações encontra-se entre aquelas que mais evoluíram nos últimos cem anos. Durante e logo após a Segunda Guerra Mundial, as telecomunicações tiveram significativo avanço, em especial nas áreas de rádio e microondas. Na verdade, esse evento pode ser considerado como um grande marco na evolução de diversas áreas da ciência como, por exemplo, a exploração espacial.

O primeiro encontro mais contundente das telecomunicações com a exploração espacial remonta ao início da segunda metade do século passado, quando foram realizados os primeiros experimentos utilizando a Lua como refletor passivo para transmissões feitas da superfície terrestre [1]. O lançamento, pelos soviéticos, do Sputnik, primeiro satélite artificial, em 1957 [2] acelerou a corrida espacial entre Estados Unidos e URSS (Guerra Fria). Sucederam-se ensaios com reflexão de sinais em balões infláveis metalizados (ECHO) e em 1960 foi colocado em órbita o primeiro satélite repetidor ativo (COURIER), um projeto patrocinado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos.

Sucederam-se diversos outros projetos subsidiados por empresas como os Laboratórios Bell, RCA, COMSAT, entre outras, sempre utilizando sofisticadas tecnologias tanto na construção dos satélites como nas estruturas de telecomunicações para as quais os satélites eram construídos.

Essa contínua evolução fez (e faz) com que se tenha hoje inúmeros satélites em funcionamento, prestando os mais variados tipos serviços para os mais diferentes segmentos da sociedade e em diversas localidades do planeta.

Portadores de complexa tecnologia nas estações espaciais, nas disciplinas de acesso aos recursos do sistema e de sofisticadas técnicas de transmissão, o conhecimento relacionado à comunicação por satélite tem estado restrito a poucas empresas e instituições de ensino, apesar dessa tecnologia ser amplamente utilizada.

Portanto, o objetivo deste trabalho é, através de extenso e exaustivo levantamento bibliográfico, explorar de forma conceitual os sistemas de comunicação por satélite que empregam a órbita geoestacionária. O estudo visa internar conceitos, definições, tecnologias e arquiteturas de rede destes sistemas, abordando seus principais aspectos.

1.2 A ESTRUTURA DO TRABALHO

Diversas são as abordagens possíveis para o estudo da comunicação por satélite. Nesse trabalho optou-se por dividir o assunto nas seguintes partes: o engenho satélite e o ambiente que o cerca, as estações terrenas e a estrutura de comunicação que conecta a estação terrena ao satélite e, finalmente, as aplicações, serviços e redes associados à comunicação por satélite.

Para atingir o objetivo definido anteriormente, tomou-se como escopo os satélites geoestacionários (ver seção 2.1.1) e sistemas a eles relacionados. O trabalho está dividido em 5 capítulos, focando aspectos particulares destes sistemas.

O Capítulo 1, trata dos aspectos motivacionais e objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 contém as principais características da órbita geoestacionária. Aborda-se, também neste capítulo, o subsistema de comunicação de um satélite geoestacionário e as principais técnicas empregadas para a otimização da banda de frequências e que é, efetivamente, o recurso a ser disponibilizado pelos satélites de comunicação. Assim, são estudadas as técnicas de transmissão, multiplexação e

acesso. Além disso, é fornecida uma análise básica do enlace de comunicações que interliga o satélite às estações terrenas.

A estação terrena é uma das estruturas que fazem parte do sistema de comunicação por satélite e tem, como uma de suas funções, a responsabilidade de servir de interface entre os usuários (ou entre suas redes) e o sistema de comunicação por satélite. A análise dessa estrutura é feita no Capítulo 3.

Todos os dispositivos e sistemas estudados operam em conjunto com o objetivo de fornecer uma determinada resposta (ou conjunto de respostas) esperada. Essa resposta, no caso das comunicações por satélite, é dada na forma de serviços, aplicações e arquiteturas de redes, que são os tópicos contidos no Capítulo 4. Neste capítulo, são tomados diversos exemplos que ilustram o emprego das diversas características do sistema de satélite.

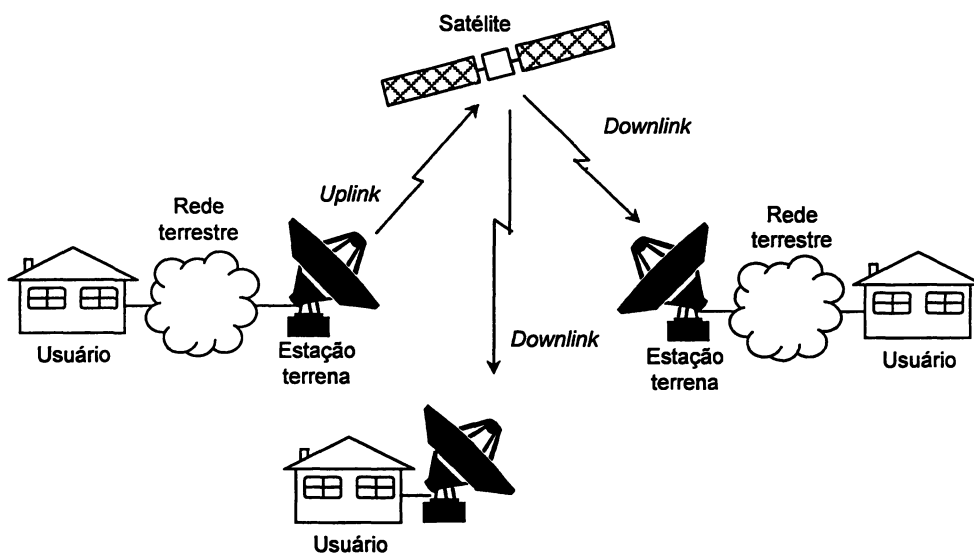
Finalmente, o último capítulo trata das discussões, conclusões e resultados alcançados com o presente estudo e as perspectivas de trabalhos futuros, geradas a partir do trabalho desenvolvido.

2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Um sistema envolvendo satélite consiste basicamente de um satélite (ou um conjunto de satélites) em órbita no espaço, conectado, através de enlaces de microondas, à diversas estações terrenas na superfície, como mostra esquematicamente a Figura 1.

Os usuários geram o sinal de informação que chega às estações terrenas através das redes terrestres, como a Rede Pública Comutada de Telefonia (RPCT), a Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI), ou uma Rede de Pacotes.

FIGURA 1 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE



Na estação terrena, o sinal é tratado e é adequado às condições de transmissão inerentes ao sistema de satélite. Dessa forma, uma estação terrena é composta por diversos dispositivos que permitem receber e transmitir informações para as redes terrestres, para o satélite e, através deste, para outras estações terrenas. Algumas estações exercem, também, a função de gerenciamento e

controle do sistema de satélite.

Após o processamento adequado, o sinal é transmitido para o satélite através de dispositivos apropriados para esse fim. O enlace de radiofrequência que interliga a estação terrena ao satélite, no sentido de transmissão do sinal, é conhecido como *uplink* [3], enquanto o enlace que interliga o satélite às estações terrena, também no sentido de transmissão, é conhecido como *downlink*. As frequências de *uplink* e *downlink* são diferentes para se evitar interferências.

O satélite é um engenho que pode ser entendido, na maioria das vezes, como um repetidor colocado no espaço e que recebe os sinais de microondas das estações terrenas, dentro do espectro de frequências de trabalho, e as retransmite de volta para a Terra, após fornecer determinados tratamentos ao sinal, como filtragens, amplificação e mudança de frequências (de *uplink* para *downlink*).

O sinal retransmitido pelo satélite é recebido por outra estação terrena componente do sistema que, novamente, trata o sinal e o entrega a rede terrestre a ela acoplada para que chegue ao usuário de destino. A transmissão estação terrena – satélite – estação terrena é chamada de “salto” simples. Quando uma transmissão originada por um usuário necessitar passar duas vezes pelo satélite, então tem-se um duplo “salto” (como, por exemplo, no caso de uma comunicação internacional de voz cuja chamada telefônica seja servida por dois sistemas diferentes de satélite).

As redes terrestres de comunicação têm diversas características que, muitas vezes, são consideradas como vantagens em relação a diversos outros sistemas. A comunicação por satélite também tem inúmeras características inerentes que, conforme a aplicação, são consideradas como vantagens. Entre as diversas características do sistema de comunicação por satélite, destacam-se [4]:

- a) ampla área de cobertura: esse sistema não é sensível à distâncias, ou seja, dentro de uma mesma área de cobertura do satélite, a distância entre duas estações terrenas que desejem se comunicar não afeta o sistema por satélites;

- b) capacidade de difusão: ou seja, é possível a transmissão ponto-multiponto onde uma estação pode transmitir informações para diversas outras, com um mesmo sinal;
- c) transmissão multiponto-ponto: é possível a transmissão reversa, ou seja, inúmeras estações terrenas transmitindo para uma única estação;
- d) simplicidade na conexão entre usuários: as redes terrestres são compostas por diversas centrais (comutação, trânsito, tandem, etc.); o trânsito da informação do usuário através de múltiplas centrais pode levar a degradação do sinal ou mesmo interrupção no fornecimento do serviço. Além disso, há o problema do *last mile* (última milha) que é o acesso do usuário à central que o serve. O sistema por satélite não têm essa multiplicidade de centrais e nem é afetado por problemas típicos da última milha (como por exemplo, as degradações típicas de antigos sistemas que usam o par metálico trançado para acesso aos assinantes);
- e) flexibilidade: novos circuitos de comunicação podem ser ligados rapidamente devido à facilidade de instalação de novas estações terrenas sob a área de cobertura do satélite;
- f) tratamento de tráfego assimétrico: os canais de comunicação do sistema por satélite não necessitam ter a mesma taxa de transmissão de informações nos dois sentidos de transmissão. Isto porque, as informações transmitidas e recebidas são tratadas em estruturas de comunicação diferentes;
- g) largura de banda: os satélites de comunicação possuem grande flexibilidade em relação à largura de banda de frequências, podendo trabalhar tanto com aplicações que requeiram uma banda estreita como com aquelas que necessitem de banda larga .
- h) obstrução do sinal: dependo da posição relativa entre o satélite e a

estação terrena e do local onde a estação está instalada, pode ocorrer obstruções no enlace de microondas (conexão satélite-estação) e cuidados especiais devem ser tomados no dimensionamento do enlace para evitar-se degradações na comunicação devido a esses problemas;

- i) retardo de transmissão: como o satélite localiza-se a uma distância significativa da superfície terrestre, o sinal de microondas terá um certo retardo entre as estações terrenas e a plataforma espacial. Esse retardo deve ser considerado no projeto do sistema, conforme a aplicação a ser usada (voz, dados, etc.).

Com relação ao espectro eletromagnético de frequências, o Quadro 1 traz um resumo de parte da tabela de alocação desse recurso, conforme as definições do ITU (International Telecommunication Union) e do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [5].

| QUADRO 1 - ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS NO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO | | | | |
|--|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|
| IEEE | | ITU | | |
| Designação | Banda | Banda | Nº da Banda | Designação |
| UHF | 300 MHz - 1.000 MHz | 0,3 GHz - 3 GHz | 9 | Ultra high frequency (UHF) |
| L | 1 GHz - 2 GHz | | | |
| S | 2 GHz - 4 GHz | 3 GHz - 30 GHz | 10 | Super high frequency (SHF) |
| C | 4 GHz - 8 GHz | | | |
| X | 8 GHz - 12 GHz | | | |
| Ku | 12 GHz - 18 GHz | | | |
| K | 18 GHz - 27 GHz | | | |
| Ka | 27 GHz - 40 GHz | | | |
| V | 40 GHz - 75 GHz | 30 GHz - 300 GHz | 11 | Extremely high frequency (EHF) |
| W | 75 GHz - 110 GHz | | | |
| Milimétricas | 110 GHz - 300 GHz | | | |

Empregando-se a nomenclatura do IEEE, o espectro de frequências utilizado para a comunicação via satélite encontra-se entre as bandas L e Ka [6].

2.1 O SEGMENTO ESPACIAL

Os satélites de comunicação estão colocados em órbitas espaciais e operam em um ambiente diferente daquele encontrado na superfície terrestre. Nesse ambiente, há pouca atmosfera, baixa gravidade, dificuldades de acesso para manutenções e não há suportes físicos de sustentação [7]. Além disso, é nesse ambiente que o satélite descreve sua órbita.

2.1.1 A órbita geoestacionária

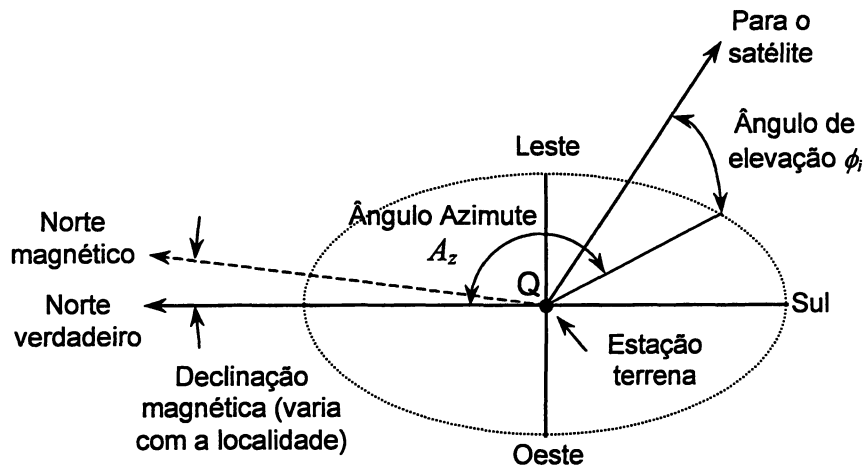
A órbita é a trajetória seguida pelo satélite. A trajetória encontra-se dentro de um plano, chamado plano de órbita, e tem o formato de uma elipse com uma extensão máxima no apogeu e mínima no perigeu. O satélite desloca-se mais lentamente em sua trajetória quando a distância para a Terra aumenta.

São necessários dois ângulos para localizar o satélite de um ponto Q na superfície da Terra. Esses ângulos são conhecidos como ângulos de elevação e de azimute [3, 6]. A Figura 2, adaptada de [7], auxilia no entendimento desses ângulos. O ângulo de elevação ϕ_i é aquele entre o horizonte para o ponto Q considerado e o satélite, medido no plano contendo o ponto em questão, o satélite e o centro da Terra. Para um ponto diretamente abaixo do satélite a elevação é de 90° . Quando o apontamento é horizontal, o ângulo de elevação será 0° .

O ângulo de azimute A_z é aquele entre a direção do norte geográfico e a

interseção do plano contendo o satélite e o centro da Terra, medido no plano horizontal da localidade. Este ângulo varia entre 0° e 360° como uma função da posição relativa do satélite e o ponto Q considerado.

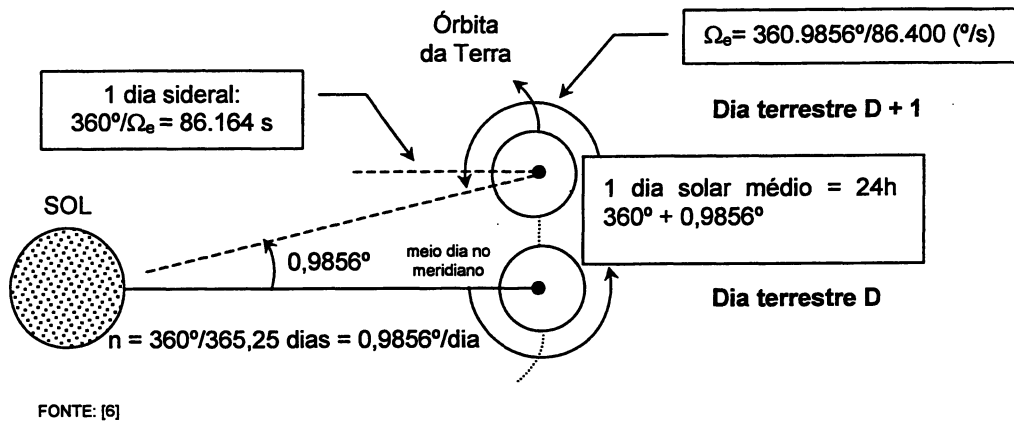
FIGURA 2 - ÂNGULOS DE ELEVAÇÃO E DE AZIMUTE



FONTE: [7]

O dia sideral é o tempo necessário para a Terra fazer uma rotação completa quando vista de alguma estrela distante, ou ainda, é o tempo entre a passagem consecutiva por um determinado meridiano terrestre de uma estrela distante qualquer. O dia sideral define o período de rotação da Terra e tem o valor de 23 horas, 56 minutos e 4,1 segundos ou 86.164,1 segundos. Já os retornos sucessivos do Sol para um determinado meridiano terrestre fornece o dia solar médio com duração de 24 horas ou 86.400 segundos. A diferença entre os dias solar e sideral está na rotação da Terra em torno do Sol que tem um valor médio de $0,9856^\circ$ por dia. A Figura 3 ilustra a diferença entre dia solar e dia sideral.

FIGURA 3 - O DIA SIDERAL E SOLAR



A excentricidade e da órbita pode ser expressa por:

$$e = \left(\frac{V_s^2 r}{\mu} \right) - 1 \quad (1)$$

onde V_s é a velocidade tangencial do satélite, r é a distância do satélite ao centro da Terra e $\mu = 3,9858528 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ é o produto entre a constante gravitacional universal G (constante de Cavendishi) e a massa da Terra M [3].

O satélite descreve uma trajetória cujo tipo de seção depende do valor da excentricidade e . Isolando-se V_s na Equação (1), tem-se [6]:

$$\text{a) } e=0 \Rightarrow V_s = \sqrt{\frac{\mu}{r}} \text{ (m/s): a trajetória será um círculo;} \quad (2)$$

$$\text{b) } e<1 \Rightarrow V_s < \sqrt{\frac{2\mu}{r}} \text{ (m/s): a trajetória será uma elipse;} \quad (3)$$

$$\text{c) } e=1 \Rightarrow V_s = \sqrt{\frac{2\mu}{r}} \text{ (m/s): a trajetória será uma parábola;} \quad (4)$$

$$\text{d) } e>1 \Rightarrow V_s > \sqrt{\frac{2\mu}{r}} \text{ (m/s): a trajetória será uma hipérbole.} \quad (5)$$

Valores para $e < 1$ correspondem a trajetórias em torno da Terra e são usadas para satélites de comunicação. Valores de $e \geq 1$ correspondem a trajetórias que levam os satélites a escaparem da atração gravitacional da terrestre, sendo usadas, por exemplo, para sondas espaciais.

Em princípio, o plano de órbita pode ter qualquer orientação e a órbita qualquer forma. Os parâmetros orbitais são determinados pela condições iniciais quando o satélite é colocado na órbita e, devido à inúmeras perturbações, esses parâmetros são alterados com o tempo, o que exige complexas operações de controle do satélite. Os custos dessas operações podem ser minimizados se forem escolhidos valores particulares de parâmetros orbitais e em conformidade com as limitações impostas pela missão de telecomunicações.

Os satélites geossíncronos – *geo*: relativo a Terra e *síncrono*: que tem mesmo período e fase [10] - têm uma órbita cujo período é o mesmo de um dia sideral, se a inclinação do plano de órbita for zero, e com período aproximadamente igual ao dia sideral, se a inclinação for diferente de zero. O satélite deve se deslocar na mesma direção de rotação da Terra. Estas são as únicas exigências para uma órbita geossíncrona. A órbita pode ser inclinada de qualquer ângulo em relação ao plano equatorial.

Se a inclinação da órbita é não nula, haverá uma oscilação na direção Norte-Sul (variação de latitude), com um período igual a um dia, e uma oscilação adicional na direção Leste-Oeste (variação de longitude), com um período de meio dia: o satélite, então, aparece descrevendo a figura de um “8” no céu [3]. A amplitude da oscilação Norte-Sul é igual ao da inclinação da órbita enquanto a amplitude Leste-Oeste se manterá tão pequena quanto for pequena a inclinação da órbita [11].

As antenas das estações terrenas necessitam de sistemas de rastreamento (*tracking*) para seguir o satélite. Os satélites geossíncronos são utilizados em situações onde: (1) as antenas das estações terrenas necessitem

naturalmente do sistema de *rastreamento*, como em plataformas móveis instaladas em barcos e aviões; (2) o alto custo do sistema de *rastreamento* das antenas não seja preponderante; (3) o raio de cobertura do satélite sobre a superfície da Terra seja global ou amplo, ou (4) o combustível para o controle do satélite na direção Norte-Sul esteja se esgotando. (5) Essa órbita também pode ser usada para o armazenamento de satélites antes de colocá-los em serviço [7].

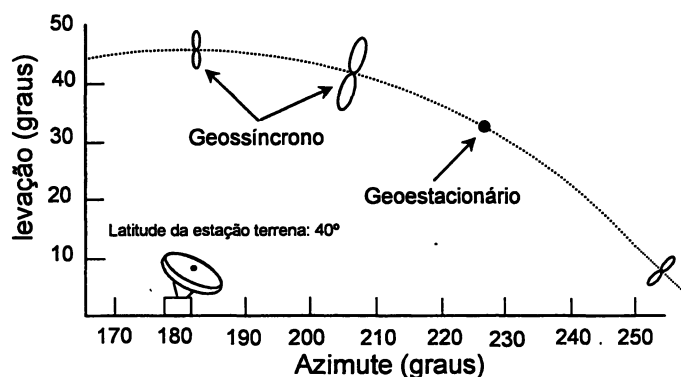
Um satélite geoestacionário tem o mesmo sincronismo e direção de rotação que um satélite geossíncrono sendo que a sua órbita está confinada às proximidades do plano equatorial da Terra, com inclinação essencialmente zero. Nas aplicações comerciais, a órbita desses satélites são circulares (o ponto mais distante, apogeu, e o mais próximo, perigeu, tem aproximadamente o mesmo comprimento); logo, sua excentricidade é zero. Nessas condições, o satélite não tem movimento em relação a um determinado ponto no Equador terrestre, ou seja, o satélite observa sempre a mesma porção da superfície da Terra. Dessa forma, os feixes oriundos tanto do satélite como da estação terrena não se movimentam o que simplifica os parâmetros de desenho e operação da estação terrena e da estação espacial. Assim: um satélite geoestacionário é sempre geossíncrono, mas o inverso não é verdadeiro.

Na prática, poucos satélites encontram efetivamente todas as condições teóricas necessárias para serem plenamente geoestacionários. Caso um satélite obtenha essa condição, ela não se manterá por muito tempo devido aos efeitos de diversos distúrbios (solar, lunar, e forças gravitacionais não simétricas) que perturbam os parâmetros das órbitas. Propulsores de bordo são necessários para fazer frente a essas forças naturais.

Embora não haja uma definição rígida para o limite entre órbitas geossíncronas e geoestacionárias, qualquer satélite que seja mantido em uma órbita com excentricidade nula e uma inclinação menor que aproximadamente 1° (um grau) é considerado como sendo geoestacionário. A Figura 4, que é uma representação

do satélite visto pela estação terrena (adaptada de [7]), e Quadro 2 ilustram a diferença entre órbitas geossíncronas e geoestacionárias.

FIGURA 4 - ÓRBITAS GEOSSÍNCRONAS E GEOESTACIONÁRIAS



Na Figura 4, o satélite em órbita geossíncrona tem inclinação não nula em relação ao plano do Equador e, portanto, terá uma oscilação Norte-Sul, cruzando a linha do Equador duas vezes ao dia. Dessa forma, do ponto de vista da estação terrena, o satélite descreverá a figura de um "8". Já o satélite geoestacionário, que tem inclinação essencialmente nula em relação ao Equador, será visto pela estação terrena como um ponto fixo no céu.

| QUADRO 2 - ÓRBITAS PRIMÁRIAS DE TELECOMUNICAÇÕES | | | | | | |
|--|--------------------|--------------|---------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| Tipo de órbita | Parâmetros Típicos | | | | | |
| | Apogeu (km) | Perigeu (km) | Excentricidade | Período | Inclinação (graus) | Alteração Doppler |
| Geoestacionária | 35.786 | 35.786 | essencialmente zero | 1 dia sideral | 0,0 ^a | nenhum ou baixo |
| Geossíncrona | 35.786 | 35.786 | normalmente perto de zero | 1 dia sideral | 0 – 90 | baixo |
| Baixa | vários | vários | entre zero e alta | 100 minutos ou mais | 0 - 90 | baixíssimo |

^a Valor prático típico: 0,1°

FONTE: [7]

Para que as antenas do satélite sempre vejam a mesma face da Terra durante a órbita geoestacionária ou o satélite deve girar sobre seu próprio eixo (que é o eixo paralelo ao da Terra) ou o sistema de antenas deve girar sobre o eixo sideral.

2.1.1.1 Condição de altitude para órbita geoestacionária

O tempo t_s para que o satélite complete uma volta em sua órbita deve satisfazer a equação:

$$\omega_s t_s = 2\pi \quad (rad) \quad (6)$$

onde ω_s é a velocidade angular que se relaciona com a velocidade tangencial por

$$V_s = r\omega_s \quad \text{m/s} \quad (7)$$

sendo r a distância do centro da Terra ao satélite. Dessa forma, trabalhando com as Equações (2), (6) e (7), tem-se:

$$t_s = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{2\pi r}{V_s} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{\mu}{r}}} = \frac{2\pi\sqrt{r^3}}{\sqrt{\mu}} \quad (s) \quad (8)$$

A distância r [7] e pode ser escrita como:

$$r = R_e + h \quad (m) \quad (9)$$

onde R_e é o raio da Terra e h a altitude. A União Astronômica Internacional (*International Astronomical Union*) recomenda que, desde 1976, o raio médio equatorial terrestre seja adotado como sendo $R_e = 6.378,144 \text{ km} = 6.378.144 \text{ m}$ [6].

Substituindo a Equação (9) na Equação (8), e isolando-se a altitude h , tem-se:

$$h = \sqrt[3]{\frac{\mu_s^2}{(2\pi)^2}} - R_e \quad (\text{m}) \quad (10)$$

Para que o satélite pareça estacionário para um observador na Terra, ele deve dar uma volta completa em um dia sideral, ou seja, 23h, 56 minutos e 4,091 segundo, ou 86.164,091 s. Substituindo os valores na Equação (10) tem-se:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3,9858528 \times 10^{14} \times (86.164,091)^2}{(2\pi)^2}} - 6.378.144 = 35.785,49 \text{ m} \quad (11)$$

ou seja, para que um satélite esteja em órbita geoestacionária, o mesmo deve estar em órbita circular ($e = 0$) sobre o Equador com uma altitude de aproximadamente 35.786 km [9].

A velocidade do satélite [3] é obtida pela Equação (12):

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{r}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_e + h}} = \sqrt{\frac{3.9858528 \times 10^{14}}{6.378.144 + 35.785.491}} = 2.974,62 = 3.074,62 \text{ m/s} \quad (12)$$

ou aproximadamente $V_s = 3,98 \text{ km/s}$.

O Quadro 3 mostra os valores de altitude, período e velocidade de satélites para alguns exemplos de órbitas circulares, considerando o raio médio da Terra como $R_e = 6.378 \text{ km}$. [7]

| QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE O PERÍODO E VELOCIDADE DE SATÉLITE PARA DETERMINADAS ALTITUDES | | | | |
|--|---------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Altitude h [km] | Raio r [km] | Período t_s [hr:min:seg] | Velocidade V_s [km/s] | Velocidade V_s [km/h] |
| 200 | 6.578 | 1:28:29 | 7,78 | 28.008 |
| 1.000 | 7.378 | 1:45:07 | 7,35 | 26.460 |
| 10.000 | 16.378 | 5:47:40 | 4,93 | 17.748 |
| 20.000 | 26.378 | 11:50:36 | 3,89 | 14.004 |
| 35.786 | 41.164 | 23:56:04 | 3,08 | 11.088 |

FONTE: [6, 7]

2.1.1.2 Características e problemas da órbita geoestacionária

O satélite em órbita geoestacionária apresenta uma série de vantagens sobre os demais tipos de órbitas, tais como [6, 7, 8]:

- a) o satélite está disponível para comunicações por todo o tempo;
- b) como o satélite permanece estacionário em relação à Terra, não há necessidade de estruturas de rastreamento automático na estação terrena, exceto para grandes estações;
- c) pelas mesmas razões, não há a necessidade da estação terrena chavear de um satélite para outro quando o primeiro desaparecer no horizonte;
- d) não há problemas de computação da órbita do satélite em função do dia e da hora para se estabelecer a comunicação;
- e) ampla área de cobertura o que se reflete na possibilidade de se estabelecer comunicações entre um grande número de estações terrenas;
- f) devido ao satélite não ter movimento em relação à estação terrena, erros de temporização TDMA, causados pelo efeito Doppler, são

pequenos. Quando o satélite move-se em relação à Terra, a distância relativa do satélite a um ponto da superfície terrestre varia. Uma taxa de variação da distância do satélite à Terra em relação ao tempo pode ser definida em relação ao ponto considerado. A variação positiva ou negativa da taxa causará, no receptor, um incremento ou decréscimo, respectivamente, da frequência da onda de rádio transmitida no enlace, que é conhecido como efeito Doppler [9]. Esse fenômeno ocorre tanto no *uplink* como no *downlink*.

A órbita geoestacionária está, também, associada a desvantagens, quais sejam:

- a) estações terrenas localizadas em regiões com latitude superior a $76,33^\circ$ não podem ser alcançadas [9] (ver seção 2.1.1.4);
- b) como o satélite está muito distante da Terra a potência recebida pela estação terrena, que é inversamente proporcional ao quadrado da distância, é bastante reduzida;
- c) também devido à distância, o sinal sofre um atraso no processo de comunicação [7]. As ondas eletromagnéticas propagam-se no espaço livre a uma velocidade próxima à da luz, ou seja, $c = 3 \times 10^8 \text{ km/s}$. Para que o sinal saia do transmissor e chegue ao receptor ele deve percorrer uma distância superior a $d = 2 \times 35.768 \text{ km} = 71.536 \text{ km}$ (a distância exata dependerá da localização das estações terrenas), que é a distância entre a estação terrena transmissora e o satélite e o satélite e a estação terrena receptora. Logo, um sinal transmitido levará $t = d/c$ (s) para chegar ao receptor da estação terrena. Como exemplo, se for considerada a distância $d = 75.000 \text{ km}$ haverá um atraso de $t = 0,25 \text{ s}$. Circuitos telefônicos de longa distância geralmente estão contaminados por eco devido à conversão dos sistemas de transmissão de 2 para 4 fios. A existência desse atraso contribuirá significativamente no

aumento do eco na transmissão. Em uma conversa telefônica, por exemplo, o interlocutor poderá ouvir sua própria voz 0,5 s depois de ter falado. Em sistemas de comunicação de dados, este atraso será contabilizado como um dos componentes do tempo de resposta o que influenciará diretamente na escolha dos protocolos de comunicação a serem utilizados nos códigos de controle de erros, entre outros. De qualquer forma, qualquer tipo de comunicação sofrerá influência desse atraso no projeto topológico uma vez que a ocorrência de múltiplos saltos podem levar a tempos que inviabilizem o sistema.

2.1.1.3 Área de cobertura de um satélite geoestacionário [3, 7]

A área de cobertura de um satélite geoestacionário é a porção de Terra incluída em um cone que é tangencial à superfície da Terra e tem o satélite em seu vértice. A área de cobertura é, portanto, a área de uma calota esférica genérica (ver Anexo 1), sendo dada por:

$$A_{calota} = 2\pi r_c a_c \quad (13)$$

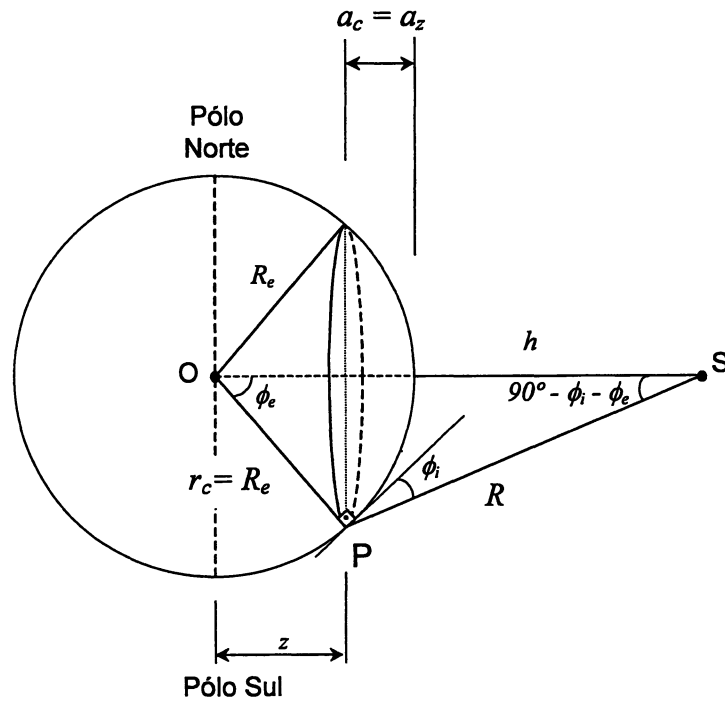
sendo r_c e a_c definidos na Figura 5, adaptada de [7, 9], de onde obtém-se:

$$z = R_e \cos \phi_e \quad (14)$$

$$a_z = R_e - z \quad (15)$$

$$a_z = R_e - R_e \cos \phi_e \quad (16)$$

FIGURA 5 - ÁREA DE COBERTURA DE UM SATÉLITE GEOESTACIONÁRIO



logo,

$$A_{calota} = 2 \pi R_e (R_e - R_e \cos \phi_e) \quad (17)$$

$$A_{calota} = 2 \pi R_e^2 (1 - \cos \phi_e) \quad (18)$$

onde o ângulo ϕ_e é obtido em função do ângulo de elevação mínimo, usando-se o triângulo OPS da Figura 5 e a lei dos senos; ou seja,

$$\frac{\sin(90^\circ - \phi_i - \phi_e)}{R_e} = \frac{\sin(90^\circ + \phi_i)}{r} \quad (19)$$

$$\frac{\cos(\phi_i + \phi_e)}{R_e} = \frac{\cos \phi_i}{r} \therefore \phi_i + \phi_e = \arccos \left[\frac{\cos \phi_i R_e}{r} \right] \quad (20)$$

Como $r = R_e + h$,

$$\phi_e = \arccos \left[\frac{\cos \phi_i R_e}{R_e + h} \right] - \phi_i \quad (21)$$

Pode-se comparar a área da calota com a área da superfície terrestre tendo-se, então, o valor percentual da área da superfície terrestre coberta pelo satélite. Considerando a Terra uma esfera, a área de sua superfície será:

$$A_{sup.Terra} = 4 \pi R_e^2 \quad (22)$$

e a área percentual da calota será

$$A_{sup.coberta} (\%) = \frac{A_{calota}}{A_{sup.Terra}} 100\% \quad (23)$$

O Quadro 4 mostra a área de cobertura em função da altitude do satélite e do ângulo de elevação ϕ_i mínimo especificado. [3]

| QUADRO 4 - PORCENTAGEM DA SUPERFÍCIE DA TERRA VISÍVEL POR UM SATÉLITE EM ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA COM UM ÂNGULO MÍNIMO DE ELEVAÇÃO ϕ_i | | | | |
|---|---------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| Área coberta da superfície terrestre (%) | | | | |
| Altitude (km) | Ângulo mínimo de elevação | | | |
| | $\phi_i = 0^\circ$ | $\phi_i = 5^\circ$ | $\phi_i = 7,5^\circ$ | $\phi_i = 10^\circ$ |
| 2.000 | 11,93 | 9,38 | 8,3 | 7,34 |
| 8.000 | 27,82 | 24,08 | 22,34 | 20,68 |
| 15.000 | 35,08 | 31,04 | 29,10 | 35,31 |
| 30.000 | 41,23 | 37,00 | 34,96 | 32,95 |
| 35.768 (geossíncrono) | 42,43 | 38,18 | 36,11 | 34,08 |
| 40.000 | 43,12 | 38,86 | 36,78 | 34,73 |

2.1.1.4 Latitude máxima permitida para as estações terrenas [3]

A Figura 5 também pode ser usada para ilustrar a situação de máxima cobertura do satélite geostacionário onde a linha de visada entre a estação terrena e o satélite coincide com a linha do horizonte. Para esse caso, também, foi desconsiderada a necessidade de um ϕ_i mínimo. Nessa situação é fácil ver que:

$$\cos\phi_e = \frac{R_e}{R_e + h} = \frac{6.378.144}{42.164.144} \quad (24)$$

logo,

$$\phi_e = 81,3^\circ \quad (25)$$

Esse resultado leva à conclusão que a latitude máxima permitida para uma estação terrena em um sistema com satélite geostacionário é $81,3^\circ$, ou seja, as regiões polares não podem ser servidas por satélites nessa condição. Caso seja considerado um valor mínimo para ϕ_i esse valor torna-se ainda mais restritivo como demonstra a Equação (21). Como exemplo, se for considerado um $\phi_i = 5^\circ$, tem-se:

$$\phi_e = \arccos\left[\frac{\cos\phi_i R_e}{R_e + h}\right] - \phi_i = \arccos\left[\frac{\cos(5^\circ)(6.378.144)}{42.164.144}\right] - 5^\circ \quad (26)$$

$$\phi_e = 76,33^\circ \quad (27)$$

2.1.1.5 Principais perturbações na órbita dos satélites geostacionários

Mesmo que uma órbita geostacionária seja conseguida, o satélite não

permanecerá nessa condição por muito tempo; devido a diversas perturbações. As principais causas das perturbações da órbita de um satélite são a massa da Lua, a massa do Sol, a não esfericidade da Terra e a pressão solar [7]. As duas primeiras perturbações são similares e os efeitos devido ao Sol serão considerados primeiro pois auxiliam na explicação dos efeitos da Lua.

A gravidade solar mantém o satélite em órbita no espaço em torno do Sol, assim como mantém a Terra. Quando o satélite encontra-se mais próximo do Sol, ou seja, a face da Terra está sendo iluminada pelo Sol, a atração gravitacional exercida sobre o satélite é grande o que causa uma aceleração extra em direção ao Sol. De forma contrária, quando é noite na face da Terra (o Sol encontra-se em posição oposta) o satélite está mais distante do Sol. Nesse caso, ocorre uma aceleração contrária à direção do Sol. Assim, a perturbação solar produz dois efeitos na órbita do satélite: (1) distorce a órbita para uma elipse achatando-a ao longo do eixo Terra-Sol; (2) gera um torque que origina uma derivada na direção da normal à órbita. Para órbitas iniciais com zero grau de inclinação, esse segundo efeito produz um acréscimo médio na inclinação de aproximadamente $0,269^\circ$ por ano. Essa perturbação é zero quando o Sol encontra-se nos equinócios e máxima quando encontra-se nos solstícios.

A atração gravitacional da Lua também cria um gradiente de campo gravitacional e uma precessão da normal da órbita do satélite. Nesse caso, isto é mais complicado porque a órbita da Lua muda com o tempo, ao passo que a do Sol permanece constante. A taxa de variação da inclinação da órbita tem um máximo $0,677^\circ$ por ano e um mínimo de $0,480^\circ$ por ano, segundo MERTENS [11]. MORGAN [7] indica que os efeitos do Sol e da Lua se somam e mostra que, por exemplo, em 1986 a inclinação da órbita aumentou em $0,93^\circ$.

A sessão equatorial na Terra não é exatamente circular o que leva o satélite a derivar-se levemente para Leste ou Oeste. Há duas posições de estabilidade na órbita geoestacionária [11], nas latitudes 79°E e $252,4^\circ\text{E}$ e também

dois pontos de equilíbrio aparente (um dos quais encontra-se sobre o Atlântico) nos quais a aceleração causada pela perturbação é cancelada, mas não a velocidade.

2.1.1.6 Eclipse do Sol pela Terra para um satélite geoestacionário

Para um satélite geoestacionário que utiliza energia solar, a duração e a periodicidade dos eclipses solares são muito importantes. Durante esses períodos as células solares, que fornecem energia ao satélite, não são iluminadas, necessitando-se recorrer ao uso de baterias. Além disso, os eclipses causam choques térmicos que devem ser levados em consideração no desenho dos satélites. [3]

O plano de órbita geoestacionária é o plano do Equador e o Sol se encontrará nesse plano duas vezes ao ano, nos equinócios. O satélite gira em torno da Terra em 23h e 56 minutos e estará em oposição ao Sol com respeito a Terra à meia-noite do horário solar. Quando essas condições ocorrerem juntas então, o Sol, a Terra e o satélite estarão alinhados e o satélite estará passando dentro da sombra da Terra de maneira que, do ponto de vista de um observador no satélite, o Sol está em eclipse; para um observador na superfície terrestre na face iluminada pelo Sol, é o satélite quem está em eclipse.

Considerando o Sol como uma fonte luminosa pontual a uma distância infinita, então a sombra da Terra será aproximadamente um cilindro cujo raio é o raio da Terra (R_e). Conforme a Figura 6, a distância angular percorrida pelo satélite entre o ponto intermediário do eclipse até emergir das sombras é chamado de η . Para um satélite em órbita geoestacionária esse ângulo é [7]:

$$\sin(\eta) = (R_e / r) \quad (28)$$

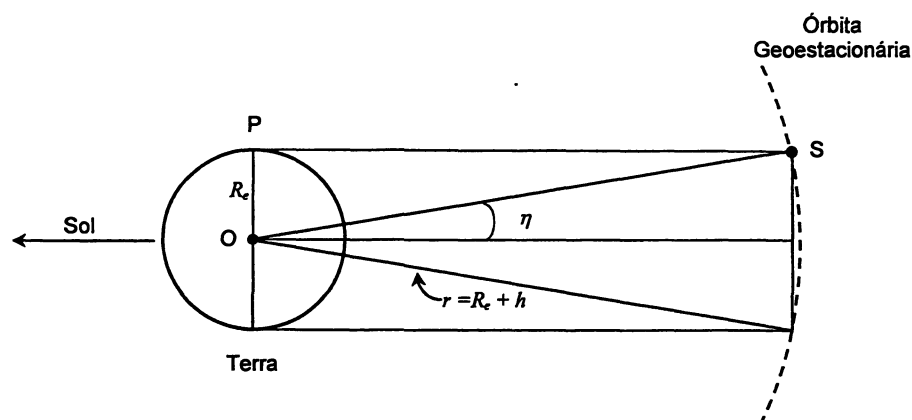
$$\eta = \arcsin(R_e / r) = \arcsin(6.378 \text{ km} / (42.164 \text{ km})) = 0,151 \text{ rad} = 8,67^\circ \quad (29)$$

onde r é a distância do centro da Terra ao satélite geoestacionário. Então, a sombra máxima terá um ângulo de $2 \times \eta = 17,34^\circ$. Considerando $t_{s(\text{geo})}$ o período da órbita geoestacionária (86.164 segundos), a duração do eclipse do Sol será dado pelo produto do ângulo η por $t_{s(\text{geo})} / 180^\circ$, ou

$$Eclipse_{\text{máximo}} = t_{s(\text{geo})} \eta / 180^\circ = 86164 \times 8,67^\circ / 180^\circ = 4150 \text{ s} = 69,7 \text{ min} \quad (30)$$

Se for considerado o fato do Sol não ser uma fonte pontual e estar a uma distância finita, a duração do eclipse será ligeiramente superior ao valor obtido. Além disso, o eclipse não ocorre somente no dia do equinócio, mas também em suas vizinhanças embora com menor intensidade, uma vez que o Sol não se encontra exatamente no plano do Equador [11].

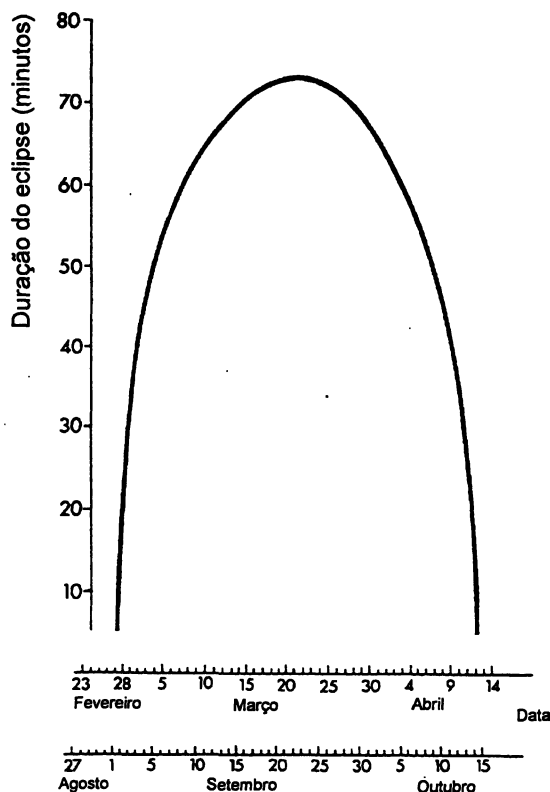
FIGURA 6 - GEOMETRIA APROXIMADA DE UM ECLIPSE



A Figura 7 ilustra a duração real dos eclipses em função do calendário anual. Pela avaliação desse gráfico, observa-se que a duração máxima real do eclipse é de 72 minutos ocorrendo em 21 de março e 23 de setembro e que a

duração do eclipse será maior que uma hora para um total de 52 dias no ano, ou seja, de 8 de março a 3 de abril e 9 de setembro a 6 de outubro [11].

FIGURA 7 - DURAÇÃO REAL DOS ECLIPSES EM FUNÇÃO DO CALENDÁRIO



FONTE: [11]

2.1.2 O satélite

2.1.2.1 Preliminares

A organização de um satélite de comunicações é determinado principalmente por [6]: (1) as exigências da carga útil de comunicações (ou *payload*) as quais definem, por exemplo, a potência a ser fornecida, a precisão no

apontamento das antenas, a quantidade de calor a ser extraída, o espaço necessário para as montagens dos equipamentos e a quantidade de canais de telemetria, rastreamento e controle; (2) a natureza e efeitos do ambiente espacial, que afetarão o controle da órbita, organização do subsistema e escolha dos materiais e componentes; (3) o desempenho dos veículos lançadores que impõem restrições mecânicas à estrutura dos satélites, limitando a massa que será colocada em órbita e influencia o subsistema de propulsão.

Como foi visto, o satélite encontra-se em operação em um ambiente particular e, de certa forma, mais agressivo do que aquele encontrado na superfície terrestre. Na órbita, o satélite está exposto, também, a ação de diversas forças. Portanto, para que possa operar com eficiência, ele é composto por um grupo de subsistemas que dão suporte efetivo ao objetivo principal, ou seja, as comunicações. A tecnologia da plataforma espacial fornece os meios para se desenhar e construir esses diversos subsistemas que geralmente são [6, 7]: estrutura, controle de atitude, propulsão, controle térmico, energia elétrica, telemetria, rastreamento e comando (TT&C), confiabilidade e comunicações.

Cada um dos subsistemas tem diversas características específicas. Por exemplo, o subsistema de controle térmico deve manter o satélite dentro da faixa adequada de temperaturas para a satisfatória operação de todos os equipamentos. Para tanto, se vale de diversos materiais isolantes que consistem, por exemplo, de diversas lâminas de plástico aluminizado (por exemplo, Mylar), revestindo as faces da superfície, e separadas por um material de baixa condutividade térmica (por exemplo, malha de Dracon) [12].

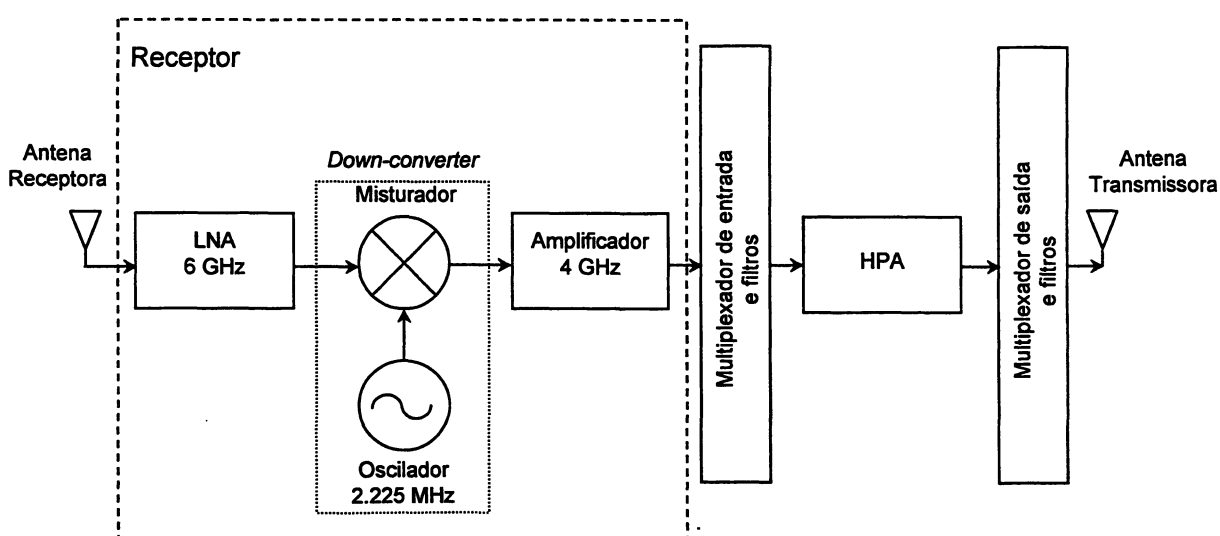
Apesar desses vários subsistemas, o estudo em questão será voltado para a análise do subsistema de comunicações por ser o dispositivo que efetivamente permite ao satélite realizar as funções de telecomunicações.

2.1.2.2 O subsistema de comunicações

A principal função do subsistema de comunicações de um satélite de comunicações, também conhecido como *payload* (carga útil), é receber um sinal de rádio oriundo da superfície terrestre, amplificá-lo e retransmiti-lo de volta para a Terra. De forma genérica, os equipamentos eletrônicos necessários para se alcançar esse objetivo estão agrupados no *transponder* [13] cujo diagrama de blocos funcional simplificado é mostrado na Figura 8.

Assim, o *payload* de comunicações consiste de antenas receptora e transmissora, que muitas vezes são combinadas de maneira que uma mesma antena exerça a função de recepção e transmissão (neste caso, paga-se o preço de se ter, geralmente, um nível de desacoplamento mais baixo), o receptor, multiplexadores e filtros para a separação dos canais do *transponder*, e amplificadores de alta potência (HPA – *high power amplifier*).

FIGURA 8 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE TRANSPONDER NA BANDA C



O desenho desses dispositivos eletrônicos formadores do *payload* de

comunicações é balizado por diversos fatores. Como exemplo, pode-se citar o alto valor de amplificação que é necessário pois, a grande distância entre a estação terrena e o satélite dá origem a uma acentuada perda de potência no espaço livre - valores típicos estão na faixa de 200 dB; a grande largura de faixa de operação dos satélites de comunicação (tipicamente, 500 MHz ou mais) [7]; e o fato dos satélites operarem em órbitas geoestacionárias, o que indica que a massa e potência são severamente limitados, além da ausência de manutenção.

O *payload* inclui, também, outros dispositivos como diplexadores, filtros, equalizadores, atenuadores e diversos componentes redundantes com o apropriado dispositivo de comutação. [13]

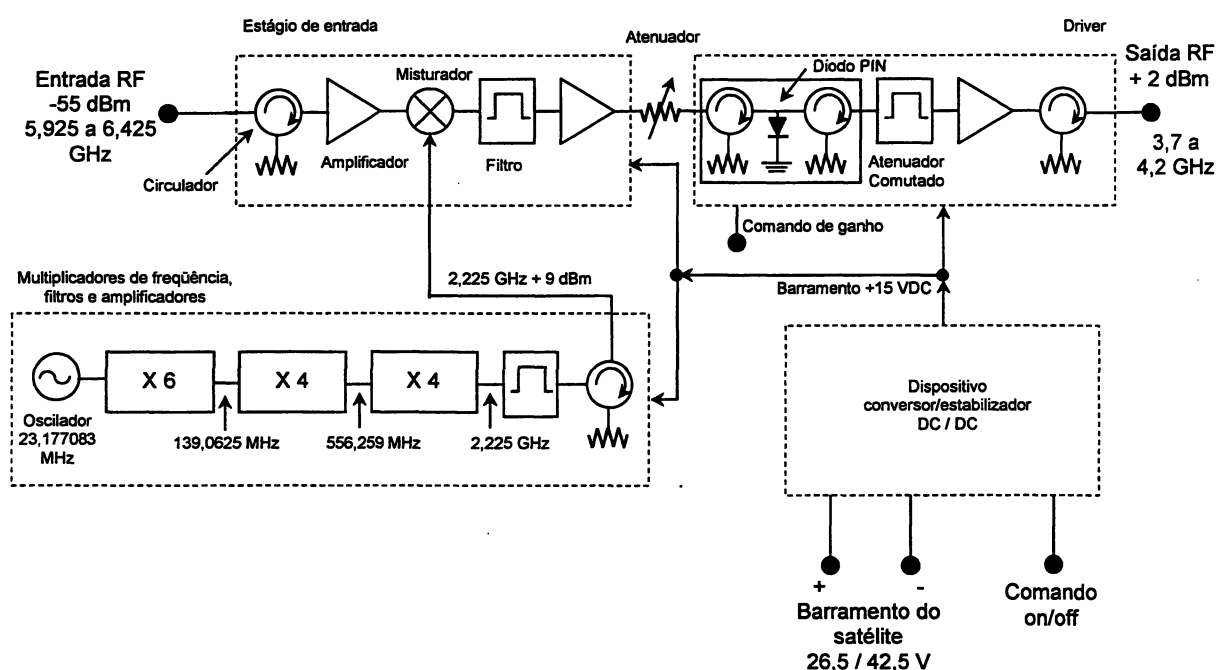
2.1.2.2.1 O receptor [7]

Um receptor consiste em diversos estágios de amplificação e um *downconverter*. Para a ampliação usa-se amplificadores de baixo ruído (LNA – *low noise amplifier*) que normalmente são constituídos de diodos túnel ou outros dispositivos no estado sólido, apropriados à frequência de operação do satélite. O conversor de frequências (*downconverter*) que comuta a frequência de *uplink* para a frequência de *downlink*, é formado por um oscilador local e um misturador. Normalmente uma frequência menor é utilizada no *downlink* porque há maiores atenuações para as altas frequências na atmosfera.

Um receptor pode ser analisado tomando-se como exemplo o diagrama de blocos da Figura 9 para a frequência típica de *uplink* de 6 GHz (banda C). Nesse exemplo, o receptor inicia com uma chave e um amplificador de quatro estágios. O oscilador local gera um sinal de 23,177083 MHz que chega a 2,225 GHz após ter sido multiplicado em três estágios e sofrer a adequada filtragem e amplificação (neste caso, com um fator de multiplicação de cerca de 96).

Após o misturador, segue um filtro que rejeita sinais fora da banda. Após novo estágio de amplificação, há um diodo atenuador PIN (material intrínseco I de alta resistividade entre duas camadas P e N de baixa resistividade) que é um isolador acoplador para o estágio *driver* de amplificação. O *driver* consiste de estágios adicionais de filtragem e amplificação, neste caso, usando transistores.

FIGURA 9 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM RECEPTOR DE 6 GHz

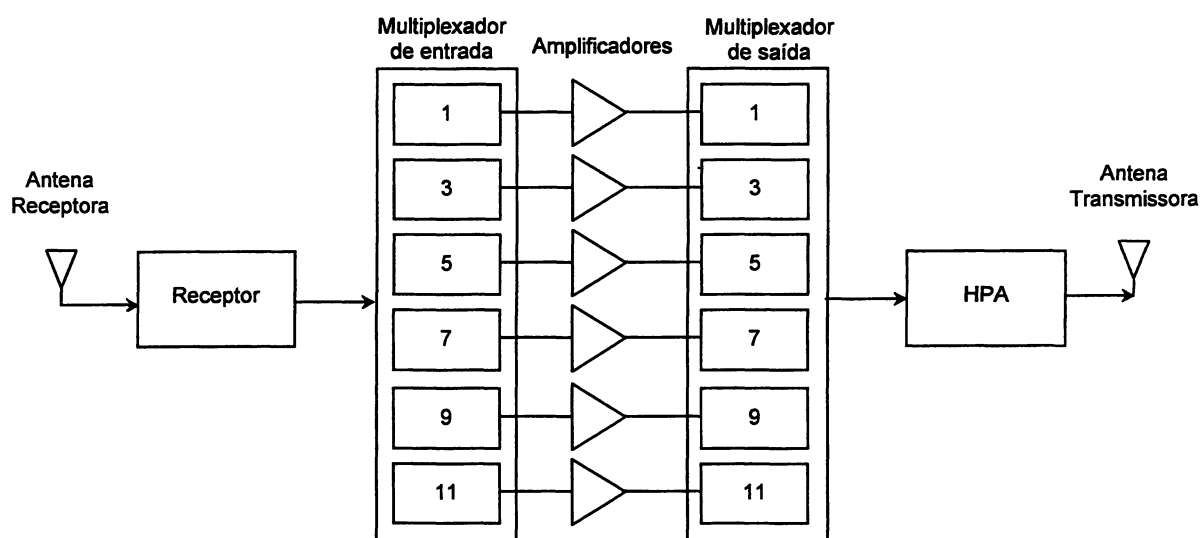


2.1.2.2.2 Os filtros e multiplexadores [7]

O conceito que envolve os filtros de microondas é relativamente simples, consistindo de uma cavidade cilíndrica com paredes condutoras, obstruções e cavidades, que permitem a entrada e saída de energia, e pequenas roscas para ajustar a frequência de ressonância da cavidade. A frequência de ressonância e uma pequena banda em volta dessa frequência é transmitida através do filtro, enquanto as demais frequências são bloqueadas. Um exemplo do conjunto filtro-multiplexador operando na Banda C é mostrado na Figura 10. O sinal oriundo da

antena receptora é dividido em sub-bandas pelo dispositivo filtro-multiplexador, amplificado, recomposto em um sinal de banda básica e transmitido.

FIGURA 10 – EXEMPLO DE UM CONJUNTO FILTRO-MULTIPLEXADOR PARA BANDA C



2.1.2.2.3 O amplificador de alta potência

Os amplificadores de alta potência (HPA – *high power amplifier*) podem ser constituídos de TWTAs (*travelling-wave tubes* - tubos de ondas caminhantes) ou amplificadores de estado sólido [14].

Os TWTAs já foram dominantes nos satélites de comunicação mas, atualmente, muitos satélites utilizam os amplificadores de estado sólido como os transistores de efeito de campo de Arseneto de Gálio (GaAsFET). Esta substituição tem sido feita, principalmente, na faixa de frequência de 4 GHz sendo que os TWTAs são ainda muito utilizados na faixa entre 12 e 20 GHz [13].

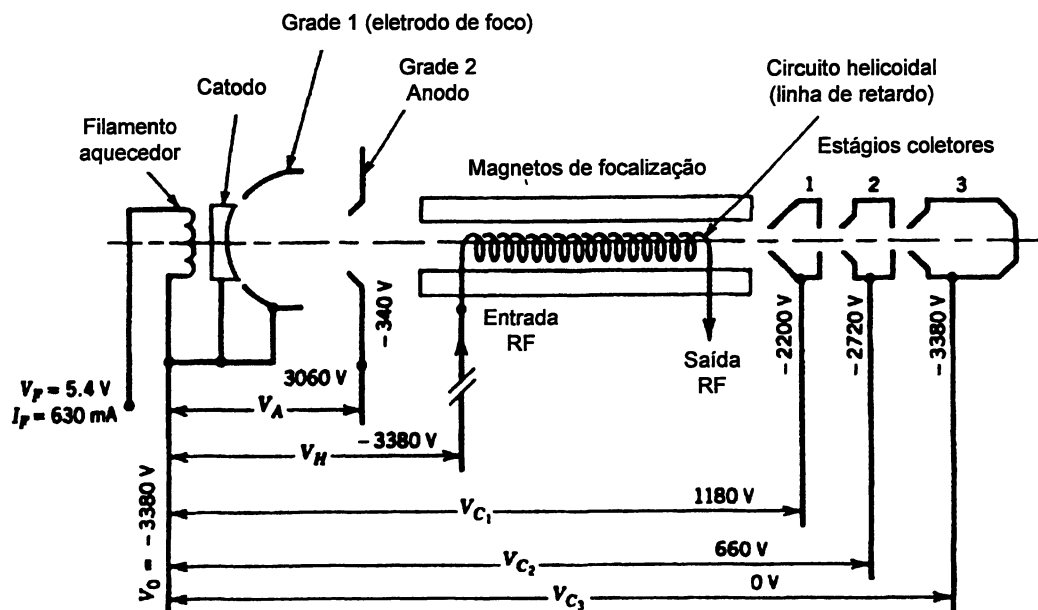
O princípio de funcionamento [7] de um TWTA é ilustrado na Figura 11. Um fluxo de elétrons é gerado por um gatilho eletrônico. Este fluxo viaja ao longo do eixo do tubo controlado por magnetos focalizadores e são coletados por eletrodos. Em

volta do feixe, há um circuito helicoidal capaz de propagar uma onda eletromagnética lenta, o qual é ajustado de forma que a velocidade de fase da onda seja pequena quando comparada com a velocidade da luz. Um circuito externo de RF é adequadamente acoplado ao dispositivo. A velocidade dos elétrons é ajustada para ser a mesma da velocidade de fase axial da onda no circuito. Quando uma onda propaga-se no circuito helicoidal, sua componente longitudinal de campo interage com os elétrons que trafegam no tubo de forma que alguns elétrons serão acelerados e outros desacelerados, resultando em um rearranjo progressivo na fase dos elétrons em relação a onda. O fluxo de elétrons modulados, por sua vez, induz ondas adicionais no circuito helicoidal. Este processo de mútua interação continua ao longo do comprimento do tubo resultando que energia é cedida pelo fluxo de elétrons ao circuito helicoidal como energia RF, e a onda é, então, amplificada.

Embora os TWTA's sejam dispositivos de banda larga, não podem operar eficientemente sobre toda a banda de um satélite que, como exemplo, está em torno de 500 MHz a 2 GHz, para alguns satélites [13]; cada TWTA amplifica uma banda limitada, como 36 ou 72 MHz (ver seção 2.1.2.2.4). Assim, multiplexadores são usados na entrada do *transponder* para separar as faixas de frequência para os TWTA's apropriados e multiplexadores de saída são utilizados para recombinar o sinal. A potência típica de um TWTA encontra-se na faixa entre 10 e 60 W [7].

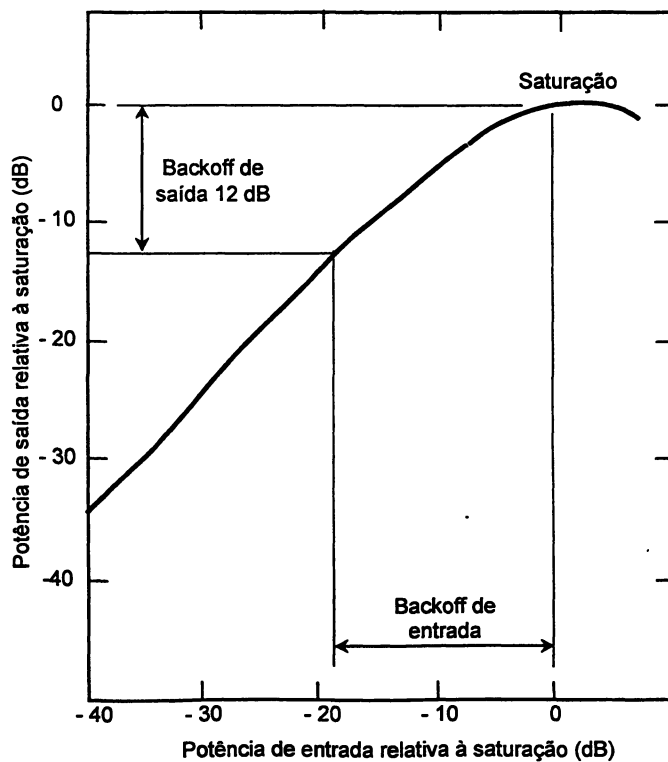
As características elétricas de um TWTA são mostradas na Figura 12. Como a potência disponível para o *downlink* é limitada, tem-se a tendência de operar os TWTA's perto da região de saturação, objetivando-se obter máxima potência. No entanto, como mostra a Figura 12, a região próxima ao ponto de saturação não é linear o que leva ao surgimento de intermodulação que, por sua vez, degrada o sistema. Assim, os TWTA's são operados com uma potência de saída menor que a potência de saturação. A diferença entre a potência efetiva de operação e a potência de saturação é conhecida como *backoff*, podendo ser definido um *backoff* de entrada e um *backoff* de saída. [7]

FIGURA 11 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM TUBO DE ONDAS CAMINHANTES



Fonte: [7]

FIGURA 12 – CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DO TWTA



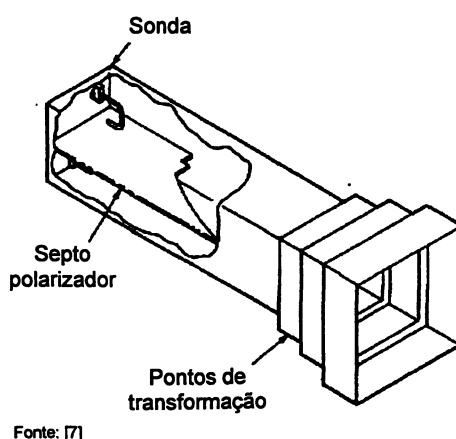
2.1.2.2.4 As antenas

As antenas em um satélite de comunicação exercem tanto a função de recepção e transmissão de comandos para o subsistema de telemetria, rastreamento e comando (TT&C), bem como recebem e transmitem os sinais oriundos do *payload* para a Terra e vice-versa.

Para o TT&C, as antenas são normalmente omnidirecionais sendo especialmente usadas durante as fases de lançamento e posicionamento do satélite, uma vez que os demais tipos de antenas podem não estar apontadas na direção da Terra nessas fases de operação. Após devidamente posicionado e orientado, o satélite pode se utilizar de antenas direcionais para o subsistema TT&C [15].

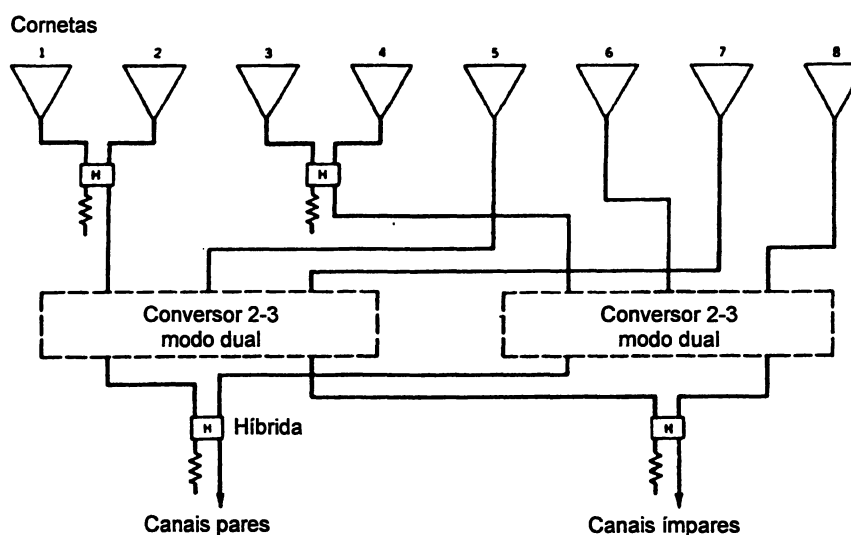
Como dispositivos acopladores do *payload*, os satélites de comunicação utilizam-se de antenas que possuem refletores parabólicos e que produzem feixes estreitos para uma larga faixa de frequências [16]. A potência é transmitida ou recebida através de outra antena, do tipo corneta retangular, e que está voltada para o refletor [7]. A Figura 13 ilustra um exemplo simplificado de uma antena corneta onde pode ser observado a sonda que irradia o sinal de microondas e a superfície que funciona como dispositivo polarizador. O padrão de radiação produzido pela corneta molda, sobre a superfície terrestre, determinadas regiões conhecidas como áreas de cobertura da antena [13].

FIGURA 13 – EXEMPLO SIMPLIFICADO DE UMA CORNETA



Em geral, o diâmetro da antena parabólica e a largura do feixe principal radiado da antena são inversamente proporcionais. Assim, antenas com grandes refletores parabólicos são usadas para transmitir e receber sinais de uma pequena e específica área da superfície terrestre. Refletores parabólicos pequenos são utilizados para transmitir e receber sinais para amplas áreas sobre a Terra. Além disso, o padrão de radiação de um refletor parabólico pode ser projetado para cobrir determinada área com o uso de cornetas de múltiplos campos e que são posicionadas de forma a fornecerem a cobertura desejada [7]. Essa situação é ilustrada na Figura 14 onde os dispositivos numerados são cornetas de diversas configurações e que são apropriadamente posicionadas para que os feixes emitidos desenhem na superfície terrestre as áreas de coberturas com as intensidades desejadas.

FIGURA 14 – REDE DE CORNETAS USADA PELO TRANSMISSOR DO SATÉLITE



Fonte: [7]

Devido à limitação do espectro de frequências destinada para as comunicações espaciais, é comum nos sistemas de satélite ocorrer o reuso de frequências através do emprego da polarização cruzada ou ortogonal [15]. A

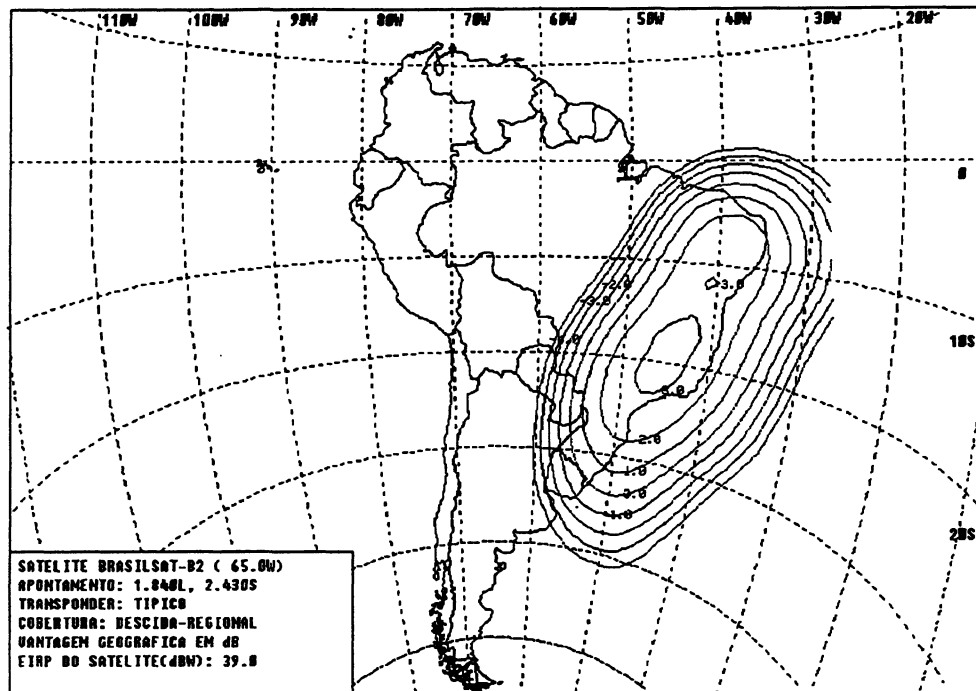
polarização cruzada permite que uma estação terrena utilize uma mesma banda de freqüências para transmitir e receber informações de e para o satélite. Com isso, a capacidade total do sistema de comunicação por satélite é duplicada uma vez que um mesmo *transponder*, operando em determinada banda de freqüências, pode ser acessado na polarização horizontal e vertical, no caso de uma polarização linear; ou polarização horária e anti-horária, no caso de polarização circular.

Os satélites que se utilizam tanto da polarização vertical como da horizontal, para o reuso da largura de banda disponível, freqüentemente possuem duas antenas parabólicas transmissoras (*downlink*), uma para a polarização vertical e outra para a horizontal, e duas antenas receptoras (*uplink*), da mesma maneira, uma para a polarização vertical e outra para a polarização horizontal.

Outra técnica também, empregada para o reuso de freqüências, consiste em se apontar dois feixes de sinal com as mesmas freqüências para duas localidades diferentes, com alta isolamento espacial (cerca de 30 dB) [15]. Isto pode ser obtido usando-se dois alimentadores diferentes para gerar baixos lóbulos laterais.

O padrão de radiação de uma antena transmissora do satélite determina a região da Terra onde o sinal de *downlink* será recebido. O padrão de radiação para uma antena transmissora de qualquer satélite pode ser superposto a um mapa da região de cobertura, com as informações de potência isotrópica efetiva radiada (EIRP – *effective isotropic radiated power*) emitida pelo satélite para cada área de uma região. Mapas que fornecem a EIRP para um determinado satélite são chamados de *footprints* (áreas de cobertura) [13], sendo que tanto os padrões de radiação vertical como horizontal são normalmente combinados em um mesmo mapa. A Figura 15 ilustra o *footprint* do satélite BRASILSAT B2 [17], com posição orbital de 65° de longitude Oeste e feixe na banda C direcionado para dar cobertura ao Brasil. Nesse exemplo, as linhas sobre a superfície terrestre indicam o nível de potência em dB fornecida pelo satélite.

FIGURA 15 – EXEMPLO DE FOOTPRINT DO SATÉLITE



Para a realização de projetos de comunicação através do sistemas de satélite, torna-se necessário conhecer o plano de distribuição de freqüências e polarizações utilizadas pela plataforma espacial. Essas informações são distribuídas pelas empresas operadoras do segmento espacial. Como um exemplo, a Figura 16 [18] traz um diagrama de distribuição de freqüências para um *transponder* do satélite INTELSAT VA.

Nesse exemplo, a largura de banda de RF do satélite INTELSAT VA é dividida em segmentos de 36, 41, 72, 77, e 241 MHz, dependendo da banda de freqüência e conexões de feixe empregadas para se obter o tráfego desejado. Esse satélite pode operar tanto na banda de freqüências de 6/4 GHz como na de 14/11 GHz e é capaz de interconectar essas bandas. Assim sendo, podem ser estabelecidas comunicações entre estações terrenas operando em 6/4 GHz e estações operando em 14/11 GHz, (operação *cross-strapped*). Um sistema de numeração de 1 a 12 é usado para designar os slots de freqüência que tem uma

largura de banda não excedente a 41 MHz. Quando um *transponder* com uma largura de banda maior que 41 MHz é usado, emprega-se uma numeração múltipla (em geral, 1-2).

Na banda de 6/4 GHz e para os feixes de cobertura hemisférica (hemi) e zonal, é obtido reuso de freqüência na ordem de 4 vezes através da isolação espacial entre os feixes Leste e Oeste junto com o uso de polarização circular de sentido oposto. Os feixes de cobertura global operam com polarização circular no modo dual para 6/4 GHz objetivando obter reuso de freqüências na ordem de duas vezes; os feixes de sinal de 4 GHz também operam com polarização circular dual. Reuso de freqüência na ordem de cinco vezes é obtida na banda de 14/11 GHz [11] através da isolação espacial entre os feixes de sinal de cobertura Leste e Oeste e que também usam polarização linear oposta.

A identificação associada aos feixes com polarização circular é definida a seguir. É possível fazer conexões com polarização A de *uplink* e polarização A de *downlink* ou polarização A de *uplink* e polarização B de *downlink*. Similar conexões são possíveis com a polarização B de *uplink*.

a) Pol A:

Recepção do Satélite (*uplink*) – circular anti-horária.

Transmissão do satélite (*downlink*) – circular horária.

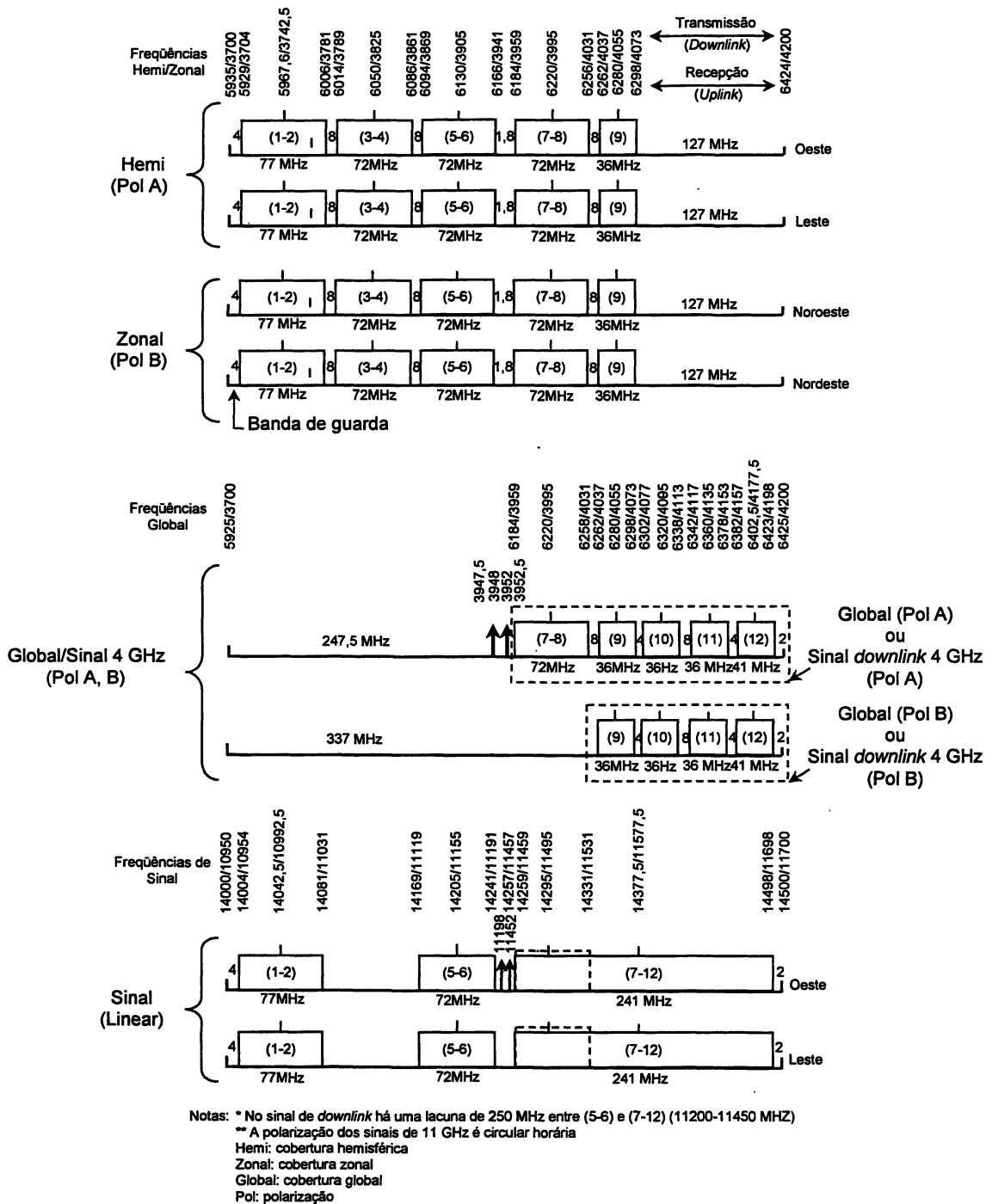
b) Pol B:

Recepção do Satélite (*uplink*) – circular horária.

Transmissão do satélite (*downlink*) – circular anti-horária.

Os feixes de sinal de 14/11 GHz são polarizados linearmente com orientação vertical ou horizontal em relação ao sistema de coordenadas do satélite. A orientação vertical é paralela ao eixo Norte/Sul da estação espacial e a orientação horizontal é paralela ao eixo Leste/Oeste.

FIGURA 16 – DIAGRAMA DO TRANSPONDER DO INTELSAT VA



A orientação no campo E, quando vista por uma estação terrena, é dependente da localização geográfica da estação e sua posição em relação ao satélite de interesse. Isto implica que há necessidade de se girar o polarizador da

estação terrena objetivando-se otimizar o sinal de e para o satélite. Devido ao estreito feixe de sinal, procura-se fazer com que a polarização de recepção da estação terrena seja aproximadamente ortogonal à polarização de transmissão para o satélite e, com isso, aumentar a eficiência do sistema. A orientação linear dos feixes de sinal do INTELSAT VA são definidos como:

Orientação do feixe de sinal Oeste:

Recepção do satélite (*uplink*, 14 GHz) – Vertical;

(Paralelo ao eixo Norte/Sul);

Transmissão do satélite (*downlink*, 11 GHz) – Horizontal;

(Paralelo ao eixo Leste/Oeste)

Orientação do feixe de sinal Leste:

Recepção do satélite (*uplink*, 14 GHz) – Horizontal;

(Paralelo ao eixo Leste/Oeste).

Transmissão do satélite (*downlink*, 11 GHz) – Vertical;

(Paralelo ao eixo Norte/Sul).

A orientação entre as polarizações dos feixes de sinal de cobertura Oeste e Leste são de sentido oposto (ortogonal) em relação à estação espacial.

2.2 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO E MÚLTIPLO ACESSO

Em sistemas de satélite, as técnicas de transmissão (modulação), a multiplexação, os métodos de múltiplo-acesso e as características do canal interagem para a determinação da capacidade de transmissão [19].

2.2.1 Técnicas de transmissão/multiplexação

Historicamente, a transmissão analógica tem dominado as comunicações por satélite desde seu início. Ainda hoje, muitos sistemas por satélite transmitem sinais telefônicos e de televisão usando, principalmente, a modulação por frequência (FM), associada à técnica de múltiplo acesso por divisão de frequências (FDMA). O uso da transmissão analógica deve se manter por algum tempo devido aos grandes investimentos realizados nessa técnica [3]. No caso da transmissão analógica, a modulação por frequência é a preferida porque a amplitude da portadora não é afetada pela informação modulante de maneira que o sinal é pouco sensível à eventuais não-linearidades nos canais do satélite [8]. Além disso, a modulação FM é tipicamente utilizada em sistemas que necessitam de elevada relação sinal / ruído (SNR - *signal to noise ratio*), como é o caso típico das transmissões por satélite. A relação SNR mede quantas vezes o nível de sinal (informação) é maior que o nível de ruído presente no sinal.

O ruído incide, principalmente, na amplitude, portanto os sistemas FM tem maior imunidade a ruídos, pois as informações do sinal modulante estão nas variações de frequência da portadora. Considerando uma cossenóide como sinal modulante, o sinal modulado em FM pode ser descrito pela expressão:

$$e(t) = E_0 \cos(2 \pi f_0 t + \beta \sin 2 \pi f_m t) \quad (31)$$

onde:

E_0 = amplitude da portadora;

f_0 = frequência da portadora;

β = índice de modulação em FM;

f_m = frequência do sinal modulante.

Sendo que o índice de modulação β em FM é definido como:

$$\beta = \frac{\Delta f_0}{f_m} \quad (32)$$

onde Δf_0 é o desvio de frequência. A largura de banda para o sinal FM é dada pela expressão:

$$B = 2(\Delta f_0 + f_m) \quad (33)$$

ou

$$B = 2n f_m \quad (34)$$

com

$$n = \beta + 1 \quad (35)$$

sendo n o número de bandas laterais em cada lado da portadora [20].

Apesar de ser uma técnica muito difundida na comunicação por satélite, devido à maturidade da tecnologia e a facilidade de implementação, a transmissão FM utiliza de forma ineficiente a energia do satélite e tem baixa flexibilidade para alterações dos circuitos, em especial, quando associada à técnica de múltiplo acesso por divisão de frequências [8].

A transmissão digital passou a ser usada pelas estações terrenas dos sistemas por satélite com o surgimento da eletrônica digital e buscando, também, o aumento da qualidade de comunicação. A transmissão digital possui diversas vantagens em relação à analógica mas pode-se citar como exemplos a possibilidade de integração de vários tipos de informação e a flexibilidade. Pode-se, com isso, fazer frente a variações de tráfego com rápidas alterações no sistema. Além disso, é melhor adaptada à transmissão de informações em alta velocidade [3].

Entre as diversas funções de um sistema digital, encontra-se a modulação. A modulação digital é, portanto, a técnica usada para transmitir a informação digital em banda básica sobre a largura de banda dos canais [20]. Na comunicação por satélite, os sistemas de modulação digital mais convencionais são o BPSK (*binary*

phase shift keying) e o QPSK (*quaternary phase shift keying*), que são variantes da modulação PSK (*phase shift keying*).

O BPSK é uma técnica de sinalização binário [21] onde a fase da portadora analógica varia entre dois valores separados de π radianos para cada novo dado binário. Vista como uma modulação em fase, o sinal $s(t)$ BPSK é dado por:

$$s(t) = E_0 \cos[2\pi f_0 t + d_k(\pi/2) + \phi] \quad (36)$$

onde,

ϕ é a fase inicial da portadora;

d_k é um conjunto de dados variáveis os quais são números inteiros e representam a mensagem. As escolhas mais comuns para d_k são $d_0 = 0$ e $d_1 = 2$ ou $d_0 = +1$ e $d_1 = -1$.

Os sistemas por satélite costumam utilizarem-se de diversas técnicas que visam melhorar o desempenho da utilização do recurso *transponder* que é limitado e de alto custo. Entre as diversas técnicas, uma das principais é a multiplexação que consiste em permitir que vários canais secundários que simultaneamente contenham informação, compartilhem um único canal primário sendo que essa operação é realizada pelos equipamentos multiplex, na transmissão, e demultiplex, na recepção [22]. Dessa forma, a idéia fundamental nos sistemas multiplex é permitir a otimização da utilização dos meios de transmissão e, no caso dos sistemas por satélite, o meio comum a ser compartilhado corresponde aos *transponders*. Existem diversas técnicas associadas à multiplexação, entre as quais destacam-se a multiplexação por divisão de freqüências e a multiplexação por divisão de tempo. Além disso, o processo de multiplexação deu origem ao compartilhamento usado nos métodos de acesso que também visam otimizar a utilização dos recursos dos satélites.

O sistema que opera com a multiplexação no domínio da freqüência (FDM - *frequency division multiplexing*) foi originalmente sugerido por Carson em 1920

[23]. Basicamente, consiste em se em tomar diversos canais com a mesma faixa de frequência e em suportes de transmissão distintos e efetuar sua translação para posições adjacentes e específicas do espectro de frequências de um mesmo meio de transmissão (por exemplo) par metálico, cabo coaxial, fibra ótica ou microondas), sendo agrupados e transmitidos sem interferência mútua [22].

O sinal transmitido sobre o meio comum de comunicação é conhecido como banda básica. Assim, a banda básica é a faixa de frequências necessária para a transmissão do sinal multiplex por um meio de transmissão qualquer, sendo formada através de sucessivos processos de translação de frequências. Os canais são deslocados no espectro de frequência pelo emprego de ondas portadoras. No lado de recepção, os canais são separados por filtros e convertidos às posições originais do espectro com o uso das mesmas frequências de ondas portadoras da transmissão [22].

O FDM é formado a partir de processos de conversão de frequências (processo de translação) onde os canais de entrada são sucessivamente deslocados em frequência pelo uso de ondas portadoras. No lado de recepção e por meio de filtros, se individualizam os canais convertidos e, através de processo de reconversão onde são usadas as mesmas frequências das ondas portadoras, os canais compostos são realocados, cada um deles, na faixa original.

Na banda básica, os canais convertidos ocupam faixas adjacentes, para maior economia na ocupação do espectro. No entanto, a faixa útil para o sinal é menor que a largura do canal pois utilizam-se bandas de guarda entre os sinais. Essas bandas de guarda são necessárias porque não se consegue produzir filtros ideais e, na recepção, precisa-se de uma margem de segurança para se evitar interferências dos canais adjacentes [23]. Para se chegar à formação da banda básica no processo FDM é necessário transpor diversos estágios de multiplexação e a largura da banda de guarda irá variar conforme o estágio de translação.

Já a multiplexação por divisão de tempo (TDM - *time division multiplexing*)

é o processo no qual cada estação terrena participante de um mesmo sistema possui um determinado tempo para transmitir suas informações. O *transponder* ou parte dele é compartilhado por todas as estações que o acessam de forma ordenada e sincronizada. Dessa forma, processos devem ser usados para estabelecer e manter o correto sincronismo entre todas as estações participantes do sistema.

No TDM há o conceito de intervalos de tempo (*time slots*) que são divisões contíguas no tempo. Cada um dos *time slots* é reservado para uso de um dos canais (estações terrenas). Dentro de cada canal, utiliza-se as janelas de tempo para a transmissão da informação, dimensionadas conforme a necessidade do sistema. Para a formação da estrutura de transmissão é necessária, além dos diversos intervalos justapostos no tempo, a inserção de tempos de guarda e que têm finalidade semelhante à bandas de guarda do sistema FDM [23].

No caso do TDM, os tempos de guarda correspondem a intervalos entre a varredura sucessiva de canais adjacentes, não havendo transmissão de informação nesses instantes. No entanto, o seu uso é fundamental pois os sistemas reais possuem resposta limitada em frequência, o que faz com que os pulsos se alarguem no domínio do tempo, transbordem suas respectivas janelas de amostragem e produzam interferência entre canais (a chamada diafonia). Com o emprego do tempo de guarda, há um espaço adequado entre canais contíguos de maneira que a interferência eventualmente causada fique dentro de níveis aceitáveis.

Cada ciclo completo de varredura de todos os canais forma um conjunto de intervalos de tempo chamado de quadro (*frame*). Se a varredura for periódica, os quadros também se sucederão de forma periódica e com a mesma estrutura [23]. Ressalta-se que o sincronismo é aspecto fundamental nesse sistema onde além do sincronismo de frequência (varredura seqüencial das estações do sistema), há a necessidade de coerência de fase no processo de varredura [22].

Normalmente, as amostras dos canais de informação são tomadas de forma uniforme ao longo do tempo, o que corresponde a intervalos de tempo iguais

no quadro TDM. O receptor faz coincidir a abertura das janelas do demultiplexador (equipamento de recepção) com as janelas onde o sinal está presente, verificando as transições do sinal de entrada [23].

Embora esse sistema de transmissão possa operar tanto com sinais analógicos como digitais, foi com o desenvolvimento do PCM (*pulse code modulation*) [23] que se deu grande impulso ao desenvolvimento e implantação do TDM. No PCM, qualquer sinal de entrada, inclusive os analógicos, são transformados em sinais digitais, transmitidos para a estação remota, convertidos na forma original e, então, entregues ao usuário.

Quando o canal de entrada possui longos períodos de ociosidade, sem o tráfego de informação, o esquema determinístico de multiplexação perde em eficiência, uma vez que a filosofia intrínseca ao processo é a otimização do uso do meio de transmissão. A adoção de estruturas que usam a multiplexação por divisão de tempo estatística ou probabilística permitem a melhoria do desempenho do sistema. Nesse caso, a idéia básica é somente ocupar um *time slot* quando, efetivamente, o canal contiver informação para ser transmitida, usando os períodos de inatividade para alocar outro canal nesse intervalo de tempo [22].

2.2.2 Técnicas de múltiplo acesso

2.2.2.1 Preliminares

Uma das vantagens da comunicação por satélite sobre outros meios de transmissão é a capacidade de se conectar todas as estações terrenas, permitindo conectividade ponto-multiponto. Um *transponder* do satélite pode ser acessado por

diversas estações terrenas e, portanto, são necessárias técnicas para a alocação de bandas no *transponder* para cada uma. Além disso, é necessário o gerenciamento sobre cada alocação para, por exemplo, permitir o remanejamento de banda entre estações com pouco e muito tráfego e, também, para evitar a colisão entre alocações das estações. Essa técnica é denominada de múltiplo-acesso sendo que os esquemas mais importantes são: FDMA, TDMA e CDMA [3].

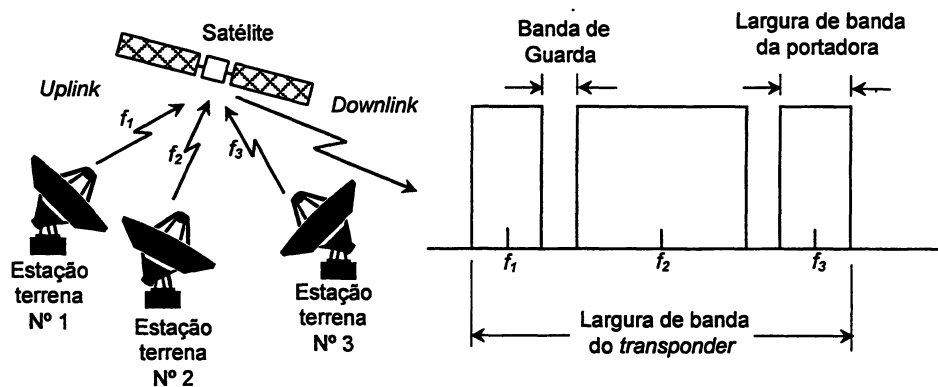
Os métodos de compartilhamento de recursos incluem a alocação dedicada, o acesso randômico, e a alocação sob demanda [24]. Na alocação de canais dedicados, cada usuário ou estação terrena usa um recurso fixo e predeterminado, não importando se a estação terrena tenha ou não tráfego para ser transmitido. O esquema de alocação dedicada é apropriado para tráfego do tipo contínuo, mas pouco econômico para tráfego de rajadas (*bursts*). No caso de canais com acesso randômico, todos os usuários (as estações terrenas) competirão pela transmissão no canal, assim que a informação estiver disponível para tanto. Esse tipo de método é adequado para tráfego de rajadas mas não para tráfego sensível a retardos (*delay-sensitive traffic*). O esquema de alocação por demanda reserva recursos conforme solicitado pela estações terrenas. Uma vez que os pedidos de reserva sejam transmitidos (usando acessos dedicados ou randômicos) e processados, as estações podem fazer as transmissões dentro do recurso estabelecido. A alocação sob demanda é adequada para tráfego com taxa variável e em condições híbridas, como o tráfego de multimídia.

2.2.2.2 O FDMA

Na técnica de múltiplo-acesso por divisão de frequência (FDMA – *frequency division multiple access*) o *transponder* do satélite é dividido em diversas bandas de frequências sendo que cada segmento é alocado para um usuário [9]. O

número de segmentos pode variar de um (onde um *transponder* inteiro é dedicado a um único usuário) a centenas, como em uma operação SCPC (*single channel per carrier*) típica [25]. Dentro do canal FDMA, a transmissão pode ocorrer de forma contínua. Cada estação terrena da rede de satélite transmite uma ou mais portadoras para o *transponder* do satélite (tanto pode ser empregada a modulação analógica – FM – como a digital – PSK [9]). Para cada portadora é alocada uma banda específica do *transponder* com uma pequena faixa de guarda para se evitar interferências entre portadoras adjacentes. O *transponder* do satélite recebe todas as portadoras dentro da faixa de freqüências de operação, as amplifica, e as retransmite de volta para a Terra [3]. Um exemplo de sistema típico FDMA é idealizado na Figura 17 para o caso de uma rede com três estações terrenas.

FIGURA 17 - CONCEITO DO SISTEMA FDMA



O FDMA foi a primeira técnica de múltiplo acesso utilizada pelas comunicações via satélite. Ela é uma tecnologia madura, estável e de fácil implementação. É especialmente atraente para o serviço telefônico onde há grande necessidade de disponibilidade de rotas permanentes durante os horários de maior movimento [8].

No desenho desse sistema, especiais considerações devem ser feitas com relação aos *transponders* do satélite, mais especificamente, aos amplificadores de

potência. Dependendo do método de modulação empregado, não-linearidades de amplitude ou fase devem ser consideradas no projeto a fim de se minimizar os produtos de intermodulação, diafonia e outros efeitos de interferência, levando-se em consideração o número e a largura de banda das portadoras que acessarão o *transponder*.

Os amplificadores de potência operam de forma mais eficiente quando são levados a trabalhar perto da região de saturação. No entanto, quando duas ou mais portadoras trabalham perto dessa região, são gerados excessivos produtos de intermodulação. Esse tipo de ruído pode ser minimizado reduzindo-se a potência de transmissão de modo que os amplificadores operem abaixo da região de saturação. A essa operação denomina-se *backoff* (ver seção 2.1.2.2.3).

Os produtos de intermodulação podem ser reduzidos pela escolha de valores mínimos de *backoff* necessários para assegurar a operação dentro dos parâmetros preestabelecidos de desempenho. Isto, porém, resulta em uma menor disponibilidade da capacidade do canal quando comparado ao modo de acesso único (uma única portadora). Valores típicos de *backoff* para sistemas multiportadora FDMA encontram-se entre 5 e 10 dB [25].

Quando aumenta-se a quantidade de portadoras no *transponder*, a utilização de largura de banda torna-se pouco eficiente. Assim, por exemplo, se for assumido o valor de 100% de eficiência na utilização de um *transponder* com uma única portadora, essa eficiência reduz-se a 90% para 2 portadoras, 60% para quatro, 50% para oito e 40% para catorze [25].

Nos primeiros sistemas de comunicação por satélite, os produtos de intermodulação foram os fatores dominantes que limitavam a operação desses sistemas [25]. No entanto, como amplificadores de alta potência e *transponders* de banda estreita, capazes de operar com poucas portadoras perto da região de saturação, tornaram-se disponíveis, a capacidade máxima tornou-se dependente da análise de parâmetros como:

- a) degradações devido ao *transponder*, onde produtos de intermodulação são causados por diafonia e pelas não-linearidades de amplitude e fase devido à conversão FM-AM-PM durante a operação multiportadora;
- b) degradações na transmissão FM e não diretamente associados ao *transponder*, como a sobreposição de portadoras adjacentes que geram ruído na banda básica;
- c) degradações gerais, que incluem disponibilidade de energia e alocação de banda, controle de potência do *uplink*, coordenação de frequências e vulnerabilidade geral do sistema à interferências.

Outro parâmetro importante a ser considerado nos sistemas FDMA é a diafonia que pode ser o resultado de dois fenômenos:

- a) uma resposta em amplitude que varia com a frequência, produzindo modulação em amplitude com a portadora de RF;
- b) uma modulação em amplitude que modula em fase todas as portadoras que ocupam um mesmo amplificador devido à conversão AM/PM.

Quando uma portadora passa através de um amplificador ela produz modulação em amplitude devido às anomalias no caminho de transmissão. Outra portadora passando através do mesmo amplificador interage com a componente AM dando origem à diafonia. Para aplicações típicas em satélite, os produtos de diafonia devem estar 58 dB [25] abaixo do sinal efetivo.

Outro problema a ser avaliado no sistema FDMA é a emissão RF fora da banda que tem origem no amplificador de alta potência da estação terrena quando operando na região na saturação. Nesse caso são gerados produtos de intermodulação que afetam, principalmente, as outras portadoras de *uplink*. Para evitar esses problemas, também adota-se a técnica de *backoff* para a operação do amplificador da estação terrena.

O controle de potência do *uplink* é, também, outro importante fator para os sistemas FDM/FM/FDMA. A potência de transmissão deve ser mantida dentro dos

níveis adequados para se obter uma relação sinal/ruído satisfatória para a transmissão da informação. Além disso, a potência de *uplink* de cada portadora deve ser tal que limite a geração de produtos de intermodulação com as outras portadoras. Um método utilizado para se ter um controle adequado, é o estudo individual de cada *transponder* para que se possa realizar a configuração apropriada para cada amplificador [25].

Em termos de desempenho de um sistema FDM-FM-FDMA, a relação sinal/ruído de saída de um canal telefônico para uma frequência máxima f_m da banda básica FDM é encontrada considerando-se que a densidade de ruído é N_o e que B é a largura de banda da portadora FM transmitida para a estação terrena (FI). O valor da relação sinal/ruído S/N [3] é dado por:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_o^2 f_r^2}{2N_o f_m^2 b_c} \quad (37)$$

onde,

E_o é a amplitude da portadora;

f_r é um desvio de frequência para um ponto de referência de 0 dBm dentro do canal;

b_c é a largura de banda do canal telefônico onde o ruído tem maior valor;

Como a potência da portadora para um sistema FM é $C = E_o^2/2$ e a potência efetiva de ruído na banda de FI é $N_e = N_o B$, então, a relação portadora/ruído de um sinal FDM-FM-FDMA na entrada de um demodulador FM será:

$$\frac{C}{N_e} = \frac{E_o^2}{2N_o B} \quad (38)$$

Então, pode-se expressar a relação sinal/ruído de um canal telefônico para a frequência máxima da banda básica FDM em termos da relação portadora/ruído

recebida. Substituindo-se a Equação (38) na Equação (37) encontra-se:

$$\frac{S}{N} = \left(\frac{C}{N_e} \right) \left(\frac{B}{b_c} \right) \left(\frac{f_r}{f_m} \right)^2 \quad (39)$$

e conseqüentemente,

$$\frac{C}{N_e} = \left(\frac{S}{N} \right) \left(\frac{b_c}{B} \right) \left(\frac{f_m}{f_r} \right)^2 \quad (40)$$

Pela Equação 40, observa-se que a relação portadora/ruído total C/N_e pode ser ajustada para maximizar a capacidade do transponder do satélite através do ajuste da largura de banda B da portadora de RF (e, portanto, da quantidade de canais por portadora) e pela seleção adequada da relação sinal/ruído máxima do canal de saída do demodulador FM.

A técnica FDMA tem sido usada em conjunto com a modulação analógica desde o início da comunicação por satélite. As duas principais técnicas FDMA [3] em operação são:

- a) transmissão MCPC (*multichannel per carrier*) ou múltiplos canais por portadora, onde a banda básica composta por diversos canais telefônicos multiplexados pela técnica de divisão de freqüências modula uma portadora de RF e é transmitida para o *transponder* FDMA do satélite. Este tipo de operação é chamada de FDM-FM-FDMA e é um tipo de transmissão típico para aplicações que requeiram enlaces de grande capacidade.
- b) transmissão SCPC (*single-channel-per-carrier*) ou canal único por portadora, onde cada canal telefônico modula uma portadora de RF específica e é transmitido para o *transponder* FDMA do satélite. A modulação pode ser analógica, como o FM, ou digital, como o BPSK.

No sistema SCPC, cada canal de telefonia é modulado independentemente por uma portadora de RF e é transmitido para o satélite cujo *transponder* opera com tecnologia FDMA. Para modulações com portadora analógica, é empregado o FM; no caso digital, usa-se o PSK (BPSK/QPSK) [25]. Normalmente, é utilizado o sistema FM-SCPC devido à sua simplicidade e baixo custo.

Algumas técnicas são normalmente usadas para se aumentar a eficiência dos sistemas SCPC [8]:

- a) ativação por voz: nesse método, as portadoras somente são transmitidas quando os sinais de voz estão presentes nos circuitos telefônicos, ou seja, nos canais de comunicação. Como, em média, os sinais de voz estão presentes nos circuitos unidirecionais somente cerca de 40% do tempo total de duração de uma chamada telefônica, o número de portadoras que estarão operando de forma simultânea no *transponder* será menor que o total de portadoras disponíveis. Devido a isso, os efeitos dos produtos de intermodulação serão reduzidos, resultando em um aumento da eficiência no uso da potência do satélite.
- b) alocação por demanda: nessa técnica, todos canais podem ser compartilhados por qualquer estação terrena, isto é, uma estação terrena pode estabelecer circuitos de comunicação pelo uso de qualquer canal vago. Quando a estação deseja transmitir, ela faz uma solicitação de reserva de canal. Após o uso, o canal pode ser alocado a outra estação que deseje transmitir. Assim sendo, a eficiência pode ser alcançada pois somente são alocados os canais para as chamadas em andamento em determinado momento.

O projeto de um enlace FM-SCPC [3] também pode ser expresso em termos da relação sinal/ruído S/N de saída de um demodulador FM, ou seja:

$$\frac{S}{N} = \frac{3E_0^2 \Delta f_0^2}{4N_0 f_m^3} \quad (41)$$

ou ainda,

$$\frac{S}{N} = \frac{3}{2} \left(\frac{C}{N_e} \right) \left(\frac{B}{f_m} \right) \left(\frac{\Delta f_0}{f_m} \right)^2 \quad (42)$$

onde $C/N_e = E_0^2/2N_0B$ é a relação portadora/ruído e B é a largura de banda da portadora em FM dada pela Equação 33.

2.2.2.3 O TDMA

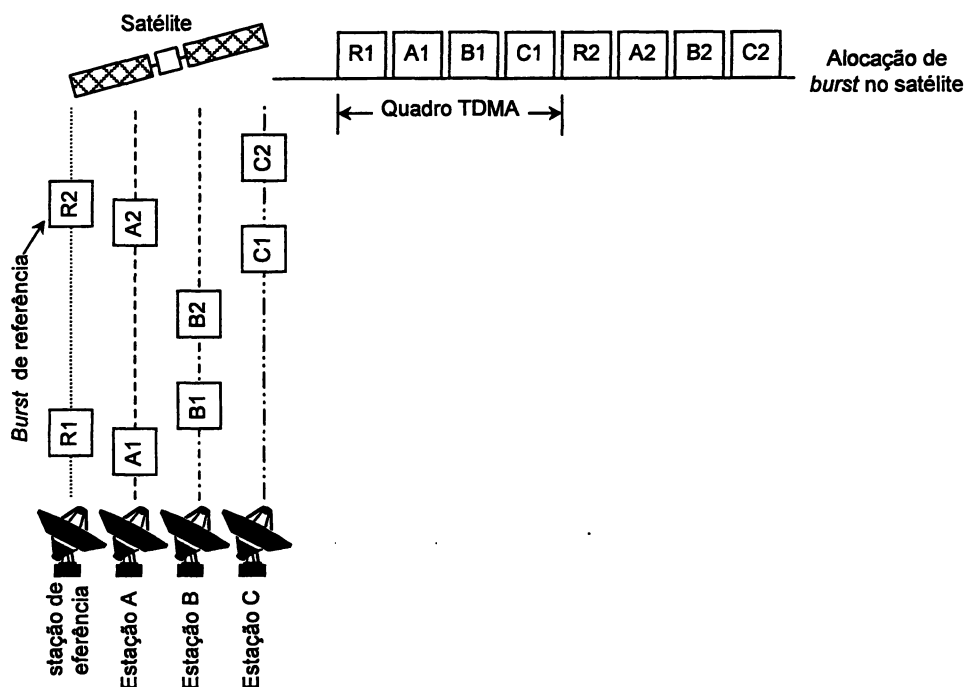
O *Time Division Multiple Access* foi desenvolvido como um sistema de transmissão que poderia resolver os problemas associados ao sistema FDMA [8]. O sistema INTELSAT foi pioneiro na utilização desse método de múltiplo acesso [26]. Nesta técnica, uma portadora modulada por sinais digitalizados de uma multiplexação por divisão de tempo é transmitida e recebida por um grupo de estações terrenas através do compartilhamento, baseado no tempo, de um *transponder* do satélite [8]. De forma diferente do FDMA, o TDMA somente opera com transmissão digital [25]. A Figura 18 ilustra a técnica TDMA.

Nessa técnica, em um determinado momento, somente uma estação terrena acessa o satélite. São alocados *time slots* de forma seqüencial para as estações terrenas que estão em operação. Cada estação terrena tem uso total e exclusivo da largura de banda do *transponder* durante o *time slot* destinado a ela.

Conforme a largura de banda do *transponder* e da modulação usada, a taxa de bits típica encontra-se entre 10 e 200 Mbps. No TDMA de banda larga, a taxa de transmissão na forma de rajadas, *bursts*, encontra-se entre 60 e 250 Mbps usando toda a faixa de freqüências do *transponder* e toda energia, resultando em uma eficiência próxima de 95% [26]. Mas as redes com TDMA também podem ser usadas para baixas taxas de dados, tipicamente entre 64 kbps e 15 Mbps

compartilhando a capacidade de um *transponder* que opera em FDMA o que reduz a potência de *uplink* solicitada pela estação terrena.

FIGURA 18 - CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO SISTEMA FDMA



Como somente uma portadora opera no *transponder* em cada instante, não se desenvolve produtos de intermodulação e o amplificador do *transponder* pode operar na sua potência máxima [26]. Dessa forma, não há a necessidade de *backoff* e pode-se operar com máxima eficiência e próximo da região de saturação, se for o caso [19].

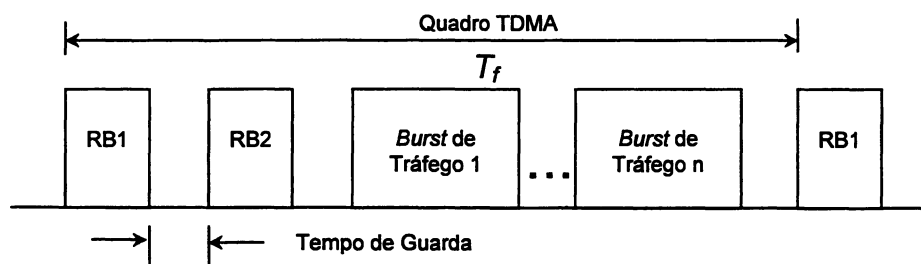
Outra vantagem do TDMA é a flexibilidade [25]. Acessos não uniformes não são problemas para essa tecnologia uma vez que a alocação de *time slots* é fácil de ser ajustada. Isto é adequado para configurações iniciais de redes, expansão ou serviços adicionais.

As desvantagens do TDMA são a necessidade de sincronismo e a complexidade do sistema [25]. Não pode haver sobreposição de acesso devido às

interferências que serão causadas sobre os acessos seqüenciais. Dessa forma, torna-se necessário estabelecer tempos de guarda [3] entre os acessos de forma a se obter uma mínima eficiência de operação. Em um sistema TDMA típico, 5 a 20 acessos podem ser acomodados por *transponder* com tempos de guarda entre 50 e 200 ns [25].

Na rede TDMA, os sinais são transmitidos no modo de rajadas (*bursts*). Cada estação terrena transmite periodicamente um ou mais *burst* para o satélite. Assim sendo, o sinal de entrada no *transponder* do satélite consiste em um conjunto de *bursts* originários de diversas estações terrenas. Esse conjunto de *bursts* é chamado de quadro TDMA [3] e é ilustrado na Figura 19, onde T_f é o tempo total de duração do quadro (*frame*).

FIGURA 19 - ESTRUTURA DO QUADRO TDMA – Fonte: [25]



Cada quadro TDMA contém dois *bursts* de referência RB1 e RB2 [25]. O primeiro *burst* de referência, que tanto pode ser um RB1 ou RB2, é transmitido por uma estação terrena de referência primária. Um segundo *burst* de referência, que também pode ser um RB1 ou RB2 (de forma excludente com o primeiro *burst* de referência) é transmitido por uma estação terrena de referência secundária [3] o que permite uma comutação automática no caso de falha da estação de referência primária [25]. Isto permite um fornecimento ininterrupto de serviço pela rede. Os *bursts* de referência não levam informação e são utilizados para estabelecer sincronismo entre todas as estações terrenas que estejam acessando um

transponder em particular [3].

Os *bursts* de tráfego transmitidos pelas estações terrenas levam a informação digital. Cada estação pode transmitir um ou mais *bursts* de tráfego por quadro TDMA que devem ser posicionados no quadro conforme um mapeamento de tráfego estabelecido entre as estações. A localização do *burst* de tráfego dentro do quadro está relacionado ao primeiro *burst* de referência. Pela localização desse primeiro *burst* de referência, a estação terrena é capaz de localizar um determinado *burst* de tráfego no quadro. O tamanho do *burst* de tráfego depende do volume de informações contida na portadora. [3]

Há a necessidade de se estabelecer um pequeno tempo de guarda entre *bursts* originários de diferentes estações para se evitar a sobreposição de acessos no *transponder*. O tempo de guarda é, normalmente, igual ao intervalo usado para detectar o pulso de *start* de um quadro TDMA por uma estação terrena.

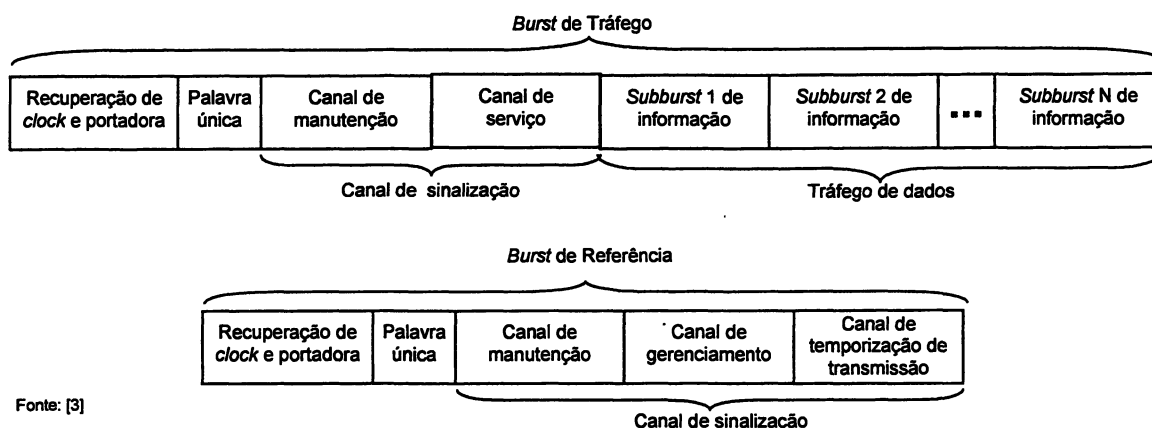
O tamanho de um quadro TDMA típico encontra-se entre 0,75 e 20 ms [3] para o serviço de voz sendo, geralmente, múltiplo de 0,125 ms devido à taxa de amostragem PCM que retira 8000 amostras do canal de voz típico (banda de 4 kHz) em um segundo [23].

A Figura 20 ilustra os *bursts* de tráfego e de referência. No *burst* de tráfego, os bits de informação são precedidos por um grupo de bits que formam o preâmbulo e que é usado para sincronização do *burst*, além de conter informações de gerenciamento e controle. Em geral, o preâmbulo consiste de três partes contíguas:

- a) a seqüência de recuperação de sincronismo e portadora;
- b) a palavra única; e
- c) canal de sinalização.

A seqüência de recuperação de sincronismo e portadora é um conjunto de bits ou símbolos usados pelo demodulador das estações terrenas para recuperar a fase da portadora e regenerar o sinal de *clock* (sincronismo) que serão usados no processo de demodulação.

FIGURA 20 - ESTRUTURA DO BURST TDMA



A palavra única no *burst* de tráfego, que é uma seqüência binária apropriada, marca o tempo de ocorrência desse *burst* e fornece a temporização de recepção de quadro que permite à estação extrair somente os *subbursts* procurados.

O canal de sinalização para o *burst* de tráfego, é formado pelos *subbursts*:

- canal de manutenção, onde instruções na forma de voz ou dados são levadas de/para as estações terrenas;
- canal de serviço, que leva informação de *status* das estações para as estações de referência ou informações de alarmes e taxa de erros para outras estações de tráfego; e

O *subburst* de tráfego, que ocorre imediatamente após o preâmbulo, contem a informação do usuário (podem ser sinais de voz, dados, vídeo ou facsimile). O tamanho desse *subburst* está diretamente relacionado com a velocidade de transmissão digital do sinal.

Já o *burst* de referência possui somente o preâmbulo, ou seja, não há tráfego de dados. A seqüência de recuperação de sincronismo e portadora tem a mesma função do *burst* de tráfego. A palavra única é utilizada no *burst* de referência para fornecer a temporização de recepção de quadro, o que permite com que uma estação terrena localize a posição de um *burst* no quadro. O canal de sinalização, no

caso do *burst* de referência, é composto pelos *subbursts*: canal de manutenção, com a mesma função do *burst* de tráfego; canal de gerenciamento, no qual as estações de referência fornecem instruções de gerenciamento para todas as estações terrenas (como o mapeamento que coordena o tráfego entre estações); e o canal de temporização de transmissão, que leva informação de sincronismo para o ajuste dos *bursts* de temporização de transmissão de maneira que os *bursts* possam ser transmitidos dentro dos *time slots* corretos no quadro TDMA.

A eficiência do quadro TDMA depende da porcentagem do tempo total T_f do quadro que é alocado para o tráfego de dados, de maneira que, quanto maior a porcentagem, maior é a eficiência do sistema. Para que isso ocorra, o *overhead* do quadro (tempos de guarda e preâmbulo) deve ser reduzido ao máximo, garantindo, porém, que tenham o tamanho suficiente para permitir a operação do sistema dentro da qualidade exigida. A eficiência do quadro TDMA é definida como:

$$\eta_q = 1 - \frac{T_x}{T_f} \quad (43)$$

onde T_x é o *overhead* do quadro. Se houver n *bursts* em um quadro, então T_x será expresso por:

$$T_x = nT_g + \sum_{i=0}^n T_{p,i} \quad (44)$$

onde T_g é o tempo de guarda entre *bursts* e $T_{p,i}$ é o preâmbulo do i -ésimo *burst*.

Os sistemas de comunicação por satélite possuem limitação de banda de frequências ou limitação de potência.

Para o caso de limitação de largura de banda, a capacidade nominal de um *transponder* do satélite utilizando a técnica TDMA é expressa por:

$$R_b = W + B_s - C_w \quad (45)$$

onde,

R_b é a taxa de bits do enlace, expressa em dB;

W é a largura de banda do *transponder* do satélite, em dB (por exemplo, 100 bps equivale a 20 dB);

B_s é a taxa de bits por símbolo (dB) e indica o número de bits contido em um símbolo da portadora ou baud (por exemplo, na modulação QPSK, um baud leva dois bits de informação);

C_w é a relação largura de banda / taxa possível de símbolos, para o *transponder*, e é expressa em dB (em geral, usa-se 0,8 dB);

Se o canal do satélite é limitado em potência no *downlink*, então a capacidade é expressa por:

$$R_p = EIRP_{dBW} - P_L + \frac{G}{T} - k - \frac{E_b}{N_0} - M_e \quad (46)$$

onde,

R_p é a taxa de bit do enlace de transmissão do satélite em dB,

$EIRP$ é a potência isotrópica radiada efetiva do *transponder* (dBW),

P_L é a perda de trajeto do *downlink* (dB),

$k = -228,6$ dBW / Hz / K é a constante de Boltzmann,

E_b/N_0 é o valor da taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*) desejada,

M_e é a margem de enlace total do sistema (dB) e

G/T é a relação do ganho e temperatura de ruído da estação terrena.

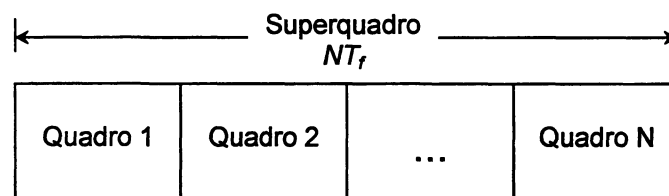
As funções mais críticas em um quadro TDMA são o controle da posição do *burst* no quadro e a coordenação do tráfego entre estações, que são atendidas pela ação da estação de referência que deve endereçar todas as estações da rede.

A coordenação do tráfego entre estações é conseguida através do canal de gerenciamento do *burst* de referência. O controle da posição do *burst* é obtido via o canal de temporização de transmissão.

Se houver N estações na rede, então serão necessárias N mensagens enviadas através de cada um dos canais. Para se obter uma transmissão livre de erros, em cada canal é empregado um algoritmo de redundância, como a codificação 8:1. Nesse método, um bit de informação é repetido oito vezes conforme um padrão predeterminado o que resulta em uma comunicação mais confiável; porém, aumenta o preâmbulo e, conseqüentemente, reduz a eficiência do quadro.

Objetivando, então, reduzir o tamanho dos preâmbulos dos *bursts* e, assim, aumentar a eficiência, a estação de referência pode, em vez de endereçar as N estações de uma só vez, fazer o endereçamento de cada uma das estações em um quadro diferente de forma que a N -ésima estação seja endereçada no quadro de número N . Assim, esses N quadros podem ser agrupados em uma única unidade chamada de superquadro como mostra a Figura 21.

FIGURA 21 - ESTRUTURA DO QUADRO TDMA



No sistema TDMA, a estação terrena deve desempenhar duas funções:

- a) na recepção, deve ser capaz de receber *bursts* de tráfego endereçados a ela em cada quadro transmitido pelo satélite;
- b) na transmissão, deve transmitir *bursts* de tráfego para as outras estações em cada quadro, sem sobreposição com os *bursts* de outras estações.

Por definição [3], a temporização do quadro recebido (RFT – *receive frame timing*) é o instante de ocorrência do último bit ou símbolo da palavra única do *burst* de referência primário. Também, o último bit ou símbolo da palavra única do *burst* de tráfego é a temporização do *burst* de recepção (RBT – *receive burst timing*). O RFT indica o início de um quadro recebido. A posição de um *burst* de tráfego no quadro recebido é determinada pelo deslocamento entre RFT e o RBT. Esse deslocamento (dado em bits ou símbolos) faz parte de um mapeamento de tempo de *bursts* recebidos que é armazenado na estação terrena. Usando esse mapeamento, a estação terrena pode localizar qualquer *burst* de tráfego no quadro que foi recebido.

Para a transmissão de um *burst* de tráfego de forma que ele possa ser corretamente alocado no quadro do *transponder*, a estação transmissora deve estabelecer uma temporização do quadro de transmissão (TFT – *transmit frame timing*), que indica o início do quadro de transmissão da estação, e uma temporização do *burst* de transmissão (TBT – *transmit burst timing*) que indica o início da transmissão de um *burst* para o satélite. A posição do *burst* transmitido no quadro transmitido é determinado pelo deslocamento entre TFT e TBT, cujo deslocamento faz parte de um mapeamento de tempo de *bursts* transmitidos que é armazenado na estação terrena.

O *burst* de tráfego transmitido, em relação à sua temporização de quadro de transmissão, cairá na posição adequada do quadro TDMA no *transponder*. Isso ocorre para quaisquer *bursts* de quaisquer estações de maneira que, seguindo essa regra, não ocorrerá sobreposições.

O processo de aquisição da temporização do quadro de recepção é chamado de aquisição do quadro de recepção (RFA - *receive frame acquisition*); para a temporização do quadro de transmissão, chama-se aquisição do quadro de transmissão (TFA – *transmit frame acquisition*). Os processos de manutenção dessas temporizações são chamados de sincronização do quadro de recepção (RFS – *receive frame synchronization*) e sincronização do quadro de transmissão (TFS –

transmit frame synchronization).

O processo de aquisição é usado quando a estação terrena entra ou reentra em operação. Após o término, com sucesso, do processo de aquisição, as estações terrenas entram na fase de sincronização [25]. O processo de sincronização é necessário porque o satélite não está, efetivamente, parado em órbita. Mesmo um satélite geoestacionário sofre pequenas perturbações, como visto no Capítulo 2, que resultarão em um movimento do satélite. O deslocamento do satélite, mesmo que pequeno, fará com que a distância de *uplink* varie o que impõe uma variação no retardo do sinal entre a estação terrena e o satélite. Essa variação do retardo causa erros no posicionamento dos *bursts* quando eles chegam no *transponder* do satélite. Dessa forma, a sincronização é necessária para manter a correta recepção e transmissão de *bursts* de tráfego [8].

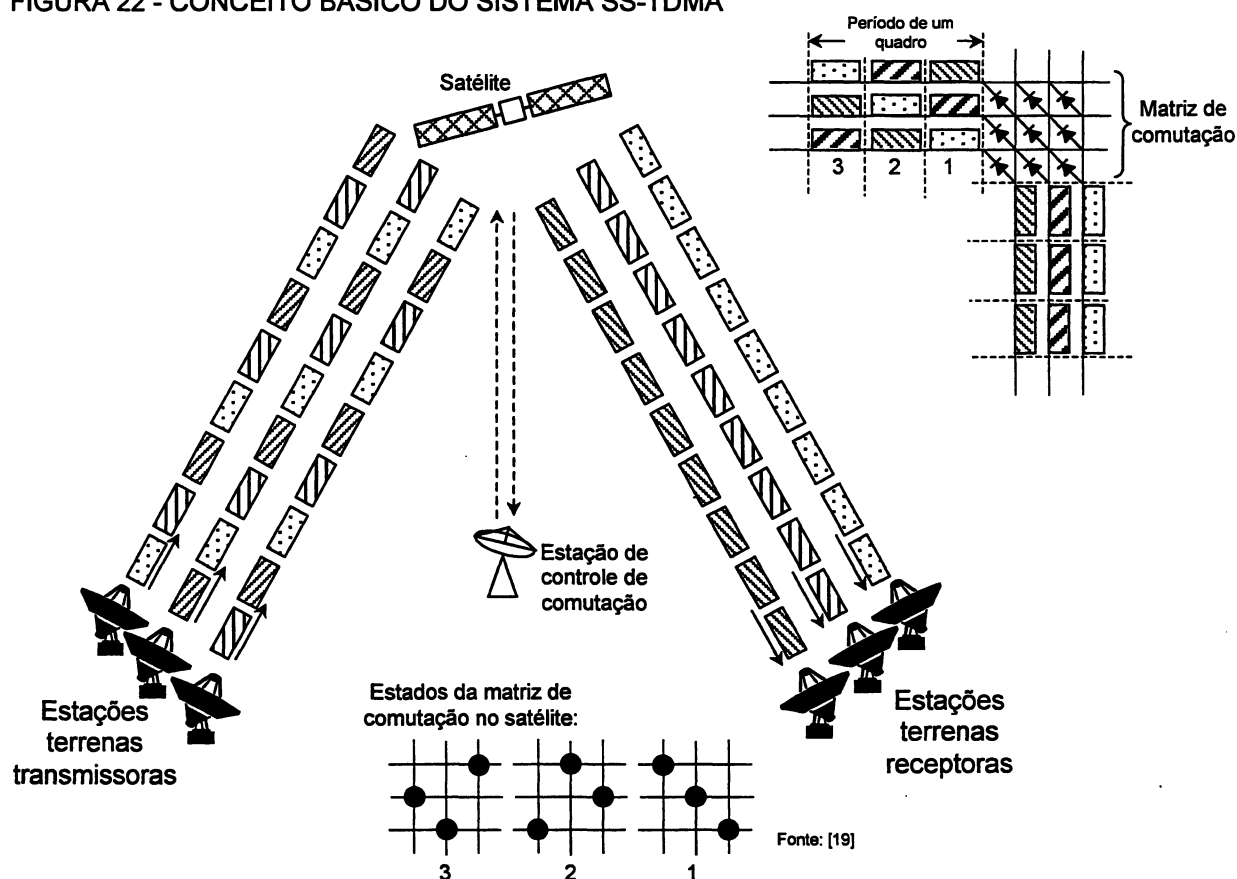
Na operação de um satélite de comunicação com múltiplos feixes de sinal, uma mesma banda de frequência é usada simultaneamente para todos os feixes. Para esse tipo de satélite, torna-se necessário ter um dispositivo a bordo que efetue algum tipo de comutação para rotear o tráfego oriundo de um feixe para outro [8]. Em um sistema FM-FDMA, é comum o uso de uma matriz estática de comutação para realizar a conexão interfeixe. Uma vez estabelecida a conexão entre dois feixes, o *transponder* em questão somente é ocupado pelo tráfego gerado pela estações terrenas que necessitam dessa conexão. Dessa forma, qualquer outro tráfego que esteja compartilhando o *transponder* nesse momento deve ser roteado para outro *transponder*. Como a quantidade de *slots* de frequências nos *transponders* é limitada, algumas conexões de feixes serão abandonadas quando o número de feixes extrapolar a quantidade de *slots* disponíveis. Isso ocorre porque um arranjo de conexão estática um-para-um é adotada na transmissão FM-FDMA.

Os sistemas de comutação que podem ser incorporados ao TDMA resolvem os problemas descritos acima. O TDMA pode utilizar matrizes dinâmicas com alta velocidade de comutação a bordo do satélite, ao invés das matrizes

estáticas do FM-FDMA. Nesse sistema, chamado de TDMA comutado no satélite (SS-TDMA - *satellite switched TDMA*) [8], o estados das conexões de entrada e saída do comutador dinâmico alteram-se automaticamente conforme uma seqüência de comutação preestabelecida a qual repete-se a cada quadro TDMA.

A comutação pode ser feita para o sinal de RF ou banda básica [19]. No caso da comutação em RF, os sinais de *uplink* e *downlink* são interconectados através de uma matriz de comutação de microondas (MSM – *microwave switching matrix*), como mostra a Figura 22.

FIGURA 22 - CONCEITO BÁSICO DO SISTEMA SS-TDMA



Nesse exemplo, é mostrado um diagrama de blocos de um sistema SS-TDMA MSM 6x6 onde cada estação terrena transmite seu próprio *burst* de sincronização com o tempo no qual deseja estabelecer um determinada conexão.

Uma vez que o SS-TDMA permite uma conexão, baseada no tempo, entre

quaisquer feixes, a eficiência na utilização do *transponder* pode ser maximizada pela adoção de uma seqüência de comutação adequada para o padrão de tráfego.

Na operação do SS-TDMA, torna-se necessário, em primeiro lugar, conhecer o tempo de chaveamento do comutador de bordo que é, efetivamente, o ponto de maior diferença para o TDMA convencional [8].

As estações terrenas devem estabelecer um quadro de sincronização pelo ajuste da temporização de transmissão de seus *bursts* de forma que os *bursts* passem através da matriz de comutação no tempo exato e previamente determinado.

Dois métodos são disponíveis para a sincronização do quadro [8]:

- a) a matriz de comutação de bordo opera livremente, ou seja, com sua própria referência, e todas as estações terrenas se sincronizam com o comutador de bordo; e
- b) a matriz de comutação é controlada por uma estação terrena de referência, além de controlar todas as outras estações.

2.2.2.4 O CDMA

A técnica de múltiplo-acesso por divisão de código (CDMA – *code division multiple access*) é particularmente atraente para aplicações militares devido à sua inerente imunidade a ruídos e propriedades de baixa probabilidade de interceptação [25]. Mais recentemente, porém, com o incremento do uso da tecnologia de satélites de média e baixa órbitas, o CDMA têm sido uma das técnicas utilizadas para permitir o múltiplo-acesso, em especial, aos sistemas de comunicação pessoal (*global personal communications*).

Nesse método, o sinal transmitido é espalhado por toda a largura de banda disponível no *transponder* do satélite, em uma interação tempo-freqüência, e usando

uma transformação por código. Tipicamente, a largura de banda do sinal RF modulado é de dez a cem vezes maior que a largura de banda da informação. No conceito do CDMA para satélite de baixa órbita (LEO), que é baseado na estrutura do CDMA terrestre [27], cada estação é distinguida de todas as outras pela posse de um código único no qual imprime sua transmissão. Para sua implementação, a técnica CDMA utiliza o sistema de banda larga *spread-spectrum* (espalhamento espectral).

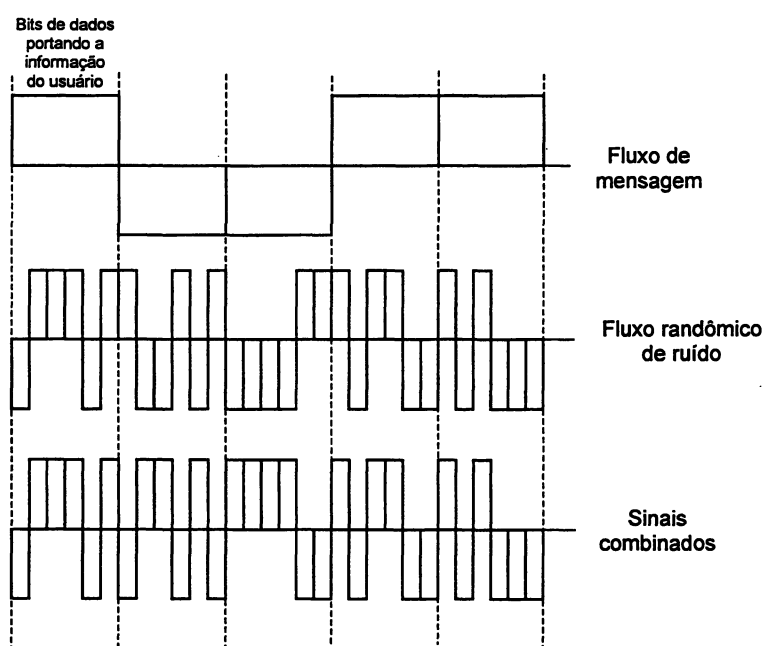
Na tecnologia *spread-spectrum*, ao invés de se separar as transmissões em canais distintos, ocorre a junção ou empilhamento de todas as transmissões sobre um mesmo canal, ou seja, ao invés de se evitar as interferências, elas são propositalmente provocadas. Nos outros métodos de acesso múltiplo, desejava-se canais de banda estreita; nesta tecnologia, utiliza-se canais de banda larga. Quando a potência do sinal é espalhada sobre uma larga banda de frequências, a potência média do sinal é muito baixa para qualquer *slot* de banda estreita dentro da banda considerada. Isto significa que o sistema *spread spectrum* pode compartilhar uma banda de frequências com diversos sistemas de banda estreita. Significa, também, que é difícil detectar-se a presença de um sinal *spread spectrum* usando-se equipamentos de banda estreita [21].

A transmissão se dá ao nível de ruído o que torna esse sistema altamente robusto. Um sistema *spread spectrum* adequadamente projetado pode operar com confiabilidade na presença de vários tipos de interferências de radiofrequências, incluindo interferências de múltiplos caminhos, interferências de múltiplos acessos e interferências hostis [21]. Não há uma limitação fixa da quantidade de canais simultâneos que podem ser transmitidos, mas sim uma degradação no sistema conforme o aumento do tráfego. O espalhamento do espectro da portadora pode ser feito de diversas formas, incluindo a seqüência direta (DS – *direct sequence spreading*) e transposição (salto) de frequência (FH – *frequency hopping*) [21].

A idéia no sistema DS [28] é juntar dois sinais digitais (dois fluxos de

dados) com objetivo de se criar um terceiro fluxo de dados que será transmitido. O primeiro sinal é a informação com uma baixa taxa de bits, como, por exemplo, a saída de um circuito digitalizado de voz (cerca de 10 kHz, por exemplo). O segundo sinal é produzido por um gerador de seqüência randômica de maneira que seja um grande fluxo aleatório de bits. Quando os dois sinais são agrupados, o resultado é o terceiro sinal que se deseja transmitir e que possui a mesma taxa de bits do segundo sinal mas contendo a informação do primeiro sinal. Esta situação é ilustrada na Figura 23.

FIGURA 23 - EXEMPLO DO DS – (*direct sequence spreading*)



No receptor, outro gerador produz um fluxo de bits randômico que é exatamente igual à seqüência randômica usada no transmissor. A subtração dessa seqüência do sinal recebido fornecerá o sinal de informação. Como o sinal transmitido tem uma alta taxa de bits, por exemplo 100 Mbps, que deverá ocupar uma faixa em torno de 100 MHz, pode-se dizer que ocorreu o espalhamento espectral do sinal de informação. O sinal *spread-spectrum* DS ocupa toda a largura de banda durante todo o tempo, sendo possível que diversos transmissores ocupem

o mesmo canal simultaneamente. Com o aumento do número de transmissores sob uma mesma banda, o nível de interferência aumenta gradualmente, o que reduz a eficiência do sistema.

A filosofia associada à técnica FH [28] consiste na divisão de uma banda larga de frequências (em geral, na faixa de Megahertz) em inúmeros canais de banda estreita. O transmissor salta de um canal para outro, transmitindo diversas rajadas de informação em cada um dos canais. A seqüência de salto é totalmente randômica, gerada conforme uma chave preestabelecida disponível tanto no transmissor como no receptor. Dessa forma, avaliando a transmissão dentro do período de um segundo, a transmissão da informação estará ocupando toda a largura de banda, embora, em um dado momento e para uma determinada rajada, esteja ocupando apenas um canal.

Apesar da potência de ruído no canal de banda larga ser alta, seu espectro está espalhado sobre toda a faixa do canal e a energia do ruído em qualquer um dos canais de banda estreita oriundos da divisão do canal de banda larga será menor que a potência da rajada do sinal de informação [28]. Se o número de canais de banda estreita criados dentro do canal de banda larga é grande o suficiente, diversas comunicações simultâneas podem ocorrer pois as chances de colisão na seleção de um mesmo canal por dois ou mais transmissores serão pequenas. Essas chances de colisão podem ser reduzidas através do uso de seqüências randômicas de salto que sejam ortogonais ou totalmente sem relação. Com o aumento de transmissões simultâneas, cada transmissão com sua própria seqüência ortogonal de saltos, o nível de interferências no sistemas aumentará e, assim como no caso do sistema DS, não há um número fixo máximo de transmissões simultâneas que possam compartilhar o canal FH, mas será a eficiência desejada do sistema que imporá os limites.

Embora sejam usadas outras técnicas para o espalhamento de frequências, todas, inclusive as citadas acima, têm características em comum [28]:

- a) a largura de banda para a transmissão da informação é muito maior daquela que seria necessária para a mesma transmissão em um sistema convencional (rádio, por exemplo);
- b) ocorre a codificação da informação através de uma seqüência randômica que é compartilhada tanto pelo transmissor como pelo receptor;
- c) a alocação de seqüências randômicas distintas para estações diferentes.

O Quadro 5 traz uma comparação entre os três métodos de acesso vistos.

| QUADRO 5 – CARACTERÍSTICAS DOS ESQUEMAS DE MÚLTIPLO-ACESSO <small>Fonte: [19]</small> | | | |
|---|---|---|--|
| Tipo | Características | Vantagens | Desvantagens |
| FDMA | <ul style="list-style-type: none"> • Modulação analógica ou digital • Separação dos canais por filtragem | <ul style="list-style-type: none"> • Fácil interconexão com os sistemas analógicos terrestres • Não há necessidade de sincronização • Estações terrenas com equipamentos simples | <ul style="list-style-type: none"> • Redução da capacidade devido ao ruído de intermodulação (não linearidade dos amplificadores) • Necessita de <i>backoff</i> • Há necessidade de coordenação de potência de <i>uplink</i> • Dificuldades para reconfiguração do plano de tráfego |
| TDMA | <ul style="list-style-type: none"> • Modulação digital • Tráfego de <i>bursts</i> entre estações terrenas, sem sobreposição • Apenas um <i>burst</i> presente no sistema, em um determinado momento • Separação por tempo | <ul style="list-style-type: none"> • Fácil interconexão com as estações terrenas digitais • Amplificadores operam perto da região de saturação, com alta eficiência • Alta capacidade de comunicação • Não necessita de controle de potência e coordenação • Plano de tráfego flexível | <ul style="list-style-type: none"> • Há necessidade de sincronismo • Estações terrenas com equipamentos mais complexos • Necessita de conversão analógica/digital e digital/analógica |
| CDMA | <ul style="list-style-type: none"> • Modulação digital • Cada acesso usa toda a largura de banda do <i>transponder</i> • Separação correlacional | <ul style="list-style-type: none"> • A técnica <i>spread-spectrum</i> fornece proteção contra interferências | <ul style="list-style-type: none"> • Há necessidade de sincronismo • A capacidade de comunicação é limitada • A qualidade de sinal piora com o aumento dos acessos • Há necessidade de coordenação de potência • Necessita de conversão analógica/digital e digital/analógica |

2.2.2.5 A alocação fixa e sob demanda

Nos três métodos básicos descritos, a cada portadora é alocada uma parcela dos recursos oferecidos pelo satélite: no FDMA, uma banda de frequências, no TDMA, um *time slot*, e no CDMA uma parcela da potência total com uma transformação por código. O processo efetivo de se dispor do recurso pode ser feita de duas formas básicas: a alocação fixa e a alocação sob demanda [6].

No processo de alocação fixa, os recursos disponibilizados para cada estação são determinados e independentes da demanda de tráfego das redes terrestres nos quais o sistema de satélite está conectado. Caso uma estação terrestre receba um fluxo de informações maior do que a capacidade de transmissão negociada com o satélite, haverá perda de informações pois o excesso não poderá ser transmitido; ou seja, haverá bloqueio de parte da informação. Mesmo que outras estações terrestres, que façam parte do mesmo sistema, tenham capacidade ociosa de transmissão, essa capacidade não pode ser transferida para a estação que está recebendo sobrecarga de tráfego [6]. Dessa maneira, percebe-se que o recurso disponibilizado pela rede de satélite é explorado de forma ineficiente. É um método usado, em particular, para aplicações onde há um fluxo contínuo de comunicação, como no caso de programas de televisão e radiodifusão comercial [7].

Em contraste com alocação fixa, a alocação sob demanda permite a seleção de recursos da rede de satélite conforme as necessidades de tráfego das estações terrenas em determinado momento [6]. Na alocação sob demanda, para as três tecnologias de múltiplo-acesso discutidas anteriormente, são estabelecidos métodos e parâmetros de forma que cada estação reserve o recurso necessário para dar vazão ao tráfego necessário em determinado momento. As estações que momentaneamente estejam sem tráfego, não utilizam nenhum recurso liberando-os para aquelas que estejam efetivamente transmitindo informações. Pode-se dizer, então, que ocorre uma transferência de recurso das estações com baixo tráfego para

as estações com alto volume de tráfego. Com a alocação sob demanda FDMA e CDMA, uma determinada capacidade é alocada sob requisição para uma certa estação terrena pela sinalização de que a estação necessita da utilização, durante a transmissão, de uma banda de frequências ou um determinado código. Efetivamente, porém, a alocação sob demanda TDMA é o processo que permite maior flexibilidade. A alocação sob demanda é obtida pelo ajuste do tamanho e posição de *bursts*, necessitando, portanto, de um ajuste no mapeamento do tempo dos *bursts*. Observa-se, portanto, que a alocação sob demanda é ideal para sistemas que operam com tráfego em que o fluxo de informações varie várias vezes durante o dia, havendo momentos de pico e momentos de inatividade na transmissão [7].

No sistema DAMA (*demand assignment multiple access*) ou múltiplo acesso por alocação sob demanda, a função mais importante é alocar a capacidade necessária para estabelecer uma comunicação entre dois usuários. O sistema DAMA é o serviço com a melhor relação custo benefício para usuários altamente dispersos e com baixo volume com tráfego [29]. Normalmente, o dimensionamento de rotas de satélites com pré-alocação para um determinado tipo de serviço leva a uma pobre utilização dos equipamentos da rede, dos canais de satélite e dos entroncamentos terrestres. Com o uso do sistema DAMA nas rotas de satélite, pode-se ter ganhos tanto no segmento espacial como nos equipamentos terminais de tráfego. Esse ganho, obtido pelo uso da estrutura DAMA, é baseado nos mesmos princípios de engenharia de tráfego que são aplicados à concentração de linhas e entroncamentos de assinantes das redes de telefonia.

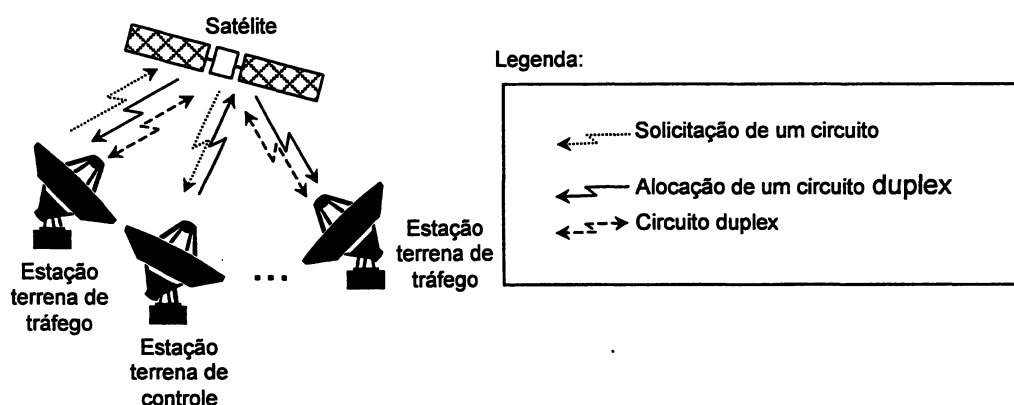
O sistema DAMA tanto pode ser empregado junto ao TDMA como ao FDMA [3]. Quando utiliza o SCPC como base, o sistema pode fornecer flexibilidade a ambientes heterogêneos de satélite, com estações terrenas usando antenas com diversos diâmetros. Em princípio, e sujeito ao tipo de satélite, feixe de sinal, transponder e carga de tráfego, o sistema DAMA pode ser operado com antenas

com diâmetro inferiores a 1,8 m. Nesse, caso usa-se uma configuração em estrela e estações terrenas com grandes antenas exercem a função de nó centralizador da rede e do tráfego [29].

O sistema DAMA pode estabelecer conexões entre usuários pelo uso de dois métodos básicos: o controle centralizado e o controle distribuído [3].

No sistema DAMA com controle centralizado, há uma estação de controle principal que assume a função de disponibilizar o circuito duplex (dois canais) para que o tráfego entre duas estações terrenas possa ser efetivado. São funções da estação de controle principal: detectar a solicitação de conexão feita por qualquer estação terrena, fazer reserva de recursos para estabelecer a comunicação, determinar os canais nos quais a comunicação vai trafegar, determinar o momento de início da comunicação entre estações, desativar o recurso utilizado pelas estações após a troca de mensagens. A Figura 24 ilustra as rotas para o estabelecimento de comunicação entre duas estações.

FIGURA 24 - SISTEMA DAMA DE CONTROLE CENTRALIZADO

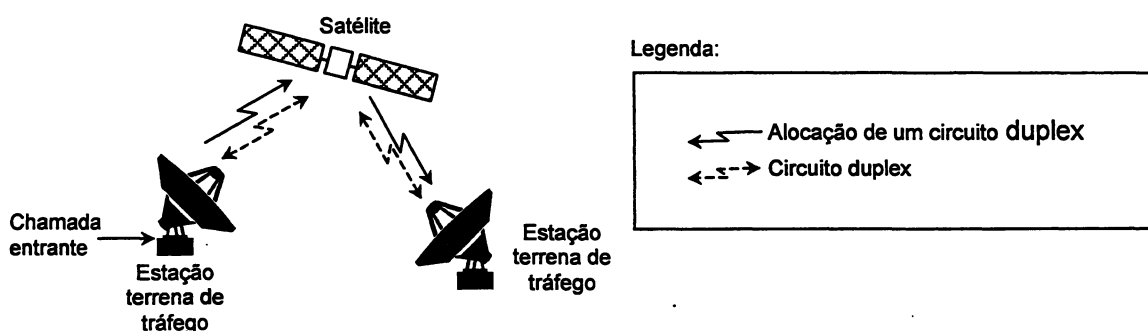


O método centralizado tem como vantagem característica a manutenção do *status* de todo o sistema. Além disso, os recursos de processamento disponibilizados para cada estação são reduzidos. Como desvantagens, há a possibilidade de paralisação de toda rede caso a estação principal falhe (se não

houver estação *backup*), o canal pelo qual as estações realizam a solicitação de recurso deve ter uma alta capacidade de tráfego e deve ser implementado um canal de comunicação entre a estação de controle e as demais estações para a alocação da capacidade solicitada.

No sistema DAMA de controle distribuído não há uma estação de controle central, mas todas as estações da rede assumem igual controle sobre o *status* do uso dos canais, de maneira que cada estação terrena possa alocar canais de forma independente. Dessa maneira, uma vantagem desse sistema é que a falha de qualquer estação não compromete significativamente toda a rede. Para que seja possível estabelecer o controle distribuído, é configurado um canal de sinalização comum (CSC – *common signaling channel*). Através desse canal as estações trocam informações para atualizar constantemente uma tabela de alocação de circuito baseada na indicação “ocioso-ocupado”, cujo controle da tabela é feita via o sistema DASS (*demand assignment signaling and switching* – sinalização e comutação de alocação sob demanda). A desvantagem desse sistema consiste na grande capacidade de processamento que cada estação terrena deve ter para manter sempre atualizada e sincronizada a tabela de alocação de circuito. A Figura 25 ilustra o processo do controle DAMA distribuído.

FIGURA 25 - SISTEMA DAMA DE CONTROLE DISTRIBUÍDO

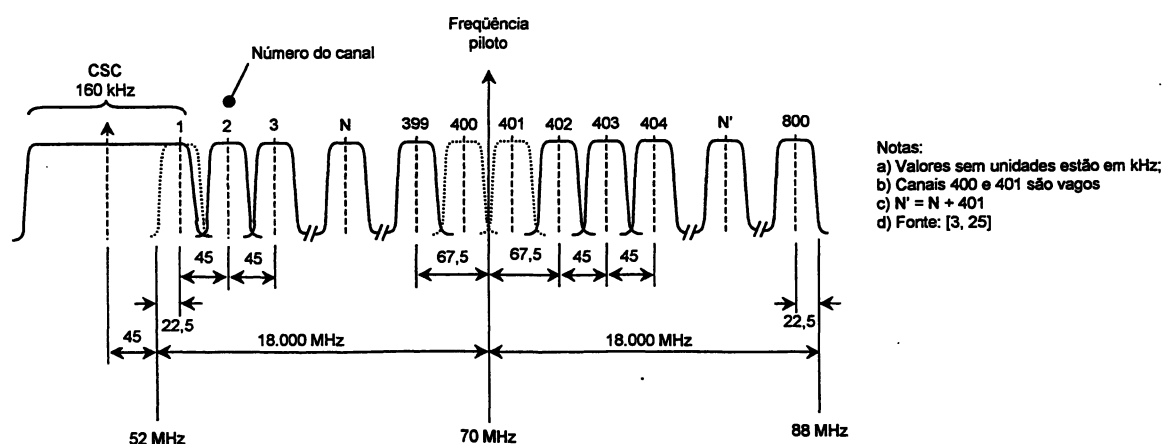


O SPADE (*single-channel-per-carrier pulse code modulation multiple access demand assignment equipment*), ou equipamento de acesso múltiplo PCM-SCPC por alocação sob demanda, é uma rede de satélite SCPC-DAMA, operando com um método de controle distribuído [3].

A técnica PCM é usada para digitalizar os circuitos de voz, a portadora é modulada usando o esquema QPSK e cada canal ocupa uma banda de 45 kHz; já o canal de sinalização comum ocupa 160 kHz da banda de RF e é modulado usando PSK [3]. O acesso das estações se dá através do modo TDMA de maneira que cada estação em operação transmite um breve *burst* de dados com informações de sinalização em cada quadro; esses *bursts* são recebidos pelo satélite e retransmitidos para todas as estações em *broadcast* (difusão). Assim, enquanto cada estação transmite um pequeno *burst* de informação de sinalização, recebe informações de todas as outras.

O quadro TDMA do CSC possui um tamanho de 50 ms e usa 128 kbps. Cada quadro tem 50 *time slots* de 1 ms sendo um destinado para *burst* de referência (sincronização da rede) e o *time slot* subsequente para testes. Dessa forma, os 48 *time slots* restantes podem ser utilizados para a acomodação dos *burst* com dados de informações de sinalização pelas estações terrenas da rede [3]. A Figura 26 mostra o plano de freqüências SPADE.

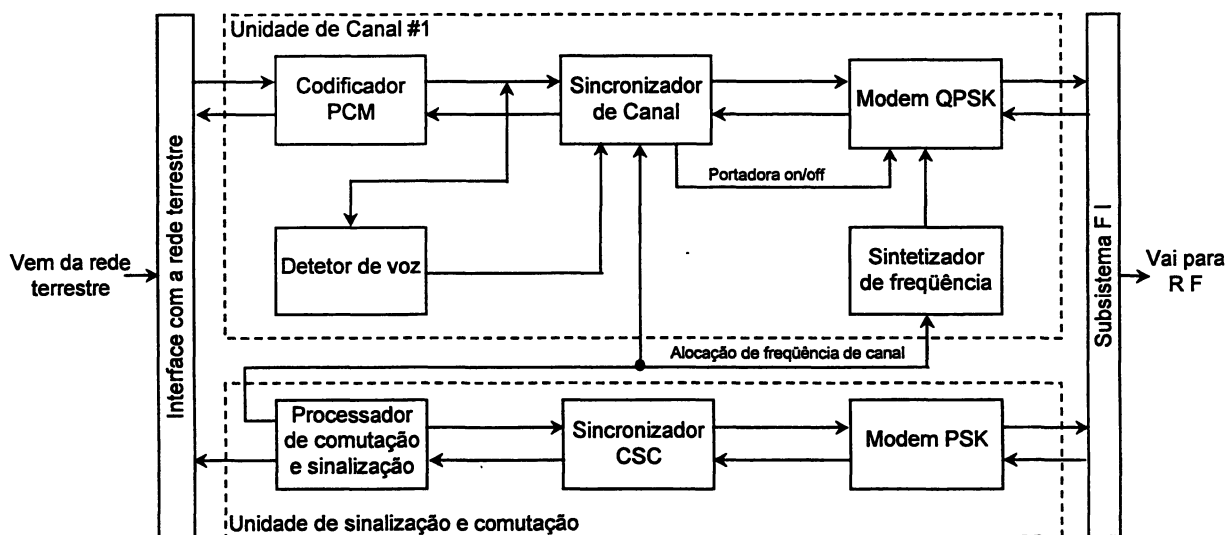
FIGURA 26 – PLANO DE FREQUÊNCIA SPADE



Pode ser observado que cada canal para um circuito de voz ocupa 45 kHz de banda, o canal de sinalização comum CSC ocupa 160 kHz da largura de banda da portadora de RF, que tem uma largura de banda total de 36 MHz. Assim, o sistema SPADE comporta 800 canais.

A Figura 27, ilustra um exemplo de um diagrama de blocos de um terminal SPADE. Nesse caso, o terminal mostrado, que opera no sistema SCPC, engloba uma unidade de interface com a rede terrestre, diversas unidades de recepção e transmissão, unidade de sinalização e comutação, e um subsistema de frequência intermediária (FI). As funções de modulação e demodulação bem como conversão analógica/digital e digital/analógica são desempenhadas pelos modems QPSK e codificadores PCM [19].

FIGURA 27 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM TERMINAL SPADE

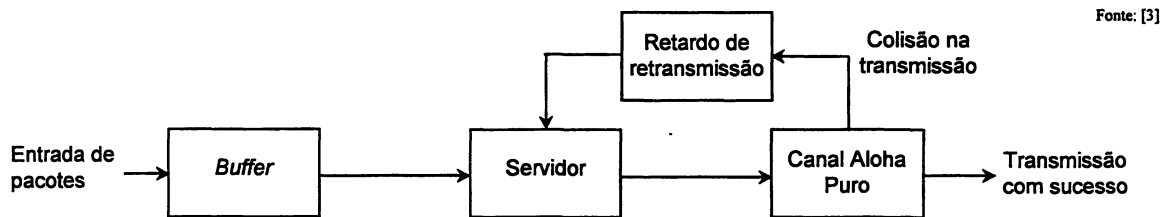


2.2.2.6 O acesso randômico

2.2.2.6.1 A técnica Aloha Pura

O protocolo Aloha é um esquema de acesso randômico desenvolvido pela Universidade do Hawaii para interconexão de terminais e computadores via rádio e satélites e que formou a rede conhecida por Alohanet. A idéia era o desenvolvimento de um protocolo que operasse com tráfego de rajadas e onde as estações permanecessem ociosas na maior parte do tempo; nessas condições, o esquema TDMA puro não era considerado adequado. Essa técnica caracteriza-se [30] pelo fato das estações terrenas transmitirem suas mensagens (ou pacotes) sem nenhuma restrição quanto ao tempo de emissão das mesmas. O método de detecção de conflito consiste simplesmente na existência ou não de resposta da estação destinatária da mensagem. As mensagens são transmitidas na forma de quadros que contém um campo de controle de erros. A estação destinatária responde à estação transmissora somente se não houver erros na mensagem; caso mensagens oriundas de diferentes estações se sobreponham no canal do satélite (conhecido como colisão de pacotes), a estação receptora rejeita o quadro uma vez que ele estará comprometido devido à colisão com a mensagem de outra estação. A estação transmissora aguarda por um determinado tempo pela recepção da resposta da estação destinatária; não recebendo a confirmação, a estação retransmite a mensagem e assim de forma sucessiva até obter uma resposta positiva da estação destinatária. Para se evitar sucessivas colisões, o intervalo de retransmissão da informação é randomizado em cada estação. O protocolo Aloha é mostrado esquematicamente na Figura 28.

FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DE UM PROTOCOLO ALOHA DE MÚLTIPLO ACESSO



A média de retardo de pacotes pelo *throughput* do canal do satélite (quantidade total de informação processada com sucesso pelo canal), característica fundamental de um método de acesso de pacotes, pode ser obtida considerando-se uma grande quantidade de estações (infinita) gerando pacotes conforme a distribuição de Poisson (distribuição de pacotes aleatória e independente) em uma determinada taxa de K_c pacotes por segundo e com tamanho de pacotes de τ segundos [3]. O *throughput* S_c do canal será:

$$S_c = K_c \cdot \tau \text{ (pacotes para tamanho de pacotes)} \quad (47)$$

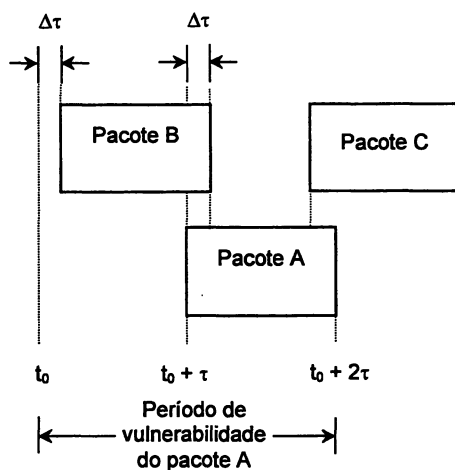
sendo $0 \leq S_c < 1$ porque, se $S_c > 1$, a população de usuários estaria gerando pacotes a uma taxa superior à capacidade do canal e todos os pacotes colidiriam. Sendo G_m o tráfego médio no canal do satélite (em pacotes) e admitindo que esse tráfego também siga uma distribuição de Poisson, então a probabilidade de k pacotes chegarem ao canal do satélite durante qualquer intervalo t do tamanho do pacote, é:

$$P[k, t] = \frac{(G_m t)^k}{k!} e^{-G_m t} \quad (48)$$

Como mostra a Figura 29, mesmo uma pequena sobreposição causa uma colisão entre pacotes, então a probabilidade de que não haja colisão quando um

pacote é transmitido é exatamente a probabilidade de que nenhum outro pacote seja gerado durante o intervalo equivalente a dois tamanhos do pacote.

FIGURA 29 - PERÍODO DE VULNERABILIDADE DE UM PROTOCOLO ALOHA



Da Equação (48) tem-se, então:

$$P[k = 0, t = 2] = e^{-2G_m} \quad (49)$$

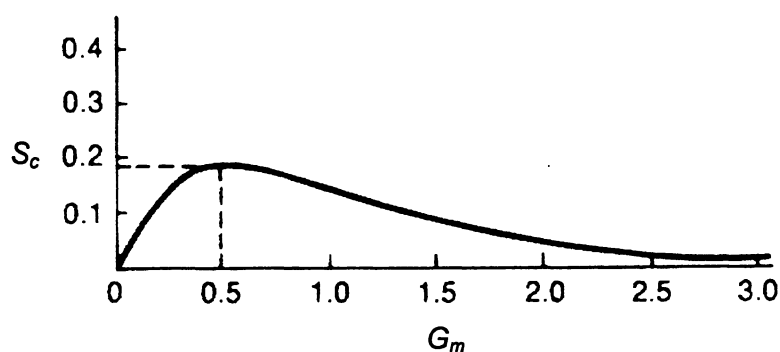
Uma vez que o *throughput* do canal S_c é o tráfego de canal G_m multiplicado pela probabilidade de transmissão de pacotes sem colisão, então:

$$S_c = G_m e^{-2G_m} \quad (50)$$

A Figura 30 mostra o *throughput* do canal Aloha versus o tráfego no canal. O *throughput* máximo considerando o valor típico $G_m = 0,5$ será:

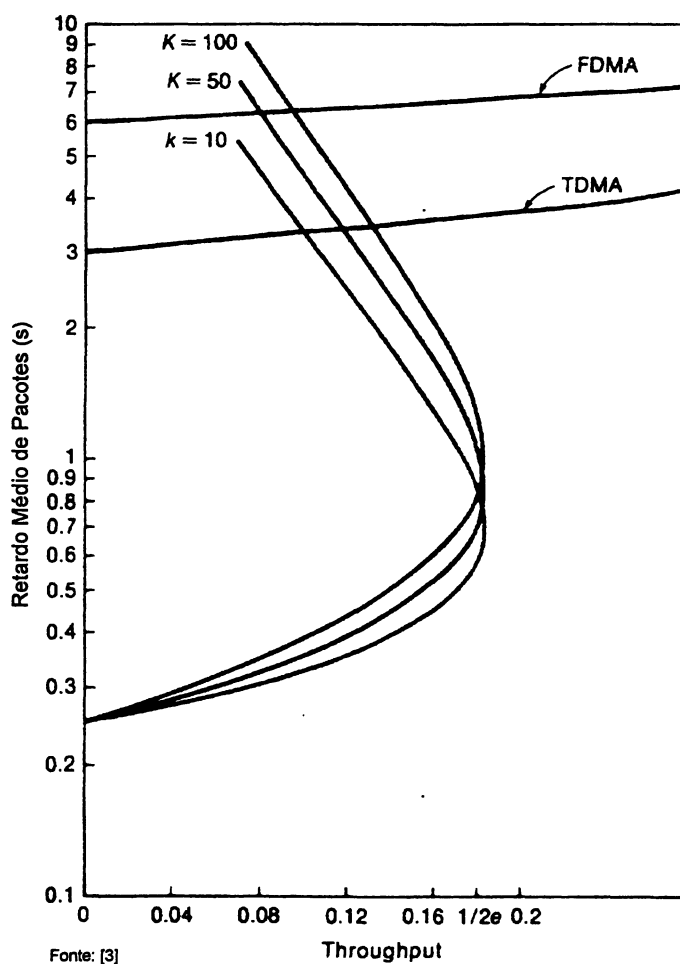
$$S_{c,\max} = \frac{1}{2e} = 0,184 \quad (51)$$

FIGURA 30 – THROUGHPUT VERSUS TRÁFEGO DE CANAL PARA SISTEMA ALOHA Fonte: [3]



Note que o *throughput* de um canal no sistema Aloha Pura é muito baixo, ou seja, o *throughput* máximo do canal é somente 18,4% da capacidade disponível no canal. Porém esse sistema é recomendado para situações onde haja um grande número de estações, o tráfego seja caracterizado por rajadas (*bursts*) e a capacidade do canal do satélite seja limitada. Nessas situações, o retardo médio de pacote do sistema Aloha é muito melhor que os sistemas TDMA e FDMA, como mostra a Figura 31, cujas curvas foram plotadas considerando o parâmetro K como sendo a quantidade máxima de intervalos de retransmissão de τ segundos cada, a capacidade do canal do satélite de 250 kbps, o comprimento médio das mensagens de 1000 bits, o retardo de propagação para o satélite de 250 ms, tamanho de pacote de 4 ms e população infinita de usuários. Para o TDMA e FDMA, as curvas foram plotadas considerando população com 1500 usuários.

Outra grande vantagem do sistema Aloha Pura é a simplicidade, o que resulta em um baixo custo das estações usuárias pois não há necessidade de sincronização entre as estações do sistema – cada estação transmite o pacote que estiver no *buffer*. [3]

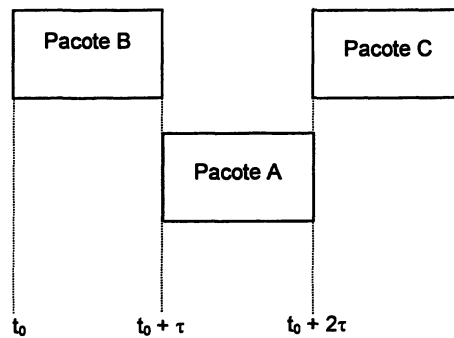
FIGURA 31 – RETARDO MÉDIO DE PACOTES VERSUS *THROUGHPUT* PARA UM CANAL ALOHA

2.2.2.6.2 A técnica Aloha Discreta

Essa técnica, conhecida como *Slotted Aloha*, é uma variação da técnica Aloha Pura, e que reduz a probabilidade de conflitos no acesso ao canal do *transponder*, melhorando, portanto, a eficiência. A redução dos conflitos é conseguida pela imposição de uma disciplina aos instantes de início e duração das transmissões (pacotes). Uma base centralizada de sincronismo divide o tempo em intervalos de duração fixa, do tamanho da duração dos pacotes, que são autorizados para serem transmitidos somente no início dos intervalos [30]. Dessa forma, quando

dois pacotes colidirem no canal do satélite, a sobreposição será total como mostra a Figura 32, não ocorrendo sobreposições parciais como no caso do sistema Aloha Puro.

FIGURA 32 - PERÍODO DE VULNERABILIDADE DE UM PROTOCOLO *SLOTTED* ALOHA



Assumindo que a população de usuários N seja infinita, o *throughput* do sistema *Slotted* Aloha [3] relaciona-se com o tráfego no canal por:

$$S_c = G_m e^{-G_m} \quad (52)$$

Isto porque o *throughput* do canal é o tráfego do canal G_m vezes a probabilidade de que um pacote gerado não sofra colisão, ou seja:

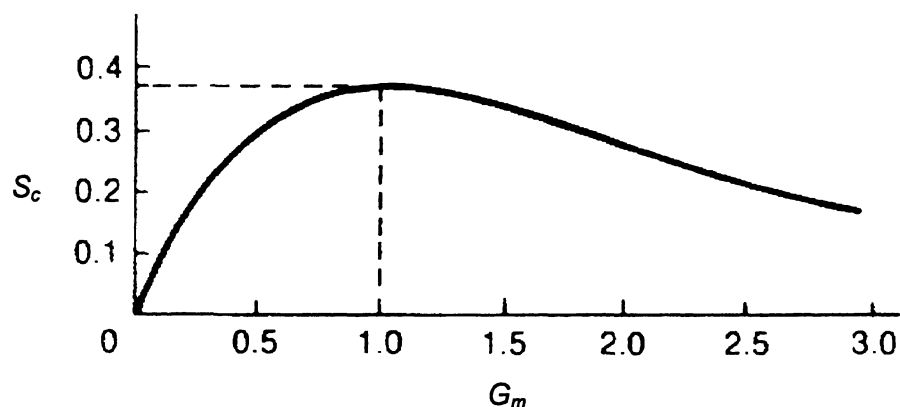
$$P[k=0, t=1] = e^{-G_m} \quad (53)$$

O *throughput* máximo considerando o valor típico $G_m = 1,0$ para o *Slotted* Aloha será:

$$S_{c,\max} = \frac{1}{e} = 0,368 \quad (54)$$

que é o dobro do *throughput* do sistema Aloha Puro. A Figura 33 mostra o *throughput* do canal *Slotted* Aloha versus o tráfego no canal.

FIGURA 33 – THROUGHPUT VERSUS TRÁFEGO DE CANAL PARA SLOTTED ALOHA Fonte: [3]



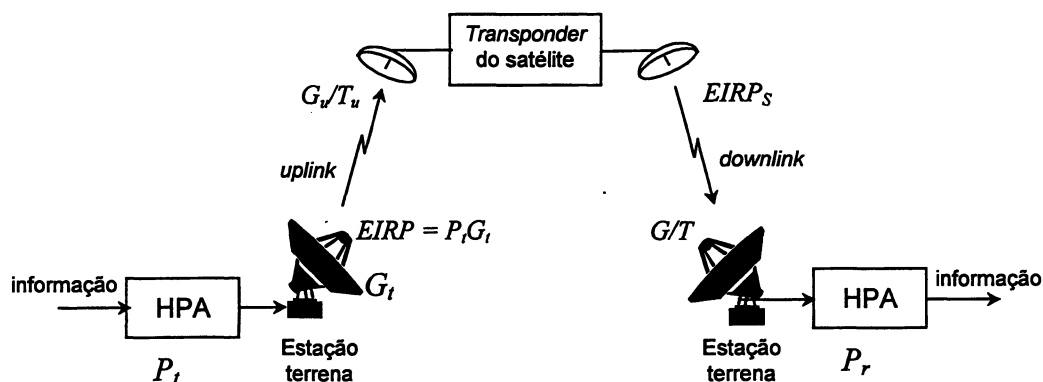
2.3 O ENLACE DE SATÉLITE

2.3.1 Considerações

Os sistemas de comunicação por satélite transmitem a informação dos usuários através do *uplink* e *downlink*, que são os enlaces que constituem a rota de comunicação estação terrena para estação terrena, como ilustrado na Figura 34. Nesses enlaces, a qualidade de comunicação deve ser satisfatória o suficiente para permitir que o fluxo da informação ocorra dentro da eficiência requerida [3]. Dessa forma, o processo de dimensionamento do enlace total de comunicação do sistema é realizado de forma a se obter essa qualidade de transmissão exigida.

Na análise do enlace, além das considerações específicas sobre o *uplink* e *downlink*, devem, ainda, ser considerados diversos outros fatores como as degradações por interferências, por intempéries e intermodulações, entre outras.

FIGURA 34 – ENLACE BÁSICO DO SATÉLITE



O objetivo dessa seção é determinar a relação portadora/ruído na entrada do dispositivo receptor da estação terrena. Essa avaliação será feita considerando-se um satélite operando em órbita geoestacionária e faixa de operação entre 1 GHz e 30 GHz.

2.3.2 A análise básica do enlace

Define-se a potência isotrópica efetiva radiada (*EIRP - effective isotropic radiated power*) [3] como a potência gerada pelo amplificador de potência HPA vezes o ganho da antena (do satélite ou da estação terrena), levando-se em conta as perdas do meio de comunicação que conecta o HPA à entrada da antena. Assim,

$$EIRP = G_t P_t \quad (55)$$

Onde,

G_t : é o ganho da antena transmissora.

P_t : é a potência do HPA.

Da teoria de antenas [31] tem-se que a área efetiva de uma antena é dada por:

$$A_{ef} = \frac{P_r}{\varphi} \quad (56)$$

onde:

P_r : é a potência entregue à carga pela antena, já considerando-se as perdas da antena e as perdas devido ao descasamento entre a antena e o receptor;

φ : é a densidade de potência irradiada por uma antena isotrópica ($G_t = 1$), sendo expressa por:

$$\varphi = \frac{P_t}{4\pi r^2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (57)$$

onde:

P_t : é a potência transmitida

r : é a distância entre as antenas transmissora e receptora.

Da mesma fonte, tem-se, ainda, que o ganho da antena receptora G_r é dado por:

$$G_r = \frac{4\pi A_{ef}}{\lambda_o^2} \quad (58)$$

sendo λ_o o comprimento de onda da frequência transmitida.

Isolando-se P_r em (56) e substituindo φ da Equação (57) tem-se:

$$P_r = \frac{P_t A_{ef}}{4\pi r^2} \text{ (W)} \quad (59)$$

Em uma situação real, no entanto, a antena transmissora não é isotrópica mas possui um ganho genérico G_t . Assim, a Equação (59) fica:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{ef}}{4\pi r^2} \text{ (W)} \quad (60)$$

e substituindo a Equação (55) na Equação (60) encontra-se:

$$P_r = \frac{EIRP A_{ef}}{4\pi r^2} \text{ (W)} \quad (61)$$

Isolando-se A_{ef} na Equação (58) e substituindo-se na Equação (61) tem-se:

$$P_r = \frac{EIRP}{4\pi r^2} \left(\frac{G_r \lambda_o^2}{4\pi} \right) = \frac{(EIRP)G_r}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda_o} \right)^2} \text{ (W)} \quad (62)$$

Definindo-se a atenuação no espaço livre (L – *free space loss*) [6] como sendo dada por:

$$L = \left(\frac{4\pi r}{\lambda_o} \right)^2 \text{ (W)} \quad (63)$$

Pode-se, substituir a Equação (63) na Equação (62) obtendo-se:

$$P_r = \frac{(EIRP)G_r}{L} \text{ (W)} \quad (64)$$

A potência de ruído térmico (N) presente em um sistema, conforme a teoria de antenas, é dado por:

$$N = kTB \text{ (W)} \quad (65)$$

onde:

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K) é a constante de Boltzmann;

T : a temperatura absoluta (K);

B : a largura de banda disponível no satélite (Hz).

Como a potência recebida pela antena é o sinal da onda portadora (C – *carrier*), pode-se dizer que:

$$P_r = C = \frac{(EIRP)G_r}{L} \text{ (W)} \quad (66)$$

Dividindo-se a Equação (66) pela Equação (65) encontra-se:

$$\frac{C}{N} = \frac{(EIRP)G_r}{LkTB} \text{ (W)} \quad (67)$$

O termo C/N é conhecido como relação portadora/ruído (*carrier-to-noise ratio*).

Os sistemas de satélite usam a modulação para transmitir a informação de banda básica das estações terrenas. Nos sistemas analógicos, que empregam a modulação FM, a relação sinal/ruído (S/R – *sinal-to-noise ratio*) de um canal de voz na saída de um demodulador FM é uma medida de qualidade do sinal. Esta relação portadora/ruído (S/R) é uma função da relação portadora/ruído (C/N) do enlace de satélite [3].

Já nos sistemas digitais de satélite, a qualidade do sinal recebido pela estação terrena é avaliado em termos da probabilidade média de erro de bit, que é uma função da relação portadora/ruído (C/N) do enlace, da duração do bit e da largura de banda do canal do satélite [3]. Ou seja, tanto os sistemas analógicos como os digitais levam em consideração a relação (C/N) para a avaliação de seu desempenho.

É comum encontrar a Equação (67) expressa em decibéis. Assim, rearranjando os termos da Equação (67) tem-se:

$$\left(\frac{C}{N}\right) = (EIRP) \frac{1}{L} \frac{G_r}{T} \frac{1}{kB} \quad (68)$$

aplicando-se logaritmo (base 10) nessa equação, encontra-se:

$$\left(\frac{C}{N}\right) = (EIRP)[dBW] + \frac{G_r}{T} \left[\frac{dB}{K}\right] - L[dB] - 10\log(kB) \quad (69)$$

O termo G_r/T , conhecido como Fator de Mérito [25], é a relação Ganho/Temperatura de Ruído da antena receptora que tanto pode ser a antena do satélite, no caso do *uplink*, como a antena da estação terrena, no caso do *downlink*.

Como mencionado anteriormente, a análise do enlace geral da comunicação por satélite é feita considerando-se os enlaces de *uplink* como o de *downlink*. Assim sendo, a Equação (69) adaptada, respectivamente, para o caso de *uplink* (índice u) e *downlink* (índice d), fica:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_u = (EIRP)_u + \left(\frac{G_r}{T}\right)_u - L_u - 10\log(kB) \quad (\text{dB}) \quad (70)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d = (EIRP)_d + \left(\frac{G_r}{T}\right)_d - L_d - 10\log(kB) \quad (\text{dB}) \quad (71)$$

Na análise do enlace, a *EIRP* da portadora, ou simplesmente *EIRP*, é a *EIRP* do satélite ($EIRP_s$) para a portadora retransmitida são normalmente dadas com relação ao ponto de operação do *transponder* TWTA. O ponto de operação onde a potência de saída do TWTA é máxima é chamado de ponto de saturação. Após esse ponto, um incremento adicional na potência de entrada do TWTA resultará em um

decréscimo da potência de saída. Em muitos casos, o TWTA é operado abaixo do ponto de saturação para se evitar distorções não lineares (especialmente quando há muitas portadoras por *transponder*) e reduzir a potência gerada pelo produtos de intermodulação que funcionam como sinais de interferência na qualidade total do sinal.

Como definido na seção 2.1.2.2.3, o processo de se afastar o ponto de operação da região de saturação é chamado de *backoff*. Assim, com auxílio da Figura 12, pode-se definir BO_i e BO_o [3] como sendo, respectivamente, os *backoffs* de entrada e saída de um TWTA e que são dados por:

$$BO_i = \frac{(EIRP)_{sat}}{EIRP_u} > 1 \quad (\text{dB}) \quad (72)$$

$$BO_o = \frac{(EIRP)_{s,sat}}{EIRP_d} > 1 \quad (\text{dB}) \quad (73)$$

onde:

$(EIRP)_{sat}$: é a potência da estação terrena necessária para saturar o TWTA do satélite. O termo “*sat*” refere-se à saturação;

$(EIRP)_{s,sat}$: é a potência de saída, na saturação, do TWTA do satélite;

BO_o : é uma função não linear de BO_i .

Substituindo-se a Equação (72) na Equação (70) e a Equação (73) na Equação (71) encontra-se respectivamente:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_u = (EIRP_{sat})[dBW] - BO_i[dB] + \left(\frac{G_r}{T}\right)_u \left[\frac{dB}{K}\right] - L_u[dB] - 10\log(kB) \quad (74)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d = (EIRP_{s,sat})[dBW] - BO_o[dB] + \left(\frac{G_r}{T}\right)_d \left[\frac{dB}{K}\right] - L_d[dB] - 10\log(kB) \quad (75)$$

As Equações (70) e (71) definem a expressão da relação portadora/ruído

para cada um dos dois enlaces que formam a conexão entre a estação terrena transmissora e a estação terrena receptora. A relação C/N final desejada é aquela presente na entrada do receptor e deve incluir, portanto, pelo menos as duas relações de *uplink* e *downlink* anteriores, no caso do *transponder* do satélite estar operando somente com uma portadora. A relação portadora/ruído total do sistema $(C/N)_s$ para essa situação é dada por:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_s = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_u} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_d}} = \left[\left(\frac{C}{N}\right)_u^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_d^{-1} \right]^{-1} \quad (76)$$

cujo detalhamento para se obter essa expressão pode ser verificado em [3].

Se o *transponder* do satélite operar, de forma simultânea, com acessos multiportadoras, como no caso dos sistemas FDMA e SCPC (item 2.2.2.2.), o sinal de *downlink* sofrerá interferência de produtos de intermodulação [25]. Embora o ruído de intermodulação possa ser controlado, não pode, no entanto, ser eliminado e deve ser considerado no cálculo da relação portadora/ruído do sistema. Dessa forma, a Equação (76) fica:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_s = \left[\left(\frac{C}{N}\right)_u^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_d^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_i^{-1} \right]^{-1} \quad (77)$$

onde a parcela $(C/N)_i$ refere-se ao ruído de intermodulação cuja principal fonte desse tipo de ruído é o HPA (amplificador de alta potência) do satélite [25].

Da mesma forma que o ruído de intermodulação, a Equação (77) pode considerar outros fatores de degradação do sistema de comunicação por satélite como interferências causadas por um satélite adjacente, interferências oriundas das superfície terrestre (tipicamente para enlaces terrestres que operam na banda C),

interferências devido à despolarização causada por chuvas, etc [6].

Outros fatores como a absorção atmosférica que, como a perda em espaço livre, está sempre presente no sistema de comunicação, também devem ser considerados. A absorção atmosférica, que é a perda de potência devido aos diversos gases da atmosfera, afeta, no entanto, somente algumas bandas de frequência. A atenuação por chuvas, embora nem sempre presente, também deve ser prevista no cálculo do sistema, muito embora, assim como no caso da absorção atmosférica, somente afete certas bandas de frequências como as faixas entre 12/14 GHz e 20/30 GHz [3]. A banda C, largamente utilizada tanto para enlaces de satélite como enlaces na superfície terrestre, é menos sensível às influências das chuvas.

3 A TECNOLOGIA ASSOCIADA ÀS ESTAÇÕES TERRENAS

As estações terrenas, que formam o segmento terrestre, são o segundo elemento básico de um sistema de comunicação por satélite e podem assumir diversas configurações, variando seu tamanho, funções, sofisticação e custo. Podem, portanto, serem classificadas de várias formas, como por exemplo, em relação ao tipo de serviço prestado (serviço fixo ou móvel via satélite), a função da estação, a banda de frequências usadas, o tipo de transmissor e receptor e, ainda, as características da antena [8, 19]. Esta seção se ocupará das principais características e configurações de uma estação terrena padrão baseadas no serviço fixo via satélites geoestacionários de comunicação e padrões emitidos pela INTELSAT.

3.1 A ESTAÇÃO TERRENA PADRÃO

O termo Estação Terrena é usado para referenciar um conjunto de facilidades compostas por transmissores, receptores e antenas empregadas para receber e/ou transmitir sinais de/para um satélite de comunicação [32]. A informação pode ser recebida ou transmitida de forma analógica ou digital sendo composta por mensagens de voz, dados ou imagem. Nesse aspecto, a estação terrena pode ter três categorias [19]:

- a) transmissora e receptora, utilizada em sistemas de comunicação duplex;
- b) somente receptora, como as estações usadas para recepção doméstica de sistemas de televisão; e
- c) somente transmissora usada, por exemplo, em sistemas de coleta de

dados.

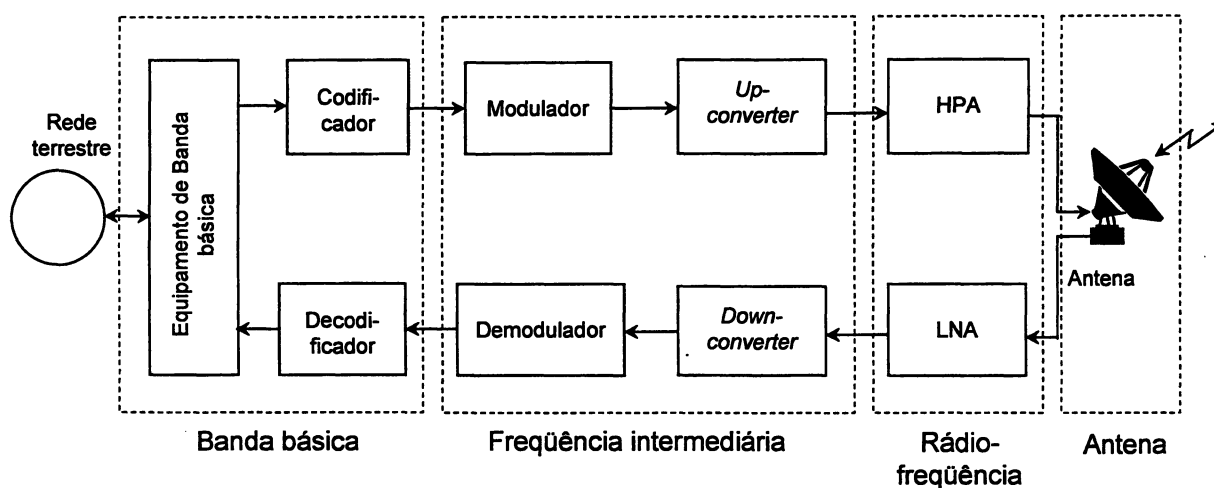
Por definição [8], a estação terrena também inclui os equipamentos necessários para interconectar a rede de satélite aos usuários ou à rede terrestre que serve o usuário. Esses diversos componentes estão arranjados em subsistemas entre os quais destacam-se: o subsistema de banda básica, o subsistema de frequência intermediária, o subsistema de radiofrequência e o subsistema de antenas. Além disso, inclui, também, todos os dispositivos para fornecimento e controle de energia e sistemas de climatização.

A Figura 35 mostra um diagrama de blocos com alguns elementos funcionais de uma estação terrena para comunicação via satélite. A informação oriunda das redes terrestres entra no lado de transmissão da estação terrena e são processados (armazenados, multiplexados, formatados, etc.) por equipamentos de banda básica. A seguir, as informações podem ser codificadas, de modo a se obter uma taxa de erros aceitável. O sinal codificado é, então, modulado utilizando-se uma portadora de frequência intermediária (FI) empregando-se, normalmente, a frequência de 70 MHz para um canal com 36 MHz de largura de banda no transponder [19]. A portadora FI vinda do modulador é entregue ao *upconverter* (conversor de subida), por meio de cabos coaxiais, onde a frequência intermediária é transladada para a frequência de RF no espectro de *uplink* do satélite. O sinal de RF é amplificado por um amplificador de alta potência (HPA - *high power amplifier*) e entregue no nível adequado para ser transmitido pela antena.

No lado de recepção, a mesma antena da estação terrena que transmite o sinal para o satélite recebe o sinal oriundo da estação espacial (portadora modulada em RF). Os dois sinais, de *uplink* e *downlink*, possuem uma diferença de potência de várias ordens de magnitude e, também, estão separados pelo uso de polarizações ortogonais [3]. Diplexadores são empregados para aumentar a separação dos sinais no domínio da frequência, transformadores tipo "*orthomode*" são usados para acoplar os sinais polarizados ortogonalmente em um mesmo guia de onda e polarizadores convertem a polarização linear em circular (e vice-versa). O sinal

passa por um estágio de pré-amplificação onde um amplificador de baixo ruído (LNA - *low-noise amplifier*) é utilizado para se obter a relação sinal/ruído adequada. O *downconverter* (conversor de descida) translada o sinal de RF para a frequência intermediária. Depois de demodulado, o sinal é entregue ao decodificador, que tem função oposta ao codificador, e enviado ao usuário do sistema ou para a rede terrestre.

FIGURA 35 - DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DE UMA ESTAÇÃO TERRENA



3.1.1 O subsistema de Banda Básica

O subsistema de Banda Básica inclui as facilidades de interconexão com a rede terrestre, quando utilizada. Os dispositivos que compõem esse sistema variam conforme a finalidade da estação terrena, as necessidades e forma de interconexão com a rede terrestre.

Basicamente, para um serviço de canais telefônicos (transmissão de voz), o subsistema de banda básica utiliza, além dos meios de transmissão e equipamentos associados (transmissão via fibra óptica, microondas, etc.), estágios de multiplexação, demultiplexação, interpolação de sinais, supressão e cancelamento de ecos, entre outros.

Mesmo que os canais telefônicos já tenham sofrido algum processo de multiplexação na rede terrestre, torna-se sempre necessário rearranjá-los na rede por satélite uma vez que nem todos os canais seguem para o mesmo destino. Dessa forma, os canais telefônicos que têm a mesma destinação são agrupados e multiplexados, modulam uma portadora e são transmitidos para o destino desejado. Na recepção, de forma semelhante, apenas uma parcela dos canais recebidos são transmitidos para uma conexão específica com a rede terrestre, o que exige novo rearranjo na estrutura dos canais.

Enquanto a multiplexação digital (TDM) usada no sistema por satélite segue as mesmas recomendações usadas nas redes terrestres (com 24 ou 30 canais telefônicos), a multiplexação analógica de canais telefônicos (FDM) sofre algumas alterações [6]. Por exemplo, um processo usado no sistema INTELSAT considera que os 12 primeiros canais telefônicos são trasladados para a banda de 12 a 60 kHz, formando o grupo A. Um sistema multiplex de 24 canais, com banda entre 12 e 108 kHz, é obtido pela adição do quinto grupo de 12 canais com o grupo A invertido. Um multiplex de 36 canais é obtido pela adição do quarto e quinto grupos de 12 canais do processo de translação e o grupo A, também invertido. Esse processo se repete em passos de 12 canais até 72 canais, ocupando a banda de 12 a 300 kHz. Para arranjos maiores, há uma lei de formação que associa diversos supergrupos com o grupo A.

A interpolação digital da fala (DSI – *digital speech interpolation*) [6] é outra técnica associada ao subsistema de banda básica que consiste na exploração do silêncio em um canal telefônico para se inserir bits representativos da conversação de outro canal telefônico. Um conversa telefônica típica consiste de uma série de períodos de atividade de fala e de inatividade (períodos de silêncio). Isto resulta em um grande desperdício de banda uma vez que nenhuma informação é transmitida durante os períodos de silêncio. O sistema DSI aproveita mais eficientemente a largura de banda do sistema por permitir que as informações de fala de um canal seja transmitidas durante o período de silêncio de outro canal.

Dessa forma, m canais telefônicos de uma rede terrestre podem ser transmitidos sobre n canais digitais de um multiplex, onde $m > n$. São utilizados detetores de fala para se identificar os silêncios nos canais terrestres. O equipamento DSI associa um canal do enlace de satélite para cada canal ativo da rede terrestre e as informações de alocação de bits são transmitidas através de um canal de sinalização. Na recepção, o processo é inverso, sendo que a ordem das mensagens dentro de cada canal é restaurada com o uso das informações transmitidas pelo canal de sinalização. Esse sistema, no entanto, tem suas limitações que implicam na degradação do sistema quando determinada rajada de sinais de voz não pode ser transmitida devido à ocupação de todos os canais do satélite, ou quando há sobrecarga no canal de sinalização ou, ainda, quando um grande número de canais da rede terrestre têm um fator de atividade superior ao previsto no sistema (por exemplo, quando ocorre transmissão de dados dentro de canais telefônicos).

Outro sistema normalmente usado para conexão entre as redes terrestre e de satélite é o equipamento de multiplicação de circuitos digitais (DCME – *digital circuit multiplication equipment*) [33]. Esse sistema permite a concentração de canais tronco de 64 kbps em um reduzido número de canais de transmissão, utilizando duas técnicas básicas: a interpolação digital da fala (DSI – *digital speech interpolation*), descrita anteriormente, e a modulação digital por código de pulso diferencial adaptativa (ADPCM – *adaptive differential pulse code modulation*) que permite que 62 canais sejam alocados dentro de um fluxo de 2,048 Mbps. No sistema DCME, os canais telefônicos nos quais trafegam dados são processados separadamente. Esses canais são detectados pela presença de um tom de 2100 Hz usado para desabilitar os supressores de eco existentes na linha de comunicação. Os canais digitais da rede terrestre são transmitidos diretamente, sem o uso de interpolação digital ou codificação adaptativa. Segundo MARAL [6], o emprego de um sistema DCME pode permitir que um certo número de canais de satélite possam transmitir cerca de 5 vezes (ou mais) canais terrestres em comparação com a

mesma transmissão sem o uso de nenhuma técnica de otimização.

São utilizados, também, dispositivos supressores e canceladores de eco. O eco, que é o retorno de uma parcela da energia transmitida, surge nos sistemas de comunicação devido, basicamente, ao descasamento de impedâncias nas híbridas que fazem a conversão dos circuitos de 2 para 4 fios e, também, nas conexões a 2 fios entre os dispositivos de comutação. Em uma rede de satélite, esse problema é realçado pela longa distância entre o satélite geoestacionário e a estação terrena e que gera retardos na ordem de 250 ms (ver seção 2.1.1.2) para um enlace completo (*uplink* e *downlink*). A supressão de eco consiste em inserir uma alta impedância no canal de retorno, permitindo somente que a informação flua pelo canal do usuário que esteja efetivamente falando no momento. Já o cancelamento de eco usa técnicas mais modernas e consiste em se gerar um sinal de eco, idêntico ao eco presente no canal, e inseri-lo com fase invertida no canal de comunicação. O cancelamento de eco é uma técnica que requer considerável poder computacional e facilidades de processamento de sinal para cada canal de comunicação.

3.1.2 O subsistema de frequência intermediária

Para que seja possível transmitir a informação digital em banda básica sobre um canal de satélite que tem características “passa-faixa”, é necessário transferir a informação digital para uma onda portadora que esteja adequada às frequências do canal. Esta técnica é chamada de modulação digital da onda portadora.

A função do modulador é receber o fluxo de símbolos oriundos do codificador e usá-los para modular uma portadora de frequência intermediária (FI). Nos satélites de comunicação, emprega-se a frequência intermediária de 70 MHz para os canais que utilizam uma largura de banda no transponder de 36 MHz, e 140

MHz para os canais que usam uma largura de banda de 54 ou 72 MHz [3]. A modulação de onda portadora em frequência intermediária é usada porque há certas dificuldades em se projetar moduladores que operem com eficiência no espectro de frequência de *uplink* (por exemplo, 6 GHz ou 14 GHz).

Para esquemas de modulação binária, cada bit de saída do codificador é usado para selecionar uma de duas possíveis formas de onda. Para um esquema de modulação *M-ário*, a saída do codificador é segmentada em conjuntos de k bits, onde $M = 2^k$ e cada conjunto de k -bits ou símbolos é usado para selecionar uma entre M formas de ondas. Por exemplo, para o caso particular da modulação BPSK (seção 2.2.1), o bit 1 é representado pela forma de onda $s_1(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t)$ e o bit 0 é representado pela forma de onda $s_0(t) = -A \cdot \cos(\omega_0 t)$, onde ω_0 é a frequência intermediária.

A portadora modulada em frequência intermediária oriunda do modulador é enviada ao *upconverter* onde a portadora em FI é trasladada para o espectro de frequência de *uplink*, em radiofrequência (RF). Em seguida o sinal é entregue ao amplificador de alta potência para amplificação e transmitido para o satélite.

No lado de recepção, o sinal modulado em RF oriundo do satélite e após ter passado por estágios de amplificação é enviado ao *downconverter* que tem a função de trasladar o sinal do espectro de radiofrequência para o de frequência intermediária, com as mesmas considerações feitas no caso da transmissão. O sinal em FI passa pelo demodulador onde, então, a informação é retirada.

O demodulador retira a informação do sinal de FI através de uma análise probabilística da portadora. A probabilidade de que um símbolo seja detectado corretamente depende da relação sinal/ruído da onda portadora, das características do canal do satélite e do esquema de detecção empregado. Como a seqüência de símbolos recuperados pelo demodulador pode conter erros, o decodificador emprega técnicas de detecção de erros através da análise de bits redundantes inseridos pelo codificador. [3]

3.1.3 O subsistema de radiofrequência

Nessa seção são válidas as considerações feitas na seção 2.1.2.2 onde analisou-se as características do receptor e transmissor do *payload* do satélite de comunicação. Como naquele caso, a estação terrena, ao receber o sinal pelo *downlink*, necessita amplificá-lo acrescentando a menor quantidade possível de ruído. Para tanto, o sinal passa por um amplificador de baixo ruído (LNA). Além disso, são usadas outras fases amplificadoras e um receptor divisor. Quando o sistema opera com polarizações ortogonais, dois conjuntos de dispositivos receptores devem ser instalados, um para cada polarização.

No *uplink*, o sinal de portadora deve ser amplificado para poder ser transmitido corretamente para o segmento espacial. Nesse caso, é utilizado um amplificador de alta potência, o HPA. Os valores de amplificação do dispositivo transmissor e receptor dependerão da quantidade de múltiplas portadoras utilizadas bem como a potência EIRP requerida.

A estação terrena normalmente transmite uma ou mais portadoras simultaneamente sendo que podem ser utilizados dois sistemas básicos para a amplificação de múltiplas portadoras: o sistema amplificador único e o sistema amplificador individual [8].

No sistema amplificador único é usado um HPA para amplificar múltiplas portadoras. No sistema amplificador individual, HPA's independentes são utilizados para cada portadora e os sinais amplificados de saída de cada HPA são combinados por um combinador de sinais.

3.1.4 O subsistema de antena

As antenas são os dispositivos acopladores do sinal de RF

(radiofrequência) entre o satélite e a estação terrena. No segmento terrestre, as características necessárias para as antenas de uma estação são [6]:

- a) alta diretividade ao longo do eixo da antena, em princípio na direção da posição do satélite;
- b) baixa diretividade nas outras direções, em especial naquelas correspondentes a outros satélites que estejam operando na mesma faixa de frequências;
- c) a maior eficiência possível da antena para as direções de *uplink* e *downlink*;
- d) alta isolamento entre as polarizações ortogonais;
- e) menor temperatura de ruído possível;
- f) permanente apontamento da antena na direção do satélite;
- g) limitação, o quanto possível, dos efeitos meteorológicos locais (vento, temperatura, etc.).

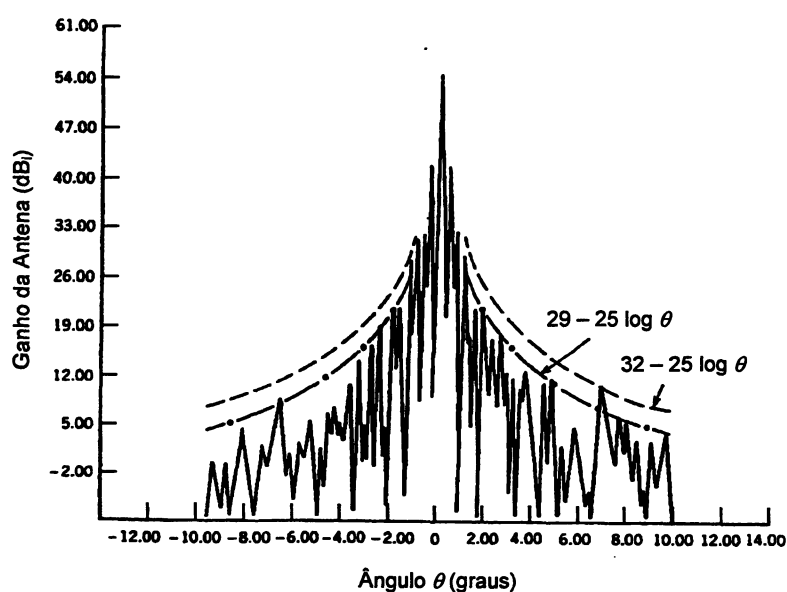
3.1.4.1 O ganho da antena

Como visto anteriormente, o enlace de comunicação em um sistema por satélite é composto de duas trajetórias: uma ligando a estação transmissora ao satélite (*uplink*) e outra ligando o satélite à estação transmissora (*downlink*). Na seção 2.2.3 (O enlace de satélite) foi visto que a performance de enlace é indicada pela relação C/N (*carrier to noise ratio*) obtida do sistema. Pela análise da Equação 67, verifica-se que a relação C/N depende das potências utilizadas nas transmissões, dos ganhos das antenas, das perdas no sistema, da temperatura de ruído dos receptores, da temperatura de ruído das antenas, entre outros. Observa-se, então, que as antenas participam diretamente do desempenho do sistema, ou seja, são responsáveis pelo termo: ganho, e entram na composição da temperatura

de ruído do sistema. Define-se ganho como sendo a razão entre a potência radiada (ou recebida) por unidade de ângulo sólido de uma antena em uma determinada direção e a potência radiada (ou recebida) por unidade de ângulo sólido de uma antena isotrópica alimentada com a mesma potência [31]. O ganho é, então, um elemento chave para o desempenho da antena da estação terrena porque afeta diretamente a potência da portadora de *uplink* e *downlink*.

Entre os diversos tipos existentes de antenas, a antena refletora é o mais utilizado nas comunicações por satélite. Isso porque este tipo de comunicação é tipicamente de longa distância, o que exige um ganho muito alto para esses dispositivos. Com os sistemas refletores, são obtidos ganhos que excedem 30 dB na região de microondas [31], como mostra o exemplo da Figura 36 que ilustra o diagrama de radiação típico de uma antena com refletor parabólico, com figura de mérito G/T de 31,7 dB/K para 4 GHz. Esse diagrama apresenta no eixo horizontal a posição angular em relação à direção do máximo de irradiação e, no eixo vertical, o ganho em dB. As linhas tracejadas indicam os limites de dois lóbulos laterais e o ganho máximo do lóbulo principal é 55,4 dB_i [7].

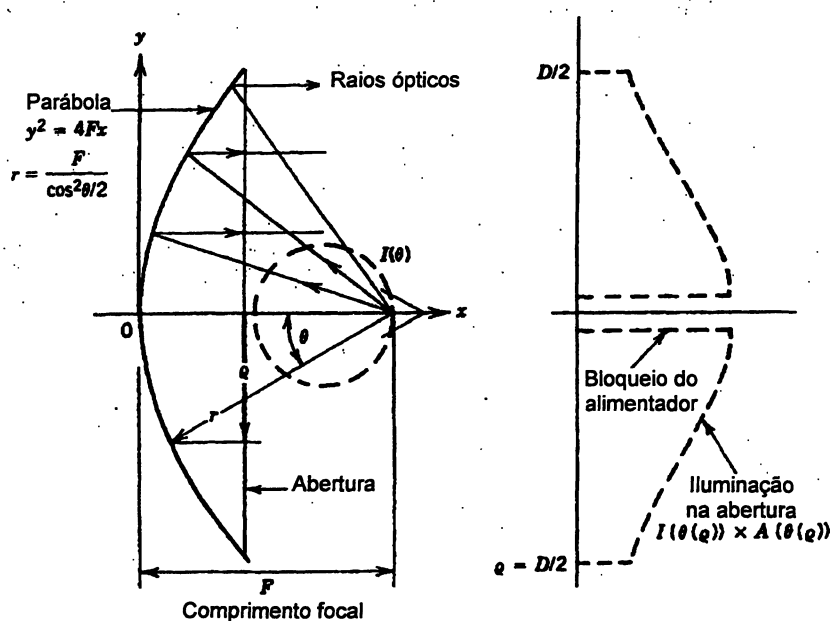
FIGURA 36 - EXEMPLO DO GANHO DE UMA ANTENA PARABÓLICA



O ganho da antena depende da quantidade de energia oriunda do

alimentador que é espalhada sobre o refletor. Em um caso ideal, isto seria uma distribuição uniforme (diretividade padrão) o que, na prática, é muito difícil de obter. Como mostrado na Figura 37 [7] para uma antena simétrica, a potência decresce do centro para as bordas. Se o espalhamento é muito grande, muita potência é perdida por não alcançar o refletor; se for muito pequeno, o refletor não está sendo utilizado eficientemente e o feixe resultante terá um espalhamento maior.

FIGURA 37 - POSSÍVEL DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM UMA ANTENA SIMÉTRICA



Da teoria de antenas [31], o ganho de uma antena parabólica simétrica eletricamente grande é dado aproximadamente por:

$$G = \eta_a \frac{4\pi A}{\lambda_o^2} = \eta_a \frac{4\pi A f^2}{c^2} \quad (78)$$

onde,

A: área da abertura da antena (m^2);

λ_o : comprimento de onda (m);

f : frequência (Hz);

$c = 2,997925 \times 10^8$ m/s, é a velocidade da luz;

η_a = eficiência da abertura da antena ($\eta < 1$).

Para uma abertura circular, se,

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (79)$$

tem-se,

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \eta \left(\frac{\pi f D}{c} \right)^2 \quad (80)$$

onde r é o raio (m) e D (m) é o diâmetro da antena. A eficiência da antena η_a representa a porcentagem da área de abertura A que é usada eficientemente na transmissão ou recepção e é um produto de diversos fatores de eficiência que reduzem o ganho da antena, além de depender, também da aplicação. Os valores típicos encontram-se na entre 0,65 e 0,75 (65% a 75%).

Expressando o ganho em função da antena isotrópica, ou seja, em dB_i, encontra-se,

$$G = (20 \log \pi - 20 \log c) + 20 \log D + 20 \log f + 10 \log \eta_a \quad (\text{dB}_i) \quad (81)$$

$$G = 20,4 + 20 \log D + 20 \log f + 10 \log \eta_a \quad (\text{dB}_i) \quad (82)$$

sendo D dado em metros e f em GHz.

3.1.4.2 Os tipos de antenas

Entre os diversos tipos de antenas, a comunicação por satélite se utiliza, em especial, das antenas do tipo corneta e refletora. As primeiras possuem baixo ganho e são normalmente empregadas como o radiador primário das antenas refletoras. As cornetas também são usadas na estrutura dos satélites devido às suas pequenas dimensões físicas e à largura de feixe que produzem, que é adequada à cobertura global. As antenas refletoras, ao contrário das cornetas, são usadas devido ao alto ganho alcançado.

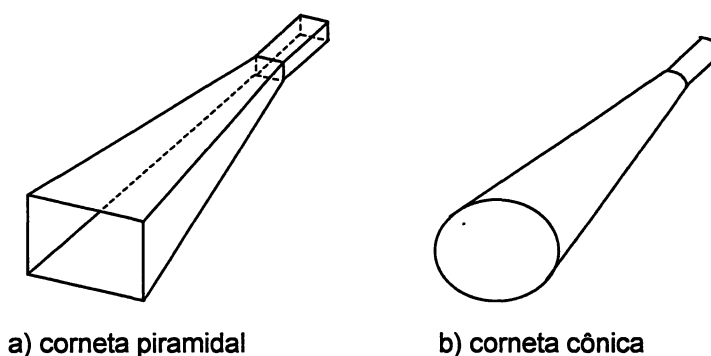
As antenas tipo corneta são classificadas em antenas cônicas e piramidais, conforme o tipo de abertura [8]. A corneta piramidal tem sido largamente usada como uma antena padrão para a medição de ganho de antenas por permitir irradiar ondas livres de polarização cruzada. Além disso, seu ganho pode ser precisamente calculado através de suas dimensões físicas. As cornetas cônicas são muito usadas como o radiador primário das antenas refletoras das estações terrenas ou como as antenas de cobertura global do satélite de comunicação. Essas antenas podem ser classificadas conforme sua configuração:

- a) modo único de propagação: este é o tipo mais básico de antena corneta na qual somente é excitado um modo de propagação do sinal eletromagnético, o modo TE_{11} , que é modo dominante em um guia de onda circular;
- b) multimodo: neste tipo de antena, o modo TM_{11} é sobreposto ao modo TE_{11} com amplitude e fase adequadamente ajustadas em relação ao plano da abertura;
- c) modo híbrido: essas antenas têm características de baixa polarização cruzada, largura de feixe com simetria axial e pequenos lóbulos laterais. Nesse tipo de antena, as cornetas corrugadas são largamente usadas as quais possuem, internamente, diversas cristas e sulcos retos,

paralelos e alternados.

A Figura 38 ilustra os dois tipos básicos de cornetas: a piramidal e a cônica.

FIGURA 38 – ANTENAS TIPO CORNETA



Na comunicação por satélite são empregados diversos tipos de antenas refletoras, sendo que os refletores parabólicos (parabolóide de revolução) são os mais utilizadas pois proporcionam feixes estreitos sobre uma larga faixa de frequências [7]. A potência é transmitida (ou recebida) através de um alimentador na direção do refletor. As quatro principais montagens são:

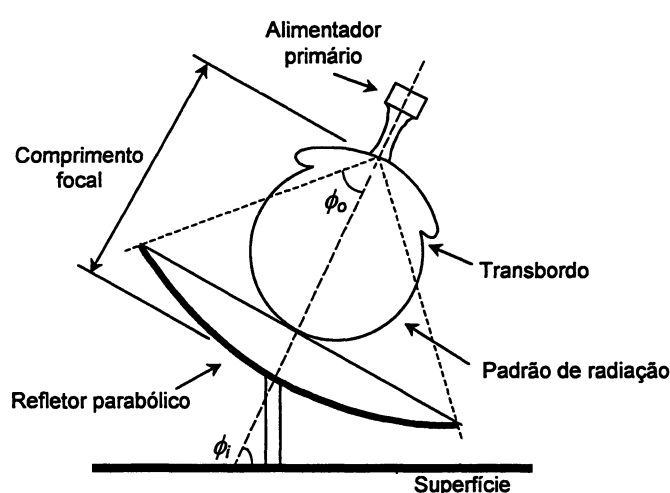
- a) Simétrica;
- b) *Offset*;
- c) Cassegrain,
- d) Gregoriana.

3.1.4.2.1 Antena com refletor parabólico simétrico

A Figura 39 ilustra a montagem de uma antena com refletor parabólico que tem simetria de rotação em relação ao eixo principal e na qual o alimentador primário

é colocado no foco. A vantagem do uso desse sistema é a simplicidade mecânica de sua montagem. O ponto fraco é que o alimentador e seu suporte mecânico têm um efeito de obstruir a abertura (bloqueio da abertura) [15]. Esse bloqueio leva à redução da eficiência da antena e um aumento no nível dos lóbulos laterais devido à difração por obstáculos.

FIGURA 39 - ANTENA COM REFLETOR PARABÓLICO SIMÉTRICO



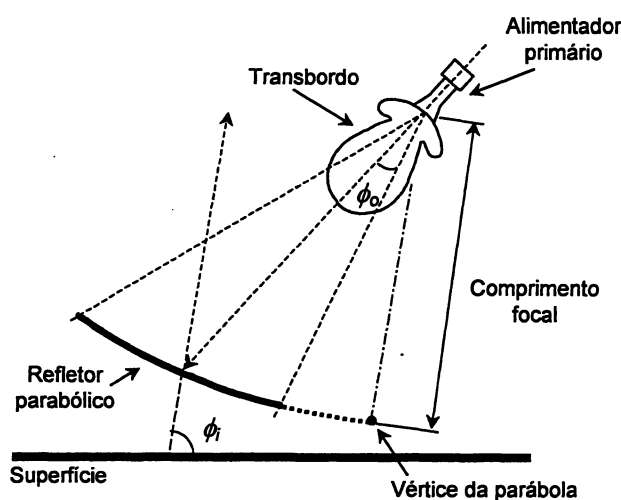
Além disso, o alimentador primário é voltado para a Terra e parte do diagrama de radiação do alimentador primário que não intercepta o refletor (*spillover*, ou transbordo) facilmente captura a radiação emitida pela superfície o que é uma grande contribuição para o aumento da temperatura de ruído da antena [6].

O transbordo é atenuado se a amplitude da radiação do alimentador primário é reduzida do centro para o perímetro (ver Figura 37). Para se obter uma baixa temperatura de ruído são necessários um alimentador primário direcional e um longo comprimento focal. Esse tipo de antena é, então, ineficiente e pouco apropriada para a instalação dos circuitos de RF atrás do alimentador; o volume desses equipamentos teria um significativo efeito de obstrução.

3.1.4.2.2 A antena com refletor parabólico *Offset*

A montagem com refletor parabólico *Offset* permite que os equipamentos de RF sejam colocados atrás do alimentador primário sem o efeito de obstrução [15], como mostra a Figura 40. Isto não implica, como o nome pode sugerir, compensação do alimentador em relação ao foco, mas sim, o uso de parte da parábola localizada em um dos lados do vértice, em relação ao perfil do refletor [6]. Atualmente utilizada para antenas de pequeno diâmetro (1 a 4 m), este tipo de montagem é pouco usada para grandes antenas onde a montagem Cassegrain é preferida. Com a montagem *Offset*, o *spillover* (transbordo) permanece orientado em direção à superfície e a temperatura da antena continua alta.

FIGURA 40 - ANTENA COM REFLETOR PARABÓLICO *OFFSET*



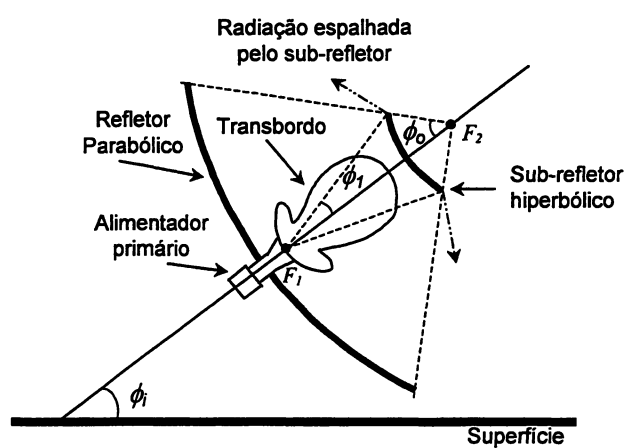
3.1.4.2.3 A antena com montagem Cassegrain

Neste tipo de montagem, ilustrado na Figura 41, o centro do alimentador primário está situado no primeiro foco F_1 de um refletor hiperbólico auxiliar [6]. O outro foco F_2 do refletor auxiliar coincide com o foco do refletor parabólico principal.

Se D é o diâmetro da abertura do refletor parabólico e f_d é o comprimento focal, o vértice do ângulo sólido $2\phi_0$ sob o qual o refletor é visto é dado por:

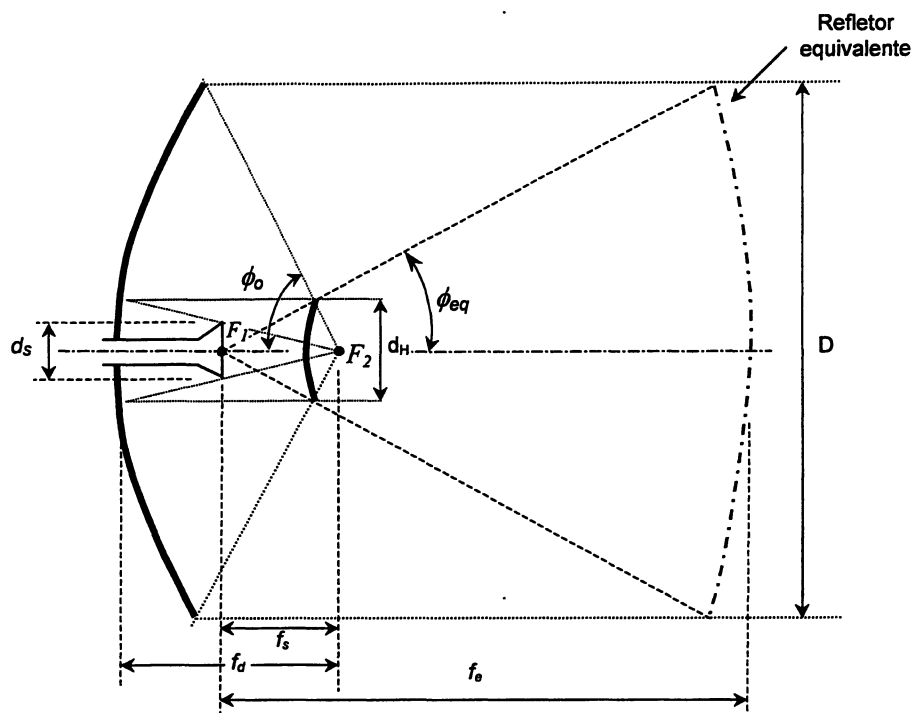
$$\operatorname{tg}(2\phi_0) = \frac{D}{4f_d} \quad (83)$$

FIGURA 41 – A ANTENA CASSEGRAIN



O desempenho da antena Cassegrain é avaliado pelo uso do conceito de um parabolóide equivalente [8]. Uma antena parabólica refletora equivalente é definida como uma antena que possui um refletor simples de diâmetro idêntico ao do refletor principal da antena Cassegrain e um comprimento focal equivalente ao da montagem Cassegrain. O parabolóide equivalente tem, então, o diâmetro D , comprimento focal f_e e é caracterizado pelo vértice do ângulo $2\phi_{eq}$ do refletor auxiliar como visto do foco F_1 , como ilustra a Figura 42.

FIGURA 42 – O REFLETOR EQUIVALENTE DE UMA ANTENA CASSEGRAIN



A antena Cassegrain é, então, mais eficiente e mantém as vantagens das antenas com longo comprimento focal: a temperatura de ruído é menor primeiro porque a maior parte do transbordo não está direcionado para a superfície mas para o céu e, segundo, porque o próprio transbordo é menor; grandes valores do comprimento focal equivalente permite o uso de alimentador primário direcional e baixos valores do comprimento focal f_d e f_s dos refletores parabólicos e hiperbólicos atenuam o transbordo. [6]

Outra vantagem é que circuitos de RF podem estar perto do alimentador primário que está colocado no refletor principal, limitando o efeito de perdas no enlace. Contudo, para antenas com grande diâmetro (em geral, 30 m), o alimentador está a uma altura significativa da superfície. Para facilitar a instalação, é possível instalá-lo no nível da superfície, sob a antena, pelo uso de um sistema de espelhos de microondas para guiar as ondas de rádio do alimentador primário do nível da superfície ao foco F_1 , do refletor [8]. Esse arranjo permite que as grandes perdas inerentes aos cabos coaxiais ou guias de onda sejam evitados enquanto permite a

rotação da antena sobre 2 eixos ortogonais e permitindo que o alimentador e o equipamento de radiofrequência permaneçam fixos. Atualmente, devido ao alto custo e também à redução do diâmetro da antena, o que tem facilitado a instalação do equipamento alimentador de radiofrequência no foco da antena, este tipo de montagem periscópica está em desuso. [8]

Uma desvantagem da montagem Cassegrain é o efeito de obstrução do refletor auxiliar. A perturbação causada pelo espelho auxiliar leva a uma pequena redução do ganho e no ponto de 3 dB do feixe, um visível aumento no nível do primeiro lóbulo lateral e a uma modificação no nível ou largura dos demais lóbulos. Esses efeitos podem ser negligenciáveis para pequenas taxas de d_H/D (onde d_H é o diâmetro do refletor auxiliar). Para antenas de tamanho médio esses efeitos podem ser minimizados pela seleção de dimensões onde:

$$\frac{f_s}{f_d} = \frac{d_s}{d_H} \quad (84)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{2f_s\lambda_o}{\eta_s}} \quad (85)$$

sendo η_s a eficiência do alimentador primário. O efeito de obstrução do refletor auxiliar pode ser superado pela escolha de uma montagem Cassegrain *Offset*.

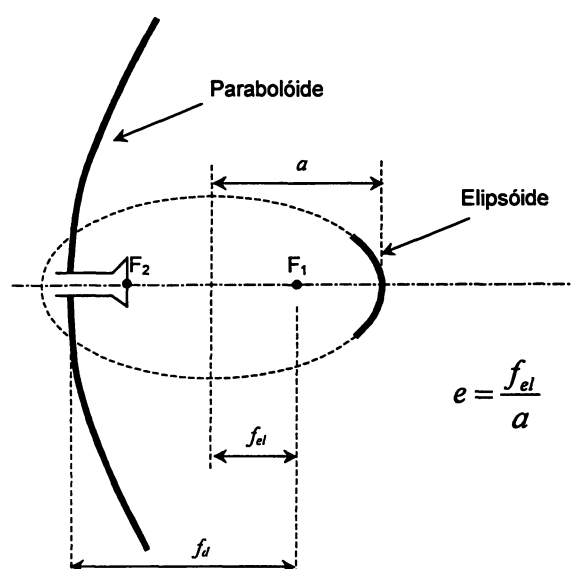
3.1.4.2.4 Antena com montagem Gregoriana

Um outro tipo de antena também utilizado nas transmissões por satélite é a antena Gregoriana [8]. Essa antena é composta por dois refletores, sendo o refletor principal um parabolóide e o sub-refletor um elipsóide, como mostrado na Figura 43. O ponto focal F_1 do parabolóide é compartilhado pelo elipsóide como sendo um dos

focos. O centro de fase do primeiro radiador é colocado no foco F_2 do elipsóide. Na figura, f_d é o comprimento focal da parábola, f_{el} o comprimento focal da elipse e e a excentricidade da elipse.

As considerações sobre as antenas Gregorianas são muito similares às feitas para as antenas do tipo Cassegrain e serão, portanto, omitidas neste trabalho.

FIGURA 43 – A ANTENA GREGORIANA

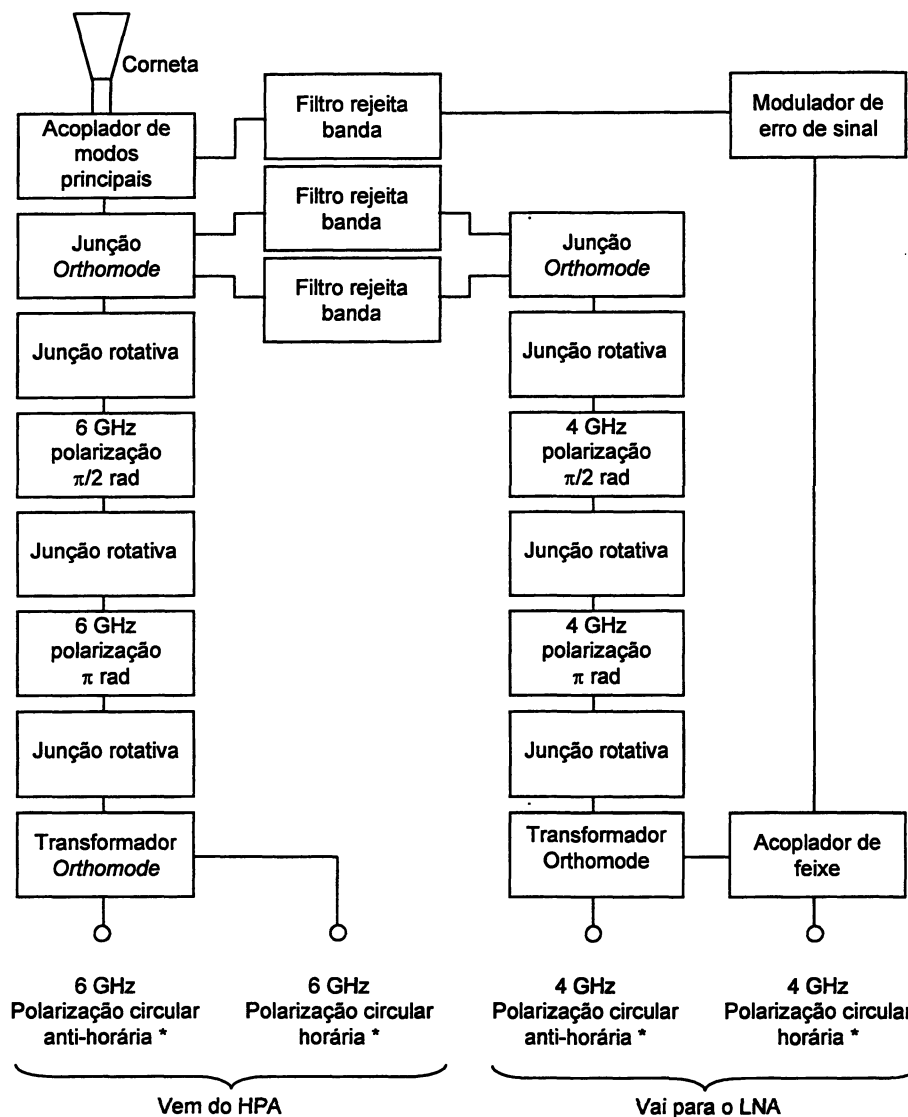


3.1.4.3 Os sistemas com dupla polarização

Como descrito na seção 2.1.2.2.4, as estruturas de comunicação por satélite empregam o reuso de freqüências para aumentar a capacidade total do sistema. Nesse caso, uma determinada banda de freqüências do transponder pode ser acessada tanto na polarização linear horizontal e vertical, na polarização circular horária e anti-horária.

A Figura 44 ilustra um modelo de alimentador com uma montagem para polarização ortogonal, utilizado por estações terrenas para acessar os satélites da série INTELSAT V [8].

FIGURA 44 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM ALIMENTADOR COM POLARIZAÇÃO ORTOGONAL



NOTA: * Polarização do sinal no enlace entre o satélite e a estação terrena

Nesse exemplo, os sinais oriundos do HPA na banda de 6 GHz e polarizados linearmente (vertical e horizontal) são acoplados pelo transformador *orthomode* e convertidos em polarização circular horária e anti-horária pelos defasadores diferenciais de um quarto de onda (polarizador $\pi/2$) e de meia onda (polarizador π). Na junção *orthomode* o sinal a ser transmitido é separado do sinal de 4 GHz recebido pela antena. Na recepção, que funciona do sentido oposto ao da transmissão, o dispositivo acoplador de modos seleciona o modo de propagação usado para o auto-alinhamento da antena. Esse auto-alinhamento, quando

empregado, permite que os lóbulos laterais da antena sejam os menores possíveis evitando (ou pelo menos diminuindo) o nível de interferência para (ou de) outros sistemas. Essa informação é enviada para o modulador de erro de sinal que separa o sinal de erro do sinal de referência. Então, o sinal modulado é combinado com o sinal de referência pelo acoplador de feixe e enviado ao LNA.

Os sistemas que usam a polarização dual são altamente afetados pela despolarização causada por intempéries, em geral, as chuvas. As chuvas (gotas de chuva não esféricas) geram atenuação e defasagem diferenciais que distorcem tanto a polarização linear como a circular, transformando-as em polarização elíptica.

Tanto para as polarizações circulares como lineares, a discriminação de polarização cruzada (XPD – *cross-polarization discrimination*) [19] é uma medida da qualidade da polarização sendo definida pela taxa entre as componentes de co-polarização (componente original da polarização) e polarização cruzada (gerada pela degradação da chuva). Assim,

$$XPD = \frac{P_{co}}{P_{cross}} \quad (\text{dB}) \quad (86)$$

onde,

P_{co} : é a componente de co-polarização;

P_{cross} : é a componente de polarização cruzada.

Em sistemas que empregam o reuso de frequência (duas polarizações), é desejável que a polarização cruzada esteja em torno de 30 dB abaixo para o caso de se empregar em um mesmo sistema a polarização linear horizontal e vertical ou polarização circular horária e anti-horária [15]. O valor de XPD entre um sinal linearmente polarizado e outro com polarização circular deve ser cerca de 3 dB [19]. Para regiões onde espera-se uma degradação acentuada devido à chuvas, torna-se necessário o uso de redes de compensação de despolarização objetivando restaurar a ortogonalidade entre os dois canais.

Na comunicação por satélites, algumas estações espaciais não tem os

sinais polarizados horizontalmente exatamente paralelos à linha do equador e os sinais verticais alinhados com os pólos, ocorrendo variações entre 5° e 30° [7]. Esse desvio implica que as antenas das estações terrenas devem ser alinhadas para cada satélite e que a isolamento entre satélites adjacentes será menor do que aquela se os transponders tivessem polarização cruzada exata.

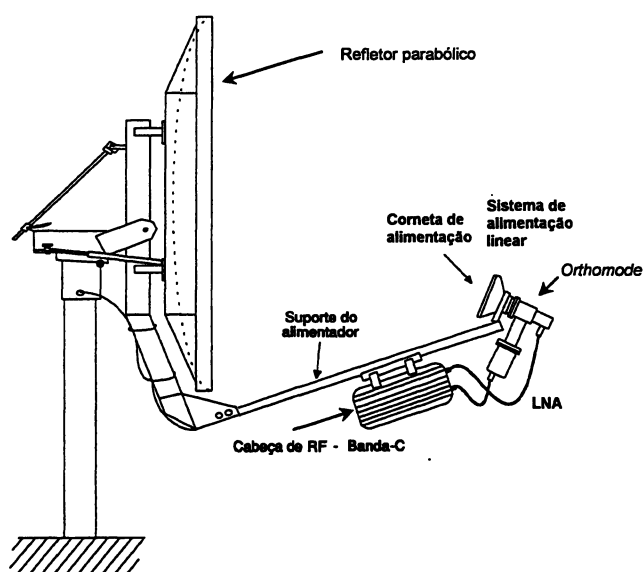
O uso de polarização circular evita os problemas citados. Em sistemas reais, no entanto, tanto a polarização linear como a circular têm sido usadas com resultados similares. A escolha da polarização é orientada pelo uso de uma banda específica de frequências, aspectos regulatórios e a proximidade entre satélites.

3.1.5 Exemplo de composição entre subsistemas

Conforme o tipo de estação terrena, diversos subsistemas podem ser colocados juntos como uma forma de otimizar os espaços de instalação, diminuição de perdas de transmissão da informação e redução de custos. A Figura 45 ilustra uma situação de instalação de uma estação terrena de pequeno porte onde, junto com a antena com diâmetro de 1,8 m, são instalados vários equipamentos que fazem parte de subsistemas diferentes.

Nesse exemplo, observa-se a cabeça de RF, que contém o HPA, o LNA, o *upconverter* e *downconverter*, a antena tipo corneta que o alimentador primário do sinal de microondas, e antena tipo refletor parabólico. O sinal de FI é enviado através de cabos coaxiais até dispositivos internos ao ambiente do usuário, onde esse sinal é processado. Esse conjunto está usando uma configuração *offset*.

FIGURA 45 – EXEMPLO DE MONTAGEM DE ANTENA E EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÃO



3.1.6 O subsistema de rastreamento

O sistema de rastreamento tem por objetivo manter a antena permanentemente apontada para o satélite. Isto porque diversas perturbações orbitais afetam a estabilidade do satélite geostacionário (seção 2.1.1.5). As exigências para o subsistema de rastreamento variam conforme as características do subsistema de antenas e da órbita do satélite. Para estações terrenas com antenas de pequeno diâmetro (1,8 m por exemplo) o sistema de rastreamento pode ser eliminado o que reduz consideravelmente os custos de implantação.

Dois sistemas de rastreamento são muito usados [3]: o sistema de multi-cornetas o qual combina a saída de quatro ou mais cornetas para se obter um sinal de erro; e o sistema de modo de propagação principal que utiliza a característica dos modos principais de um guia de onda circular (alimentador), não tendo componente de sinal na direção do eixo do guia.

O sistema de multi-cornetas usa a diferença entre dois feixes; um sinal de

erro é formado por duas cornetas colocadas simetricamente em referência ao eixo do parabolóide. A antena é, então, direcionada para que o sinal de erro torne-se zero. Um sistema prático consiste no uso de quatro cornetas montadas em arranjo. O erro de ângulo em azimute é obtido pela diferença na saída de um par de cornetas colocadas à direita e à esquerda, enquanto o sinal de erro de elevação é obtido pela diferença entre um par de cornetas colocadas nos lados superior e inferior. A soma das quatro saídas produz o sinal de erro.

O sistema de rastreamento de modo de propagação principal usa algum dos modos de um guia de onda circular, como os modos TM_{01} ou TE_{01} , como o sinal de erro. Uma vez que esses modos não têm componentes na direção do eixo do guia de onda, o padrão de radiação de campo distante excitado por esses modos são nulos na direção do eixo do sistema de radiação, o qual coincide com a direção de pico do feixe excitado pelo modo dominante. Tal característica pode ser convenientemente aplicada ao sistema de rastreamento especialmente ao sistema de auto-rastreamento. O ganho máximo será alcançado no canal de comunicação se a antena é apontada na direção onde o sinal de erro tiver o valor nulo. Um sistema com motor de passo conduz a antena, no método de tentativa-e-erro, de forma que o nível máximo de sinal recebido sempre seja obtido. O sistema de rastreamento de modo de propagação principal é usado quando deseja-se obter uma alta precisão no sistema de rastreamento.

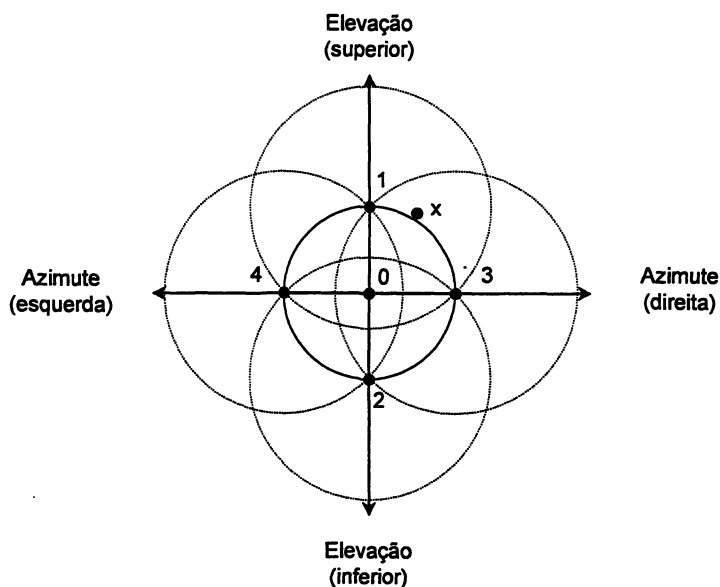
Outros sistemas, mais modernos, também têm sido propostos como os que utilizam as técnicas de rastreamento de feixe eletrônico oblíquo (EBS – *electronic beam squint*) [34]. Esse sistema emprega técnicas de comutação eletrônica para obter medidas simultâneas e próximas do feixe de sinal e, conseqüentemente, a determinação desejada de erro. Amostras do feixe de sinal de entrada são obtidas para um determinado número de posições em torno da abertura nominal da antena.

A Figura 46 ilustra essa situação para um exemplo com 4 posições. O eixo central do círculo (ponto 0) representa a direção de abertura da antena enquanto as posições 1, 2, 3 e 4 representam quatro posições oblíquas. Para se localizar uma

posição que esteja fora do eixo da abertura da antena (o "x" na figura), o feixe varre de forma oblíqua e seqüencial cada posição e a amplitude do sinal recebido é medida por um estágio no receptor. Estes valores são armazenados junto com suas coordenadas. No exemplo dado, o sinal nas posições 1 e 3 será maior que o sinal nas posições 2 e 4. Além disso, o sinal na posição 1 será ainda maior que o sinal na posição 3.

Utilizando-se os diversos dados medidos em cada direção durante um período de amostragem pré-determinado, as coordenadas do ponto "x" são calculadas e alimentam o sistema mecânico de posicionamento. A ação de amostragem da técnica EBS ocorre pela geração proporcional dos modos de propagação de alta ordem do guia de onda dentro da corneta do alimentador.

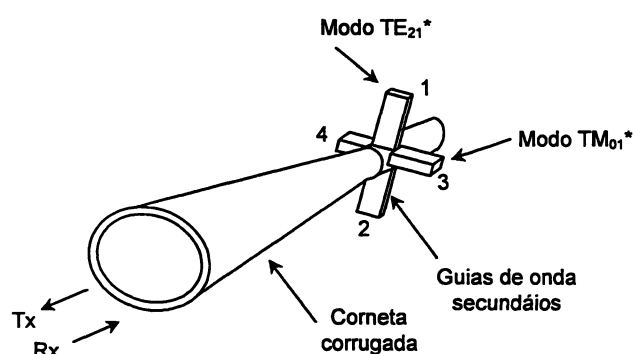
FIGURA 46 – DIAGRAMA POLAR COM OS PONTOS DE MÁXIMO DOS GUIAS DE ONDA SECUNDÁRIOS



A Figura 47 ilustra a conexão serial de um alimentador tipo corneta corrugada e os guias de ondas auxiliares, para um feixe de sinal com polarização circular. Com o feixe de sinal fora do eixo da abertura da antena, o alimentador é dimensionado de maneira que os modos TM_{01} e TE_{21} sejam excitados na corneta.

Uma unidade de modo TE_{21} , consistindo de dois guias de ondas auxiliares retangulares e diametralmente opostos, são acoplados longitudinalmente (em relação à seção circular) em torno do guia de onda principal. Este sistema fornece os desvios no plano de azimute. A unidade de modo TM_{01} , também consistindo de guias de onda diametralmente opostos, é acoplado transversalmente e fornece as informações para ajuste do plano de elevação. Cada um dos guias de onda auxiliares são terminados por diodos PIN. A assimetria no guia de onda circular gera modos de propagação que são amostrados seqüencialmente pelos diodos PIN. Para assegurar que tanto o canal de *uplink* como o de *downlink* não sejam modulados, filtros de guia de onda são empregados para restringir o processo de conversão de modos na frequência do feixe do satélite.

FIGURA 47 – ALIMENTADOR DE RF USANDO SISTEMA *ELECTRONIC BEAM SQUINT*

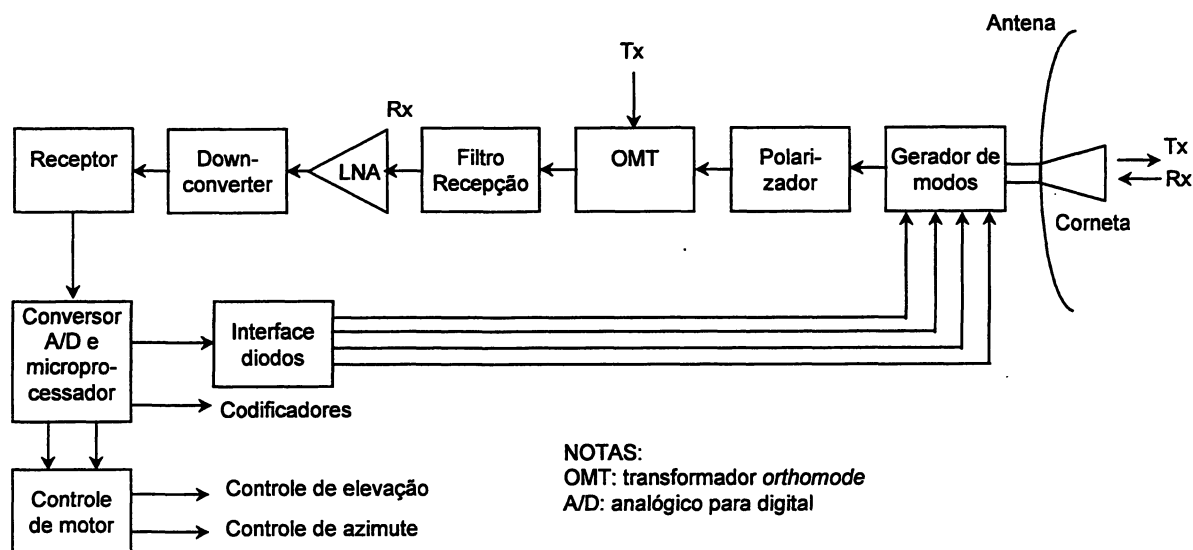


* Cada braço contém um filtro e um diodo PIN

O sistema de rastreamento completo é mostrado na Figura 48 onde o feixe de sinal recebido é detectado pelos dispositivos do subsistema de comunicações, transformado em medidas digitais por um conversor analógico digital, e enviado a um microprocessador que controla o motor do dispositivo mecânico de ajuste da antena. Uma seqüência de medição e amostragem permite que a varredura de todo padrão de radiação ocorra em uma fração de segundo. Com o uso de diodos PIN, com capacidade de comutação em torno de 60 ns, a taxa de amostragem pode

exceder várias centenas de quilohertz.

FIGURA 48 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA EBS



3.1.7 O subsistema de energia [6]

O subsistema de energia é responsável por coletar, adequar, distribuir e controlar a energia elétrica para todos os dispositivos da estação terrena. Na maioria dos casos, a energia elétrica é obtida de uma rede de distribuição porém, conforme as características de operação, pode ser necessário tomar diversas precauções contra a interrupção do fornecimento.

Em uma estação terrena, pode ser encontrado três tipos básicos de sistemas de alimentação de energia:

- a) **Sem interrupção:** são sistemas que alimentam todos os equipamentos que devem operar sem interrupção de energia, como os equipamentos de comunicação de radiofrequência, luzes de emergência, etc.;
- b) **Stand-by:** alimentam dispositivos que toleram certa interrupção no fornecimento de energia como os servomecanismos das antenas (não operam continuamente);

- c) Sem *stand-by*: que alimentam circuitos não críticos e que toleram a interrupção de energia por várias horas, como o ar-condicionado, por exemplo.

Como citado anteriormente, as redes de distribuição são a principal fonte de energia elétrica para todos esses sistemas de alimentação. Para os sistemas com alimentação do tipo *stand-by*, a fonte secundária é suprida pela energia de grupos motor-gerador. No caso da alimentação sem interrupção, a alimentação secundária é primeiramente obtida com o uso de baterias que permitem que os equipamento sejam alimentados continuamente. Imediatamente após a falha da rede de distribuição e a conexão das baterias ao sistema, são acionados um ou mais conjuntos motor-gerador. Assim que os grupos motor-gerador atinjam a condição de operação, esses passam a alimentar o sistema, ocorrendo a conseqüente desconexão das baterias. O banco de baterias tanto é conectado ao sistema de distribuição como ao sistema de geradores, com o objetivo de providenciar a recarga desses dispositivos.

Além dos sistemas de geração e de distribuição de energia, o sistema de alimentação conta, ainda, com unidades retificadoras, alternadoras e controladoras que dão suporte às diversas fases do processo de alimentação de energia. Conta, também, com unidades responsáveis pela proteção contra sobrecargas e curto-circuito. [6]

4 APLICAÇÕES, SERVIÇOS E ARQUITETURAS DE REDE

Os sistemas de comunicação por satélite podem ser divididos em três tipos de serviços, como sugerido pelo ITU:

- a) serviços fixos;
- b) serviços de difusão;
- c) serviços móveis.

Os serviços fixos e móveis são considerados as maiores áreas dentro do sistema de telecomunicações por satélite [35]. Entre esses serviços, o fixo é a aplicação mais antiga tendo alcançado grande sucesso internacional operando com satélites geoestacionários. A área móvel é a que tem oferecido as mais radicais e rápidas mudanças. O sistema de difusão encontrou diversas dificuldades em sua implementação inicial [35]. Esses serviços são providos aos usuários por empresas ou consórcios (ver Anexo 2) através de diversos tipos de redes de comunicação via satélite.

O objetivo desse capítulo é apresentar alguns possíveis serviços, aplicações e configurações de redes empregando-se o sistema de comunicação por satélites geoestacionários de comunicação.

4.1 AS REDES VSAT

As redes VSAT, acrônimo de *Very Small Aperture Terminal*, surgiram no início da década de 80, designando estações terrenas de satélite com antenas de abertura reduzida (tipicamente inferiores a 2,4 m de diâmetro) [36, 37], operando com a tecnologia CDMA e de forma unidirecional (simplex). Atualmente, operam com

transmissão de informação na forma duplex (bidirecional) com tecnologias FDMA e TDMA, além da CDMA [38], e são um dos serviços mais típicos da configuração fixa.

A tecnologia VSAT permite o fornecimento de vários tipos de serviços para os mais diversos segmentos, como agricultura, educação, construção civil, instituições financeiras, governo, transporte, entre outros [39]. O Quadro 6 traz um resumo com alguns tipos de serviços e aplicações para as redes VSAT.

| QUADRO 6 – EXEMPLOS DE SERVIÇOS E APLICAÇÕES PARA REDES VSAT | | |
|--|--------|--|
| Serviço | | Exemplo de aplicações |
| Distribuição e <i>broadcast</i> de informação | Dados | Bancos de dados, meteorologia, lista de preços, vendas a varejo |
| | Imagem | Facsimile |
| | Áudio | Jornais, programas de música, propaganda, controle de tráfego |
| | Vídeo | Programas de TV: Entretenimento, educação, etc. |
| Serviços de monitoração e coleta de informação | Dados | Meteorologia |
| | Imagem | Topografia |
| | Vídeo | Imagem com alta compressão |
| Serviços interativos (topologia em estrela) | Dados | Cartões de crédito, transações financeiras, reservas aéreas |
| Serviços interativos (topologia ponto-a-ponto) | Dados | Interconexão de redes locais de computadores, conexões entre CPU's |
| | Imagem | Canais de voz de banda estreita, canais de emergência |
| | Vídeo | Teleconferência de vídeo com compressão |

A arquitetura das redes VSAT pode ser avaliada do ponto de vista da topologia física e lógica [36]. Normalmente, a estrutura física é caracterizada por uma topologia em estrela, com múltiplas estações remotas de baixo custo conectadas, através do sistema de satélite, a uma estação central chamada "Hub". A comunicação entre um terminal VSAT remoto e a estação Hub, onde a portadora é

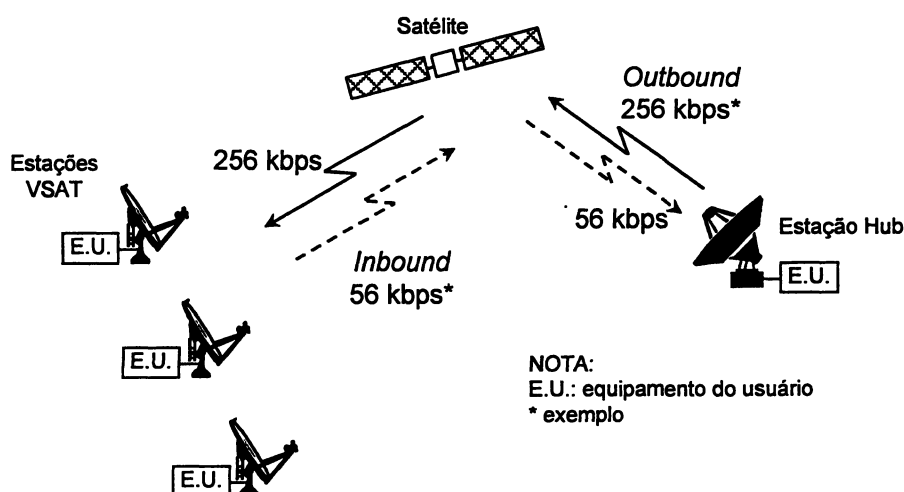
chamada de *inbound* ou *inroute*, é realizada através de diversas técnicas; a portadora da Hub para as estações remotas é chamada de *outbound* ou *outroute*. A portadora de *outbound* é diferente da portadora de *inbound* em dois aspectos fundamentais, objetivando a manutenção de baixo custo para o demodulador do terminal VSAT:

1. a *outbound* tem uma alta taxa de dados, o que permite que múltiplas estações remotas recebam informações em um mesmo canal *outbound*. A relação da capacidade de canal entre a portadora de *outbound* e a de *inbound* encontra-se, tipicamente, entre 5 para 1 a 20 para 1 [37];
2. a portadora *outbound* emprega modulação contínua.

Na topologia física das redes VSAT convencionais, não é possível a comunicação direta entre estações remotas; para que essa comunicação seja possível, é necessário o uso do duplo salto, passando-se pela Hub [40]. Ou seja, a estação remota transmissora envia a informação para a Hub através de sua portadora *inbound* (primeiro salto); a Hub, por sua vez, roteia essa mesma informação para a estação remota destinatária, através da portadora de *outbound* (segundo salto). Nesse caso, o tráfego originado pela estação remota é enviado para a estação Hub que, por sua vez, envia para a estação remota destinatária. O retardo originado pelo duplo salto é perfeitamente aceitável para a maioria das comunicações de dados, mas pouco adequado para as comunicações de voz [40]. Caso as estações remotas tenham suficiente potência, e conforme o desenho de rede, estas podem estabelecer a comunicação direta entre si; no entanto, haverá um incremento do custo das comunicações.

A Figura 49 ilustra uma configuração genérica de uma rede VSAT operando na banda Ku. Embora existam diversas redes VSAT operando na banda C, a grande largura de banda disponível na banda Ku é mais aplicável ao tráfego de dados em alta velocidade e à integração de redes de comunicação [36].

FIGURA 49– EXEMPLO DE REDE VSAT

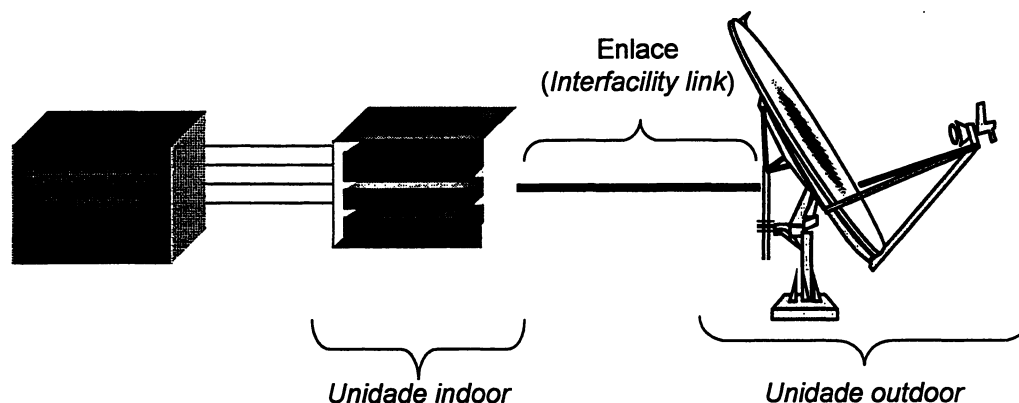


Os terminais VSAT são caracterizados por serem de baixo custo, por empregarem antenas de baixo diâmetro (geralmente, menor que 2,4 m), potência de transmissão em torno de 1 W [38], alta facilidade de instalação e manutenção, flexibilidade de configuração e alta confiabilidade. Na sua maioria, esses terminais são compostos de dois componentes principais, interligados por um enlace (*interfacility link*) [36]. O primeiro componente fornece todas as funções de processamento necessárias, incluindo as interfaces com o equipamento do usuário e recursos para a rede. Por localizar-se dentro do ambiente do usuário é conhecido como unidade *indoor* (ver Figura 50). O segundo dispositivo, chamado de unidade *outdoor*, providencia a translação de freqüências da portadora entre o segmento espacial e o equipamento de modulação/demodulação da estação remota.

A configuração da estação Hub de uma rede VSAT é similar a dos terminais VSAT, utilizando tantos os equipamentos de rádio como os de banda básica, guardadas as devidas proporções [36]. No entanto, a Hub possui alta redundância de equipamentos, uma vez que, caso ocorra uma falha da estação principal, a rede inteira será afetada. Para estações Hub operando na faixa Ku, a confiabilidade dessas estações está em torno de 0,999962 [40]. A estação Hub

opera com antenas de grande diâmetro, normalmente entre 5 e 9 metros.

FIGURA 50 - CONCEITO DOS DISPOSITIVOS DA REDE VSAT



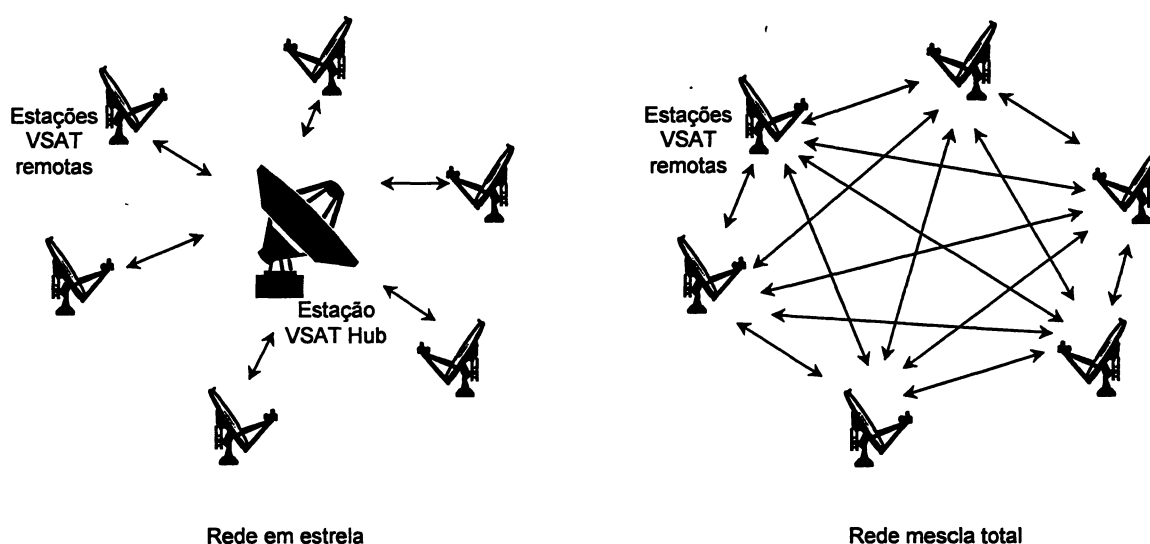
Nas redes privadas [36], a estação Hub é normalmente alocada junto às facilidades de processamento de dados do usuário. Em redes VSAT com estação Hub compartilhada (onde diversos usuários independentes compartilham uma mesma Hub mas não tem interconectividade entre si), a conexão dos usuários à Hub é feita através de enlaces terrestres. A Hub de uma rede VSAT deve, também, fornecer facilidades de gerenciamento para toda a rede, sendo que, somente a estação Hub é capaz de monitorar o tráfego da rede.

O segmento espacial de uma rede VSAT é composto por *transponders* de satélite geostacionário operando tanto na banda C como Ku. A economia do segmento espacial é muito importante nesse tipo de redes pois o custo de um *transponder* é alto. As redes VSAT usam técnicas para permitir que um grande número de estações compartilhem o recurso do segmento espacial; este recurso pode ser composto por somente uma parcela do transponder. Nesse caso, a rede deve ser configurada para somente utilizar a quantidade de banda necessária do transponder do satélite.

Enquanto a configuração física das redes VSAT constitui-se da topologia estrela [36], a topologia lógica pode ser configurada para se obter a conectividade total entre as estações, criando-se uma topologia de rede de mescla total (*full mesh*).

Nas redes convencionais isso é obtido através do uso de duplo salto via Hub. Embora a topologia estrela represente uma séria limitação para o sistema, há duas razões principais para o uso desse sistema: em primeiro lugar, as necessidades de potência de transmissão e recepção no sistema VSAT podem ser reduzidas, o que implica na redução do tamanho das estações e conseqüente redução de custos; em segundo lugar, um dos objetivos da maioria das redes VSAT é estabelecer comunicações entre um grande número de usuários, altamente dispersos, e uma fonte central de informações – dessa forma, a topologia em estrela é mais adequada [41]. A Figura 51 ilustra a topologia lógica em estrela e a topologia mescla total.

FIGURA 51 - ARQUITETURAS LÓGICAS VSAT EM ESTRELA E MESCLA TOTAL



A estrutura de gerenciamento dentro de uma rede VSAT é muito importante e pode ser o fator de sucesso ou não de uma rede VSAT com muitos terminais. Deve ser possível a um usuário do sistema reconfigurar e testar as partes da rede que, logicamente, pertençam ao seu domínio. Essa estrutura [36] pode ser considerada com um conjunto de funções administrativas, operacionais e de planejamento:

- a) funções administrativas: envolve as funções de configuração, contabilidade, inventário e segurança da rede. Basicamente, as redes VSAT operam com bancos de dados onde são armazenadas todas as informações para o correto gerenciamento da rede, e que definem as configurações dos equipamentos e das comunicações do sistema;
- b) funções operacionais: são compostas pela monitoração e controle da rede (suporte a alarmes e monitoração de eventos, *logging* e filtragem), a coleta e geração de registros (dados relativos ao estado e desempenho da rede) e gerenciamento do acesso a recursos (a capacidade dos recursos);
- c) funções de planejamento: que constituem as ações voltadas à otimização da rede conforme o projeto e os perfis de medida de tráfego.

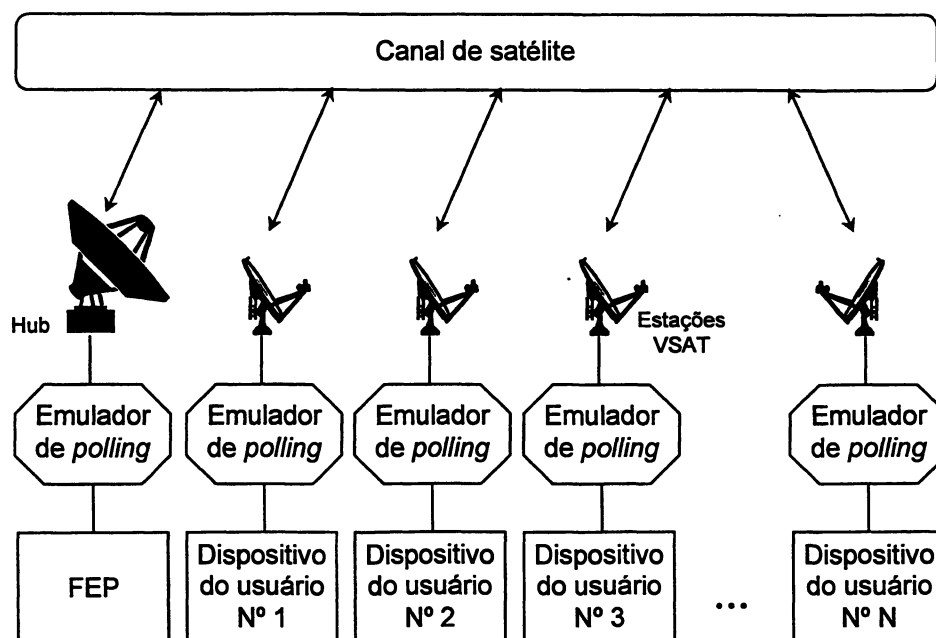
Os protocolos de rede para um sistema VSAT definem os procedimentos para a troca de informações entre as estações VSAT e a Hub. As informações podem ser divididas em duas partes: informações relacionadas com a monitoração/controle da rede e informações dos usuários.

Em geral, as redes VSAT permitem o fornecimento de serviços de comunicação de dados, voz e recepção de vídeo aos usuários. As opções de voz suportadas pelas redes VSAT são tipicamente baseadas em voz digitalmente codificada [36]. Os serviços de comunicação de dados incluem diversos protocolos de comunicação, como IBM SNA/SDLC, Bisync 2780 e 3780, Poll/Select (Burroughs) e CCITT X.25 [37]. Os protocolos que usam *polling* (mensagem de questionamento enviada pela estação primária do sistema de processamento), como o Bisync 2780, 3780 e Poll/Select, possuem o problema do reconhecimento da mensagem (*acknowledgement*). Esses protocolos necessitam de uma confirmação (*poll* de resposta) para cada mensagem transmitida. Se as estações VSATs usassem protocolos do tipo *polling*, uma mensagem de curta duração deveria ocupar o canal do satélite durante cada evento de *polling*. Isto resultaria em um excessivo tempo

ocioso. Para evitar essa situação, as redes VSAT usam um procedimento conhecido como “emulação de protocolos” para desacoplar o protocolo nativo dos usuários (que emprega o *polling*) e permitir o trânsito de mensagens que não necessitem da confirmação imediata através canal do satélite.

A Figura 52 ilustra essa situação. Os emuladores de *polling* “enganam” os dispositivos dos usuários localizados tanto nas estações Hub (em geral FEP – *front end processor*) como nas remotas. Quando o processador principal da rede do usuário (FEP) envia um *polling*, o emulador retorna uma mensagem simulando a resposta adequada que seria enviada pelo dispositivo do usuário localizado na estação remota. De forma similar, o dispositivo do usuário localizado na estação remota recebe um *polling* do emulador como se esse fosse o FEP da rede. Dessa forma e sobre a rede de satélite, somente são transmitidas mensagens de dados e de informações críticas de supervisão; nenhuma mensagem de *polling* é transmitida pelo canal do satélite. Os emuladores de *polling* convertem, portanto, os protocolos nativos dos usuários, baseados na estrutura de *polling*, em um protocolo de múltiplo acesso mais eficiente.[42]

FIGURA 52 - CONCEITO DOS EMULADORES DE *POLLING* EM UMA REDE VSAT



Nos casos em que os protocolos de usuários não sejam suportados pela rede VSAT, o sistema fornece conexões digitais, semelhantes a enlaces terrestres, e que são totalmente transparentes a protocolos.

Os métodos aplicados ao sistema VSAT para o compartilhamento dos canais do satélite entre as estações terrenas que operam com a transmissão de pacotes na forma de rajadas, podem ser classificados em quatro categorias [36]:

- a) CDMA;
- b) TDMA *packet reservation* (reserva de pacote) ou *demand assigned* (alocação sob demanda) – DA/TDMA;
- c) TDMA *fixe allocation* (alocação fixa);
- d) TDMA *random access* (acesso aleatório)– RA/TDMA.

No esquema CDMA [37], as estações VSAT compartilham uma mesma portadora *inbound*, cada uma usando uma única seqüência de símbolos de ruído pseudorandômico para representar cada bit de dados a ser transmitido. Esse esquema necessita de uma grande largura de banda o que se reflete em uma ineficiência no uso do transponder. É, portanto, adequado para aplicações com baixa taxa de dados (menor que 9,6 kbps) e aplicações que necessitem do uso do sistema *spread spectrum* (CDMA) para a coordenação de freqüência, devido à restrições quanto a interferência (como por exemplo, redes VSAT operando na banda C). Em especial para as comunicações por satélite, a técnica CDMA traz outras vantagens: o uso de antenas de baixo diâmetro (cerca de 0,6 m para terminais unicamente receptores e 1,2 m para terminais bidirecionais), o que diminui os problemas de interferência entre satélites adjacentes ou entre estações terrenas; e um baixo tempo de resposta para os terminais dos usuários, por não haver o problema de colisões entre os pacotes VSAT transmitidos.

No sistema de reserva de pacotes TDMA, a estação remota envia uma solicitação para a Hub requisitando um *slot* de dados. A transmissão dos pacotes de dados se dá somente após a alocação de um *slot* de dados feita pela Hub e conseqüente recepção da alocação pela estação remota. Esse sistema tem um

inerente retardo de três saltos de satélite para cada transmissão de informação entre a remota e a Hub. Além disso, esse tipo de protocolo de acesso necessita de alta capacidade no segmento espacial para o tráfego *inbound* de alocação de recursos.

A alocação fixa TDMA é especialmente empregada para situações onde o tráfego entre estações seja alto, devido, por exemplo, à concentrações ou multiplexação. Nesses casos, a alocação fixa permite uma utilização eficiente do canal de satélite.

Na categoria de protocolos de acesso randômico TDMA (RA/TDMA), os canais de satélite são acessados pelas estações VSAT de forma aleatória. A retransmissão de um pacote ocorre após determinado tempo no qual a estação terrena transmissora aguarda pela recepção de um pacote sinalizando a recepção positiva da mensagem pela estação transmissora. Nessa técnica, há redução do *throughput* do sistema conforme ocorre o aumento do tráfego. Essa degradação surge porque os pacotes que se perderam ou que colidiram na transmissão são retransmitidos nos mesmos *slots* de dados usados para novas transmissões. O processo de retransmissão introduz uma significativa complexidade no desenho do sistema. O retardo de retransmissão pode ser eliminado empregando-se uma taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*, definida como a razão entre o número de bits errados pelo total de bits transmitidos) melhor que 10^{-7} ; isso, apesar de criar um cenário livre de colisões, sacrifica, no entanto, o *throughput* do sistema. Em comparação com a CDMA, a técnica RA/TDMA, em geral, é mais adequada para aplicações em que a *inbound* tenha um maior volume de dados, sendo ideal para aplicações de usuários que necessitem de um misto entre processamento interativo e de lote (*batch*) [37].

Nos sistemas operando com alocação sob demanda ou acesso randômico, a Hub distribui para todas as estações remotas participantes do sistema um mapa de *slots* que define os *slots* RA/TDMA e DA/TDMA em cada quadro. Todas as estações devem receber esse mapa e somente transmitir dentro dos *slots* permitidos. Dentro da tecnologia RA/TDMA, o esquema mais utilizado é o *Slotted Aloha* [37, 41], onde o

tempo de um canal TDMA é dividido em uma série contígua de quadros e slots. O tamanho dos slots e o número de slots em um quadro dependerá do tipo de aplicação. O canal *Slotted Aloha* tem duas desvantagens: a complexidade em potencial de se estabelecer o tempo sincronizado de referência para todas as estações e o comprimento do pacote [43]. A população de uma rede RA/TDMA dependerá da taxa de dados do canal do satélite, da frequência de atividade de tráfego das estações remotas, do tamanho do bloco de tráfego, do retardo de *throughput* e o critério de contenção escolhido.

Efetivamente, atualmente os métodos de acesso predominantes nas transmissões VSAT é o TDM, para os dados de *outbound* (Hub para VSAT's) [41], e RA/TDMA ou CDMA (*spread spectrum* CDMA) para os dados de *inbound* [37]. A taxa de transmissão típica para a portadora *outbound* encontra-se entre 128 kbps e 256 kbps, podendo chegar a 512 kbps. Para a portadora de *inbound*, a taxa típica no sistema RA/TDMA encontra-se entre 56 kbps a 128 kbps, transmitindo no formato *burst*. No sistema CDMA, em especial do *Direct Sequence* (DS/CDMA), a taxa da portadora de *inbound* está entre 1,2 kbps e 9,6 kbps, podendo, em algumas situações, chegar a 56 kbps.

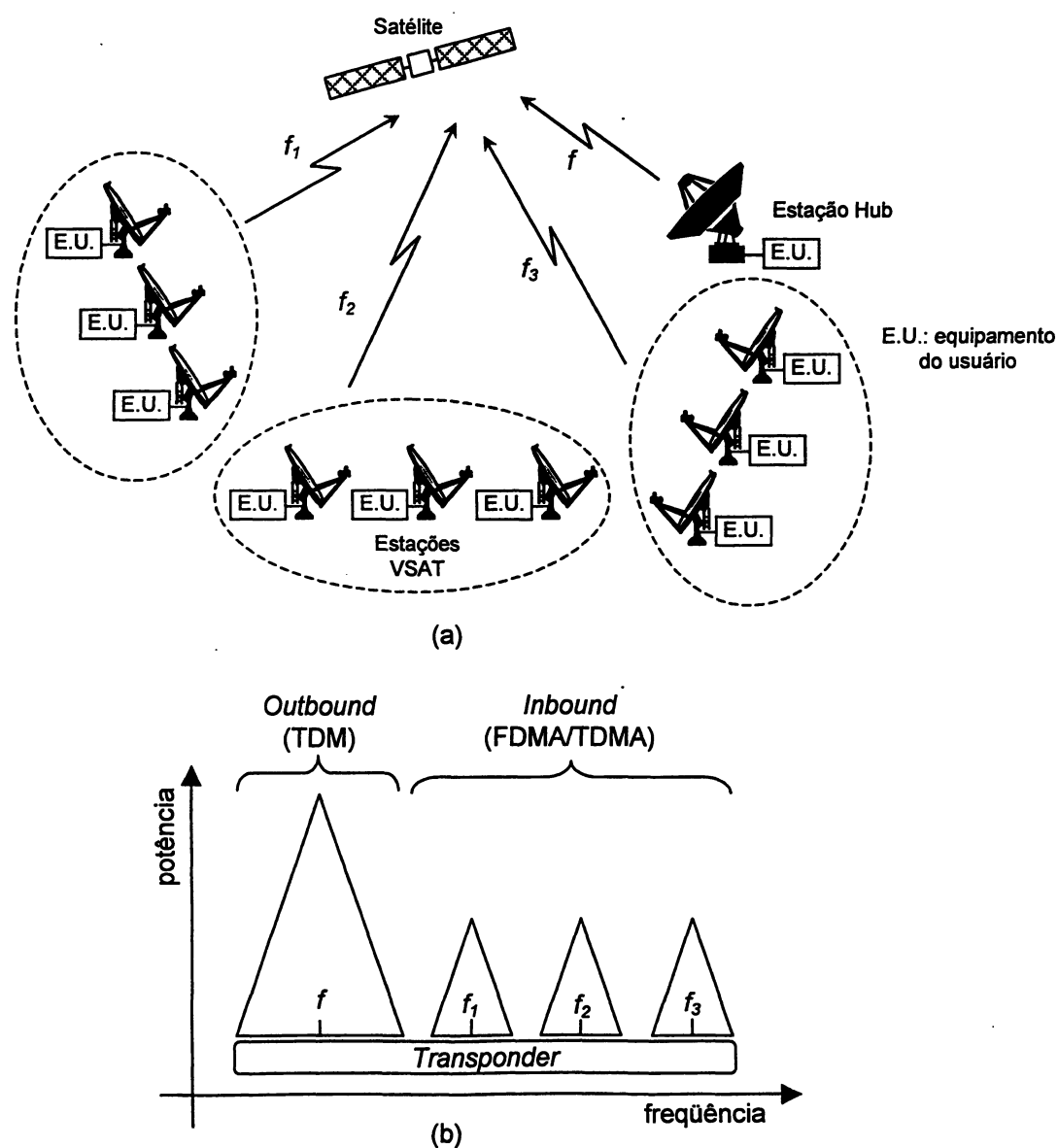
Quando o *throughput* do sistema CDMA é comparado com o do RA/TDMA para uma dada condição onde o desempenho de ambos os sistemas é similar, o *throughput* do RA/TDMA não é muito melhor que o CDMA [37].

Além dos métodos descritos, as redes VSAT também podem operar no modo FDMA, em especial, usando o SCPC [38]. Essas redes não necessitam de uma estação Hub muito grande e pequenas redes na configuração estrela ou mescla são viáveis. As estações remotas com antenas de pequeno diâmetro são possíveis pois, como operam com uma largura de banda reduzida, a potência de transmissão necessária é baixa, implicando em amplificadores de potência menores. Esse sistema, costuma operar com o sistema de *polling*, para a transmissão de dados e o sistema DAMA, para aplicações de voz [38]. No sentido da portadora *inbound*, o sistema FDMA pode ser combinado com o TDMA objetivando otimizar os recursos

do satélite. Desse forma, quando há uma grande população de usuários, diversas comunidades de usuários podem ser alocadas sob um mesmo sistema. Dentro de uma mesma comunidade (ou subrede) as estações remotas compartilham de uma mesma frequência portadora *inbound*, transmitindo e recebendo informações dentro do sistema TDMA, na forma de rajadas [40].

Essa situação é ilustrada na Figura 53, onde a parte (a) ilustra a situação da rede e a parte (b) ilustra uma possível composição do *transponder* para essa rede.

FIGURA 53 – REDE VSAT OPERANDO COM FDMA E TDMA



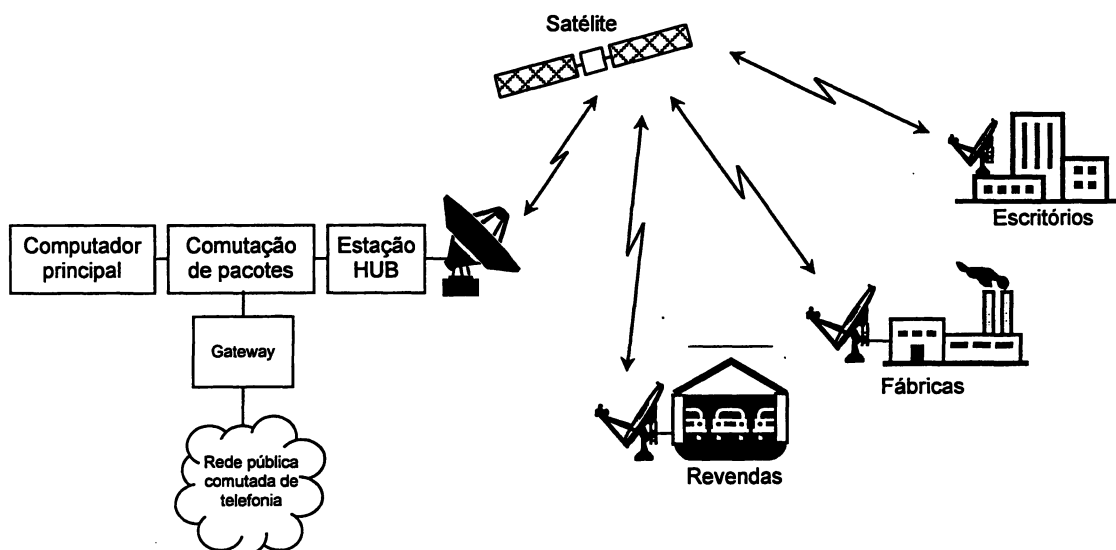
Na parte (a) da Figura 53, as frequências f , f_1 , f_2 e f_3 representam frequências diferentes; na parte (b), observa-se o maior nível de potência do sinal da portadora de *outbound* f uma vez que essa portadora tem que servir todas as estações remotas, muitas vezes espalhadas por amplas áreas. Além disso, o volume de informação transferido pela portadora *outbound* é, normalmente, muito superior ao volume de informação originado por uma portadora de *inbound*.

O uso de outras técnicas e tecnologias podem aumentar a eficiência e flexibilidade das redes VSAT. Como por exemplo o emprego, no satélite, de antenas com múltiplos feixes de sinal e comutação de bordo, tanto em frequência intermediária como em banda básica, podem evitar a necessidade de duplo salto, aumentar o ganho EIRP, elevar a taxa de transmissão e diminuir o diâmetro das antenas resultando em uma melhor exploração do espectro de frequências e no aumento do desempenho dos enlaces VSAT [44].

A instalação da rede de comunicação da Corporação Chrysler Motor pode ser considerada como um exemplo típico para o sistema VSAT bidirecional. A rede VSAT da Chrysler [45] interliga fábricas de automóveis com cerca de 6.300 revendas e unidades corporativas na América do Norte. O sistema, chamado de Chrysler Pentastar Network, conta com uma estação Hub na sede de Michigan (EUA) e estações remotas nas outras localidades, com capacidade de tráfego de dados de alta velocidade e transmissão de vídeo. O tráfego de dados assíncronos, com origem nas revendas, é roteado através do protocolo X.25 para o centro corporativo de processamento de dados; o tráfego das fábricas e escritórios é roteado no formato IBM SNA/SDLC.

O sistema suporta aplicações como assistência mecânica às revendas, sistemas de inventário, serviço de informação (data de entrega de veículos), treinamento, informações promocionais, comunicações corporativas, ordens de vendas, etc. Em especial, o sistema de vídeo corporativo via satélite permite, por exemplo, reuniões gerenciais e treinamento técnico. A estrutura básica dessa rede é ilustrada na Figura 54.

FIGURA 54 - REDE VSAT CHRYSLER PENTASTAR NETWORK



4.2 SERVIÇOS DE DIFUSÃO VIA SATÉLITE

Os serviços de difusão via satélite ou BSS (*broadcasting satellite services*) são empregados desde a década de 70 para transmitir programas de televisão usando satélites geoestacionários de alta potência [46]. A transmissão de sinais de televisão para recepção direta em residências com antenas parabólicas de pequeno diâmetro (cerca de um metro, por exemplo) [47], chamado de serviço DBS - *Direct Broadcast Satellite* (serviço direto de difusão via satélite) [48], é sinônimo desse sistema. O sistema de recepção de programas de TV pode ser classificado em:

- a) serviço de difusão de TV por meio de satélites *broadcasting*;
- b) serviço de recepção de programas de TV por meio de satélites de comunicação.

A transmissão de sinais de TV pode tanto ser realizada por satélites de alta potência como satélites de média potência, conforme o país que opera o sistema. O propósito dos satélites de *broadcasting* também varia conforme o país: em alguns,

os satélites de *broadcasting* são usados para aumentar o número de programas de televisão enquanto, em outros, para expandir as áreas de cobertura dos sinais de TV.

Os sistemas de *broadcasting* de televisão via satélite têm diversas propriedades que podem ser consideradas como vantagens em relação à difusão terrestre [49]:

- a) grande área de cobertura: pode facilmente ter uma cobertura nacional, usando uma única frequência de difusão;
- b) alta qualidade de transmissão: não há problemas de pontos “cegos” ou problemas de fantasmas nas imagens;
- c) economia: não há necessidade de estações terrestres de retransmissão;
- d) grande capacidade de transmissão: há grande banda de frequências disponível;
- e) segurança: não há problemas com desastres terrestres.

Como desvantagem, pode ser citado a atenuação por chuvas (conforme a banda de frequências utilizada). O desenvolvimento de tecnologias de compressão digital e transmissão digital de alta velocidade têm possibilitado o desenvolvimento de sistemas de televisão de alta definição (HDTV – *high definition TV*) [48].

Além da necessidade de TWTA's (*travelling wave tubes amplifiers*) de alta potência, o satélite do sistema DBS emprega antenas com modelagem de feixes. Para operar o amplificador TWTA de alta potência, são necessários tanto uma grande estrutura de células solares como técnicas de controle térmico. Além disso, são empregados dispositivos para manter alta precisão no apontamento das antenas do satélite bem como técnicas de controle de atitude para manter a modelagem de feixes sobre as áreas nas quais o serviço deve ser prestado. Para se obter a modelagem de feixe, são usadas cornetas alimentadoras que possibilitam múltiplos feixes de sinal. Para a manutenção da precisão do apontamento, emprega-se mecanismos como o sensor de RF ou dispositivos de medida da intensidade do sinal

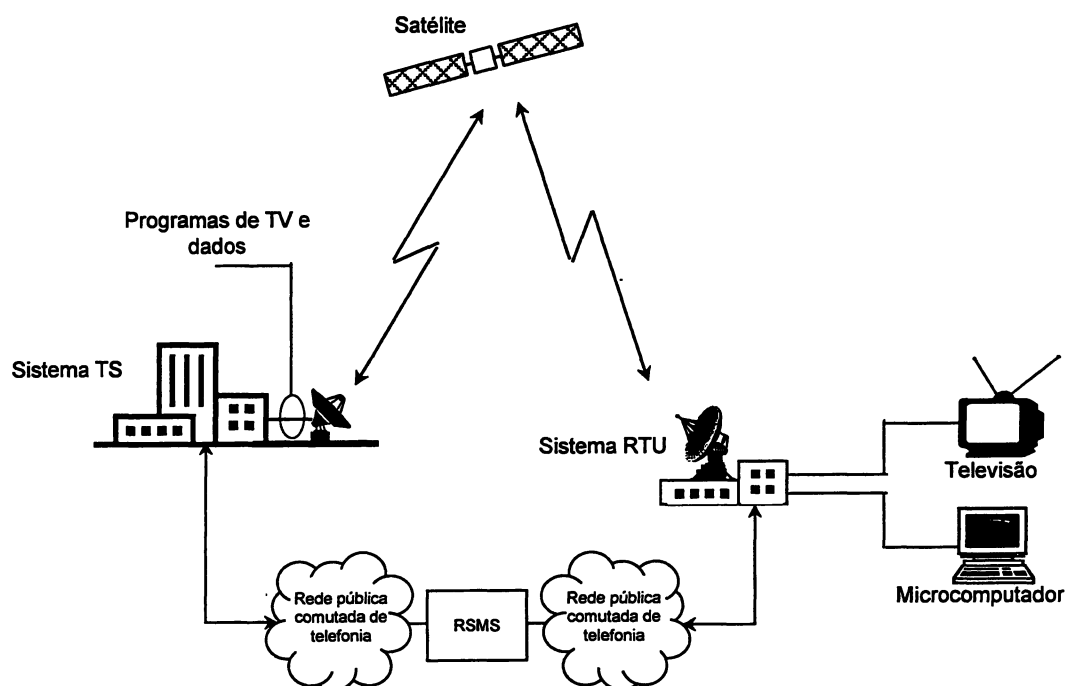
de TV [47].

Os sinais radiados pelo satélite de comunicação são recebidos na superfície terrestre por antenas individuais. O sinal de RF capturado pela antena é amplificado pelo amplificador de baixo ruído (LNA – *low noise amplifier*) e, então, alimenta o *downconverter* que converte o sinal para a frequência intermediária e que pode ser amplificada mais facilmente. São empregados dois tipos diferentes de *downconverter*: o chamado bloco *downconverter* (BDC – *block downconverter*) tem, em sua saída, todos os canais de TV que compõem o sinal de RF; o segundo tipo tem, em sua saída, somente o canal desejado entre todos os canais de TV que compõem o sinal de RF. Atualmente, emprega-se uma unidade que integra o BDC e um LNA sendo chamado de LNB (*low noise block downconverter*, ou, bloco *downconverter* de baixo ruído).

A antenas e o LNB são montados externamente ao ambiente do usuário. Os sinais de TV são enviados através de cabos a uma unidade interna receptora (chamada de *receiver*) que converte o sinal para os sinais de TV e áudio desejados e, então, enviados ao receptor de televisão.

Um exemplo de um serviço DBS para *broadcasting* de TV e dados para terminais receptores de baixo custo é mostrado na Figura 55 que ilustra o sistema Koreasat [49]. A estrutura é composta por uma estação transmissora (TS – *transmitter station*), um sistema de gerenciamento e recursos de assinantes (RSMS – *resource and subscriber management system*), e unidade receptora de teste (RTU – *receiver test unit*). O TS recebe e processa o material de programação gerado externamente e transmite essa informação sobre a área de cobertura. O sistema RSMS controla o acesso dos assinantes à programação e coleta informações geradas pelos usuários através de acesso via rede pública de telefonia. O dispositivo RTU recebe e processa o sinal enviado para aparelhos de TV, vídeo cassete ou computador pessoal.

FIGURA 55 – SERVIÇO DBS BROADCASTING DE TV E DADOS KOREASAT



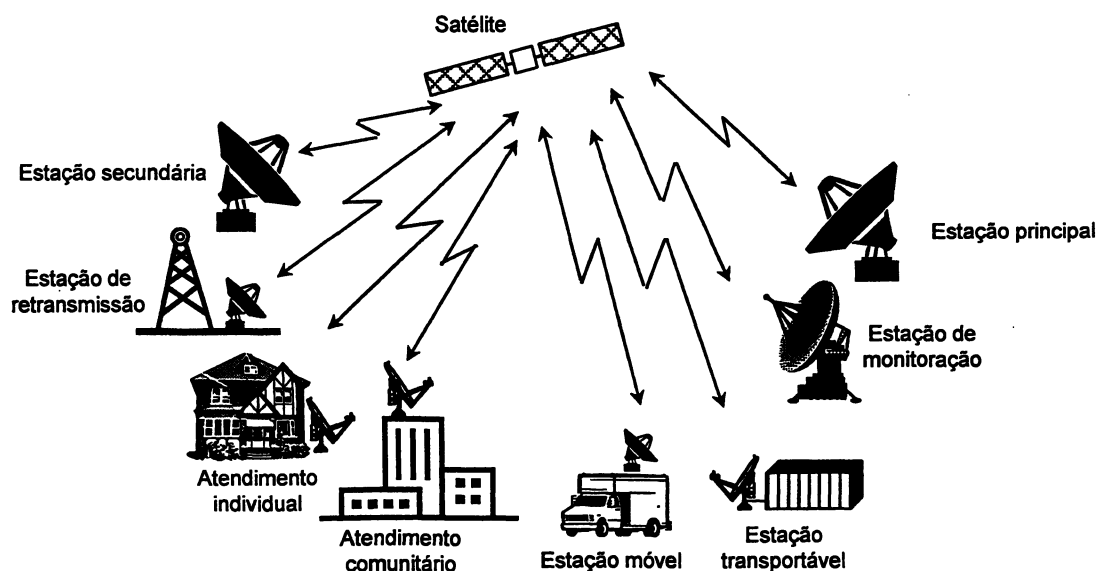
Esse sistema DBS aceita programas de áudio, vídeo e dados de várias fontes e os codifica em um fluxo do formato MPEG-2 (*Motion Picture Expert Group*). As entradas de áudio e vídeo tanto podem ser analógicas como digitais e as entradas de dados podem ser fluxos assíncronos de até 19,2 kbps ou síncrono de até 2 Mbps, unidirecionais (serviços de distribuição de bancos de dados ou música).

Outro sistema, empregado pela Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão e a empresa NHK [50], é ilustrado na Figura 56. Nesse caso, sinais de TV com som de alta qualidade codificado no formato PCM são distribuídos diretamente sobre toda a área de cobertura. O satélite é do tipo estabilizado em 3 eixos, recebe sinais na faixa de 14 GHz e os retransmite na faixa de 12 GHz, passando por amplificadores de saída de 100 W. O segmento terrestre consiste de:

- a) estação terrena principal que possui duas antenas, de 5 e 8 metros de diâmetro, e exerce as funções de transmissão de programas, monitoração e operação dos transponder do satélite;

- b) uma segunda estação terrena, com antena de 4,5 m, e que exerce a função de reserva da estação principal, além da função de transmissão emergencial de programas;
- c) diversas estações móveis, para cobertura de eventos “ao vivo” e que são montadas em veículos com geradores próprios de energia. Empregam antenas de 2,5 m, transmissores na banda de 14 GHz com potência entre 180 e 1.200 W e antenas e receptores na banda de 12 GHz;
- d) estações transportáveis (por helicópteros, por exemplo) com antenas de 2,5 m de diâmetro, transmissores de 14 GHz com potência entre 180 e 500 W, receptores na faixa de 12 GHz e geradores próprios de energia;
- e) estações de monitoração para o sinal DBS e medidas de pluviosidade, que transmitem as informações na forma de dados para a estação principal, através de linhas telefônicas;
- f) estações de retransmissão, que recebem a programação via satélite e os retransmite através de sistemas VHF terrestres convencionais;
- g) receptores residenciais (antenas e conversores) de baixo custo.

FIGURA 56 – SISTEMA DBS EMPREGADO NO JAPÃO



4.3 SERVIÇO MÓVEL VIA SATÉLITE

O desenvolvimento da microeletrônica de baixo custo, da comutação e do processamento de voz em conjunto com o aumento da potência dos satélites, melhorias da eficiência das antenas em relação ao seu tamanho e aperfeiçoamentos dos receptores de baixo ruído têm permitido o fornecimento de serviços móveis via satélite (MSS – *mobile satellite service*) [51]. O sistema MSS pode oferecer serviços de voz, dados, posicionamento, *paging*, interconexão com a rede pública comutada de telefonia, e redes privadas.

O serviço móvel via satélite, pode atender determinados usuários e fornecer certos tipos de serviços que, ou não são possíveis ou são muito caros para serem fornecidos pelos serviços terrestres convencionais. Os atributos do MSS [51] têm origem no posicionamento dos satélites geoestacionários que permitem uma cobertura hemisférica. Assim, haverá uma grande probabilidade de que o assinante do sistema esteja sempre sob a área de fornecimento do serviço. Da mesma forma, o usuário pode enviar informações de qualquer localidade para qualquer outra localidade. Com efeito, o sistema MSS permite uma conectividade quase que universal com custos não sensíveis à distâncias, ou seja, uma comunicação de 2 km ou de 2.000 km de distância teria o mesmo custo para o sistema de satélite geoestacionário.

Outra característica do sistema de satélite geoestacionário, e que surge como uma vantagem sobre os sistemas móveis terrestres convencionais, é o próprio posicionamento das estações espaciais, o que fornece alto ângulo de elevação para as antenas das estações remotas próximas à linha do Equador. Isto faz com que os efeitos de obstrução sejam reduzidos, implicando em atenuações na ordem de alguns decibéis e que são causadas, principalmente, por folhagens de árvores. Por outro lado, as obstruções de sinal originadas por edifícios na linha de visada do satélite são difíceis de serem contornadas. Nesse sentido, os sistemas terrestres

mostram-se com uma melhor flexibilidade. Assim sendo, o MSS pode operar como um sistema complementar aos sistemas terrestres móveis, fornecendo serviço à populações dispersas em áreas rurais e algumas áreas suburbanas.

Devido a essas considerações, o público alvo do serviço MSS está tipicamente concentrado em áreas não urbanas; cerca de 35% da população mundial vive nessas áreas [51]. Nessas regiões, o serviço celular terrestre típico é relativamente mais caro devido à baixa densidade de população e ao maior custo de implementação do sistema (necessidade do uso de torres muito altas, por exemplo). Entre os diversos segmentos que podem ser beneficiados pelo sistema MSS estão os serviços de vendas, construção civil, área médica, segurança pública, entre outros.

As atividades características que empregam o sistema MSS são:

- a) setor de transportes: usado por frotas de caminhões para, por exemplo, efetuar a monitoração dos veículos, alterar cronogramas dinamicamente, emergências, desempenho da frota.
- b) setor petrolífero: que possuem atividades em áreas muito amplas e no mar, além de efetuar o controle e monitoramento de instalações operadas remotamente;
- c) segurança pública: atividades de bombeiros, busca e salvamento, guarda florestal, paramédicos, etc.;
- d) setor marítimo: com atividades costeira, em rios e nos oceanos e que são locais de difícil acesso para sistemas de comunicações.

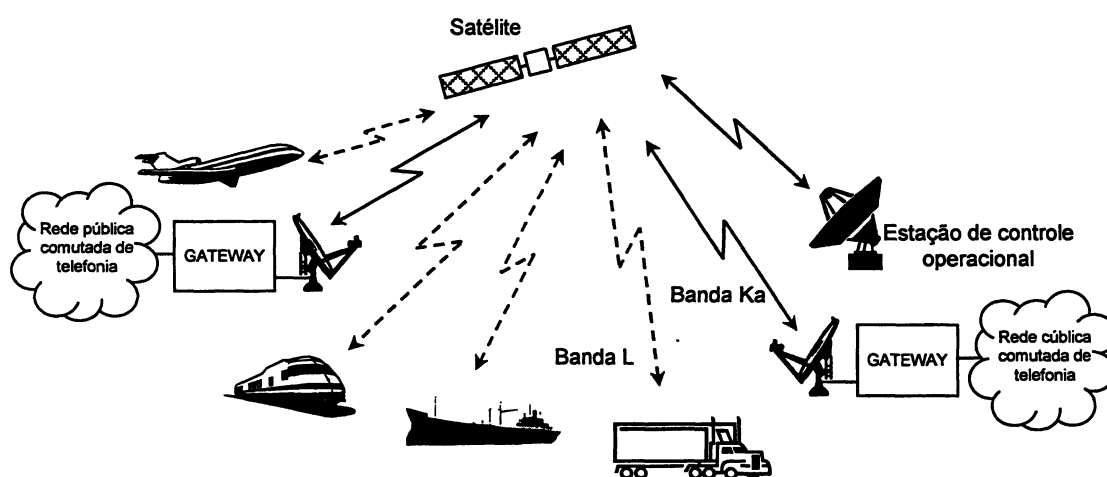
Uma rede para o serviço MSS consiste de estações móveis (carros, aviões, navios, caminhões) e estações terrenas fixas. Para o MSS, a comunicação típica se dá entre estações móveis e fixas. Dessa forma a rede emprega duas bandas diferentes de frequências [51]: a banda Ka entre as estações terrenas e o satélite e a banda L para comunicação entre as estações móveis e o satélite. O satélite opera com múltiplos feixes de sinal com roteamento interno [52]. Assim, cada feixe de sinal na banda L é roteado para um determinado feixe de sinal na banda Ka e vice-versa.

Essa predeterminação pode ser um problema pois é relativamente difícil determinar com exatidão qual o tráfego de um determinado feixe de sinal na banda L; além disso, o tráfego varia com o tempo.

Duas redes básicas [51] podem ser propostas para o sistemas MSS: uma rede para serviço telefônico com interconexão à rede pública comutada de telefonia (RPCT), o que permite com que um usuário faça uma chamada telefônica para qualquer telefone fixo no mundo; e uma rede para serviço móvel privativo, onde o usuário somente pode estabelecer chamadas para a estação central. Esses sistemas, no entanto, podem ser combinados.

Um exemplo de uma rede para o serviço telefônico é mostrado na Figura 57 consistindo do satélite geoestacionário com comutador de bordo, das estações móveis operando na banda L, um centro de operações para controle da rede e centrais de interconexão com a rede pública comutada de telefonia (*gateways*), ambos operando na banda Ka.

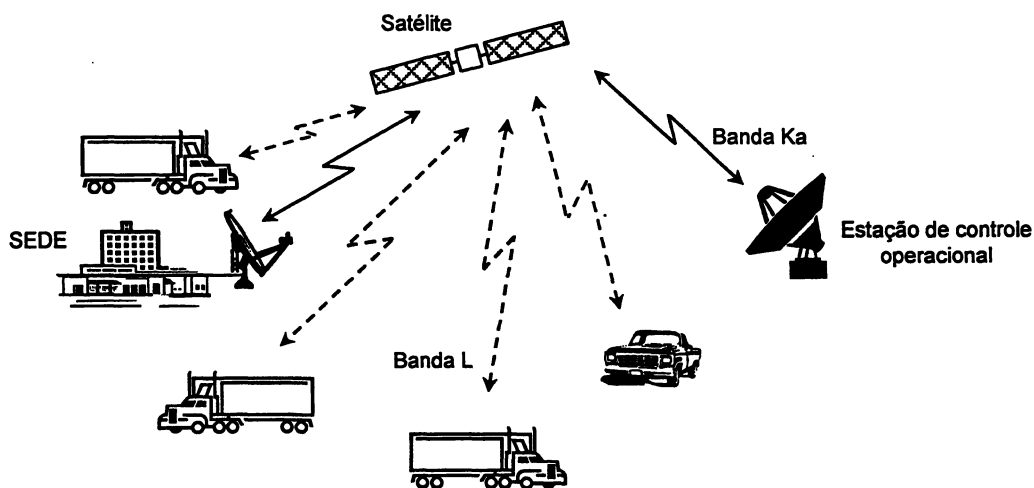
FIGURA 57 – SISTEMA MSS DO TIPO REDE TELEFÔNICA



A comunicação entre os terminais móveis e um telefone fixo é estabelecida via centrais de interconexão, também chamadas de NCC (*network communications controller* – controlador das comunicações da rede). Esse dispositivo opera em

tempo real e é responsável por controlar todos os aspectos de estabelecimento, manutenção e encerramentos das chamadas telefônicas. Uma vez estabelecida a conexão, o canal pode ser usado para uma conversa de voz, *paging*, transmissão de dados dentro da banda, fax, etc. [52]. A estação do centro de operações, também chamada de NOC (*network operations center* – centro de operações da rede), não opera, normalmente, em tempo real e fornece todos os recursos de gerenciamento da rede, incluindo a manutenção dos bancos de dados usados no sistema. Em geral, usa-se, para um enlace de voz, uma banda de 5 kHz [53]. As estações terrenas empregam antenas de 3,3 m de diâmetro e satélite com antenas de 5 m de diâmetro [51]. Usa-se, também, o sistema de ativação das portadoras através da voz, como uma forma de economizar a potência no satélite. Os satélites são geralmente maiores que aqueles usados para o serviço de comunicação fixa, uma vez que os terminais móveis têm uma pequena abertura e, portanto, o satélite deve compensar esse fato através da radiação de maior potência para a banda L. A potência típica para um satélite desse gênero está em torno de 3.000 W [51, 53]. A potência média de transmissão dos terminais móveis está em torno de 0,5 W [52]. A Figura 58 ilustra um arranjo para um sistema móvel privado.

FIGURA 58 – SISTEMA MSS DO TIPO REDE PRIVATIVA



No caso da Figura 58, há uma estação terrena localizada no ambiente do usuário e que é o dispositivo centralizador das informações. A comunicação sempre se dá entre as estações móveis e essa estação.

A geometria de um satélite de múltiplos feixes operando nesse sistema é análoga à geometria do sistema celular terrestre, sendo cada feixe de sinal similar à uma célula. Em geral, cada célula tem uma certa quantidade de canais estabelecidos e o usuário móvel monitora constantemente esses canais, escolhendo aquele de maior potência para estabelecer uma chamada. Para estabelecer uma chamada, o usuário móvel toma posse de um canal disponível e envia uma identificação única incluindo o número de destino, para o satélite. O estabelecimento da chamada se dá através de canais de *paging* e a taxa de dados necessária para esse canal deve estar em torno de 2 kbps. Dessa forma, cerca de 58 usuários podem usar esse canal em um segundo, caso fosse usada uma seqüência de 34 bits de identificação e número de destino. Assumindo que haja 200 canais por feixe de sinal e que o satélite opere com 61 feixes, então 12.200 usuários móveis poderiam estar ativos em um mesmo instante. Como a informação de *paging* deve ser transmitida para todos os usuários, então 0,5% do total de usuários poderiam estabelecer chamadas através de *paging* em um segundo [53].

4.4 SERVIÇOS IP SOBRE PLATAFORMAS DE SATÉLITE [54]

A grande procura por acessos para a conectividade à Internet e o desenvolvimento de receptores DVB (*digital video broadcasting* – difusão de vídeo digital) de baixo custo têm reforçado o interesse pelo fornecimento de serviços de dados via satélite. Com isso, estudos e testes têm sido desenvolvidos no sentido de se verificar as formas para o provimento de serviços baseados no protocolo IP (por exemplo, usando-se o protocolo ATM) e, também, em relação ao tipo de arquitetura

de rede adequada (por exemplo, enlaces bidirecionais de satélite ou enlaces unidirecionais de satélite mais retorno terrestre).

Uma das conclusões dos testes foi que a maioria das aplicações não foram severamente afetadas pela latência dos enlaces de satélite. Somente as aplicações de videoconferência, que não tiveram os padrões de conversão previamente ajustados ao retardo do enlace, apresentaram uma maior quantidade de problemas.

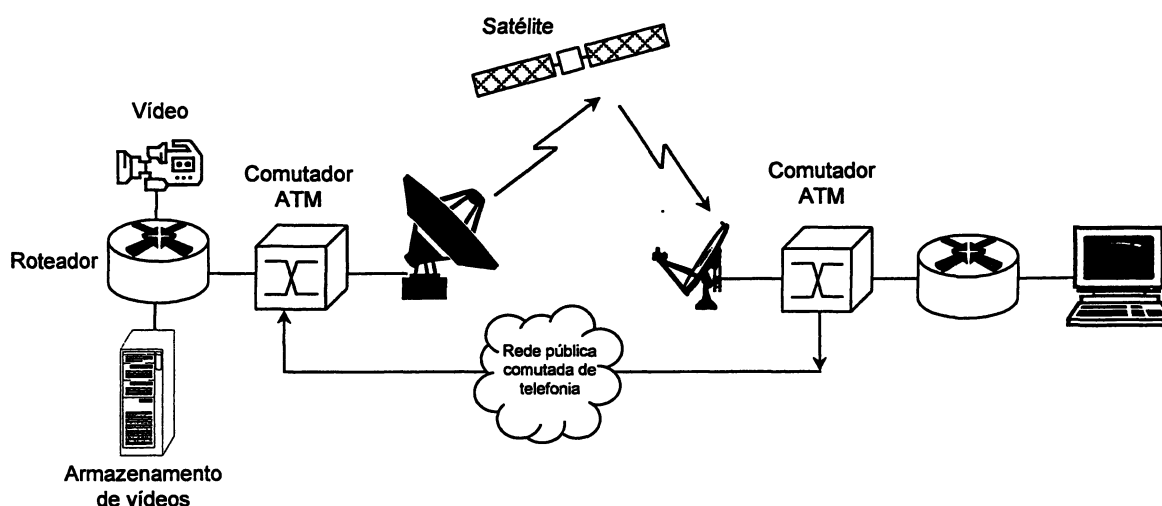
Um dos empreendimentos nesse sentido foi desenvolvido pela operadora de telecomunicações inglesa "British Telecom" na sua divisão de serviços de difusão em Londres. A operadora tem uma rede ATM terrestre que oferece serviços de transmissão de vídeo com alta qualidade (de 10 a 155 Mbps) interconectando estúdios e residências com uma abrangência de cerca de 30 km. O objetivo da rede de satélite é estender esse serviço para localidades fora da área de Londres fornecendo, inicialmente, a entrega de vídeo em tempo real no formato MPEG através de uma estação Hub.

O tráfego é tipicamente assimétrico, ou seja, a portadora de *outbound* (Hub/estações remotas) necessita de alta taxa de transmissão (8 Mbps) e opera com protocolo ATM devido à sua compatibilidade com a rede terrestre. O tráfego reverso (em direção à Hub), composto basicamente de mensagens de solicitação, opera com baixas taxas (cerca de 19,2 kbps). Dessa forma, utiliza-se a rede terrestre para o tráfego reverso. A rede é baseada em protocolo IP pela necessidade de suportar aplicações de transmissão de vídeo existentes, permitir o uso de aplicações baseadas em Web, expansão futura, entre outras.

A Figura 59 ilustra a arquitetura de rede empregada. Nesse exemplo, dois roteadores (na estação Hub e em uma remota) configurados para operarem com protocolo IP são conectados através de um enlace assimétrico operando com protocolo ATM no sentido de *outbound* e via uma linha telefônica convencional, no sentido de *inbound*. Outra opção de conexão *inbound* seria o uso de acesso via Internet. Nesse caso, os computadores dos usuários, com cartões DVB e modems discados, estabelecem uma conexão via Internet e fazem as solicitações de

arquivos. As informações solicitadas no formato IP-DVB são encapsuladas no formato MPEG, combinadas com outras informações de dados, áudio ou vídeo e transmitidas via satélite.

FIGURA 59 – SERVIÇOS IP EM PLATAFORMA DE SATÉLITE



4.5 SISTEMA DE SATÉLITE PARA SERVIÇOS MULTIMÍDIA

Os sistemas de satélite têm uma capacidade inerente de fornecer transmissões de banda larga, multiponto e com ampla cobertura, característicos de serviços de difusão. Essas capacidades podem ser empregadas para o fornecimento de serviços multimídia de voz, vídeo e dados para usuários residenciais e comerciais. As comunicações multimídia se diferenciam das comunicações convencionais pois [55]:

- a) diversos tipos diferentes de tráfegos (voz, dados, vídeo, etc.) podem ser transmitidos sobre um mesmo sistema de comunicação;
- b) a taxa de informação do tráfego varia muito;
- c) há diversos tipos diferentes de conexões (ponto-a-ponto, ponto-

multiponto, etc.);

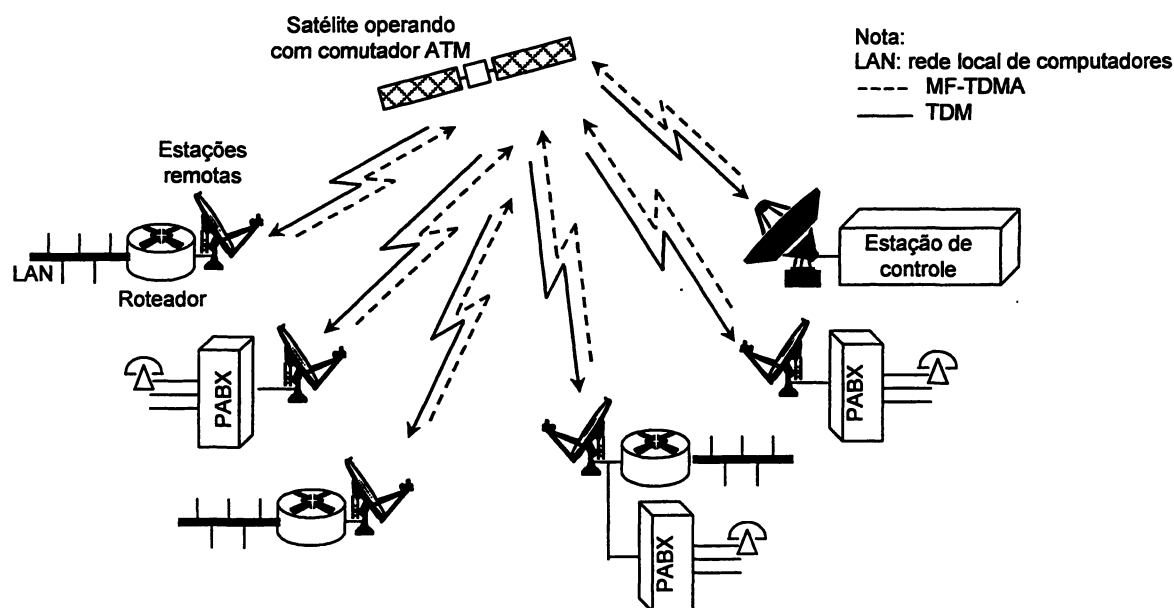
- d) o tráfego é tipicamente assimétrico, isto é, a taxa de informação em um sentido de transmissão é diferente da taxa no outro sentido.

Entre os serviços multimídia podem ser citados os de televisão e radiodifusão digital *direct-to-home* oferecendo aplicações como *pay-per-view*, comércio eletrônico, serviços de entrega *on-line*, etc. Pode-se citar, ainda, os serviços de telemedicina e educação a distância, além dos serviços para profissionais que trabalham em casa (*home workers*) permitindo o envio de documentos, fax, desenhos, projetos, entre outros, para diversas localidades [57].

Para tanto, são empregados satélites com capacidade de banda larga, que usam comutação estatística de bordo baseada em pacotes e que tratam o tráfego multimídia (que tem, tipicamente, o formato de rajadas - *bursts*) [56]. Podem ser utilizados comutadores de bordo que operam com o protocolo ATM (*asynchronous transfer mode* – modo de transferência assíncrono) e que são constituídos de duas partes: uma, com função de multiplexação estatística e outra com a função de estabelecer as conexões cruzadas [55].

Um exemplo de uma rede que fornece esse tipo de serviço, operando na banda Ka ou Ku, é mostrado na Figura 60. Esse exemplo consiste de um satélite de comunicações com múltiplos feixes, estações remotas de usuários e uma estação terrena central. O *downlink* para as estações terrenas de usuários (incluindo a estação de controle) pode ter uma taxa de 156 Mbps e múltiplos canais de *uplink* com taxa de 3 Mbps cada um. Como a estação de controle deve transmitir as informações solicitadas incluindo vídeo e dados, o diâmetro da antena dessa estação deve ser maior que o das estações remotas e com uma taxa de *uplink* superior aos 3 Mbps. Como o volume do tráfego multimídia, além de variar muito, tem o formato de rajadas, os sinais podem ser multiplexados de forma eficiente dentro de um canal de 156 Mbps [55].

FIGURA 60 – REDE OPERANDO COM SERVIÇOS MULTIMÍDIA



Cada feixe de sinal do satélite atende a um determinado número de estações terrenas e a comutação de bordo fornece a conectividade necessária entre os feixes de sinal. O tráfego multimídia é segmentado em células ATM típicas (53 bytes) sendo que os tráfegos de voz e de vídeo são tratados de forma diferenciada do tráfego de dados, que é mais tolerante a retardos [56]. O protocolo ATM é usado nesse sistema porque [55]:

- a) é altamente adequado para o tráfego multimídia;
- b) possui compatibilidade com as redes terrestres multimídia;
- c) as tecnologias ATM desenvolvidas para a rede terrestre podem ser aplicadas à rede de satélite.

Em cada feixe de sinal de *downlink*, o canal *broadcasting* (difusão) é dividido em *time-slots*, cada um acomodando um célula ATM. O canal de *uplink* é compartilhado pelas estações terrestres através do uso de um esquema de múltiplo acesso FDMA/TDMA onde cada feixe de sinal é dividido entre múltiplas portadoras (esse esquema é conhecido como MF-TDMA, *multifrequency time division multiple access*). Cada portadora é dividida em *time-slots*, sendo que cada slot de

tempo/freqüência acomoda uma célula ATM. O MF-TDMA tem sido muito usado devido a sua alta eficiência e uma complexidade relativamente baixa de implementação [57]. A taxa de transmissão deve ser baixa, objetivando reduzir o tamanho e custo das estações terrenas (amplificadores de potência) mas com o volume suficiente para permitir picos de tráfego, típicos em aplicações multimídia, como a transmissão de vídeo com compressão MPEG-1 [56]. Como o tráfego multimídia é basicamente do tipo rajada e os pacotes não são gerados continuamente [55], pode-se maximizar o uso do segmento espacial empregando-se, junto com o processo de comutação de bordo, um esquema dinâmico de alocação de recursos. Um exemplo de uma estratégia de alocação de recursos é o *Leaky Bucket* [56]. Nesse sistema, em um determinado momento, o satélite recebe as conexões de voz, dados e vídeo de maneira que a taxa de tráfego não ultrapasse a capacidade do *uplink*. O dispositivo de alocação de recursos informa as estações terrenas os valores médios e de pico do tráfego, conforme o tipo (voz, dados e vídeo), gerado por cada uma das estações terrenas. Em seguida, o sistema *Leaky Bucket* aloca uma determinada quantidade de *slots* de freqüência e tempo para cada uma das estações terrenas, proporcional à taxa de tráfego gerada pela estação e que foi lido pelo sistema. Cada uma das estações terrenas envia, então, seu tráfego dentro dos slots designados. Baseado no endereço de destino contido no cabeçalho das células, o comutador de bordo transfere o tráfego para o feixe de sinal de *downlink* adequado.

4.6 EXEMPLO DE SERVIÇO MULTIMÍDIA INTERATIVO APLICADO À MEDICINA [58]

Um exemplo de um sistema *broadcasting* operando com multimídia interativa é o *Interactive Satellite Multimedia System (ISIS)* [58] que é um projeto de

sistema de comunicação por satélite utilizando o conceito de bandas duais.

O objetivo do projeto é o fornecimento de serviços interativos a usuários residenciais junto com a distribuição convencional de TV. Dessa forma, são possíveis serviços Internet (como e-mail e FTP), distribuição controlada de informações (noticiário), transmissão bidirecional de mensagens (*paging, e-mail*), aplicações interativas de multimídia (teleducação, telemedicina).

Em especial, a telemedicina tem por objetivo fornecer serviços médicos a comunidades remotas empregando redes de comunicação atuais e emergentes. Basicamente, as aplicações de telemedicina envolvem dois ambientes:

- a) acesso a banco de dados de imagens médicas, que permite a consulta diagnósticos de imagens em arquivos;
- b) consulta remota a especialistas, permitindo transmissão interativa de imagens para a troca de informações e opiniões sobre o estado clínico de pacientes.

Esse sistema utiliza, simultaneamente, terminais que empregam a banda Ku, para a recepção de altos volumes de informação, e a banda Ka, para o enlace de retorno, permitindo um conjunto receptor/transmissor de baixo custo, dimensões reduzidas, fácil transporte e instalação. A banda Ku é usada aproveitando-se o fato de que os terminais instalados nos usuários para a tecnologia de multimídia já empregam essa banda de freqüências, o que reduz os custos de desenvolvimento em novas tecnologias. Já a banda Ka é utilizada devido à larga disponibilidade de banda nessa faixa de freqüências, reduzindo a complexidade das pequenas estações de usuários e permitindo um *throughput* maior.

A arquitetura do sistema, mostrada na Figura 61 é composta principalmente de:

- a) um centro de *broadcasting*: com funções de gerenciamento do sistema e administração da rede (funções de Hub), fornecimento de informações de dados e sinalização, armazenamento de dados, imagens e vídeos (em servidores específicos) no formato MPEG-2. A

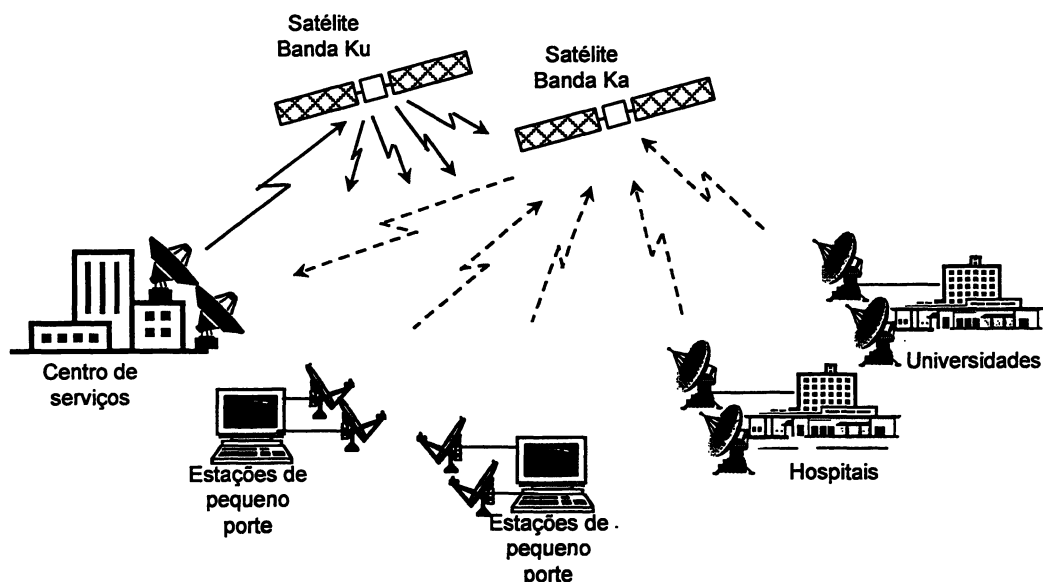
estrutura de comunicação da banda Ku desse centro controla as transmissões *broadcasting* com *throughput* de 34 Mbps com sentido de transmissão do centro de *broadcasting* para as estações remotas. Os dispositivos para banda Ka controlam o canal de retorno (estações remotas/centro de *broadcasting*) com taxas entre 64 kbps e 384 kbps e possuem tanto informações de sinalização como informações gerais dos usuários;

- b) estações terrenas de médio porte: instaladas em hospitais e universidades para atendimento coletivo;
- c) estações remotas de pequeno porte: compostas basicamente de microcomputadores e instaladas em residências, escritórios e consultórios médicos, por exemplo;
- d) Servidores de vídeo: com vídeos no formato MPEG-2 para serem distribuídos na forma de difusão conforme as solicitações dos usuários;
- e) Aplicações baseadas em IP: que permitem o acesso à Internet através de servidores especializados nessa função;
- f) Moduladores DVB (*digital video broadcasting* – difusão de vídeo digital): que recebem as informações dos servidores de vídeo no formato MPEG-2 e as converte em formatos adequados para serem transmitidos através dos enlaces de satélite;
- g) Centro de serviços: que é conectado à Web através do servidor de Internet.

As estações terrenas de médio porte não funcionam como centros de serviço ou controle e possuem capacidade de transmissão em torno de 2 Mbps. Os terminais de usuários (microcomputadores) conectados às estações de pequeno porte geram tráfego IP (solicitações de dados) sobre os canais de retorno (banda Ka). Este tráfego é convertido para o protocolo ATM para ser transmitido pela rede de satélite. As informações enviadas pelos servidores no canal de transmissão do centro de controle para as estações remotas (banda Ku), são recebidas pelas

estações dos usuários e que demodulam e demultiplexam os sinais MPEG-2 que contêm as informações solicitadas.

FIGURA 61 – SISTEMA MULTIMÍDIA BROADCAST COM APLICAÇÃO EM MEDICINA



4.7 EXEMPLO DE NOVAS ARQUITETURAS DE REDES DE SATÉLITES [59]

Uma nova geração de satélites está sendo desenvolvida, os quais são mais adequados para operação com tráfego Internet (rajadas) e tráfego multimídia. Os enlaces desses satélites são usados tanto para a interconexão de redes como para permitir o acesso de residências e empresas à redes multimídia e Internet. Com isso, as redes de satélite devem suportar tanto os serviços de comutação por circuitos como por pacotes, com alto de tráfego por rajadas.

Os maiores desenvolvimentos nas redes de telecomunicações fixas têm ocorrido nas áreas da Internet e do protocolo ATM. Em especial, nos sistemas de satélite, estão ocorrendo diversas padronizações tanto para o protocolo ATM como

para o IP. O comitê TR34.1 da Divisão de Comunicações via Satélite da TIA tem trabalhado em um conjunto de especificações para arquiteturas de rede ATM que abrange satélites com comutação de bordo e satélites transparentes, para acesso ou interconexão de redes para uso de terminais móveis ou fixos.

4.7.1 Redes de satélites transparentes

Nas redes de satélites transparentes, não há processamento do protocolo ATM a bordo das plataformas espaciais. Todo o processamento é feito no segmento terrestre. Através de satélites convencionais, essa arquitetura permite uma rápida implementação de recursos ATM em localidades remotas ou a interconexão de redes nas quais o ATM é protocolo nativo. Embora a inexistência do processamento e comutação de bordo reduza a flexibilidade do sistema, as características inerentes da comunicação por satélite (como ampla cobertura, capacidade de difusão, etc.) permitem que essa arquitetura seja um complemento adequado para redes terrestres de alta velocidade.

Essa arquitetura pode ser dividida em três categorias: redes ATM fixas, redes ATM para terminais móveis e redes ATM móveis.

4.7.1.1 Redes fixas ATM

Nesse caso, o satélite atua como dispositivo de acesso para que terminais de usuários se conectem a redes de alta velocidade ou como dispositivo de interconexão para redes remotas, também de alta velocidade.

No cenário de acesso, as estações terrenas são tipicamente terminais de baixo custo operando com o protocolo ATM. A conexão da estrutura de satélite à

rede terrestre se dá através de estações terrenas *gateway* que não processam o protocolo ATM. A arquitetura de rede é caracterizada por muitos terminais de usuário, poucas estações *gateways* e taxa de dados de interfaceamento entre as redes terrestre e satélite de 64 kbps a 1,5 Mbps.

No cenário de interconexão, a rede de satélite encontra-se no limite entre as redes terrestres de banda larga, a conexão se dá a velocidades fixas (tráfego não rajada) de 1,5 Mbps a 1,2 Gbps e a arquitetura se vale do uso de estações terrenas *gateways* (não processam o ATM - todo processamento é feito pelas redes terrestres).

As funções de gerenciamento de banda são centralizadas em uma estação central de controle da rede (NCC – *network control center*) e que pode alternar dinamicamente os recursos alocados conforme a demanda, disponibilidade de capacidade, qualidade de serviço solicitada e compartilhamento adequado de banda.

4.7.1.2 Redes ATM para terminais móveis

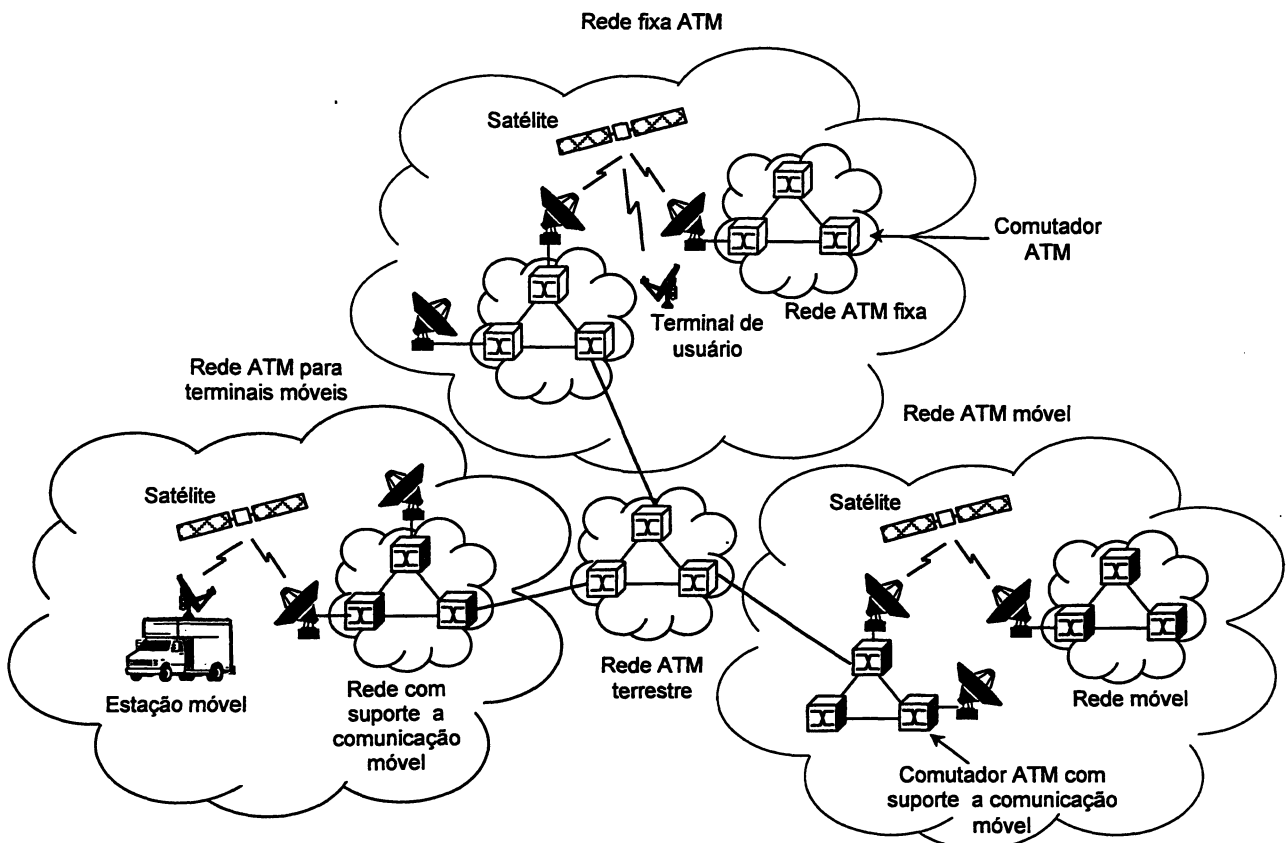
Essas redes suportam terminais portáteis de usuários. Essa mobilidade requer que a rede de satélites tenha funções de gerenciamento de localização. Em se fazendo o uso de satélites não geoestacionários (satélites de baixa e média órbitas - LEOs e MEOs) a complexidade do sistema aumenta pois a rede deve suportar funções de comutação, principalmente, quando há troca de satélites sobre uma área de cobertura, o que exige a migração da comunicação de um satélite para outro.

4.7.1.3 Redes ATM móveis

Nessa arquitetura, a rede de satélite fornece interconexão em alta velocidade entre uma rede móvel e uma rede fixa, ou entre duas redes móveis. As redes móveis são plataformas multi-usuários, como aviões, navios e trens, com conexões ATM a redes terrestres. A topologia de rede consiste de comutadores ATM fixos (interface com a rede terrestre), terminais de usuários (conectados aos comutadores) e estações terrestres *gateways* de satélite. A mobilidade da rede indica que a arquitetura deve suportar tanto a transferência como o roteamento das chamadas entre as estruturas móveis e fixas do sistema, com complexidades adicionais quando empregados satélites em órbitas diferentes da geostacionária.

A Figura 62 ilustra a arquitetura de rede ATM para satélite transparente, composta pelas três categorias descritas.

FIGURA 62 – EXEMPLO DE REDES DE SATÉLITES TRANSPARENTES



4.7.2 Redes de satélites com processamento de bordo

Nesse tipo de rede ATM os satélites possuem processamento de bordo, ou seja, o payload tem funções de comutador ATM. As funções de controle são distribuídas entre o comutador ATM de bordo e a estação NCC. O comitê TR34.1 propõe a divisão desse tipo de rede em três arquiteturas, conforme o tipo de conectividade que a rede oferece:

- a) redes de acesso ATM: onde enlaces de satélite de baixa velocidade são usados para conexão a redes terrestres ATM;
- b) redes de interconexão ATM: nas quais o satélite é um nó de rede ATM interconectando diversas redes ATM terrestres através de enlaces de alta velocidade;
- c) redes mescla ATM: onde diversos satélites formam uma rede ATM espacial, e que fornecem serviços tanto de redes de acesso como interconexão.

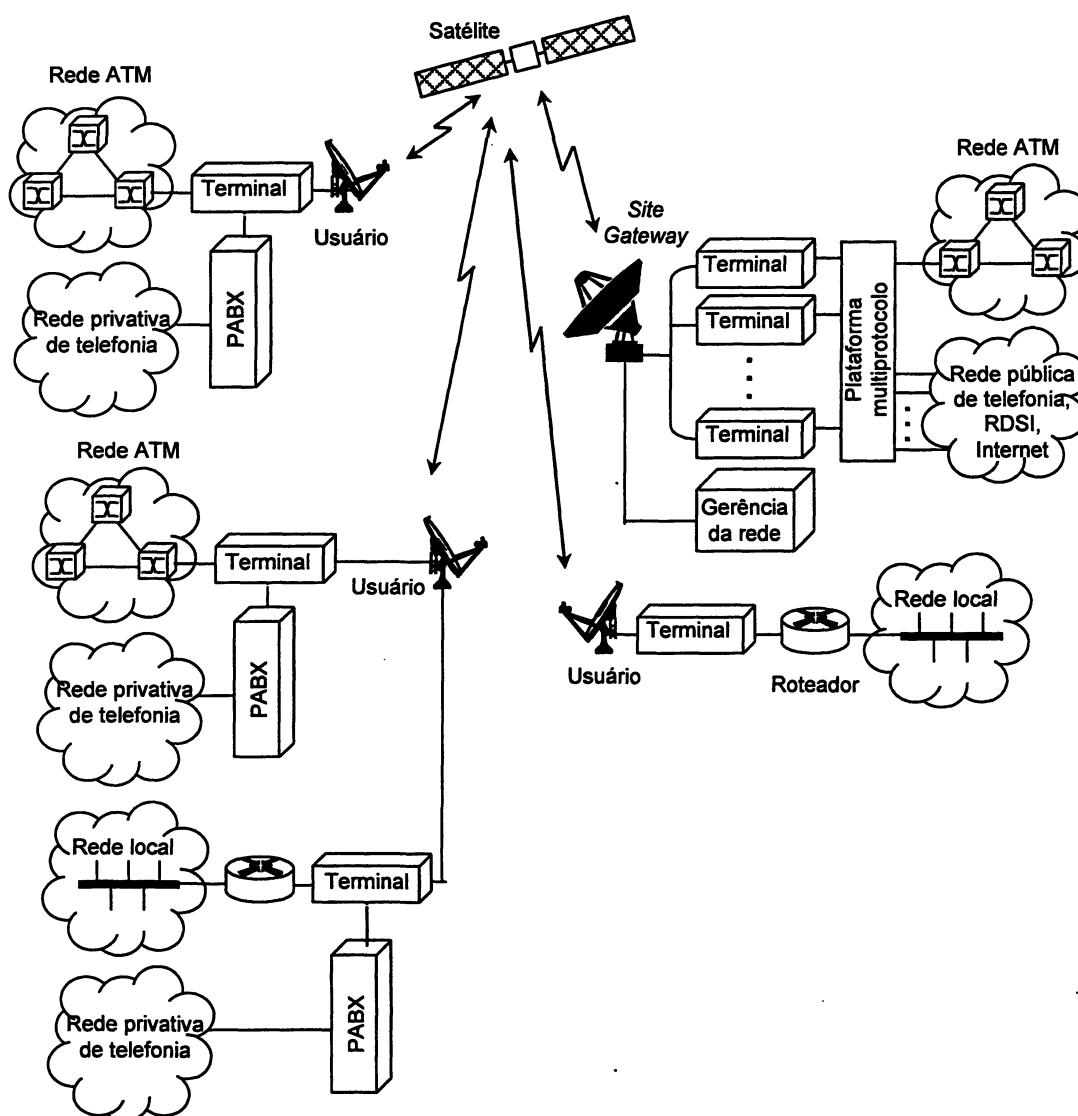
Em paralelo ao desenvolvimento dos padrões do comitê TR34.1, a indústria tem implementado e testado várias soluções para transporte de tráfego ATM sobre satélites de forma eficiente e virtualmente livre de erros [59].

Um exemplo dessa implementação (Figura 63) é o sistema desenvolvido pela COMSAT, chamado Linkway 2000 e que oferece serviços de acesso e transporte de pacotes IP, ATM, Frame Relay, RDSI e Sistema de Sinalização Nº 7, no modo mescla total, taxa de dados entre 64 kbps e 32 Mbps, tráfego simétrico ou assimétrico e modulação BPSK ou QPSK.

Essa rede emprega a técnica TDMA multifreqüência objetivando alcançar alta eficiência e flexibilidade no gerenciamento da largura de banda do satélite. De forma diferente dos sistemas VSAT convencionais, esta rede aloca a capacidade do sistema tanto para tráfego comutado por circuito como por pacotes, de forma dinâmica e adequada para diferentes terminais. A conexão entre terminais de

usuários se dá através de salto simples e com alocação de banda sob demanda (DAMA). A estação NCC possui um algoritmo de gerenciamento de banda e de capacidade de alocação, o que assegura uma eficiente distribuição de recursos.

FIGURA 63 – EXEMPLO DE REDE DE SATÉLITE MULTISERVIÇO COM ALOCAÇÃO DE BANDA SOB DEMANDA



5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

5.1 DISCUSSÕES

O presente trabalho aborda vários aspectos da comunicação por satélite, com apoio de uma análise crítica e alta seletividade de textos científicos sobre o assunto. O foco da pesquisa foi mais propriamente voltado para os satélites que operam em órbita geoestacionária, como forma de entendimento dos sistemas inerentes nesse tipo de comunicação e avaliação da tecnologia empregada. Algumas dessas tecnologias, as quais foram apresentadas nesse trabalho, são características da comunicação por satélite.

O espectro de frequências é um bem finito e tem se mostrado congestionado para diversas bandas. Em especial, na comunicação por satélite, a banda C é uma das faixas mais empregadas e que, portanto, tem sofrido maior congestionamento. Além disso, uma vez que essa faixa de frequências também é empregada nos radioenlaces terrestres, o congestionamento aumenta, aumentando, assim, as características de interferência geral do sistema.

Devido a esse congestionamento e às propriedades de ganho das antenas, onde um aumento da frequência empregada pode se refletir em um menor diâmetro do refletor parabólico para um mesmo ganho, têm sido desenvolvidos estudos em outras bandas (tipicamente em frequências mais altas), como Ku, K e Ka. Essas bandas, além da propriedade de uma antena menor que as da banda C para um mesmo ganho, estão menos congestionadas, ou seja, há uma grande largura de faixa de frequências à disposição. No entanto, os estudos têm mostrado que tais faixas são mais sensíveis à certos tipos de degradações, como a atenuação por chuvas, necessitando, então, do uso de redes de compensação sofisticadas. É de se

prever que o futuro do sistemas de comunicação por satélite passa, quase que obrigatoriamente, pela conectividade através dessas bandas.

Considera-se que outro desdobramento do estudo de novas bandas de transmissão é uma possibilidade de redução da interferência entre satélites. Com isso, há um melhor aproveitamento do plano orbital geoestacionário, com a possibilidade de diminuição da distância obrigatória entre satélites e conseqüente aumento da quantidade de posições orbitais. Ou seja, há a possibilidade de se colocar uma maior quantidade de satélites em órbita.

Nota-se que para estações terrenas de um mesmo sistema de satélite em órbita geoestacionária e sob uma mesma área de cobertura, não há a necessidade de comutação de tráfego entre satélites. Ou seja, não são necessários radioenlaces entre satélites. No entanto, tem-se o entendimento de que a adoção desses radioenlaces permitiria a extensão da área de atuação do sistema e permitindo, por exemplo, uma cobertura efetivamente global (cobertura de todo o globo terrestre).

Também para esse tipo de satélite, embora a área de cobertura seja grande (até, aproximadamente, 42% da superfície terrestre para zero grau de ângulo mínimo de elevação), ela não é grande o suficiente para contemplar as regiões polares, uma vez que há uma latitude máxima permitida, como deduzido anteriormente neste trabalho. Considera-se que isto seja uma desvantagem do serviço por satélites geoestacionários. Entende-se, então, que para uma cobertura na região polar seria necessário o uso de satélites com órbitas específicas para esse fim, como por exemplo, órbitas elípticas com um determinado grau de inclinação.

Já estações terrenas servidas por satélites geoestacionários e que estejam próximas à linha do equador são favorecidas pelo alto ângulo de elevação. Isto porque, nessa situação, é minimizado o bloqueio do feixe de microondas do radioenlace por vegetações (árvores) ou construções (edifícios). Além disso, um alto ângulo de elevação faz com que, também, seja minimizada a quantidade de ruído absorvida pelas antenas das estações. Ruído, esse, oriundo tanto da superfície como de outros radioenlaces terrestres e na mesma faixa de frequências de

operação do satélite. O alto ângulo de elevação permite, também, que haja a redução de múltiplos caminhos causados pelas reflexões do sinal em obstáculos.

Outro importante fator, e nesse caso diretamente relacionado com uma comparação com as redes terrestres, é a independência em relação aos dispositivos de acesso ao usuário, conhecido como problema da última milha. Na verdade, esse problema não se restringe unicamente ao acesso do usuário, mas, sim, ao uso de várias centrais (muitas delas com diversos tipos de tecnologia) na rota da comunicação terrestre. Isto pode levar a uma degradação da informação, exigindo o uso de dispositivos especiais para a compensação/correção das mensagens. Já a comunicação por satélite está imune a este problema devido à facilidade de que o usuário dispõe de acessar diretamente o sinal de transmissão/recepção. Assim, todas as vantagens de uma comunicação fim a fim estão sempre à disposição.

Sob meu ponto de vista, é pouco oportuno uma comparação direta entre duas ou mais tecnologias de telecomunicações (sistemas de satélites/sistemas terrestres). Isto porque cada sistema tem uma área específica de atuação e pode operar de maneira colaborativa com outros sistemas. Apesar disso, é importante traçar algumas linhas de comparação entre um sistema de comunicação por satélite e um sistema terrestre, como por exemplo, o de fibras óticas.

É sabido que tanto a fibra óptica como o satélite são sistemas de banda larga, onde a capacidade de transmissão de cada fibra pode, de certa forma, ser aproximada à capacidade de transmissão de um *transponder*. Essa similaridade, no entanto, não se mantém se for considerada, por exemplo, a capacidade de expansão do sistema. Observa-se que a fibra óptica é um sistema facilmente expansível, desde que se tenha espaço vago nos dutos para a passagem de novos cabos. Já o satélite, uma vez colocado no espaço, não permite expansões, a menos que se utilize os *transponders* reserva. A capacidade de expansão, nesse caso, estaria centrada na possibilidade da instalação de novas estações terrenas.

Também em favor da fibra óptica estão as diversas técnicas de otimização (a multiplexação no domínio do comprimento de onda e suas variações) que

conforme o tipo de fibra, podem aumentar consideravelmente a capacidade de transmissão. As técnicas de otimização aplicadas à comunicação por satélite, embora também muito eficientes, apresentam resultados gerais mais tímidos que aqueles obtidos com a fibra óptica. A vida útil é outro fator que pende a favor das fibras ópticas. Os satélites geoestacionários mais modernos tem entrado em operação com uma vida útil média de cerca de 15 anos. Considera-se que as fibras ópticas, devido aos materiais que as compõem, têm uma perspectiva de vida muito superior a esse valor. O retardo de transmissão (ou latência, no caso de um protocolo de comunicação) também não pode deixar de ser mencionado como um importante aspecto favorável às fibras ópticas. Como foi visto, em um sistema de comunicação por satélite geoestacionário, o retardo é cerca de 250 milissegundos para um salto completo (enlaces de *uplink* e *downlink*). Isto é cerca de dez vezes maior do que o retardo de transmissão de uma conexão continental ponto a ponto de fibra óptica através, por exemplo, dos Estados Unidos.

A comparação de outras propriedades, no entanto, são mais favoráveis ao satélite, como é o caso da área de abrangência. Os satélites de comunicação geoestacionários tem uma inerente capacidade de grande área de abrangência. Já as fibras ópticas necessitam de inúmeros lances de cabos para uma determinada cobertura, mesmo que restrita a uma área metropolitana. Além disso, outros fatores como acidentes são, também, favoráveis ao satélite. Não são raros os acidentes com o rompimento de cabos de fibras ópticas, sejam eles cabos enterrados, aéreos ou autosustentados. Dependendo do tipo de rompimento do cabo, da arquitetura de rede e existência ou não de rotas alternativas, o prejuízo para o sistema pode ser considerável. Já o satélite, uma vez colocado em órbita e entrando em operação com sucesso, os acidentes, historicamente, são muito pouco expressivos. Mesmo problemas com estações terrenas de controle podem ser contornados devido a existência de estações de contingência.

Nota-se, portanto, que a lista de itens que podem ser comparados é extensa e talvez não se chegue a algo conclusivo. Ratifica-se, então, a opinião

apresentada anteriormente de que comparações desse gênero tornam-se pouco produtivas. Portanto, entende-se que as avaliações necessárias de serem feitas para a determinação do melhor tipo de sistema para um certo serviço, aplicação ou formação de rede devem ser feitas caso a caso, considerando as particularidades requeridas do sistema de comunicação.

Ainda sobre as características do sistema de satélite em órbita geoestacionária, outro tema que merece destaque é o retardo de transmissão. Para uma transmissão digital, torna-se necessário a reconfiguração dos protocolos de comunicação e, ainda, eventuais ajustes nos aplicativos dos usuários. Na verdade, o retardo de transmissão não afeta a transferência de grandes volumes de dados que são transmitidos de forma contínua. Este retardo, é um problema significativo para protocolos que exijam confirmação imediata. Nesse caso, o uso de emuladores viabilizam o serviço mas aumentam a criticidade da rede por inserirem mais um elemento que necessita de sincronismo. Ou seja, a coordenação de *polling* entre a estação FEP (principal) e as estações remotas. Ajustes devem ser realizados mesmo para protocolos mais sofisticados, como por exemplo, os que empregam janela deslizante. Nesse caso, avanços tem sido feitos buscando ajustes no tamanho das janelas do protocolo, nos próprios procedimentos de confirmação e na inserção de retardo nos mecanismos de operação do protocolo.

Assim, aplicações que se utilizam de alta interatividade são diretamente afetadas pelo problema do retardo do satélite, devido ao grande volume de confirmações necessárias entre os dois lados da transmissão. Esse é o caso de um dos maiores protocolos da Internet, o TCP, que demanda muitas interações.

Para aplicações em tempo real, como no caso da voz, o retardo implica, principalmente, na questão do surgimento de eco. Assim sendo, para esses casos, torna-se necessário evitar que o sistema empregue mais de um salto. Sugere-se que isso possa ser obtido, por exemplo, com a adoção de enlaces entre satélites, e satélites com capacidade de comutação no *payload*. Com o uso dessa comutação, a necessidade de múltiplos saltos deixa de existir e com isso, também, torna-se

desnecessário o uso das estações *gateways* terrestres, responsáveis pela comutação entre redes/satélites diferentes.

A vida útil do satélite é restrita, sendo proporcional à quantidade de combustível disponível. Como foi visto, são necessários diversos ajustes na órbita de um satélite geoestacionário. O esgotamento do combustível para correções no posicionamento Norte-Sul, traz uma propriedade interessante. Nesse caso, o satélite perde a condição geoestacionária e entra em uma órbita geossíncrona, passando a descrever a figura de um 8 sobre a superfície terrestre. Assim, as estações terrenas necessitam usar dispositivos de rastreamento para manter o apontamento ao satélite, o que aumenta a sofisticação e custo do segmento terrestre. Nessa condição, o satélite torna-se ideal para serviços específicos, como difusão dentro da área de cobertura e formação de redes com poucas estações terrenas, onde o custo de rastreamento do satélite não seja preponderante. Entende-se que podem ser citados como exemplos para essa condição, os serviços de entroncamento e distribuição de programas de TV para estações que farão a retransmissão terrestre do sinal, ou ainda, redes móveis onde o rastreamento (*tracking*) seja uma necessidade obrigatória.

Observa-se que a vida útil do satélite também está relacionada com a capacidade das baterias de fornecerem energia, uma vez que durante um ano o satélite passa diversas vezes pela condição de eclipse do Sol. Na condição de eclipse, os painéis solares não são iluminados e há a necessidade de uso de fonte de energia alternativa. Além disso, e como acontece com o combustível, a massa das baterias é um fator limitante para o satélite, o que faz com que o suprimento de energia alternativa também seja restrito. Isto também se reflete no tempo total que um satélite pode ficar em operação.

Note-se, ainda, que uma maior quantidade de baterias implica em mais massa para o satélite, o que eleva o consumo de combustível para a correção da órbita. Além disso, uma grande quantidade de baterias vem da exigência do uso de grandes potências no satélite, o que conduz a uma elevada necessidade de recarga,

tornando necessário o uso de grandes painéis solares. Por sua vez, grandes painéis solares podem implicar em consideráveis perturbações na órbita do satélite (devido, por exemplo, ao vento solar) e, conseqüentemente, a um maior consumo de combustível.

Com respeito ao payload de um satélite de comunicação, observa-se que muitos sistemas de estações espaciais trabalham com a emissão de diversos feixes de sinal, permitindo coberturas domésticas (ou regionais), hemisféricas ou mesmo globais. Isso mostra que esse meio de transmissão permite uma multiplicidade de cobertura geográfica, proporcionando uma grande versatilidade na prestação de serviços.

Similar a outros sistemas, é na fase de projeto que se determina os tipos de serviços que serão prestados pelo satélite, bem como, sua área de abrangência. Uma vez, então, que o satélite entra em operação, há sérias dificuldades em se alterar o foco dos serviços ou mesmo a área de cobertura fornecida. No entanto, tem-se visto que, devido aos diversos processos de globalização e mesmo evolução da sociedade, tem ocorrido rápidas mudanças nos requisitos dos serviços de telecomunicações. Entende-se, então, que para um sistema como o de satélites, a total fidelidade ao projeto inicial é algo comprometedor pois, após o lançamento, não se pode mais fazer alterações nas características para as quais o sistema foi projetado. Considera-se, portanto, que é necessário que cada vez mais haja flexibilidade no sistema, principalmente, no seu ponto mais rígido, ou seja, na estação espacial.

Assim, a adoção de técnicas de comutação de bordo, onde as informações dos usuários podem ser roteadas de um feixe de sinal para outro (ou seja, de uma área de cobertura para outra), é uma grande evolução nesse sentido. Além disso, o fornecimento de flexibilidade de apontamento aos arranjos de antenas permitiria a modelagem dinâmica de áreas de cobertura. Com isso, considera-se possível ajustar a abrangência do sistema conforme a demanda de serviços, necessidade de fluxo de informações ou, mesmo, condições de *backup* para aplicações/redes críticas.

Pelo que se tem pesquisado, os sistemas de transmissão usados nos recursos por satélites não são mais sofisticados que aqueles empregados nos sistemas terrestres. Já as técnicas de múltiplo acesso mostram considerável evolução nos sistemas que usam plataforma espacial. O uso de técnicas de otimização junto aos sistemas de transmissão não é, com certeza, novidade imposta pelos sistemas por satélite. Técnicas desse gênero tem sido usadas largamente e com muito sucesso pelos sistemas terrestres, há muito tempo. No entanto, pode-se destacar a versatilidade e a criatividade como essas técnicas são empregadas nos sistemas por satélite.

Durante esse trabalho, constatou-se que o uso das técnicas de múltiplo acesso não é comumente feito de forma discreta, mas sim, de forma híbrida ou composta. Nesse sentido e para ilustrar essa situação, imagine-se como exemplo uma rede com inúmeras estações terrenas operando com diversos tipos de protocolos e aplicações. Para essa rede, pode ser disponibilizado um quadro TDMA, oriundo de uma prévia divisão de banda do *transponder* pelo método FDMA. Esse quadro pode ter diversos time slots que, conforme o projeto, são divididos em um determinado número entre aplicações que requeiram alocação fixa e aplicações que permitam a alocação dinâmica. No caso da alocação dinâmica, para se obter os recursos necessários, as estações terrenas inserem sua solicitação em um subcanal, dentro do quadro TDMA, de reserva de recursos. Para disciplinar o acesso das estações terrenas ao canal de reserva de recursos, pode-se empregar a técnica de acesso randômico Aloha Pura. Nota-se, então, que a técnica Aloha Pura, mesmo com uma eficiência baixa, encontra outras aplicações além daquela descrita no trabalho. Assim, diversas técnicas de múltiplo acesso são empregadas em uma mesma rede, otimizando os recursos e de forma totalmente colaborativa.

Considera-se, então, que a operação em conjunto das diversas técnicas de acesso é uma forma de composição de vantagens e de superar desvantagens de cada método. Uma ilustração de desvantagem, por exemplo, nos sistemas sob demanda, é a necessidade do controle dos recursos a serem alocados. Como foi

apresentado no trabalho, o controle pode ser feito por uma estação central ou se ter a inteligência de controle distribuída pelas diversas estações terrenas. Entende-se como preferível a opção centralizada para o caso de grandes redes, onde o custo da distribuição da inteligência de controle seria um fator proibitivo para o sistema. No entanto, fica-se à mercê de que uma falha na estação controladora possa paralisar a rede. Para redes de menor porte, onde as próprias aplicações usadas requeiram certa complexidade das estações terrenas, a distribuição da inteligência pela rede torna-se mais viável.

Com relação às estações terrenas, estas, talvez, constituam a parte mais flexível de um sistema por satélite, considerando a facilidade de alterações tecnológicas a serem introduzidas após a entrada em operação dos dispositivos. A concepção que envolve os equipamentos das estações terrenas é, geralmente, modular, o que facilita reconfigurações. Entende-se, ainda, que um dos grandes objetivos de uma rede por satélite é ser o mais transparente possível para as informações do usuário. Atingido esse objetivo e caso se entenda como oportuno a implementação de serviços adicionais, isto é mais viável de ser feito na estação terrena justamente devido à sua modularidade e facilidade de acesso.

Verifica-se, ainda, grande evolução nos dispositivos das estações terrenas que são responsáveis por receber e tratar as informações oriundas dos usuários, com a finalidade de entregá-las, de forma o mais otimizada possível, para a transmissão ao satélite. Uma análise no segmento terrestre mostra esforços no sentido da compactação dessas estações. A redução desses dispositivos implica em maior facilidade de instalação e maleabilidade, aumentando a possibilidade de novos serviços, aplicações e conseqüente expansão.

No entanto, uma característica importante a ser discutida acontece quando a estação terrena é muito grande. Nesse caso, diversos sistemas, além dos abordados nesse estudo, tornam-se necessários como é o caso de dispositivos de climatização e proteção ambiental. Além disso, havendo antenas de grande diâmetro, estruturas especiais de rastreamento devem ser instaladas visando manter

o correto apontamento, o qual se torna crítico devido ao grande volume de informação e potência empregados e pelo fato dessas antenas serem altamente diretivas.

Pela análise de suas características básicas, observa-se que os satélites de comunicação em órbita geoestacionária possuem grande vocação para a formação de redes, tanto privadas como públicas, para os mais diversos tipos de serviços. Este aspecto foi abordado no trabalho através de exemplos onde ilustrou-se tanto os serviços, com as aplicações e as arquiteturas de redes utilizadas.

No entanto, esses exemplos não esgotam as possibilidades de conectividade empregando sistemas de comunicação por satélite. Composições entre características do sistema e novas tecnologias implementadas nas estações terrenas, abrem possibilidades para outras configurações. É possível, por exemplo, a constituição de redes tipo "mescla total" onde cada uma das estações terrenas transmite em uma frequência diferente. Cada estação recebe demoduladores para cada uma das frequências de transmissão das outras estações, possibilitando a transmissão entre estações, sem a necessidade de duplos saltos.

Os serviços fornecidos pelas redes VSAT estão em franca evolução. Os sistemas eram originalmente voltados para dados, com grande restrição a diversos protocolos. Percebe-se, hoje, o estudo e desenvolvimento de técnicas para a transmissão de inúmeros protocolos e diversos tipos de serviços, como videoconferência, voz, multimídia, acessos Internet, entre outros. O aumento da taxa de transmissão das estações remotas, é outra característica em desenvolvimento. Em sintonia com essas evoluções, é grande a tendência na redução do porte dos terminais de satélite, em especial, para esse tipo de rede. Conclui-se que o futuro (não muito distante) das telecomunicações estará alicerçado na trilogia mobilidade, multimídia e Internet. Inserido nesse contexto, as novas aplicações a serem desenvolvidas exigirão uma banda muito larga de transmissão, bem como, ampla cobertura geográfica. De forma geral, os sistemas de satélite (LEO, MEO e GEO) possuem capacidade para tratar com eficiência todos os elementos dessa trilogia.

No caso de satélites geoestacionários, o sistema têm, efetivamente, certas restrições no tratamento de aplicações com alta interatividade, como foi visto. No entanto, são ideais para as aplicações que requeiram grande largura de banda e necessitem de ampla cobertura. Novas aplicações desse gênero serão, por exemplo, sistemas de disseminação de informações *broadcast/multicast* de índices financeiros, informações médicas, redes de notícias, agências de distribuição de imagens de alta definição, *video clips* de vendas de produtos em promoção, sistemas de aprendizado a distância, além daquelas já atualmente utilizadas.

5.2 CONCLUSÕES

Este trabalho compreendeu uma extensa coleta bibliográfica, análise e compilação acerca dos sistemas de comunicação por satélite que empregam a órbita geoestacionária. Foi gerado, com este estudo, um novo material teórico abordando, de forma ampla, o referido tema. Entende-se que este material traz contribuição na área das comunicações por satélite e que pode ser amplamente utilizado no ensino das telecomunicações. Embora com foco voltado para a pós-graduação, também pode ser utilizado em cursos de graduação.

Inicialmente, apresentou-se o segmento espacial onde definiu-se as características de maior destaque da órbita geoestacionária. Abordou-se o subsistema de comunicação com análise dos diversos dispositivos dessa estrutura. As técnicas de transmissão e múltiplo acesso foram apresentadas, subdividindo-se o desenvolvimento do trabalho em técnicas de transmissão, de multiplexação e de acesso. O estudo contemplou, também, a análise básica do radioenlace de comunicação entre a estação terrena e a plataforma espacial.

A tecnologia associada às estações terrenas foi estudada e, nesse trabalho, a estação terrena padrão foi subdividida em quatro partes: 1) banda básica,

2) frequência intermediária, 3) radiofrequência e 4) antenas, com a respectiva análise de cada estrutura.

Finalmente, exemplos de aplicações, serviços e arquiteturas de rede que se utilizam dos recursos dos satélites geoestacionários de comunicação também foram incluídos neste trabalho, apresentando-se alguns casos já implantados.

Diante desta pesquisa, pode-se compreender as diversas estruturas que formam os sistemas que empregam satélites geoestacionários para a comunicação. O trabalho mostra que a comunicação por satélites está intimamente relacionada com a mais alta tecnologia. Em especial, o segmento espacial (o satélite) faz uso do conhecimento de ponta das mais diversas áreas da ciência, tendo em vista o ambiente que o cerca, seu posicionamento, funcionalidades e objetivo final, ou seja, atuar como um engenho capaz de receber, tratar e transmitir sinais de radiocomunicação.

O uso de tecnologia de ponta é, muitas vezes, motivada pela ausência de manutenção na plataforma espacial, refletindo-se no uso de dispositivos de alta qualidade, além de diversas redundâncias, buscando o aumento da confiabilidade geral do satélite.

As transmissões via satélite empregam técnicas semelhantes às usadas nos sistemas terrestres, com ajustes adequados às particularidades da comunicação por satélite, como distância, área de cobertura, tipo de serviço prestado, etc. Com o objetivo de aumentar a quantidade de conexões e redução de custos do serviço, as tecnologias relacionadas ao compartilhamento dos recursos do satélite (basicamente, o *transponder*) encontraram grande aceitação neste sistema de comunicação, tirando proveito de algumas características das aplicações dos usuários, como a presença de tempos ociosos na transmissão da informação, fluxo de transmissão não contínuo, etc.

O segmento terrestre é composto de diversos tipos de estações e terminais que assumem inúmeras configurações, conforme a necessidade do serviço prestado. Além de dispositivos transmissores e receptores de microondas, tais

estações/terminais terrenas contam com vários componentes que permitem tratar a informação e entregá-la de forma adequada ao usuário. A evolução do segmento terrestre tem permitido o uso de estações terrenas cada vez menores e, com a produção em larga escala, uma acelerada redução de custos; fato atrativo para o acréscimo de usuários.

Observa-se certa propensão dos sistemas de satélite em direção às comunicações pessoais, seguindo tendência mundial e motivados pelos processos de globalização, evolução tecnológica e redução de custos de componentes e dispositivos. Esses interesses, no entanto, são mais acentuados em relação aos satélites de baixa ou média órbitas, tendo em vista a reduzida potência dos terminais de usuários.

As características de custo dos recursos por satélite em conjunto com suas propriedades básicas, indicam que esse sistema de comunicação é voltado à tipos específicos de serviços, aplicações e configurações de rede. Atualmente, tendo em vista os processos de globalização nos quais as telecomunicações internacionais têm tido um crescimento consistente, a comunicação por satélite surge como alternativa adequada para a formação de redes de área ampla, públicas ou privadas, tanto de forma isolada ou em composição com outros tipos de estruturas de comunicação. A grande expansão no número de satélites geoestacionários colocados em órbita (ver Anexo 3) confirmam o interesse por esta alternativa que são as redes via satélites.

Com cerca de 30 anos de história, as comunicações por satélite podem ser consideradas um sistema maduro e estável, mas em franco processo de evolução. Exemplo disso, é o incremento de inteligência nos dispositivos do *payload* de comunicação que permitem o fornecimento de um número cada vez maior de serviços, moldando-se com maior flexibilidade à aplicações e sendo útil a um diversificado número de segmentos da sociedade.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Pode-se extrair deste trabalho algumas sugestões de linhas de pesquisa para trabalhos futuros. Dessa forma, entende-se que seria oportuno um estudo voltado a um radioenlace entre satélites. Nesse caso, novas considerações devem ser realizadas devido ao ambiente em que se encontra os satélites, das perturbações em suas órbitas e interferências de outros satélites.

Ainda sobre os radioenlaces mas focando, agora, a conexão estação terrena/satélite, pode-se sugerir, também, o estudo das bandas de frequências mais altas, acima da banda C, uma vez que considera-se serem essas faixas o caminho pelo qual a comunicação por satélite deve seguir nos próximos anos. Neste caso, especial atenção deverá ser dada para as considerações associadas ao efeito das atenuações atmosféricas, como as tecnologias para o tratamento da relação sinal/ruído, que se torna crítica com o aumento da frequência.

É interessante, também, um estudo mais detalhado com relação às novas técnicas de comutação a serem empregadas no payload do satélite, bem como as técnicas de mobilidade dos feixes de sinal. Essa análise poderia compreender um detalhamento dos benefícios que essas técnicas trariam aos atuais e futuros serviços e aplicações.

Estudos voltados aos diversos aspectos da interação dos serviços Internet com a rede de satélite poderiam, também, ser desenvolvidos. Isto porque considera-se que as comunicações por satélite terão importante papel na evolução da rede Internet. Nesse sentido, pode-se avaliar, também, uma abordagem especial aos serviços banda larga em satélites geoestacionários.

Finalizando, sugere-se o estudo adicional da comunicação por satélite utilizando órbitas médias e baixas. Assim como os tópicos sugeridos anteriormente, esse estudo também viria a complementar o presente trabalho, incluindo as tecnologias de sistemas de constelação de satélites (Globalstar, ICO, etc.), sistemas

de posicionamento terrestre (GPS) entre outros.

REFERÊNCIAS

- [1] **IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine**. Vol.15, Nº 10, p. 95-107, Oct. 2000.
- [2] **EVANS, J. V. Twenty Years of International Satellite Communication**. IEE Conference Publication, 100 Years of Radio. Sept. 1995.
- [3] **HA, T. T. Digital Satellite Communications**. 2nd Ed. Singapore: McGraw-Hill, 1990.
- [4] **WAKEFIELD, J. Domestic Satellite Services and Applications**. IEEE 21st Annual Electronics and Aerospace Conference. Conference Proceedings, p. 41-45, 1988.
- [5] **Padrão do Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers). Standard 521**. New York, Nov. 1984.
- [6] **MARAL, G.; BOUSQUET, M. Satellite Communications Systems – Systems, Techniques and Technology**. 3rd Ed. Chichester: J. Wiley, 1998.
- [7] **MORGAN, W. L.; GORDON, G. D. Communications Satellite Handbook**. J. Wiley, 1989.
- [8] **MIYA, Kenichi et al. Satellite Communications Technology**. Tokyo: Institute of Electronic and Communication Engineers of Japan, 1980.
- [9] **JAMALIPOUR, A. Low Earth Orbital Satellites for Personal Communications Networks**. Norwood: Artech House, 1998.
- [10] **MICHAELIS: Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. São Paulo: Cia Melhoramentos, 1998.
- [11] **MERTENS, H., et al. Satellite Broadcasting – Designs and Planning of 12 GHz Systems**. European Broadcasting Union: Brussels, 1981.

[12] MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

[13] DOUGLAS, R. L. **Satellite Systems**. In: GIBSON, J. D. *The Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1997, p. 912-921.

[14] SLATER, John C. **Microwave Eletronics**. New York: Dover Publications, 1969.

[15] HWANG, Y.; CHOUNG, Y. **Satellite Antennas**. In: GIBSON, J. D. *The Communications Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 1997, p. 1032-1053.

[16] MITTRA, R.; IMBRIALE, W. A.; MAANDERS, E. J. **Satellite Communication Antenna Technology**. Elsevier Science Publisher B. V., 1983.

[17] EMBRATEL. **Características o Sistema Brasileiro de Telecomunicações via Satélite para projeto técnico de redes de comunicações de dados, voz e vídeo**. Disponível em < http://www.starone.com.br/tecnologia/tec_biblioteca.shtm > Acesso em: 08 jun. 2001.

[18] INTELSAT. **IESS-406 (Rev. 4A) INTELSAT VA satellite characteristics**. Disponível em < http://www.intelsat.int/tech/techsrch_e.asp > Acesso em: 21 jun. 2001.

[19] BARGELLINI, P. L.; HYDE, G. **Satellite and Space Communications**. In: VALKENBURG, M. E. Van. *Reference Data for Enginners: Radio, Eletronics, Computer and Communications*. 8th Ed. Carmel: Prentice, 1995.

[20] GOMES, A. T. **Telecomunicações: transmissão e recepção – sistemas pulsados**. 2^a Edição. São Paulo: Érica, 1985.

[21] PURSLEY, M. B. **Digital Communications**. In: VALKENBURG, M. E. Van. *Reference Data for Enginners: Radio, Eletronics, Computer and Communications*. 8th Ed. Carmel: Prentice, 1995.

[22] PINES, J. **Telecomunicações: sistemas multiplex**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro: Embratel, 1978.

[23] RIBEIRO, M. P. **Telecomunicações: sistemas analógico-digitais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Embratel, 1980.

[24] AKYILDIZ, I. F. et al. **Medium Access Control Protocols for Multimedia Traffic in Wireless Networks**. IEEE Network Magazine, Vol.13, No.4, pp. 39-47 July/Aug. 1999.

[25] FREEMAN, R. L. **Radio systems design for telecommunications**. 2nd Ed. J. Wiley, 1997.

[26] ELBERT, B. R. **The Communications Ground Segment and Earth Station Handbook**. Norwood: Artech House.

[27] PICKHOLTZ, R. L. **Communications by Means of Low Earth Orbiting Satellites**. Modern Radio Science, p.96, Oxford University Press, May 1996.

[28] CALHOUN, G. **Digital Cellular Radio**. Norwood: Artech, 1988.

[29] FORCINA, G.; OEI, S.; SIMHA, S. **The Intelsat DAMA System**. 10th International Conference on Digital Satellite Communications, p. 571-577, vol.2, 1995.

[30] GIOZZA, W. F. et al. **Redes locais de computadores: tecnologia e aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

[31] STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. **Antenna Theory and Design**. 2nd Ed. New York: J. Wiley, 1998.

[32] PRITCHARD, D. R. **The Earth Station**. In: GIBSON, J. D. The Communications Handbook. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 922-933.

[33] ZAI-XING, W.; DE-JUNG, W.; MING, B. **A DCME frame structure**. IEEE TENCON'93, Beijing.

[34] HAWKINS, G. J. EDWARDS, D. J. **Operational analysis of electronic tracking schemes**. IEE PROCEEDINGS, Vol.136, Pt. 1, N°3, Jun. 1989.

- [35] EVANS, B. G. **Satellite Telecommunications – An Overview**. IEE Colloquium on International Transmission System, p. 2/1- 2/4, 1994.
- [36] CHITRE, D. M.; MCCOSKEY, J. S. **VSAT Networks: Architectures, Protocols, and Management**. IEEE Communications Magazine, Vol.26, N° 7, p. 28-38, July 1988.
- [37] KIM, K. S. **Data Communications with VSATs – RA/TDMA vs. SS/CDMA**. 21st Annual Electronics and Aerospace Conference, IEEE EASCON '88, Conference Proceedings, p. 191–196, 1988.
- [38] KUMAR, S. et al . **A Digital SCPC VSAT**. Digital Communications Conference Proceedings, p. 172-199, 1988.
- [39] MURTHY, K. M. S.; GORDON, K. G. **VSAT Networking Concepts and New Applications Development**. IEEE Communications Magazine, Vol. 27, N° 5, p. 43-49, May 1989
- [40] ROY, R. R.; SHAHA, A. **Ku-Band Satellite Systems for large scale data communications networks**. IEEE Aerospace Applications Conference, 12 p. Feb. 1989.
- [41] HADJITHEODOSIOU, M. H.; COAKLEY, F. P.; EVANS, B. G. **Next Generations Multiservice VSAT Networks**. Electronics & Communications Engineering Journal p. 117-126, June 1997.
- [42] SAAM, T. J. **The Economic Benefits of VSATs**. IEEE International Conference on Communications. Conference Record, Vol. 2, p. 370-375, 1990.
- [43] CHAKRABORTY, D. **VSAT Communications Networks: An Overview**. IEEE Communications Magazine, Vol.26, N° 5, p. 10-24, May 1988.
- [44] NADERI, F. M.; WU, W. W. **Advanced Satellite Concepts for Future Generation VSAT Networks**. IEEE Communications Magazine, Vol. 26, N° 9, p. 13-22, Sept. 1988.
- [45] MURTHY, K. M. S. et al. **VSAT User Network Examples**. IEEE Communications Magazine, p. 50-57, Vol. 27, N° 5, May 1989 .

- [46] PFUND, E. T. **Direct Television Broadcasting with a Medium-Size Satellite.** 21st Annual Electronics and Aerospace Conference, IEEE EASCON '88. Conference Proceedings, p. 121-129, 1988.
- [47] KONISHI, Y. **Special Issue on Satellite Broadcasting.** IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 34, N° 4, p. 421-424, Dec. 1988.
- [48] HEWITT, C. C. **Advanced Television Systems and the Home Satellite Television Market.** 21st Annual Electronics and Aerospace Conference, IEEE EASCON '88. Conference Proceedings, p. 181-184, 1988.
- [49] SOHN, W.; KWON, O. H.; CHAE, J. S. **Digital DBS System Design and Implementation for TV and Data Broadcasting Using Koreasat.** IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 44, N° 3, p. 316-323, Sept. 1998.
- [50] MATSUSHITA, M.; YOKOYAMA, S. **Experience on Operating a DBS System (BS-2) in Japan.** IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 34, N° 4, p. 430-434, Dec. 1988.
- [51] KIESLING, J. D. **Land Mobile Satellite Systems.** Proceedings of the IEEE, Vol. 78, N° 7, p. 1107-1114, July 1990.
- [52] JOHANSON, G. A. **Ground Networks for Mobile Satellite Services.** International Conference on Communication Technology Proceedings, Vol. 1, p. 293-296, 1996.
- [53] RUSSO, A. A. **Multi-Beam GEO Satellite Concept for the Mobile User Objective System.** Military Communications Conference Proceedings, Vol. 2, p. 1125-1130, 1999.
- [54] HERNANDEZ, G. **IP Services over Satellite Platforms.** IEE Colloquium on Multimedia Services and Digital Television by Satellite, p. 4/1 – 4/5, 1999.
- [55] OTSU, T. et al. **A Study on Global Multimedia Satellite Communication System.** IEEE Global Telecommunications Conference, Vol. 5, p. 2960-2965, 1998.
- [56] HUANG, J.; LE-NGOC, T.; HAYES, J. F. **Broadband Satcom System for Multimedia Services.** IEEE International Conference on Communications. Conference Record, Vol. 2, p. 906-910, 1996.

[57] NEALE, J.; GREEN, R.; LANDOVSKIS, J. **Interactive Channel for Multimedia Satellite Networks**. IEEE Communications Magazine, Vol.39, N° 3, p. 192-198, Mar. 2001.

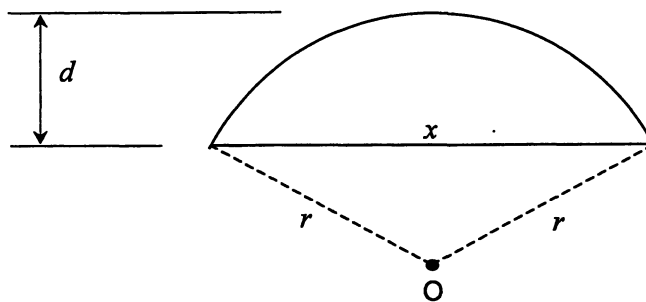
[58] PIERUCCI, L.; DEL RE, E. **An Interactive Multimedia Satellite Telemedicine Service**. IEEE Multimedia, Vol.7, N° 2, p. 76-83, Apr.-June 2000.

[59] CHITRE, P.; YEGENOGLU, F. **Next Generation Satellite Networks: Architectures and Implementations**. IEEE Communications Magazine, Vol. 37, N° 3, p. 30-36, Mar. 1999.

**ANEXO 1 - ÁREA DE SUPERFÍCIE DE FIGURA SÓLIDA
(SEGMENTO DE ESFERA)**

ANEXO 1 - ÁREA DE SUPERFÍCIE DE FIGURA SÓLIDA
(SEGMENTO DE ESFERA)

FIGURA A2.1 - ÁREA DE SEGMENTO DE ESFERA



A área da superfície esférica é dada por:

$$A = 2\pi r d = \frac{1}{4}\pi(x^2 + 4d^2) \quad (\text{A2.1})$$

com

$$x = \sqrt{4(2dr - d^2)} \quad (\text{A2.2})$$

REFERÊNCIA:

VALKENBURG, M. E. Van. **Reference Data for Engineers: Radio, Eletronics, Computer, and Communications.** 8th Ed. Carmel: Prentice Hall, 1995.

ANEXO 2 - CONSÓRCIOS DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE

ANEXO 2 - CONSÓRCIOS DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE

As redes de comunicação por satélite envolvem altos investimentos. Este fato, junto com a necessidade de uma cobertura global que permita o fornecimento de plenas facilidades de telecomunicações internacionais tem levado à formação de diversos consórcios de satélites. Uma breve descrição de alguns desses consórcios é apresentada a seguir.

INTELSAT

A Organização Internacional de Telecomunicações por Satélites - INTELSAT (International Telecommunications Satellite Organization) foi formada em 1964 com o objetivo de fornecer cobertura global via satélite para os operadores de telecomunicações. Atualmente, há cerca de 117 empresas associadas ao Intelsat. Desde seu início, com o satélite de comunicações Earlybird (ou Intelsat I), esse consórcio lançou 35 satélites constituindo 5 gerações diferentes [1].

Os primeiros satélites (Intelsat I até o IV) foram do tipo rotação estabilizada, enquanto a maioria das séries subsequentes foram do tipo estabilizado em três eixos. Originalmente, os satélites operavam com a banda C, sendo que a banda Ku foi agregada ao sistema posteriormente. Cada transponder da banda C tinha, tipicamente, uma largura de banda de 40 MHz, com 12 transponders disponíveis, perfazendo uma largura de banda total de 500 MHz. Os transponder da banda Ku operavam com largura de banda de 80 MHz, ou mais. O Intelsat oferece diversos tipos de serviços, como voz, dados, televisão e formação de redes corporativas, entre outros [2].

A Tabela A4-1 traz uma comparação entre alguns dos satélites Intelsat, considerando sua massa e capacidade de canais telefônicos, onde pode ser

observada a evolução histórica das redes de satélite.

TABELA A4-1 - COMPARAÇÃO ENTRE GERAÇÕES DE SATÉLITES INTELSAT

| | ISI (Earlybird) | ISVA | ISVI | ISVII |
|------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| Lançamento: | 1965 | 1980 | 1989 | 1992 |
| Massa do satélite em órbita (kg): | 38,5 | 900 | 1870 | 1425 |
| Potência (W): | 40 | 1200 | 2200 | 3900 |
| Número de transponders: | 2 | 30 | 48 | 36 |
| Largura de banda total (MHz): | 50 | 2160 | 3030 | 2300 |
| Capacidade de canais telefônicos * | | | | |
| Somente analógicos: | 480 | 3300 | 48000 | 38000 |
| Somente digitais: | - | 180000 | 270000 | 200000 |

* canais semi-duplex

FONTE: [1]

INMARSAT [3]

O Inmarsat foi o primeiro operador global de comunicações móveis. Criado no início dos anos 80 como uma organização inter-governamental focado nas comunicações marítimas, começou suas atividades com cerca de 900 embarcações. Atualmente, suporta enlaces para telefonia, fax e comunicações de dados com taxas de até 64 kbps para mais de 210.000 embarcações, veículos, aeronaves e terminais portáteis.

O sistema Inmarsat opera uma constelação de satélites geoestacionários, compreendendo: 4 satélites Inmarsat-3 (de terceira geração), um quinto satélite Inmarsat-3 (*backup*) e 4 satélites Inmarsat-2 (de segunda geração). Os satélites Inmarsat-2 são estabilizados em três eixos e foram desenhados para uma vida útil de 10 anos. Os satélites Inmarsat-3 têm a capacidade de gerar tanto um feixe global como 7 feixes de sinal. Os feixes de sinal são adequados para concentrar potência

extra em áreas de alta demanda.

Junto com a constelação de satélites, o Inmarsat opera uma rede mundial de estações terrenas. Os satélites são controlados por uma SCC (*satellite control center*). Dados de status dos nove satélites são fornecidos aos SCC por quatro estações TT&C (*tracking, telemetry and control*). Uma chamada oriunda de um terminal móvel segue para o satélite que a roteia para um *gateway* na superfície terrestre, chamado de LES (*land earth station*). Este *gateway*, por sua vez, entrega a chamada para a rede de telefonia pública. Há cerca de 40 LES's em 30 países. Todo o tráfego da rede é monitorado e gerenciado pelo NOC (*network operations center*). O NOC é suportado pelas NCS (*network co-ordination stations*). Uma das funções da NCS é auxiliar no estabelecimento de cada chamada, alocando um canal na LES apropriada. Há uma NCS para cada região oceânica que comunica-se com todas as LES de sua região.

Estão sendo desenvolvidos os satélites de quarta geração que entrarão em produção em 2004. Esses satélites suportarão soluções Internet e Intranet, vídeo sob demanda, videoconferência, fax, e-mail, telefone e acesso LAN com velocidades superiores a 432 kbps. Além disso, operará, também, com o sistema celular de terceira geração (3G). Os satélites serão 100 vezes mais poderosos que a geração atual e fornecerão 10 vezes mais capacidade de comunicação que a atual rede Inmarsat.

EUTELSAT [4]

A Eutelsat gerencia uma infra-estrutura de satélites que oferece serviços de transmissão de TV e radiodifusão, serviços corporativos, acessos de banda larga, telefonia móvel e serviços de posicionamento, entre outros. O fornecimento dos serviços abrange a Europa, África, Sudoeste da Ásia, Norte e Sul das Américas.

O sistema compreende 22 satélites geoestacionários, com diversas famílias. Os satélites membros de cada família tipicamente compartilham uma missão em comum (em geral, para fornecer *broadcasting* de TV e serviços de telecomunicações) e similaridades em seu desenho e construção. O Eutelsat opera satélites em diversas posições orbitais a partir de 15° Oeste, servindo as Américas e a Europa, até 48° Leste, servindo o Meio-Oeste da Europa, a Ásia Central e a Índia. As famílias são: HOT BIRD, constelação de cinco satélites capazes de operar 900 canais analógicos e digitais de TV, com ampla cobertura da Europa e partes da África e Ásia; EUTELSAT II, compostos por cinco satélites tipicamente empregados para a distribuição de televisão e serviços de telecomunicações; série W, satélites de nova geração, com maior potência, maior área de cobertura e flexibilidade para direcionamento de feixes de sinal; SESAT, satélite que comporta 18 transponders e expectativa de 10 anos de vida útil, servindo o Oceano Atlântico e Leste da Rússia; EUROBIRD, que fornece serviços para o Leste e Centro da Europa, com características ideais para fornecimento de programas *broadcast* e serviços multimídia para antenas de pequeno diâmetro.

PANAMSAT [5]

A Panamsat constrói e opera redes para o fornecimento de serviços de informação e entretenimento para sistemas de televisão a cabo, empresas afiliadas de *broadcast* de TV, operadores de TV *direct-to-home*, provedores de Internet, companhias de telecomunicações.

Operando desde 1984, conta hoje com 21 satélites das séries GALAXY e PAS, em órbita geoestacionária e cobrindo as Américas, Europa, África e Ásia, rede conta, por exemplo, com cerca de 125.000 estações VSAT operando com voz, dados e vídeo, cerca de 530 canais de programação DTH para as Américas,

Austrália, África do Sul e Taiwan. Com dois novos satélites a serem lançados, a capacidade da rede deve elevar-se para mais de 900 transponders.

REFERÊNCIAS:

[1] LILLY, C. J. **Intelsat's new generation**. IEE Review, Mar. 1990.

[2] **Satellite Communciations - A Continuing Revolution**. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Jubilee Issue, Oct. 2000.

[3] <http://www.inmarsat.com>. Acesso em 03.09.01

[4] <http://www.eutelsat.com>. Acesso em 03.09.01

[5] <http://www.panamsat.com>. Acesso em 04.09.01

**ANEXO 3 - DADOS SOBRE SATÉLITES DE COMUNICAÇÃO
GEOESTACIONÁRIOS**

ANEXO 3 - DADOS SOBRE SATÉLITES DE COMUNICAÇÃO GEOESTACIONÁRIOS

FIGURA A5-1 - NÚMERO DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS DE COMUNICAÇÃO
(TOTAL: 222 SATÉLITES) *

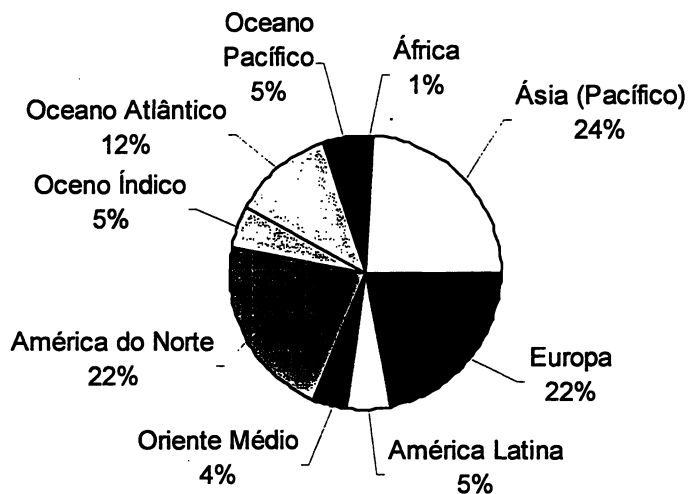
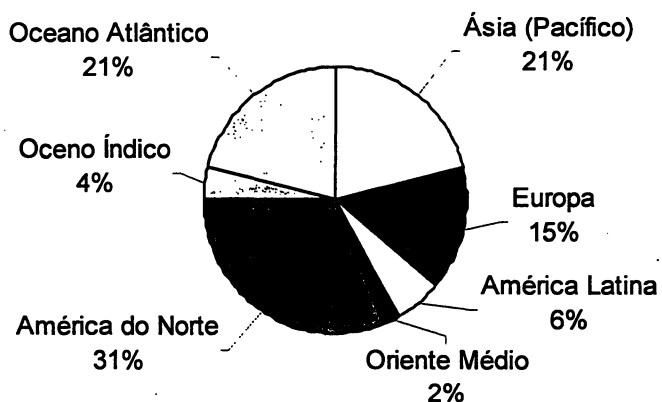


FIGURA A5-2 - QUANTIDADE PROGRAMADA DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS DE
COMUNICAÇÃO POR REGIÃO (TOTAL: 22 SATÉLITES) *



NOTAS:

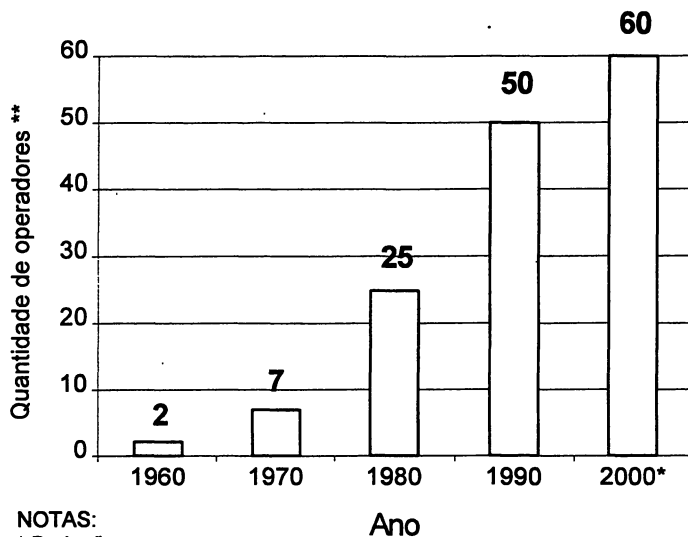
* Dados de Março 2000,

Não incluem dados da Rússia e China

Satélites transoceânicos fornecem tanto cobertura doméstica
como regional

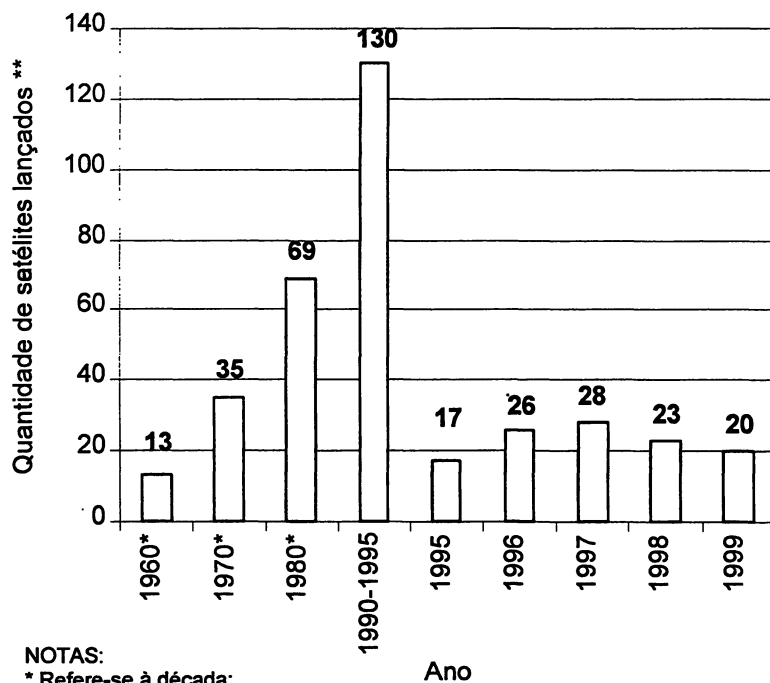
Fonte: Via Satellite

FIGURA A5-3 - NÚMERO DE OPERADORES DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS DE COMUNICAÇÃO



NOTAS:
 * Projeção
 ** Dados de 1997
 Fonte: Via Satellite

FIGURA A5-4 - NÚMERO DE LANÇAMENTOS DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS DE COMUNICAÇÃO



NOTAS:
 * Refere-se à década;
 ** Inclui os lançamentos sem sucesso.
 Exclui os lançamentos da Rússia e China.
 Dados de Março 2000.
 Fonte: Via Satellite

REFERÊNCIA:

VIA SATELLITE. <http://www.satellitetoday.com/viaonline/survey/index.html>. Acesso em 04.09.01

PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS

O conteúdo da seção 2.2 referente aos Métodos de Transmissão e Múltiplo Acesso do presente trabalho deu origem a um artigo que foi submetido e aceito para publicação na Revista Telecomunicações editada pelo Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí (MG) – INATEL.