

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE DE INTERFERÊNCIA ENTRE SATÉLITES
GEO-ESTACIONÁRIOS**

Autor: _____
Lucas Rodrigues Raposo da Camara

Orientador: _____
Ricardo Rhomberg Martins

Examinador: _____
Gelson Vieira Mendonça

Examinador: _____
Mauros Campello Queiroz

DEL
Novembro de 2006

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que sempre esteve me iluminando no decorrer de todo o meu curso.

Aos meus pais e familiares que sempre me deram força e incentivo para estudar e correr atrás dos meus sonhos.

Aos professores e mestres que me passaram o conhecimento necessário para essa árdua caminhada na engenharia eletrônica.

Aos amigos que fiz na Embratel que me ajudaram com materiais e tirando dúvidas para a realização desse projeto final.

PALAVRAS – CHAVE

- **Satélite**
- **Geo-Estacionário**
- **Interferência**
- **Cálculo de Enlace**
- **Antena**

ÍNDICE

Glossário.....	9
Capítulo 1 - Introdução	10
Capítulo 2 - História da Comunicação Via Satélite	12
2.1 O Surgimento do Satélite	12
2.2 Sistema INTELSAT	13
2.3 O Brasil na Era das Comunicações Via Satélite	14
2.3.1 A 1ª Geração de Satélites Brasileiros de Comunicações	14
2.3.2 A 2ª Geração de Satélites Brasileiros de Comunicações.....	15
Capítulo 3 – Satélites	17
3.1 Comunicações em Órbitas LEO e MEO	17
3.2 Objeções à Órbita geo-estacionária	17
3.3 Satélites em Órbitas geo-estacionária	19
3.3.1 Vida Útil de um Satélite	
GEO.....	20
3.3.2 Faixas de Frequências de	
Operação.....	21
3.3.3 Capacidade do Satélite	21
3.3.4 Otimização do Espectro de Frequência	23
3.3.4.1 Polarização	23
3.3.4.2 Frequência.....	25
3.3.4.3 Cobertura.....	25
3.4 Uma Visão Comparativa entre os satélites de Órbitas LEO, MEO e GEO.....	26
Capítulo 4 - Antenas.....	27
4.1 Características das Antenas	28
4.1.1 Intensidade de Irradiação	28
4.1.2 Antena Isotrópica	28
4.1.3 Diagrama de	
Irradiação	29
4.1.4 Largura do Feixe	30
4.1.5 Diretividade.....	31
4.1.6 Ganho da Antena.....	32
4.1.7 Tamanho da	
Antena.....	35
4.1.8 Área Efetiva de uma Antena.....	35
4.1.9 Relação Frente-Costa	
(RFC)	36
4.1.10 Atenuação do Lóbulo Lateral	37
4.1.11	
Polarização	37
4.1.12 Largura de	
Banda	37
4.2 Tipos de Antenas Parabólicas.....	38
4.2.1 Parabólica de Foco Principal (Focal Point).....	38
4.2.2 Antena Tipo Foco Deslocado (Off.Set)	39
4.2.3 Antena Tipo Cassegrain	40
4.2.4 Antena Tipo	
Gregoriana	42
Capítulo 5 – Estação Terrena	44

5.1 Escolha da Localização.....	44
5.2 Configuração de uma Estação Terrena.....	44
5.2.1 Sistema de Antena.....	44
5.2.2 Sistema de Comunicações.....	44
5.2.3 Sistema de Energia.....	45
5.3 Sistemas de Transmissão e Recepção.....	45
5.3.1 <i>Sistema de Transmissão</i>	45
5.3.2 <i>Sistema de Recepção</i>	46
Capítulo 6 - Noções de Cálculo de Enlace.....	48
6.1 Parâmetros de Maior Impacto no Cálculo de Enlace	48
6.1.1	
<i>C/N</i>	48
6.1.2 <i>EIRP (Effective Isotropic Radiation Power)</i>	48
6.1.3 <i>Ruído Térmico</i>	48
6.1.4 <i>G/T (Figura de Mérito da Antena)</i>	49
6.1.5 <i>Ruído de Intermodulação</i>	50
6.1.6 <i>Ruído de Interferências</i>	51
6.1.6.1 <i>Ruído de Interferência Terrestre</i>	51
6.1.6.2 <i>Ruído de Interferência Espacial</i>	52
6.2 Objetivo do Cálculo de Enlace.....	54
Capítulo 7 - Interferência	56
7.1 Ângulo de Interferência.....	56
7.1.1 <i>Cálculo de ϕ</i>	57
7.1.2 <i>Discriminação de Ganho</i>	58
7.2 Isolamento de Polarização.....	58
7.2.1 <i>Discriminação de Polarização</i>	59
7.3 Cobertura do Satélite.....	59
7.3.1 <i>Densidade de Fluxo de Potência de Saturação</i>	60
7.3.2 <i>Vantagem Geográfica</i>	61
7.3.3 <i>Discriminação de VG</i>	62
7.4 Interferência Espacial.....	62
7.4.1 <i>Considerações para a Determinação do C e do I</i>	65
7.4.2 <i>Interferência Espacial no Enlace de Subida</i>	65
7.4.2.1 - <i>Cálculo de C da Relação C/I de subida</i>	66
7.4.2.2 - <i>Cálculo de I da Relação C/I de subida</i>	66
7.4.2.3 - <i>Cálculo de C/I de subida</i>	68
7.4.3 <i>Interferência Espacial no Enlace de Descida</i>	68
7.4.3.1 <i>Cálculo de C da relação C/I de Descida</i>	69
7.4.3.2 <i>Cálculo de C da relação C/I de Descida</i>	69
7.4.3.3 <i>Cálculo de C da relação C/I de Descida</i>	70
7.4.4 <i>Cálculo do C/I Total</i>	70
Capítulo 8 – Apresentação da Planilha para Cálculo de Coordenação Espacial....	72
Capítulo 9 – Casos Hipotéticos.....	76
9.1 Caso 1 - Satélite BRASILSAT B1 x Satélite HIPO 1.....	76

9.1.1 Solução 1 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 1)	77
9.1.2 Solução 2 – Alteração da Vantagem Geográfica	78
9.1.3 Solução 3 – Alteração da Posição Orbital.....	79
9.2 Caso 2 - Satélite PanamSat 1R x Satélite HIPO 2.....	81
9.2.1 Solução 1 – Troca do Tipo de Polarização	82
9.2.2 Solução 2 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 2)	83
9.2.3 Solução 3 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 2)	84
9.2.4 Solução 4 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 2)	86
Capítulo 10 - Conclusão.....	88
Capítulo 11 – Bibliografia	89
ANEXO A – Planilhas Auxiliares	90
ANEXO B – Cálculos Realizados para o Estudo do Primeiro Caso.....	94
ANEXO C – Prova do Número Mínimo de 3 Satélites GEO para Cobertura Global	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Satélite SPUTNIK – Lançado em 1957.....	12
Figura 2: Satélite ECHO I - Lançado em 1960 (Repetidor Passivo - Lua Artificial).....	13
Figura 3: Satélites TELSTAR e RELAY ECHO - Lançados em 1962.....	13
Figura 4: Satélite INTELSAT 8.....	14
Figura 5: Primeira Geração – BRASILSAT A1 e A2.....	15
Figura 6: Segunda Geração – BRASILSAT B1, B2, B3 e B4.....	15
Figura 7: Cinturões de Radiação de Van Allen.....	18
Figura 8: Satélite em Órbita GEO-Estacionária Cobre uma Maior Área.....	19
Figura 9: Áreas de Cobertura dos Satélites BRASILSAT B1 e B2 da EMBRATEL.....	21
Figura 10: Esquemático Ilustrativo dos Transponders de um Satélite.....	22
Figura 11: Onda Eletromagnética Polarizada Verticalmente	24
Figura 12: Orientação do Campo Elétrico nas Polarizações Vertical e Horizontal.....	25
Figura 13: Coberturas geográficas independentes	26
Figura 14: Antena Parabólica	27
Figura 15: Padrões de irradiação.....	28
Figura 16: Diagrama Polar para Refletor Parabólico.....	29
Figura 17: Diagrama de Irradiação de uma Antena de Microondas	30
Figura 18: Largura do Feixe.....	31
Figura 19: Iluminação do Refletor.....	32
Figura 20: Ganhos de Antenas em Freqüências Diferentes	33
Figura 21: Ganho $\times \Phi$	35
Figura 22: Definição da RFC para Antenas de Microondas.....	36
Figura 23: Lóbulos Laterais e Interferências.....	37
Figura 24: Parabólica de Foco Principal	38
Figura 25: Refletor OFF-SET	39
Figura 26: Antena Cassegrain.....	40
Figura 27: Sistema Gregoriano para Estação Terrena de 10 metros de diâmetro	42
Figura 28: Antena Gregoriana	42
Figura 29: Esquemático dos equipamentos de transmissão e recepção.....	47
Figura 30: Não linearidade do ruído de intermodulação.....	50
Figura 31: Distorção Harmônica para injeção de apenas um sinal.....	51
Figura 32: Interferência de Outros Sistemas no Sistema Satélite.	52
Figura 33: Interferência Espacial no Enlace de Subida.	53
Figura 34: Interferência Espacial no Enlace de Descida.....	53
Figura 35: Enlace Satélite Completo.....	54
Figura 36: Relações C/N de um Enlace Satélite.	55
Figura 37: Ângulo Geocêntrico β e Angulo Topocêntrico ϕ	57
Figura 38: Mapa de Cobertura de Descida do Satélite Brasilsat B1.....	60
Figura 39: Mapa com as Vantagens Geográficas	62
Figura 40: Mapa Discriminação de VG.....	63
Figura 41: Interferência Espacial no Enlace de Subida.	64
Figura 42: Interferência Espacial no Enlace de Descida.....	65
Figura 43: Interferência Espacial no Enlace de Subida.	66
Figura 44: Interferência Espacial no Enlace de Descida.....	68
Anexo A - Figura 45: Gráfico das Envoltórias Rx e Tx	93
Anexo C - Figura 46: Representação da Órbita Geoestacionária.....	101
Anexo C - Figura 47: Determinação do Limite de Visibilidade Geométrica a Partir de um Satélite na Órbita GEO Estacionária.....	102
Anexo C - Figura 48: Disposição de Satélites GEO Estacionários para Cobertura Global do Planeta	103

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Satélites que Prestam Serviços no Brasil e suas Posições Orbitais e Transmissões	20
Tabela 2: Plano de frequência para serviços de comunicação via satélite.....	21
Tabela 3: Imperfeições Intrínsecas dos Transponders.....	23
Tabela 4: Bandas x Diâmetro da Antena.....	35
Tabela 5: Características de um Sistema Cassegrain.....	41
Tabela 6: Características de um Sistema Gregoriano	43
Tabela 7: Valores de Isolamento entre Polarizações.	59
Tabela 8: Planilha Coordenação Espacial.....	72
Tabela 9: Coloração das Células da Planilha.....	73
Tabela 10: Planilha de Coordenação Espacial - Brasilsat B1 x HIPO 1.....	76
Tabela 11: Planilha da Primeira Solução - Brasilsat B1 x HIPO 1.....	77
Tabela 12: Planilha da Segunda Solução - Brasilsat B1 x HIPO 1.....	78
Tabela 13: Planilha da Terceira Solução - Brasilsat B1 x HIPO 1.....	80
Tabela 14: Planilha de Coordenação Espacial – Panamsat 1R x HIPO 2.....	81
Tabela 15: Planilha da Primeira Solução - Panamsat 1R x HIPO 2.....	82
Tabela 16: Planilha da Segunda Solução - Panamsat 1R x HIPO 2.....	84
Tabela 17: Planilha da Terceira Solução - Panamsat 1R x HIPO 2.....	85
Tabela 18: Planilha da Quarta Solução - Panamsat 1R x HIPO 2.....	86
Anexo A – Tabela 19: Planilhas Rx e Tx.....	91
Anexo A – Tabela 20: Grupo de Valores das Planilhas Rx e Tx.....	92
Anexo A – Tabela 21: Planilha Discriminação de Polarização.....	93

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1: Intensidade de Irradiação da Antena Isotrópica	28
Equação 2: Largura do Feixe	30
Equação 3: Diretividade.....	31
Equação 4: Diretividade em dBi.....	31
Equação 5: Ganho em Relação à Antena Isotrópica	32
Equação 6: Ganho/m ²	32
Equação 7: Ganho em dB	33
Equação 8: Ganho em dBi	33
Equação 9: Ganho em relação a D/λ e ϕ	34
Equação 10: Área Efetiva	36
Equação 11: Relação Frente-Costa	36
Equação 12: Relação Frente-Costa em dB	36
Equação 13: Largura de Banda na Forma Percentual.....	38
Equação 14: Largura de Banda pelo Relacionamento de Frequências	38
Equação 15: EIRP	48
Equação 16: Relação G/T.....	49
Equação 17: C/N.....	55
Equação 18: Flecha a partir do Ângulo β	57
Equação 19: Flecha a partir do Ângulo ϕ	57
Equação 20: Cosseno ϕ	57
Equação 21: Fator Multiplicativo para obtenção de ϕ através de β	58
Equação 22: Relação de	58
Equação 23: Discriminação de Ganho.....	58
Equação 24: Fluxo de Potência.....	60
Equação 25: Área Efetiva em Relação ao Ganho.	61
Equação 26: Ganho por m ²	61
Equação 27: Potência na Entrada da Antena do Satélite.....	61
Equação 28: Critério C/I.....	64
Equação 29: EIRP da Estação B1	66
Equação 30: C da relação C/I de Subida	66
Equação 31: ϕ em relação a β	66
Equação 32: Discriminação do Ganho na Subida.....	67
Equação 33: Discriminação da VG de Subida	67
Equação 34: EIRP da Estação A1	67
Equação 35: I da relação C/I de Subida	67
Equação 36: C/I de Subida	68
Equação 37: C da Relação de C/I de Descida.....	69
Equação 38: Discriminação da VG de Descida.....	69
Equação 39: ϕ em relação a β	69
Equação 40: Discriminação do Ganho na Descida	69
Equação 41: EIRP do Satélite A.....	70
Equação 42: I da Relação C/I de Descida.....	70
Equação 43: C/I de Subida	70
Equação 44: C/I Total	71

GLOSSÁRIO

EMBRATEL	Empresa Brasileira de Telecomunicações. Faixa de frequência que varia de 3400 a 7075 MHz.
Banda C.	É utilizada para os serviços: telefonia fixa, transmissão de dados, voz e vídeo. Nesta faixa operam os satélites BRASILSAT.
Banda Ka	Faixa de frequência que varia de 18100 a 31000 MHz. É utilizada para os serviços: telefonia fixa e móvel e na radiodifusão.
Banda Ku	Faixa de frequência que varia de 10700 a 18100. É utilizada para os serviços: telefonia fixa e na radiodifusão.
CCSE	Centro de Controle do Segmento Espacial.
ETN	Estação Terrena
Feedhorn	Alimentador tipo corneta. Organização internacional que possui uma rede vasta de satélites de comunicações, neste comitê a EMBRATEL representa o Brasil.
INTELSAT	Baixa Órbita. São aquelas em que os satélites têm altitude entre 500 e 3000 km.
LEO	A velocidade média de um satélite LEO está em torno de 25000km/h, fazendo uma volta completa em torno da Terra em cerca de 90 a 100 minutos.
MEO	Média Órbita. Os satélites estão entre 13000 e 20000 km de altitude.
SBTS	Sistema Brasileiro de Telecomunicações Via Satélite.
UIT	União Internacional de Telecomunicações, órgão que rege os serviços de telecomunicações no mundo.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desenvolver e evoluir são necessidades básicas do ser humanos, por isso cada vez mais os usuários clamam por ampliação e integração das comunicações, bem como por qualidade e até certo ponto, por versatilidade dos serviços.

Hoje em dia, no mercado de telecomunicações, existem muitas tecnologias disponíveis para os meios de telecomunicações. Poderia citar como exemplo, as linhas terrestres, fibras óticas, satélites, e outras mais, cada qual com uma lista de vantagens e desvantagens, quanto a sua aplicação específica, tornando-se necessária uma análise com critérios quanto à escolha de qualquer uma delas.

Embora os meios físicos (cabos e fibras) apresentem um custo de infra-estrutura mais baixo, têm a desvantagem da baixa confiabilidade e disponibilidade, uma vez que sua constituição física permite rupturas. Aliado a este fato, tem-se ainda o alto tempo de reparo que é o fator decisivo que configura ao sistema físico a sua baixa disponibilidade.

Estes problemas fazem com que a telecomunicação via satélite se torne mais atraente, com alta confiabilidade e disponibilidade, no entanto, oferece um custo de infraestrutura muito mais elevado.

Sendo assim, com o nascimento dos satélites geo-estacionários consolidou a tecnologia que saiu do experimental para o comercial, solucionando alguns velhos problemas da comunicação a longas distâncias.

Os satélites geo-estacionários para ficarem parados em relação a um ponto da superfície terrestre teriam que se localizar em uma órbita circular, com altitude de 36000 km e coincidente com a Linha do Equador. Cada satélite teria que possuir uma posição orbital para evitar que a cobertura de um interferisse na do outro. Porém, o compartilhamento de uma posição orbital era possível, caso os satélites operassem em faixas de frequência diferentes ou ainda cobrissem regiões muito afastadas uma das outras.

Estas restrições não traziam grandes problemas, pois no início poucas eram as organizações que se interessavam pela tecnologia, porém à medida que o tempo passou este cenário foi mudando, e atualmente a órbita geo-estacionária está congestionada.

Com isso, os estudos de interferência espacial entre satélites conhecidos como estudos de coordenação espacial se tornaram indispensáveis para ativação de novos satélites. Nos dias de hoje, a especificação/projeto de um satélite GEO é totalmente baseada na definição da sua posição orbital e no estudo de coordenação espacial com os satélites mais próximos de sua futura posição orbital.

Outro item de extrema importância nas comunicações via satélite é que praticamente não há limites e barreiras geográficas. Os satélites podem cobrir uma vasta área com uma pequena porcentagem de perda comparado com os meios de comunicações físico. Além disso, um único satélite pode cobrir duas regiões diferentes, utilizando uma otimização como a utilização de duas bandas diferentes (Exemplo: banda Ku e C ao mesmo tempo).

Certas redes, como as de bancos, onde há diversas agências espalhadas por toda parte, é complicado atender a todas satisfatoriamente por terra, a um custo baixo. Muitos lugares do interior do país não possuem infraestrutura adequada sendo assim a comunicação via satélite é uma solução perfeita para esses lugares.

Com a comunicação via satélite não há barreiras, basta a região ser abrangida pelo satélite que a comunicação pode ser estabelecida, seja voz, dados, TV, etc.

A evolução dessa tecnologia vem criando novos horizontes e melhorias em toda a telecomunicação mundial, trazendo mais conforto e mais dinâmica nas redes de telecomunicações.

Este é um projeto de coordenação espacial e interferência entre satélites. Nele são apresentados alguns tópicos que descrevem algumas peculiaridades importantes das comunicações via satélite.

No final é apresentada uma planilha desenvolvida a fim de que os cálculos de enlaces e suas interferências possam ser explicadas de forma objetiva. Essa planilha foi desenvolvida em Excel.

O projeto começa apresentando um breve histórico das comunicações via satélite, onde são mostrados os primeiros satélites lançados e o porquê de ter sido desenvolvida a nova tecnologia de satélites geo-estacionários.

Também são abordadas as características dos Satélites geo-estacionários, com suas vantagens e suas desvantagens e comparações entre outros tipos de satélites.

Depois são mostrados os vários tipos de antenas parabólicas e uma explicação sobre as várias características destas antenas e das estações terrenas, onde estão localizadas as antenas.

Um visão sobre o que é Cálculo de Enlace é mostrada, é verificado que um enlace completo de comunicação via satélite possui três componentes (enlace de subida, enlace de descida e intermodulação dentro do satélite) e seus problemas, além, é claro, das fórmulas e os cálculos que foram usados no projeto.

No final do projeto são feitos casos hipotéticos de interferência entre satélites, e possíveis soluções são apresentadas para esses casos.

CAPÍTULO 2 - HISTÓRIA DA COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE

2.1 - O SURGIMENTO DO SATÉLITE

Em 1945, o escritor Arthur C. Clarke (“2001 – Uma odisséia no espaço”), propôs pela primeira vez o uso de satélites artificiais como estações repetidoras de telecomunicações, num artigo para a revista *Wireless World*. No ano seguinte, 1946, a Força Aérea dos Estados Unidos financiavam a realização de estudos sobre a viabilidade de sistemas de comunicações por satélites.

Assim, substituía-se uma ligação com muitos saltos por uma ligação com apenas dois: o percurso ascendente, entre o transmissor e o satélite, e o percurso descendente, entre o satélite e a estação receptora na terra.

Embora não artificial, o primeiro corpo espacial a ser utilizado para comunicações foi a Lua. Ainda em 1946 eram feitas as primeiras experiências no Projeto Diana, recebendo-se sinais refletidos pela Lua, utilizando-se as técnicas de radar desenvolvidas durante a II Guerra Mundial. Tal sistema, apesar de ser importante do ponto de vista científico, não mereceu maior desenvolvimento, pois exigia equipamentos extremamente potentes e complexos, permitia pequena capacidade de comunicação, além do que apresentava disponibilidade restrita (12 horas por dia), durante o mês, e um tempo de retardo exagerado (mais de 2 segundos, devido à distância da Lua de 388000 km).

A primeira transmissão utilizando-se um satélite artificial foi realizada com o SPUTNIK 1 (Fig.1), lançado em 4 de outubro de 1957 de Tyuratn, na Rússia, para transmitir sinais de telemetria durante 21 dias para uma estação na Terra. Em janeiro de 1958 era lançado o EXPLORER I, que transmitiu até maio do mesmo ano informações de telemetria sobre o efeito das condições ambientais em órbita em seus próprios subsistemas. Em dezembro de 1958 era então lançado o satélite SCORE, que transmitiu em VHF sinais de voz gravados em fitas magnéticas. Até então os primeiros satélites estavam sendo utilizados para transmissão unidirecionais, no sentido espaço-Terra apenas.



Figura 1: Satélite SPUTNIK - Lançado em 1957

Lançado da Terra e inflado no espaço o satélite ECHO I (1960) foi o primeiro satélite artificial utilizado sob a forma de repetidor e consistia tão somente de uma esfera com superfície metalizada, de 30m de diâmetro. Sua órbita era circular com a altitude de aproximadamente 1600 km. O ECHO I (Fig. 2) foi utilizado para transmitir sinais de telefonia, em FM, mas faixas de 1 e 2,5 GHz.



Figura 2: Satélite ECHO 1 - Lançado em 1960 (Repetidor Passivo - Lua Artificial)

Com a conquista da tecnologia, o homem criou satélites artificiais, capazes de não apenas refletirem uma portadora qualquer, mas amplificar seus níveis para possibilitar o sucesso de sua transmissão. Lançado pelos EUA numa órbita elíptica, em 1960, o satélite COURRIER, equipado com um repetidor ativo, na faixa e frequência de 2 GHz, permitiu comunicações entre New Jersey e Porto Rico durante somente 17 dias, mas serviu para comprovar a viabilidade de uma estação repetidora no espaço.

As experiências com satélites repetidores ativos em tempo real foram se desenvolvendo com o lançamento do TELSTAR (1962 -AT&T), do RELAY (1962 – RCA e NASA) (Fig.3) e diversos outros artefatos experimentais.

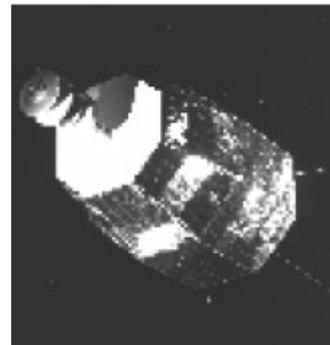


Figura 3: Satélites TELSTAR e RELAY ECHO - Lançados em 1962

Em 1963, com o lançamento de dois satélites SYNCOM, colocados em órbita geo-síncrona (Hughes/NASA), iniciou-se o desenvolvimento do sistema de satélites estacionários. O SYNCOM possuía um repetidor de 2W e equilibrava-se no espaço com o uso de jatos de nitrogênio comprimido, disparados da Terra por telecomando. Derivado do Syncom, porém mais potente e com mais capacidade, o EARLY BIRD, também chamado de INTELSAT I, lançado em 1965, consolidou a técnica de satélites geo-estacionários, passando a operar comercialmente entre várias nações; utilizando um sistema de estabilização por giro, por jatos comprimidos comandados da Terra, o INTELSAT I foi colocado no espaço por um foguete de três estágios e prometia uma vida útil de 18 meses, tendo operado quase o dobro deste prazo.

Estava inaugurada a moderna era das comunicações via satélite. Daí em diante, apenas aperfeiçoamentos técnicos surgiram, tornando mais poderosos e de maior capacidade o lançador dos satélites.

2.2 - SISTEMA INTELSAT

Em julho de 1964, de acordo com a Resolução 1721(XVI) a Assembléia Geral das Nações Unidas, governos e entidades de telecomunicações, representando 85% do

tráfego mundial de telecomunicações, se reuniram em Washington para estabelecer acordos que resultariam na criação do sistema INTELSAT (Fig.4).

O primeiro objetivo do INTELSAT era prover comercialmente facilidade de segmento espacial requeridas para os serviços públicos de telecomunicações internacionais de alta qualidade e confiabilidade, que devem estar disponíveis de maneira não discriminatória para todas as partes do mundo.

Cada membro do INTELSAT mantém uma quota de investimento baseada, em geral, na sua utilização do sistema. As receitas do sistema são consequência de tarifas de utilização e depois da dedução dos custos operacionais, são distribuídas aos membros na proporção de sua quota de investimento.



Figura 4 – Satélite INTELSAT 8

O sistema INTELSAT se tornou o principal meio que os países encontraram para fazer parte da comunicação via satélite, inclusive o Brasil faz parte desse sistema.

2.3 - O BRASIL NA ERA DAS COMUNICAÇÕES VIA SATÉLITE

Em janeiro de 1963, o Brasil tornava-se o quinto país do mundo a se comunicar via satélite. Através de uma estação rastreadora aerotransportável (antena de 9m), instalada em Jacarepaguá (Rio de Janeiro) e apontada para o satélite experimental RELAY I, foram feitas ligações experimentais com os EUA ouvidas claramente, na Inglaterra, França e Itália.

Em 1965, o Brasil se filiava ao INTELSAT e em fevereiro de 1969 colocava em operação sua primeira Estação Terrena para comunicações internacionais via satélites (Tanguá I).

Em 1974, a EMBRATEL deu início a implementação do SBTS, através de um satélite INTELSAT para uso doméstico, atendendo a regiões de difícil acesso às comunicações por terra (Manaus, Cuiabá, Porto Velho, Rio Branco, etc.). Em 1982, foi autorizada pelo Ministério das Comunicações a contratar, instalar e operar um satélite próprio, para o SBTS.

2.3.1 - A 1ª Geração de Satélites Brasileiros de Comunicações

Para isso, a EMBRATEL encomendou em 1982 dois satélites - BRASILSAT A1 e A2 (Fig.5) - e equipamentos para montar o CCSE que dá suporte e controla os satélites do sistema, localizado em Guaratiba, Rio de Janeiro.

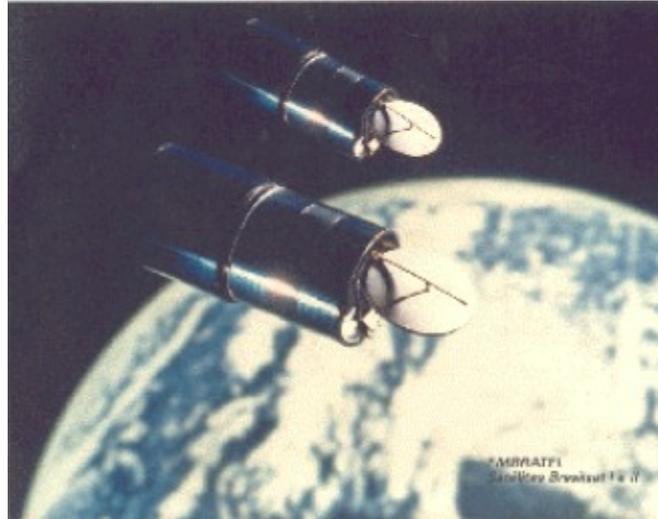


Figura 5: Primeira Geração – BRASILSAT A1 e A2

Apesar de serem projetados para terem uma vida útil de oito anos, os satélites BRASILSAT A1 e A2 tiveram suas vidas estendidas, graças a uma operação eficiente por parte da EMBRATEL, desde a sua colocação em órbita, em fevereiro de 1985 e em março de 1986, respectivamente. Assim é, que atualmente, o satélite BRASILSAT A1 ainda presta serviços a uma empresa americana, sob o regime de 'leasing', enquanto o BRASILSAT A2 serve à própria EMBRATEL. Para economizar o combustível restante, ambos os satélites operam numa condição especial denominada 'Órbita Inclinada'.

2.3.2 - A 2ª Geração de Satélites Brasileiros de Comunicações

Em 1990 a EMBRATEL contratou o fornecimento e o lançamento dos dois satélites de comunicações, denominados BRASILSAT B1 e B2 (Fig.6), que representam a segunda geração do SBTS, e dos equipamentos adicionais para as estações de controle.

Estes satélites foram lançados em agosto de 1994 e em março de 1995, respectivamente.



Figura 6: Segunda Geração – BRASILSAT B1, B2, B3 e B4

Para atender à demanda sempre crescente, principalmente no que diz respeito aos sinais de vídeo. A EMBRATEL contratou, em dezembro de 1995, o fornecimento e lançamento de mais um satélite para a segunda geração; Denominado BRASILSAT B3, que foi lançado com sucesso em 04/03/1998. Porém, os investimentos não pararam e em 17/08/2000 foi lançado o BRASILSAT B4, sendo o último satélite até então da série BRASILSAT.

Os novos satélites BRASILSAT B1, B2, B3 e B4 têm dado continuidade, de forma ampliada, à cobertura nacional de todos os serviços iniciados através dos satélites BRASILSAT A1 e A2. Além disso, o SBTS passou a ter condições de atender países do MERCOSUL, graças a maior abrangência de cobertura do satélite BRASILSAT B2.

CAPÍTULO 3 - SATÉLITES

3.1 - COMUNICAÇÕES EM ÓRBITAS LEO E MEO

Órbitas LEO (Low Elliptical Orbit) são aquelas em que os satélites viajam à uma altitude entre 500 e 3000 km, aproximadamente. Órbitas MEO (Medium Elliptical Orbit) estão entre 13000 e 20000 km de altitude. Como estas órbitas estão muito próximas à Terra, o satélite tem que viajar a uma velocidade angular maior que o do planeta, pois caso contrário, a força de gravidade o puxará para o solo, destruindo-o.

A velocidade média de um satélite LEO está em torno de 25000km/h, fazendo uma volta completa em torno da Terra em cerca de 90 a 100 minutos. As órbitas podem ser tanto circulares como elípticas, dependendo da necessidade do projeto a ser executado, pois as órbitas elípticas fazem com que o satélite passe mais tempo sobre uma determinada região, facilitando e ampliando o tempo de comunicação entre o satélite e a estação terrestre.

Os satélites LEO e MEO utilizam estas órbitas pois elas estão mais próximas à Terra, fazendo com que os equipamentos utilizados possam ser menores, até portáteis, já que não necessitam de muita potência para transmissão. Os satélites geo-estacionários estão muito longe, exigindo equipamentos terrestres com elevada potência para transmissão e antenas parabólicas para a recepção dos sinais que chegam muito debilitados do satélite.

Um dos aspectos mais interessantes dos estudos envolvendo comunicações por satélites móveis é o crescimento no interesse por órbitas não geo-estacionárias. No início dos anos 60, houve debates à cerca dos méritos das órbitas geo-estacionárias (GEO) versus as órbitas baixas (LEO) e médias (MEO). A conveniência do GEO teve contra si a dificuldade prática de seu concebimento e as vantagens técnicas do LEO, tais como menor tempo de atraso e ângulos de elevação maiores. Os primeiros satélites experimentais foram todos colocados em baixa órbita e foram utilizados somente para gravar e retransmitir dados.

Embora tenha sido manifestado a preferência pelo sistema geo-estacionário, sugeriu-se em 1964 que os sistemas LEO e MEO fossem escolhidos para pequenas distâncias. Apesar de ser requerido um conjunto de satélites ao invés de um único que faz a cobertura de todo o hemisfério, a perda de um satélite causa apenas a degradação gradual do sistema, e não uma falha geral.

3.2 - OBJEÇÕES À ÓRBITA GEO-ESTACIONÁRIA

O sucesso das comunicações via satélite utilizando órbita geo-estacionária não fez esquecer todas as objeções, e nem eliminou as vantagens de outras órbitas.

Uma objeção significativa ao GEO é o tempo de propagação grande, inevitável por causa da grande distância e da velocidade finita da luz. A altitude de uma órbita geo-estacionária é de 35786 km. Então tempo de propagação em um único sentido, tanto no up-link como no down-link esta entre 240 e 270 ms.

Em uma conexão internacional típica, o tempo de atraso de todo caminho está em cerca de 0,6 s. Este efeito em uma comunicação utilizando voz pode não ser percebido, como também pode ser agravado por ecos existentes nos fins de linha, tornando a conversação quase impossível. Os ecos são controlados utilizando os circuitos modernos para cancelamento de ecos, mas a utilização de tais circuitos está longe de ser universal. Para transmissão digital de dados, este atraso inibe a utilização

de protocolos de correção de erros que requerem a detecção de erro e a retransmissão do pacote com erros. O atraso para órbitas de baixas e médias altitudes é muito menor e os efeitos são facilmente acomodados ou, até mesmo, desprezíveis.

A segunda objeção fundamental ao GEO é a ausência de cobertura em latitudes mais ao norte e mais ao sul. Para uma latitude maior que 81° , um satélite geo-estacionário fica abaixo do horizonte, mesmo que para uma mesma longitude. Em virtude de anomalias em propagações perto do horizonte, mesmo estações fixas com grandes antenas freqüentemente possuem dificuldade em trabalhar com ângulos menores que 5° . O limite prático de trabalho foi estabelecido em cerca de 75° . Um efeito mais sério ainda é o bloqueio causado pelos obstáculos formados pelas grandes construções nas áreas urbanas. A teoria e a experiência sugerem que ângulos de elevação maiores de 40° sejam utilizados para um serviço consistente. Estes ângulos são simplesmente inalcançáveis pelas órbitas geo-estacionárias, mesmo em latitudes muito próximas ao equador. Grande parte das Capitais da Europa, incluindo Paris, Londres, Berlin, Varsóvia e Moscou, estão ao norte desta latitude. Por outro lado, altos ângulos de elevação são facilmente alcançados com a utilização de um conjunto de satélites em órbita LEO. As necessidades do menor atraso possível durante a propagação e altos ângulos de elevação, e as restrições do projeto do foguete tal como o tamanho da antena, levam à escolha das órbitas LEO e MEO para comunicações via satélites móveis na maioria dos sistemas propostos. Entretanto, as alturas das órbitas não podem ser escolhidas livremente em virtude da existência dos Cinturões de radiação de Van Allen como mostrados na figura 7.

Existem dois cinturões, centrados no eixo geomagnético da Terra, em altitudes que vão de 1500 a 5000 km e de 13 a 20000 km. Os sistemas IRIDUM, por exemplo, estão em órbitas LEO abaixo do 1500 km enquanto que ODISSEY está em uma órbita MEO entre o primeiro e o segundo cinto de radiação.

Os Cinturões de Van Allen estão em uma região onde ocorrem vários fenômenos atmosféricos devido a concentrações de partículas no campo magnético terrestre e contém partículas eletricamente carregadas de origem tanto atmosférica quanto solar, o que impede a localização de satélites nessas áreas.

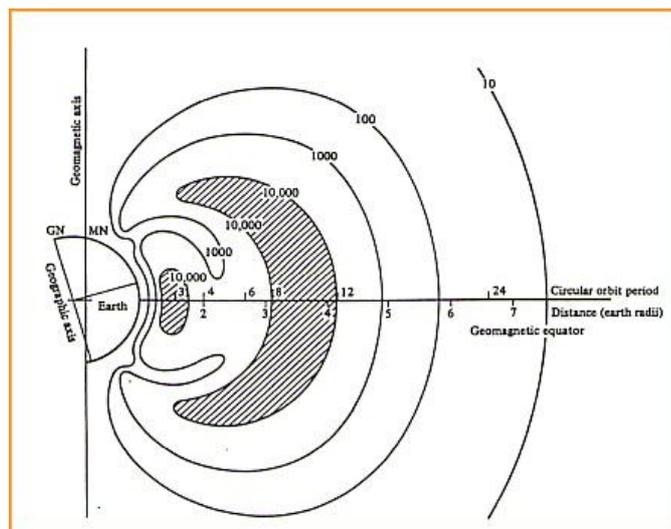


Figura 7 – Cinturões de Radiação de Van Allen

3.3 - SATÉLITES EM ÓRBITA GEO-ESTACIONÁRIA (GEO)

O estudo desse projeto é todo baseado em satélite em órbita geo-estacionária, por isso esse assunto será mais aprofundado que os satélites LEO e MEO.

A solidificação da tecnologia de satélites artificiais foi um fato marcante, mas todos os satélites operavam nas órbitas LEO ou MEO, o que impossibilitava transmissões de voz e dados em alta velocidade, limitados pela tecnologia da época.

Os satélites nestas órbitas não conseguem cobrir uma grande área, devido a sua localização muito próxima da Terra. Portanto, foi necessário fazer com que o satélite operasse em uma órbita mais distante, podendo assim “cobrir” toda a face visível do globo.

Além disso, os satélites não cobriam aquela mesma área por todo o período de 24 horas (Fig.8), pois giravam mais rápido que o movimento de rotação da Terra, demandando a utilização de antenas diretivas e com sistema de rastreamento muito eficientes, o que inviabilizava a tecnologia para uso comercial.

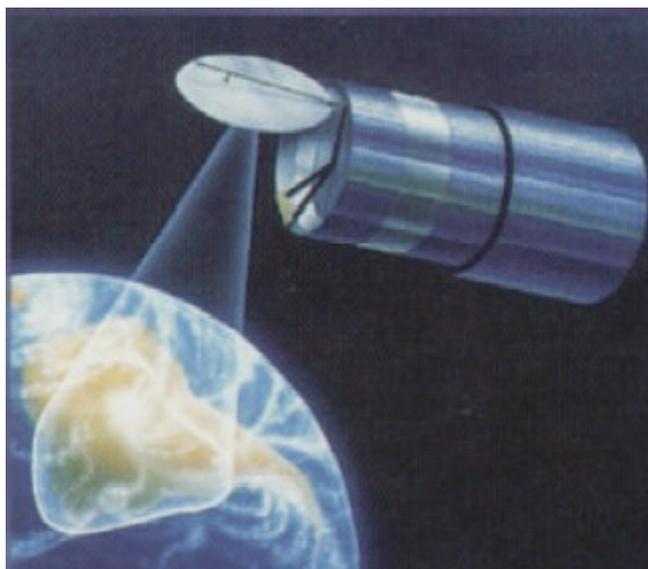


Figura 8: Satélite em Órbita GEO-Estacionária Cobre uma Maior Área

A solução foi fazer com que o satélite girasse na mesma velocidade angular que a Terra, de forma que ele completasse um ciclo de rotação no período de 24 horas. Desta forma, o satélite ficaria parado em relação aquela área que ele cobriria, e se movimentaria em uma órbita circular para garantir a mesma altitude todo o instante. Toda órbita com essas características é classificada como geo-estacionária.

Para que o satélite, na órbita geo-estacionária, entre em equilíbrio é necessário que se localize a uma altitude tal que: a força da gravidade se anule com a força centrífuga que é resultante do movimento circular. Como a velocidade angular do satélite deve ser constante, a altitude necessária para o satélite entrar em equilíbrio está em torno de 36000 km. Além disto, a órbita geo-estacionária fica coincidente com a linha do Equador, devido a força gravitacional que sempre empurra o satélite para a região do Equador.

A conclusão é que, todo satélite na órbita geo-estacionária deve completar um ciclo de rotação em torno da Terra no período de 24 horas, estar a uma altitude de aproximadamente 36000 km e girar em uma órbita coincidente com a linha do Equador. Isso significa que um satélite GEO ocupa uma posição orbital fixa determinada pela longitude, uma vez que a latitude na linha do Equador é zero.

Entre todos os satélites geo-estacionários, os mais populares aqui no Brasil são colocados na Tabela 1.

Tabela 1: Satélites que Prestam Serviços no Brasil e suas Posições Orbitais e Transmissões

Satélites Geo-Estacionários	Posições Orbitais	Transmissões mais conhecidas
BRASILSAT B1	70° W	Responsável pela retransmissão de canais convencionais de TV como a Globo, Bandeirantes e SBT.
Panamsat 6B	43° W	Responsável pela retransmissão dos canais da SKYNET, TV por assinatura.
Galaxy III R	95° W	Responsável pela retransmissão dos canais da DirectTV, TV por assinatura.

Com isso as transmissões via satélite GEO consolidaram a tecnologia, saindo do campo experimental para o comercial.

Devido a enorme distância, que também é responsável pelo retardo na repetição do sinal (cerca de 500 ms), foi necessário desenvolver antenas mais eficientes, como as antenas parabólicas. Apesar da alta velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (velocidade da luz), não é possível vencer uma distância de 72000 km (ida e volta) sem que haja qualquer atraso no sinal.

3.3.1 – Vida Útil de um Satélite GEO

Os satélites posicionados na órbita geo-estacionária não estão exatamente parados em relação à Terra. Eles descrevem um movimento cíclico e incremental, ou seja, aumento do deslocamento com o decorrer do tempo, que observado da Terra descreve uma trajetória semelhante ao algarismo oito em itálico – δ , que deve-se ao fato do satélite estar exposto basicamente às forças gravitacionais da Lua e do Sol.

As antenas parabólicas possuem uma folga de apontamento permitindo ao satélite oscilar um pouco. Mas quando esta oscilação toma amplitudes maiores, a comunicação é interrompida.

Para não haver perda da comunicação com as antenas, as operadoras realizam semanalmente correções do satélite na sua posição orbital, onde são acionados pequenos foguetes telecomandados a bordo, que consomem combustível e quando este acaba, não há mais como corrigir a posição do satélite e a sua vida útil chega ao fim.

As operadoras não permitem que o combustível acabe, pois não haveria outra maneira de retirar o satélite da sua posição orbital. Existe uma pequena quantidade de reserva, para retirar o satélite desta posição lançá-lo ao espaço, se tornando lixo espacial.

O sucesso na fase de lançamento é fundamental, porque cerca de 80% do combustível é gasto nesta fase. Os outros 20% são consumidos ao longo de sua vida útil.

Em média, a vida útil de um satélite GEO é de 12 a 15 anos.

3.3.2 – Faixas de Frequência de Operação

A comunicação via satélite em geral, tem uma particularidade em relação aos outros sistemas de comunicação. As portadoras de transmissão, sentido Terra-Satélite (*uplink*), operam em uma faixa da frequência bem diferente das portadoras de recepção – sentido Satélite-Terra (*down-link*).

Como o satélite é um mero repetidor de portadoras, esta é enviada para toda a área de cobertura, ou seja, todas as antenas parabólicas apontadas para aquele satélite (inclusive a transmissora) recebem aquela portadora. Isto causa uma interferência na estação terrena transmissora.

Para que o problema seja evitado, basta que a faixa de frequência de *uplink* seja diferente da de *down-link*.

Não existem muitas faixas disponíveis, as mais comuns são os mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Plano de frequência para serviços de comunicação via satélite.

Bandas	Faixa de <i>Up-Link</i> (GHz)	Pseudônimo <i>Up-Link</i> (GHz)	Faixa de <i>Down-Link</i> (GHz)	Pseudônimo <i>Down-Link</i> (GHz)
Banda C	5,85 ~ 6,425	6	3,6 ~ 4,2	4
Banda Ku	13,75 ~14,5	14	10,7 ~12,2	11
Banda Ka	27,0 ~30,0	29	18,3 ~21,2	19

Um outro obstáculo para a comunicação via satélite, é a elevada atenuação espaço livre, devido a grande distância entre o satélite e a Terra. Observadas na tabela 2, as faixas de frequência utilizadas para o *down-link*, são menores do que as utilizadas no *uplink*.

Isto é um artifício adotado para otimização do enlace satélite, pois há limitação de geração de energia a bordo do satélite e a atenuação espaço livre é diretamente proporcional ao valor da frequência (Fig.9).

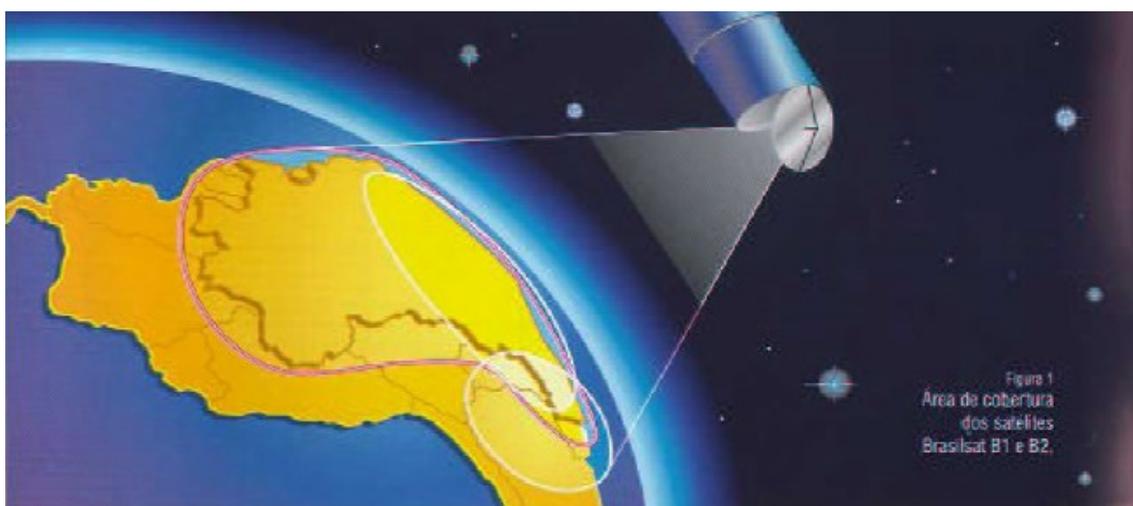


Figura 9: Áreas de Cobertura dos Satélites BRASILSAT B1 e B2 da EMBRATEL

3.3.3 – Capacidade do Satélite

A capacidade do satélite é determinada pela quantidade de banda de frequência que ele é capaz de repetir de volta para a Terra, ou seja, cada sinal modulado ocupa uma banda de frequência em Hertz e estas devem ser alocadas no satélite lado a lado, sem que haja superposição para não haver interferência entre elas. Quanto mais bandas puderem ser alocadas no satélite maior será a sua capacidade em faixa de frequência.

Também há um outro fator limitante que é o da energia, pois além de repetir o sinal para a Terra, o satélite também o amplifica. Devido as diferentes técnicas de modulação dos sinais enviados para o satélite, alguns sinais demandam mais energia do que outros, mesmo que, suas bandas de frequência sejam iguais. Isto significa que um satélite pode alcançar sua plena carga de potência ainda que haja faixas de frequências disponíveis para uso.

A conclusão é que a capacidade do satélite está em sua quantidade de faixa de frequência disponível e sua capacidade de fornecer energia aos amplificadores a bordo.

Para aumentar a versatilidade e a confiabilidade, o satélite é projetado não como um imenso repetidor ativo e sim como um grupo de vários repetidores ativos independentes chamados de transponders.

Os transponders (Fig.10) possuem faixas de frequência de resposta independentes e estão organizados em frequência lado a lado, como ilustrado na figura abaixo. Tal organização constitui o que se denomina de Plano de Frequências do satélite.

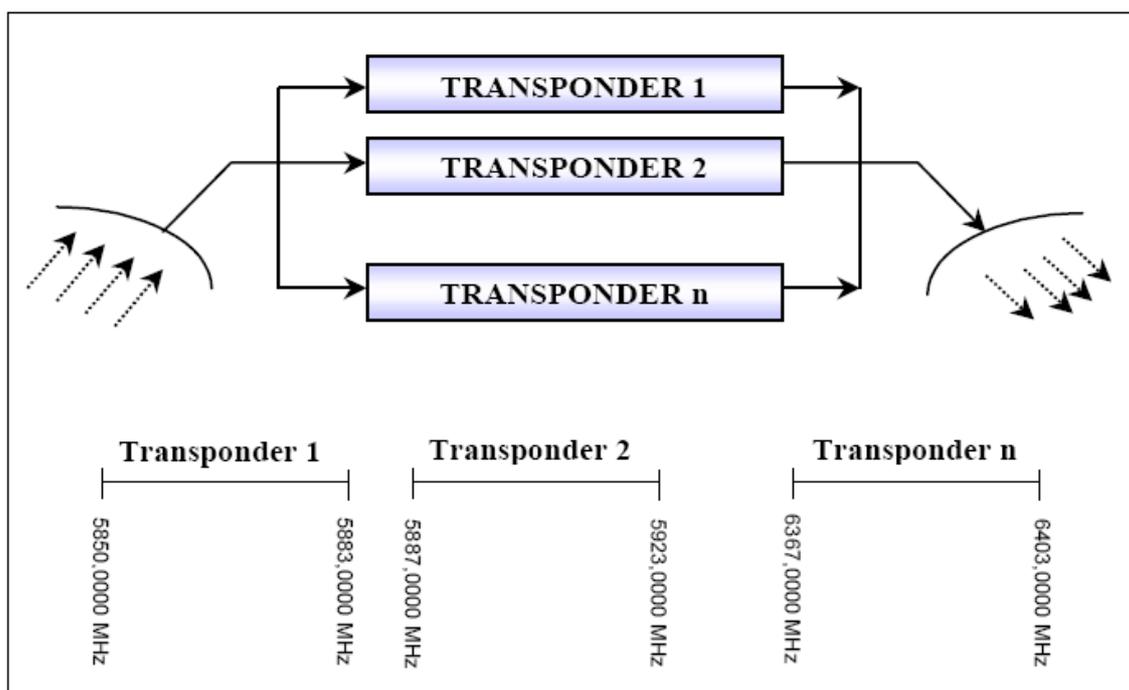


Figura10: Esquemático Ilustrativo dos Transponders de um Satélite

Cada transponder possui o seu amplificador e sua faixa de frequência disponível para uso. Isto significa que se um amplificador queimar, o máximo que pode acontecer é a inutilização da faixa correspondente daquele transponder ao invés do satélite inteiro. Para isso existem transponders de back-up.

Outra característica dos transponders é a presença de imperfeições intrínsecas, provocadas por alguns componentes internos que se manifestam sobre os sinais trafegados, degradando a qualidade dos mesmos. Na tabela 3, pode-se observar os efeitos destas imperfeições e suas causas.

Tabela 3: Imperfeições Intrínsecas dos Transponders

EFEITO	CAUSA
Interferência entre símbolos para transmissão digital	Filtro passa-faixa na entrada do transponder.
Variações na envoltória do sinal	Filtro passa-faixa na entrada do transponder.
Intermodulação	No amplificador do transponder.
Conversão AM/PM	No amplificador do transponder, devido às variações de envoltória provocadas pelas filtragens precedentes.
Ruído térmico	No receptor do satélite (entrada do transponder).

Como os transponders são independentes, em um mesmo satélite, um transponder pode estar operando com capacidade total de potência, embora sua capacidade de faixa de frequência não esteja no limite, e outro pode estar operando com folga de potência, mesmo que sua capacidade de faixa esteja esgotada.

Em termos práticos, a capacidade do satélite está no número de transponders com uma determinada largura de banda e na máxima potência que cada um dos transponders podem radiar para a Terra. Exemplo: Satélite de 28 transponders de 36 MHz cada, com potência máxima de transmissão de 40 dBW por transponder.

3.3.4 – Otimização do Espectro de Frequência

Um dos principais fatores que determina a capacidade do satélite é a faixa de frequência que ele é capaz de repetir de volta para a Terra. É fácil imaginar que para construir satélites de alta capacidade, bastaria que este possuísse uma capacidade em faixa de frequência grande, porém como todo serviço de telecomunicações, o serviço de comunicação via satélite está regulamentado pela UIT, que determina a faixa de frequência recomendada para cada banda de operação como as Bandas C, Ku e Ka. Como por exemplo, para a Banda C - ela recomenda o uso da faixa compreendida entre 5850 MHz e 6425 MHz apenas. Isto significa que a maior capacidade de faixa de um satélite em banda C seria 575 MHz, ou seja, 14 transponders de 36 MHz, já incluindo os afastamentos em frequência entre transponders para evitar interferência entre eles.

Portanto, com apenas 575 MHz na Banda C disponível para a prestação do serviço via satélite é necessária a utilização de artifícios físicos para aumentar a capacidade de faixa de frequência do satélite. Estes artifícios são: a comunicação em polarizações ortogonais, ou a comunicação de faixas do espectro de frequência diferentes, ou ainda a comunicação em coberturas de áreas diferentes.

3.3.4.1 – Polarização

A onda eletromagnética é composta por duas componentes, uma elétrica e outra magnética, onde uma é defasada de 90° da outra. Na ocorrência de duas ondas eletromagnéticas, onde a primeira é denominada como [A] e a segunda como [B] e ambas na mesma frequência, se o campo elétrico da onda [A] está defasado em 90° do campo elétrico da onda [B], necessariamente os campos magnéticos de ambas estão defasados de 180° também. Isto significa que, a [A] está com uma polaridade exatamente oposta a da [B] e portanto, não há superposição entre elas, e conseqüentemente, não há interferência, podendo ambas coexistirem na mesma frequência.

A polarização (Figs. 11 e 12) é orientação do campo elétrico que pode ser dada ortogonalmente, ou seja, o campo elétrico somente oscila no eixo vertical ou horizontal, ou circularmente, isto é, o campo elétrico descreve um movimento circular a direita ou a esquerda.

Com este recurso, um satélite que opera na Banda C, passa a ter 1150 MHz de capacidade de faixa de frequência, sendo 28 transponders de 36 MHz.

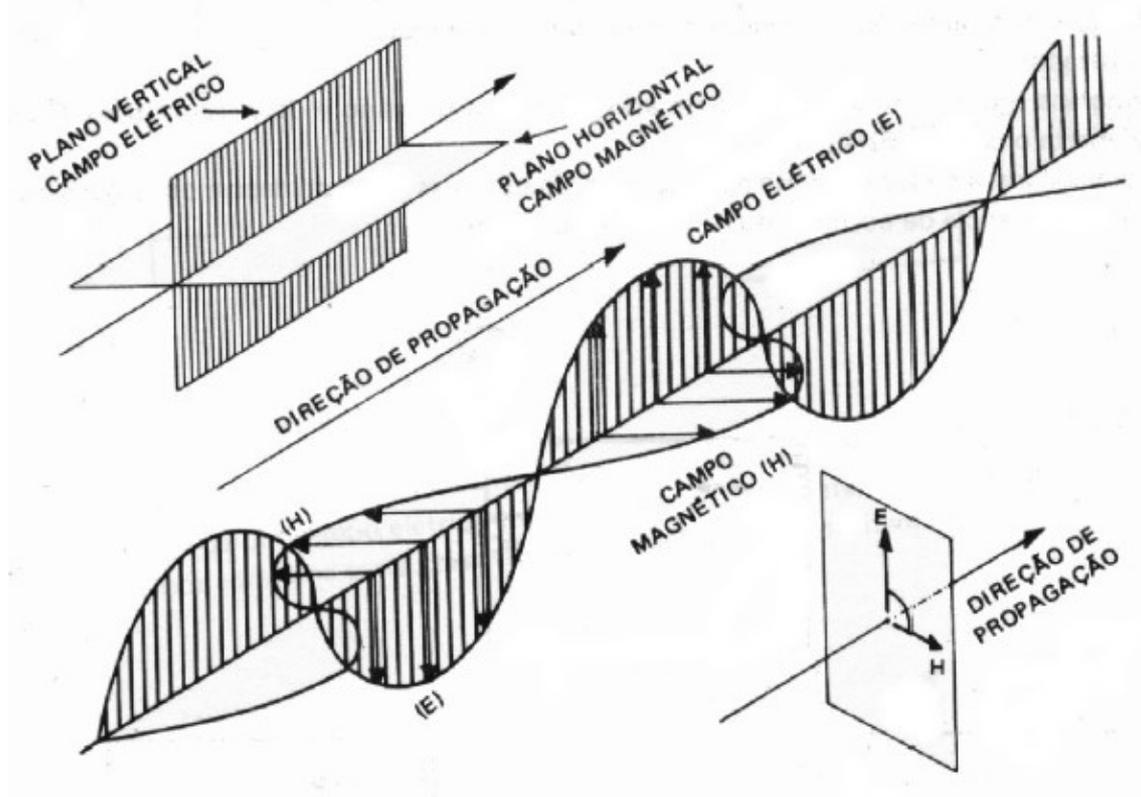


Figura 11: Onda Eletromagnética Polarizada Verticalmente

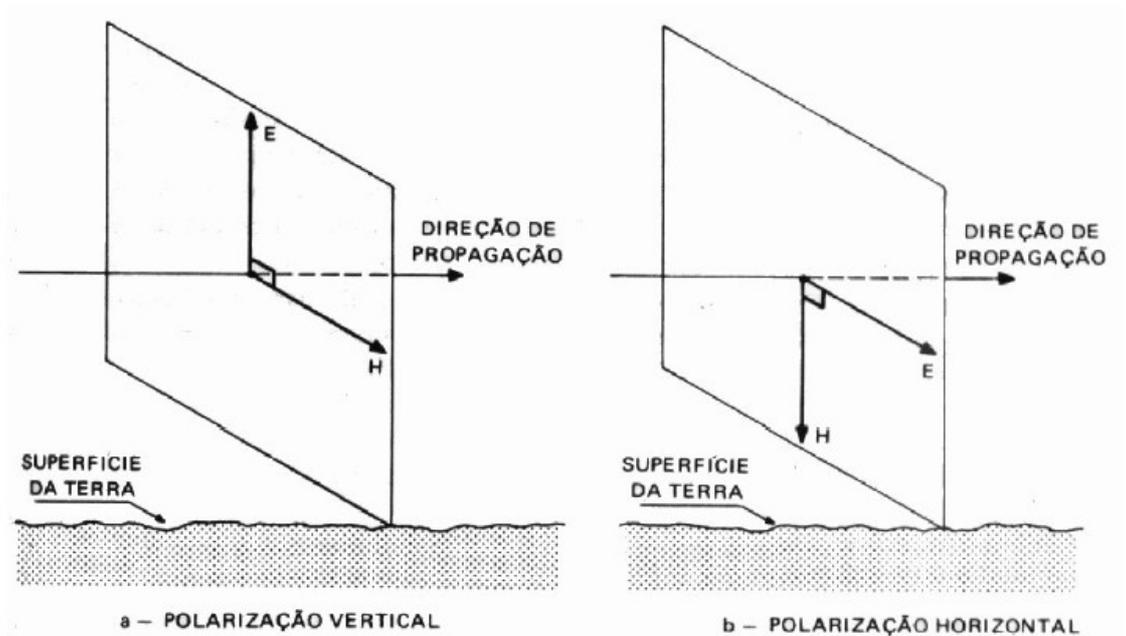


Figura 12: Orientação do Campo Elétrico nas Polarizações Vertical e Horizontal

3.3.4.2 – Frequência

Outro artifício empregado para o aumento da capacidade de faixa do satélite, é a simples utilização de mais de uma banda do espectro de frequência disponível para este tipo de serviço, como por exemplo: um satélite pode ser construído com capacidade de operação tanto em banda C, como em Banda Ku. Isto daria a este satélite 1150 MHz de faixa na Banda C e 1500 MHz da faixa na Banda Ku, como um total de 2650 MHz de faixa de frequência disponível.

3.3.4.3 – Cobertura

Um satélite geo-estacionário pode cobrir toda a face do globo que ele “enxerga” com densidade de potência baixa ou direcionar seu feixe de cobertura, apenas para uma região ou um ponto, com densidade de potência alta.

O anexo C apresenta a prova de que apenas três satélites GEO são suficientes para cobrir todo o globo terrestre.

Quando a cobertura é direcionada e estas são suficientemente afastadas uma da outra, cria se duas áreas isoladas, ou seja, é como se dois satélites independentes estivessem cobrindo áreas geográficas diferentes e portanto, não há como um interferir no outro. Isto significa que pode haver novamente, a duplicação da capacidade de um satélite, fazendo com ele cubra duas áreas diferentes, como ilustrado na figura 13.

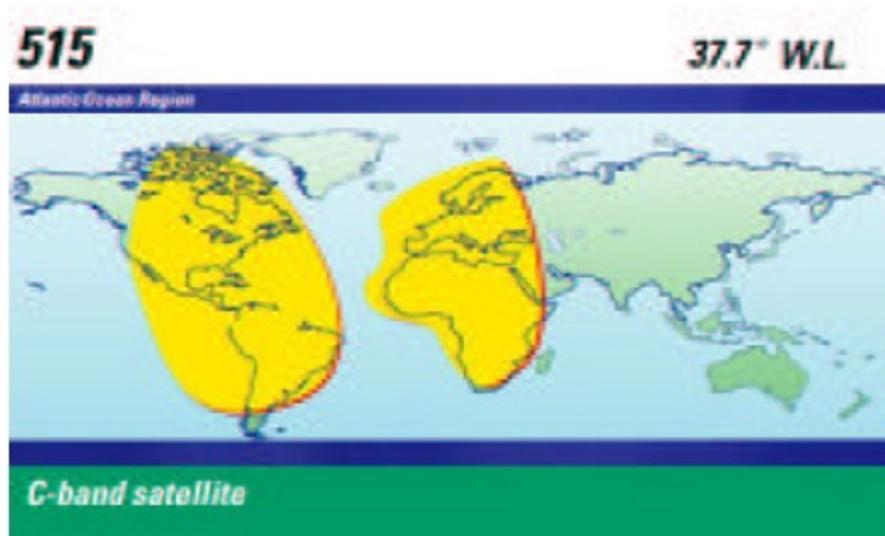


Figura 13: Coberturas geográficas independentes

Portando, aproveitando o exemplo do item anterior, tem-se 5300 MHz disponíveis para comunicações em um satélite que cobre duas áreas geográficas afastadas, suficientemente para haver isolamento entre elas, operar nas bandas C e Ku em ambas as coberturas, e ainda operar nas duas polarizações em ambas as coberturas e bandas do espectro de frequência.

3.4 - UMA VISÃO COMPARATIVA ENTRE SATÉLITES DE ÓRBITAS LEO, MEO E GEO

Os satélites que operam em uma órbita geo-estacionária necessitam de foguetes lançadores mais complexos, devido a sua altitude elevada, o que provoca um custo de lançamento mais elevado do que os lançamentos dos satélites de tecnologia (MEO e LEO). Este custo chega a ser 4 vezes mais caro que o próprio satélite.

Esta operação de lançamento, a cerca de 10 anos atrás, era uma operação arriscada, pois havia uma quantidade razoável explosões e insucessos. Hoje, a cada ano que passa a confiabilidade nos veículos lançadores vem aumentando muito.

Os Satélites GEO possuem uma vantagem de abranger uma área de cobertura muito maior do que as dos satélites LEO e MEO.

Em contra partida, a elevada altitude provoca um retardo de aproximadamente 0,5 s. Se colocarmos duas TVs lado a lado, a primeira recebendo o sinal de uma antena comum de TV e a Segunda recebendo o sinal de uma antena parabólica. Ambas transmitem imagens de um mesmo jogo de futebol ao vivo no exato momento de uma cobrança de um pênalti. Podemos reparar que na primeira TV enquanto o jogador acabou de chutar a bola na Segunda o ele está prestes a chutá-la.

Este retardo provoca problemas mais complexos em protocolos de verificação e correção de erro de dados, onde a todo instante uma sistema de transmissor interrompe a comunicação de dados para aguardar a resposta do sistema receptor de que há erro do dado enviado. Só então o dado é retransmitindo. Esta interação entre os dois sistemas (Tx e Rx) seria normalmente instantânea se eles não tivessem que aguardar 0,5 s por uma confirmação de erro.

Por este motivo os protocolos de comunicação de sistemas via satélites geo-estacionários são diferentes dos outros sistemas de telecomunicações, tornando viável a tecnologia.

CAPÍTULO 4 - ANTENAS

As antenas são uma forma de acoplar energia elétrica, eficientemente, ao espaço, ou seja, são acopladores da energia do transmissor ao espaço, e também as captadoras desta energia para os receptores.

A maioria das antenas (Fig.14) utilizadas nas comunicações via satélite é desenhada com base na combinação de superfícies circulares e parabólicas.



Figura 14: Antena Parabólica

A antena parabólica é a parte mais visível do conjunto de equipamentos que constituem uma estação terrena para comunicações via satélite, são também os equipamentos mais críticos em um sistema de transmissão, pois por meio delas são transmitidas as ondas portadoras de sinais de TV, dados, telefonia, para o satélite que ela está direcionada.

A energia recebida pelos refletores parabólicos, em terra, é baixa, pois as fontes de energia do satélite são pequenas devido a problemas de peso. Por isso os refletores parabólicos, que concentram a energia recebida no dipolo receptor, possuem dimensões elevadas. Estas dimensões são necessárias para que seja captada a máxima energia necessária ao acionamento do receptor.

Pelo fato dessas antenas serem as responsáveis pela transferência do sinal gerado pelo transmissor para o espaço, elas devem estar perfeitamente calibradas, para a frequência em que serão utilizadas.

Vários modelos de antenas estão disponíveis no mercado, e quando se pretende montar um sistema irradiante, deve-se levar em consideração as características de cada modelo, de forma que seja utilizada a que mais se adapta ao sistema em que será utilizada.

Dentre as propriedades mais importantes de uma antena destacam-se: o seu diagrama de radiação, a sua polarização, o seu ganho e a sua impedância.

O ganho é uma característica muito importante, pois contribui para o bom alcance da portadora gerada por um transmissor. Quanto maior o ganho, maior o alcance da antena.

O tipo de irradiação da antena (Fig. 15) também é uma propriedade de fundamental importância. Por quê? Porque o tipo de irradiação irá influir na área de cobertura de um sistema irradiante.

Existem dois tipos de irradiação:

- a) Omnidirecional (não diretiva): O sinal é irradiado em todas as direções;
- b) Unidirecional: O sinal é concentrado em uma única direção, sendo altamente indicada para sistemas de comunicação à longa distância.

Exemplo: Se um transmissor ligado a uma antena omnidirecional irradia seu sinal em um raio de 1 km, este mesmo transmissor ligado a uma antena unidirecional irá irradiar o sinal a uma distância de 50 km, dependendo das características da antena, mas preferencialmente estará transmitindo com maior intensidade em uma direção.

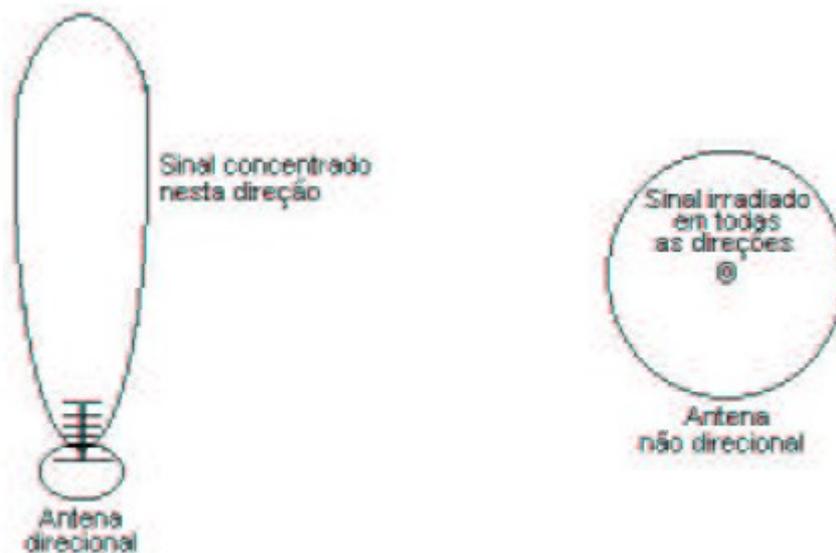


Figura 15: Padrões de irradiação

4.1 - CARACTERÍSTICAS DAS ANTENAS

4.1.1 - Intensidade de Irradiação

Densidade de potência por unidade de ângulo sólido (watt/st rad). Normalmente é simbolizada pela letra U.

4.1.2 - Antena Isotrópica

Antena que irradia ou recebe energia com a mesma intensidade em todas as direções. É um conceito teórico, pois nenhuma antena possui esta característica. A intensidade de irradiação desta antena em qualquer direção é dada por:

$$U_0 = \frac{P}{4\pi}$$

(Equação 1: Intensidade de Irradiação da Antena Isotrópica)

Onde:

$P \rightarrow$ potência irradiada por essa antena
 $4\pi \rightarrow$ ângulo sólido compreendido por uma esfera.

4.1.3 - Diagrama de Irradiação

As estruturas irradiantes apresentam direções preferenciais de irradiação, isto é, direções segundo as quais para uma mesma potência total irradiada é possível registrar diferentes intensidades de campo elétrico a uma mesma distância r .

O diagrama de irradiação é a forma de apresentar a intensidade de campo elétrico irradiado. Este diagrama é indispensável para os estudos de interferência, onde a atenuação sofrida pela energia irradiada em determinadas direções estabelecidas deve ser calculada.

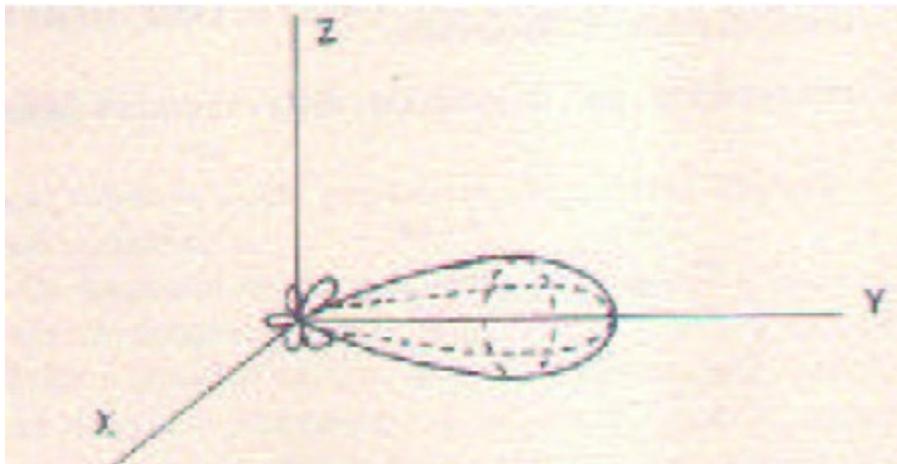


Figura 16: Diagrama Polar para Refletor Parabólico

Como pode ser visto na figura 16, praticamente toda a potência é transmitida para uma pequena região do espaço, em torno de uma certa direção. Idealmente nenhuma potência é transmitida para fora desta região.

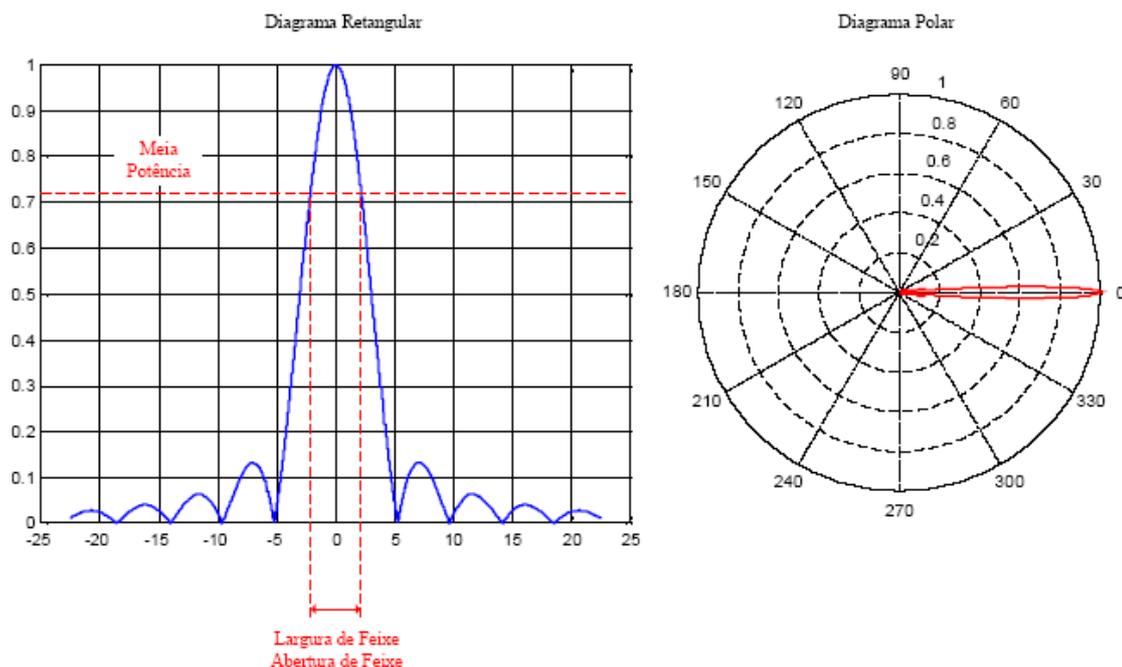


Figura 17: Diagrama de Irradiação de uma Antena de Microondas com Refletor Parabólico

4.1.4 - Largura do Feixe

É interessante que o ponto de recepção de uma antena esteja situado na direção do máximo do lóbulo principal.

O ângulo contendo a direção máxima, compreendido entre os pontos que apresentam atenuação de 3 dB em relação ao valor máximo do diagrama de irradiação da antena é chamado de largura do feixe.

A largura do feixe é dada pela fórmula:

$$\alpha = 70 \frac{\lambda}{d}$$

(Equação 2: Largura do Feixe)

Onde: α é a largura do feixe em graus, λ é o comprimento de onda e d é o diâmetro do refletor.

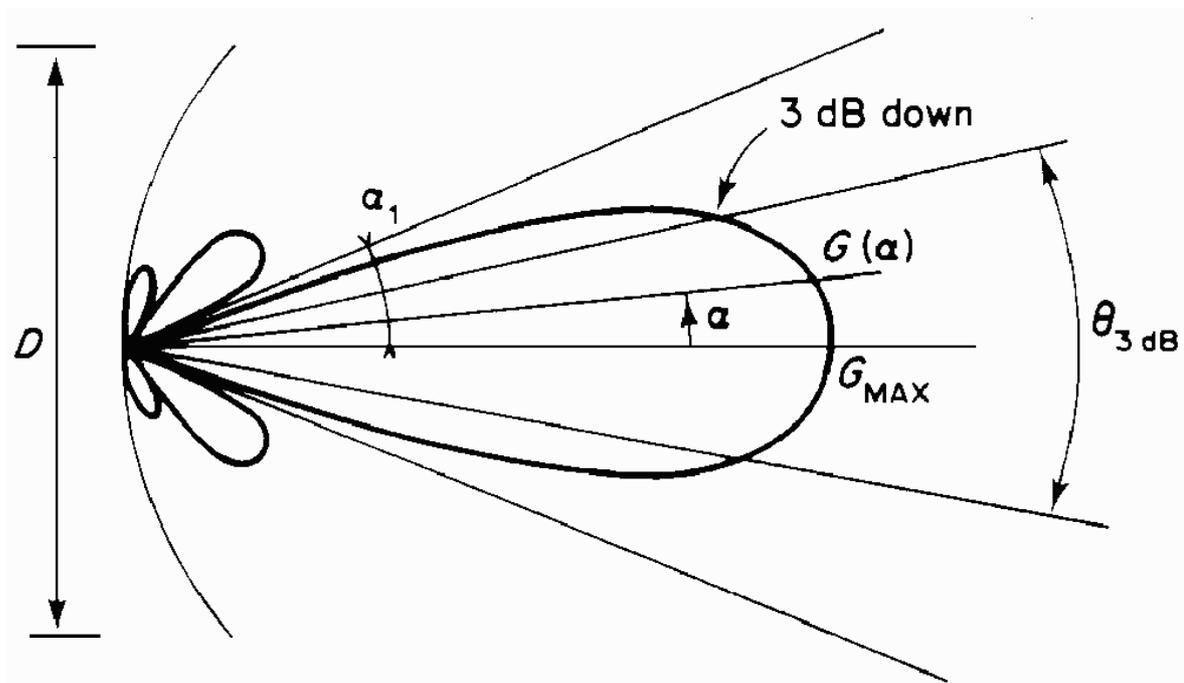


Figura 18: Largura do Feixe

Existem limites para o tamanho máximo das antenas e largura mínima dos feixes, devido à ocorrência de refração na atmosfera. (Fig.18)

Devido à refração do feixe de microondas na atmosfera, que pode se desviar em algumas condições de $-0,3^\circ$ a $+0,4^\circ$ da direção normal de propagação, uma antena muito grande com um feixe muito estreito pode resultar na atenuação do sinal.

4.1.5 - Diretividade

Capacidade da antena de concentrar a potência irradiada em uma dada direção.

Como referência utiliza-se a antena isotrópica, que possui diretividade igual a 1 (um).

Normalmente expressa como: $10 \log 1 = 0$ dBi.

Para uma antena que irradia uma potência P e produz uma intensidade de radiação U em um dado sentido, tem-se, comparando com a isotrópica:

$$D = \frac{U}{U_0} \Leftrightarrow U_0 = \frac{P}{4\pi} \Leftrightarrow D = \frac{U \cdot 4\pi}{P} \quad (\text{Equação 3: Diretividade})$$

Para se obter a diretividade em dBi, usa-se a expressão:

$$D_{dBi} = 10 \log_{10} D \quad (\text{Equação 4: Diretividade em dBi})$$

4.1.6 - Ganho da Antena

Uma antena direcional envia ou capta, em uma certa direção, mais energia. Devido a isto, diz-se que possui ganho.

O ganho depende de alguns parâmetros, tais como: das dimensões do refletor, da frequência de operação e do tipo de sistema de alimentação.

O desempenho de uma antena, usualmente, é dado em termos de ganho: uma medida de amplificação que uma antena proporciona com relação à área de reflexão, quanto maior a área que capta o sinal maior o ganho. Logo, o ganho em potência é diretamente proporcional à área da antena.

Os ganhos das antenas são dados em relação à antena isotrópica padrão, que irradia o sinal em todas as direções. Este tipo de antena apresenta ganho de 0 (zero) dB devido a não existência de diretividade em sua irradiação.

Algumas vezes o ganho é dado em relação a um dipolo de meia onda ideal. Nestes casos, sabendo-se que o ganho do dipolo em relação à antena isotrópica é de 2,15 dB, tem-se:

$$G_{isotrópica} = G_{dipolo} + 2,15dB \quad (\text{Equação 5: Ganho em Relação à Antena Isotrópica})$$

O ganho máximo ocorreria se a iluminação fosse uniforme (em fase e amplitude) ao longo de toda a abertura da antena. (Fig.19)

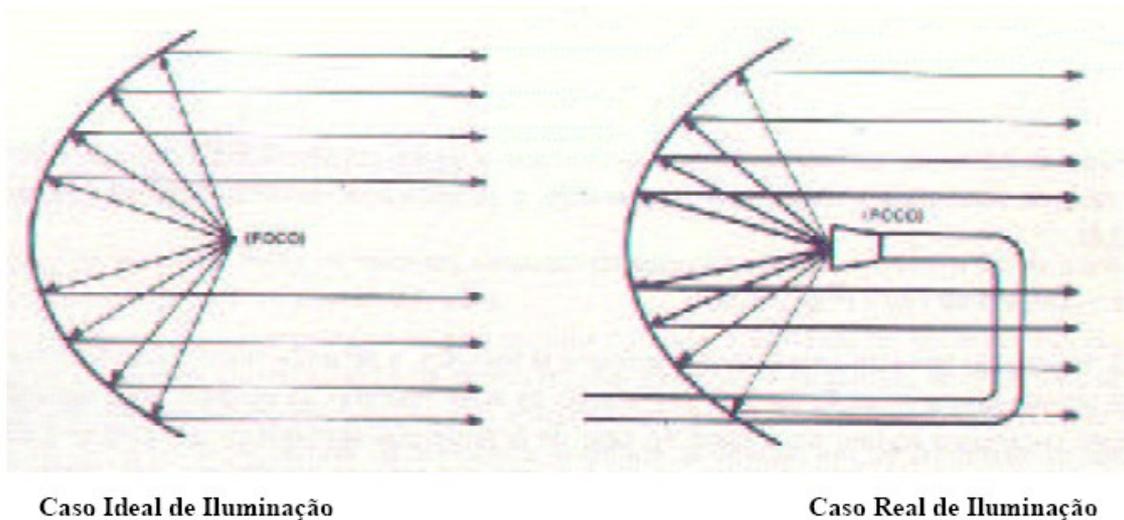


Figura 19: Iluminação do Refletor

Se isso ocorresse o ganho seria simplesmente calculado pela fórmula:

$$G = \frac{4\pi \cdot A_{ef}}{\lambda^2} \quad (\text{Equação 6: Ganho/m}^2)$$

Na prática o ganho é expresso em decibéis (dB), cada decibel representa o acréscimo de sinal que se pode detectar, para uma mesma tensão de transmissão.

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \cdot \eta_a \cdot \frac{4\pi \cdot A_{ef}}{\lambda^2} \quad (\text{Equação 7: Ganho em dB})$$

Outra fórmula conhecida do ganho é a apresentada abaixo, que leva em consideração as perdas ôhmicas e a diretividade.

$$G_{dBi} = D_{dBi} - 10 \log_{10} L \quad (\text{Equação 8: Ganho em dBi})$$

A figura abaixo mostra os valores dos ganhos típicos para várias medidas de diâmetros de antenas para a Banda C (com eficiência de 55%).

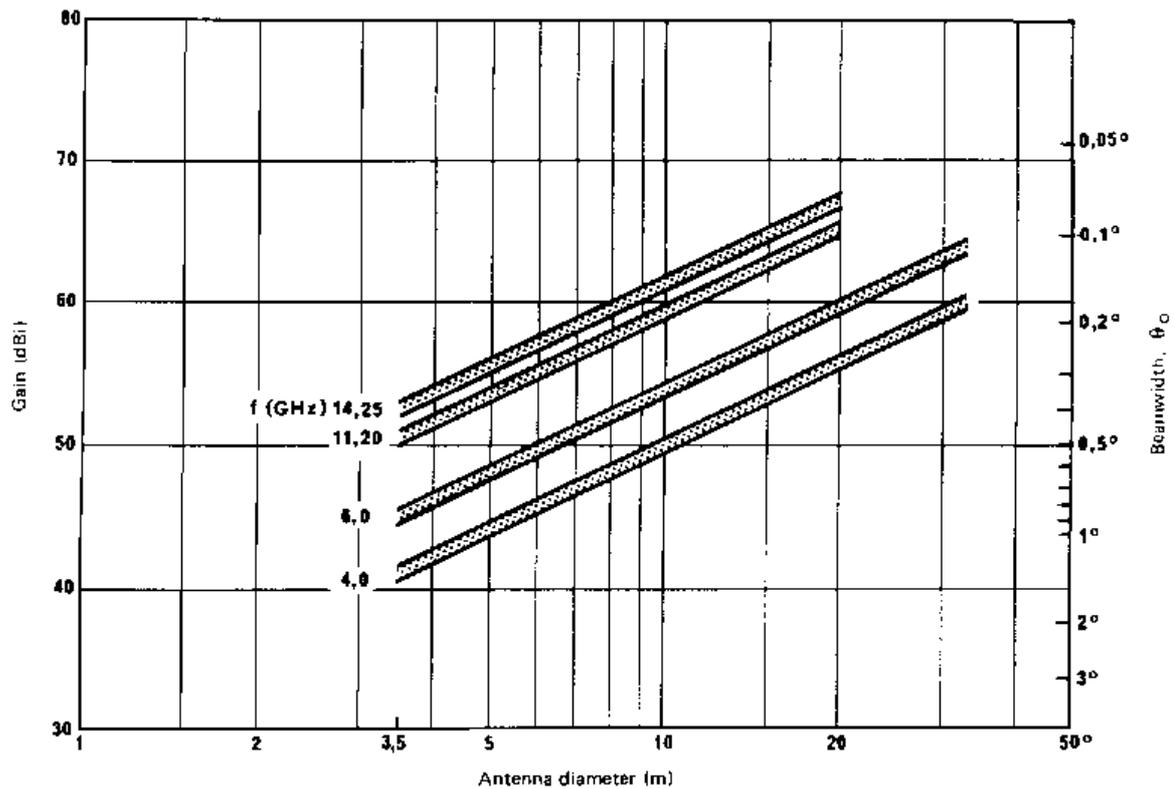


Figura 20: Ganhos de Antenas em Frequências Diferentes

O ganho (Fig.20) pode ser calculado, de uma forma mais completa, pelas equações da recomendação ITU-R IS.847-1, apresentadas a seguir. Nelas, o ganho é calculado em relação aos parâmetros D/λ e ângulo de apontamento da antena.

$$G_{\text{máxR}} = 7,7 + 20 \log \frac{D}{\lambda} \quad (\text{dB})$$

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 2.5 * 10^{-3} * \left(\frac{D}{\lambda} \varphi\right)^2 & \text{para } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G_1 & \text{para } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ 29 - 25 \log \varphi & \text{para } \varphi_r < \varphi < 36^\circ \\ -10 & \text{para } 36^\circ < \varphi < 180^\circ \end{cases}$$

$$G_1 = \begin{cases} -1 + 15 \log \left(\frac{D}{\lambda}\right) \text{ dBi} & \text{para } D/\lambda \geq 100 \\ -21 + 25 \log \left(\frac{D}{\lambda}\right) \text{ dBi} & \text{para } D/\lambda < 100 \end{cases}$$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1} \text{ graus}$$

$$\varphi_r = \begin{cases} 15.85 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0.6} \text{ graus} & \text{para } D/\lambda \geq 100 \\ 100 \left(\frac{\lambda}{D}\right) \text{ graus} & \text{para } D/\lambda < 100 \end{cases}$$

(Equação 9: Ganho em relação a D/λ e φ)

Onde:

$G(\varphi)$ - Valor do ganho da antena na direção da interferência.

G_{\max} - Valor do ganho da antena na direção de apontamento.

G_1 - Ganho no primeiro lóbulo lateral.

φ - Ângulo topocêntrico, descrito pela posição orbital do satélite interferido, a estação terrena e o satélite interferente.

φ_m - Primeiro nulo do Diagrama de Radiação.

φ_r - Segundo nulo do Diagrama de Radiação.

D - Diâmetro da antena utilizada no enlace.

λ - Comprimento de onda no enlace.

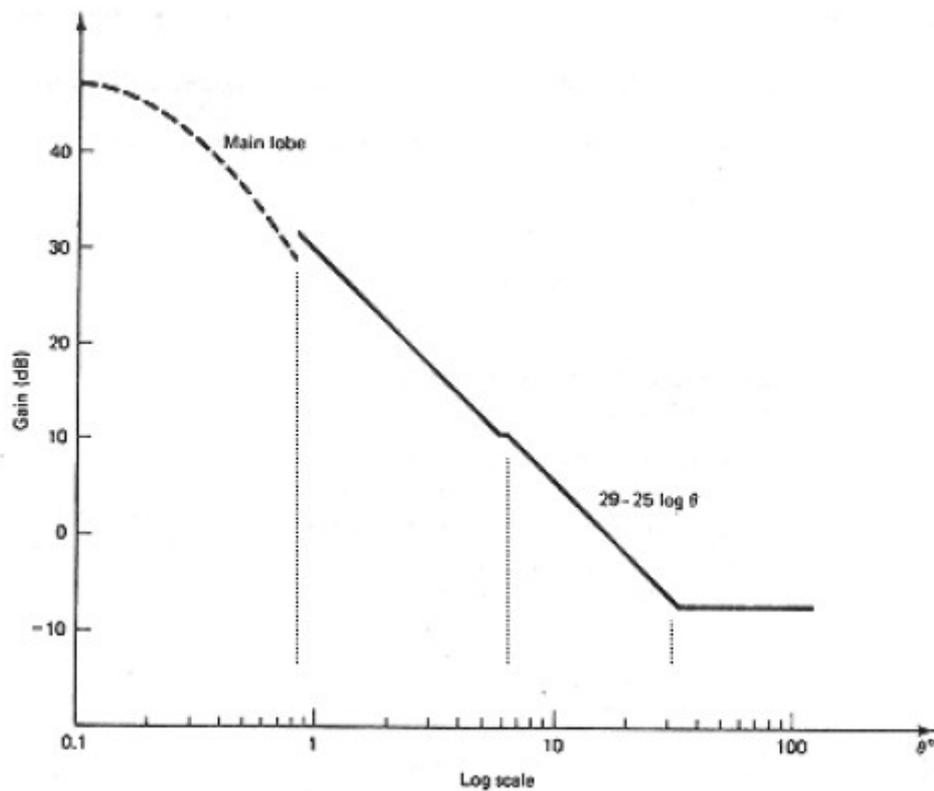


Figura 21: Ganho x ϕ

4.1.7 - Tamanho da Antena

O tamanho das antenas varia de acordo com o tipo de aplicação em que ela será utilizada, da velocidade e de outros fatores.

Para frequências maiores utiliza-se antenas menores para um mesmo ganho. Por isso, as antenas que utilizam frequências mais altas possuem tamanho mais reduzido.

Tabela 4: Bandas x Diâmetro da Antena

Bandas	Diâmetro das Antenas
C	1,8 m
Ku	60 cm
Ka	15 cm

Quanto maior a área da antena, mais estreito será o lóbulo principal. Quando o lóbulo é muito largo ele pode vir a interferir em outros sistemas.

4.1.8 - Área Efetiva de uma Antena

Área através da qual uma antena capta a energia incidente, esta área é considerada fictícia.

A área efetiva das antenas refletoras varia entre 50 e 80 % da área do seu refletor.

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2 \cdot G}{4\pi}$$

(Equação 10: Área Efetiva)

4.1.9 Relação Frente-Costa (RFC)

É a relação entre a irradiação na direção do máximo do lóbulo principal (P1) e a irradiação de energia em direção oposta a esse máximo (P'). Esta relação deve ser atenuada ao máximo por se tratar de uma ocorrência indesejável.

$$RFC_{dB} = 10 \log_{10} \cdot \frac{P_1}{P'}$$

(Equação 11: Relação Frente-Costa)

Pode ser definida também como a razão entre as potências irradiadas dentro do feixe definido pelos pontos de - 3 dB do lóbulo principal (P3 dB) e uma certa região oposta ao máximo, delimitada por um ângulo. Esta definição é a que vale para as antenas de microondas.

$$RFC_{dB} = 10 \log_{10} \cdot \frac{P_{3dB}}{P_{\theta}}$$

(Equação 12: Relação Frente-Costa em dB)

A RFC das antenas de microondas (Fig.22) varia de 20 dB a 70 dB, a potência P_θ é inferior a potência P3 dB de 100 a 107 vezes.

Uma RFC alta é desejável para que a irradiação de um enlace não interfira no enlace adjacente.

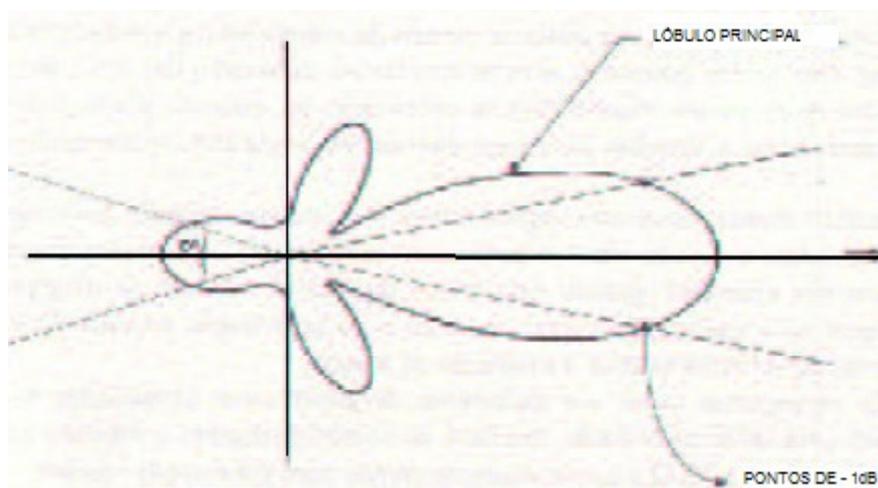


Figura 22: Definição da RFC para Antenas de Microondas

4.1.10 - Atenuação do Lóbulo Lateral

É a relação entre a irradiação na direção do máximo do lóbulo principal e a irradiação de energia do lóbulo adjacente a este máximo.

A energia dos lóbulos adjacentes ao principal também deve ser atenuada (Fig.23), pois este tipo de irradiação pode causar perturbações em outros sistemas que operam em região próxima e com a mesma frequência ou até mesmo interferir em enlaces do mesmo sistema.

Os valores desta atenuação variam de 20 a 50 dB.

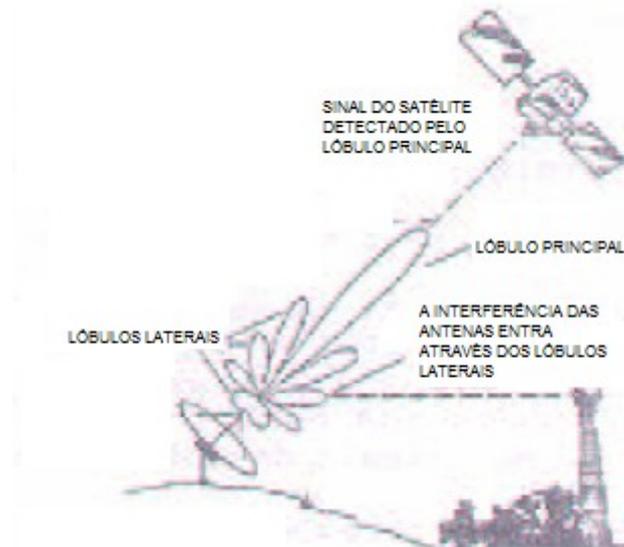


Figura 23: Lóbulos Laterais e Interferências

4.1.11 – Polarização

A polarização pode ser linear, circular ou elíptica, dependendo das amplitudes e fases das componentes ortogonais que compõem o campo elétrico total da onda irradiada.

A polarização da antena é definida em relação à direção de máxima radiação (lóbulo principal).

4.1.12 - Largura de Banda

É a faixa de frequências na qual a antena opera, satisfazendo determinados critérios. Estes critérios referem-se às variações, com a frequência, das características da antena.

Dependendo das necessidades de operação do sistema no qual a antena é utilizada, a largura de banda é limitada por um ou vários dos seguintes fatores: impedância de entrada, ganho, largura do feixe, nível dos lóbulos secundários e polarização.

Existem duas formas de se expressar a largura de banda:

a) Forma Percentual: utilizada quando a largura de banda é muito menor que a frequência central;

$$LB = \frac{Freq_{Sup.} - Freq_{Inf.}}{Freq_{Central}}$$

(Equação 13: Largura de Banda na Forma Percentual)

b) Relacionamento entre as frequências superior e inferior: utilizada quando a frequência superior for maior ou igual ao dobro da frequência inferior.

$$LB = Freq_{Sup.} - Freq_{Inf.}$$

(Equação 14: Largura de Banda pelo Relacionamento de Frequências)

4.2 – TIPOS DE ANTENAS PARABÓLICAS

4.2.1 - Parabólica de Foco Principal (Focal Point)

É a mais comum, focaliza em um único ponto todos os sinais recebidos em uma direção paralela ao seu eixo. Os sinais que tem origem em outras direções que não daquelas do satélite apontado, são refletidos fora do seu ponto principal.

Nesta antena a energia que o satélite provém, após reflexão do parabolóide, converge para o foco onde é recolhida por intermédio de uma pequena antena, denominada fonte primária (normalmente, algum tipo de corneta).

Na figura 24 pode-se observar a geometria das antenas parabólicas (refletor) e o alimentador. Neste tipo de antena, Focal Point, os raios são dirigidos em uma só reflexão a um alimentador no ponto focal.

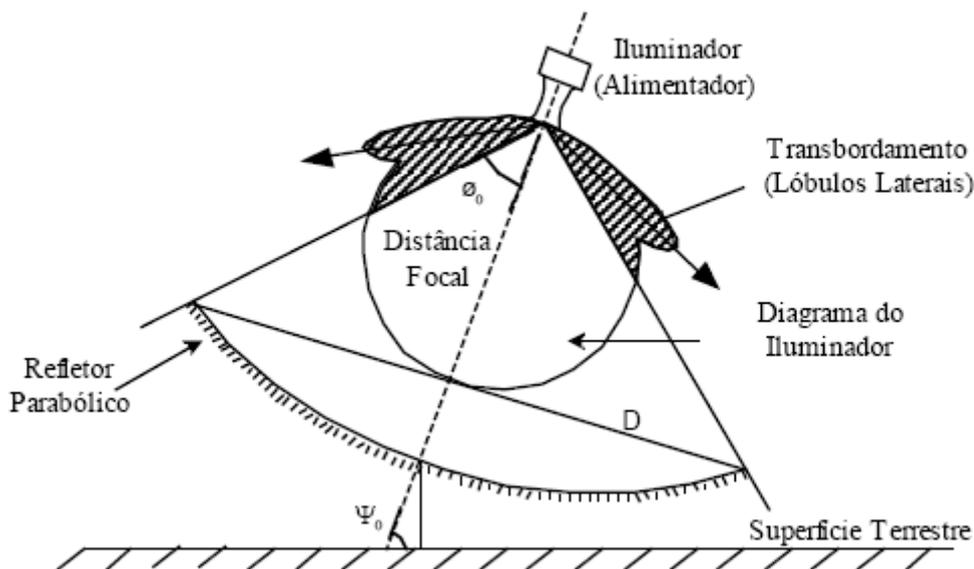


Figura 24: Parabólica de Foco Principal

Na prática esta antena não se comporta como descrito na teoria devido aos motivos relacionados abaixo:

a) O equipamento montado no foco da antena se estende ao redor do ponto focal, com isso intercepta algumas das microondas de algumas regiões ligeiramente desviadas do foco;

b) As superfícies apresentam irregularidades, o que ocasiona erro, assim alguns sinais fora do eixo são detectados e alguns sinais apontados passam sem serem observados;

c) As antenas parabólicas não se comportam tão perfeitamente quanto dita a geometria de rastreamento de raios, a radiação interceptada por ela interceptada se comporta conforme os princípios de ondas e sempre ocorre expansão do sinal ao redor das bordas;

4.2.2 Antena Tipo Foco Deslocado (OffSet)

É diferente do modelo convencional por ter seu ponto de foco deslocado para a sua borda inferior.

A antena off-set (Fig.25), ou refletor off-set forma somente parte do parabolóide de revolução. Geralmente, é escolhido o ápice.

Este sistema oferece algumas vantagens e desvantagens com relação ao sistema de foco centralizado.

Esta antena geralmente é mais fácil de ser montada devido ao baixo ângulo de elevação, e não oferece perdas devido à sombra do feedhorn como no caso da antena de foco centralizado. Em contrapartida, seu alinhamento é muito mais trabalhoso.

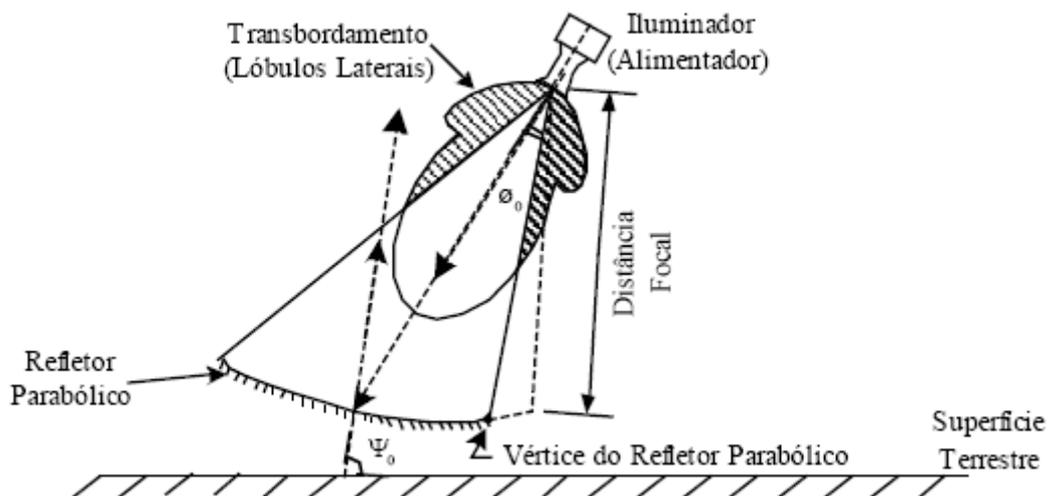


Figura 25: Refletor OFF-SET

4.2.3 - Antena Tipo Cassegrain

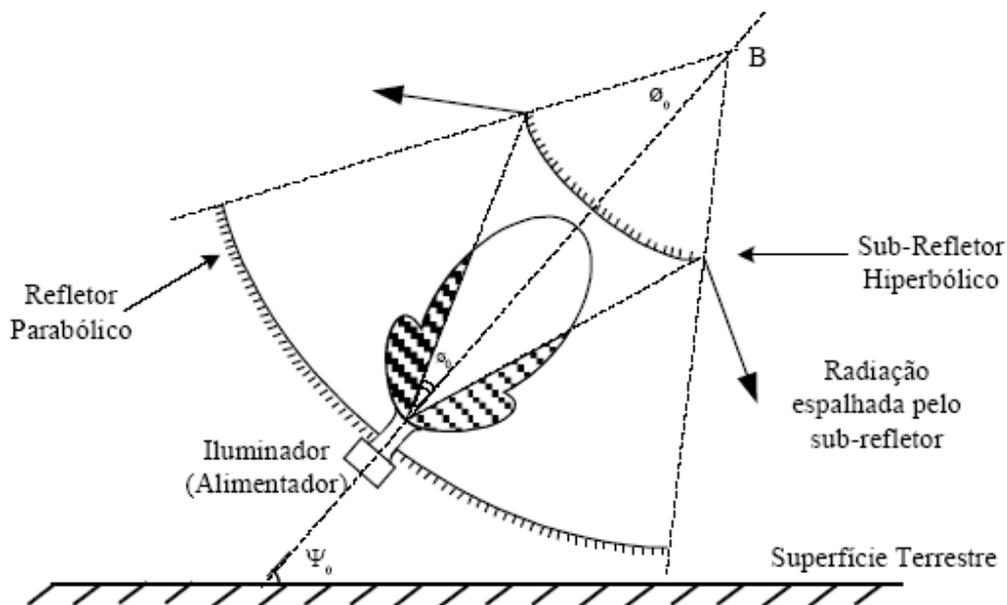


Figura 26: Antena Cassegrain

As antenas usadas em transmissão de microondas ponto a ponto, antena parabólica básica, é um elemento altamente diretivo. Porém, o alimentador localizado no ponto focal da parabólica não pode ser precisamente controlado para iluminar somente o refletor. Uma determinada quantidade de energia se perde do refletor, vindo a ocasionar lobos indesejáveis para trás e para os lados da antena. Este fenômeno recebe o nome de “spillover”.

Quando a antena em operação tiver apontada para o satélite, o alimentador estará apontado para a Terra, que é relativamente ruidosa e este ruído será captado pela antena.

A antena Cassegrain (Fig.26) foi criada para diminuir essa captação de ruído. Este tipo de antena é constituído por dois refletores, uma superfície parabólica como refletor principal e um sub-refletor hiperbólico. O alimentador do sinal fica na superfície da parabólica, irradiando o sinal para um sub-refletor que reflete o sinal para a parábola, a qual por sua vez reflete para o espaço e vice-versa.

Nesta antena, o alimentador fica apontado para o céu, que possui um nível bem inferior de ruído. Além disso, por ela permitir a colocação do receptor RF bem perto do alimentador, as perdas em linhas de transmissão são diminuídas o que diminui também o ruído introduzido pela atenuação do guia de onda.

As principais características de um sistema Cassegrain de 4,5 metros de diâmetro são mostradas na tabela 5:

Tabela 5: Características de um Sistema Cassegrain

Frequência, GHz	3,7 – 4,2
Ganho em 4 GHz, dBi \pm 0,2 dB	44,0
Temperatura de Ruído, °K	
a 10° de elevação	35
a 20° de elevação	27
a 40° de elevação	22
COE Máximo	1,30
Largura de feixe de 3 dB, graus	1,20
Largura de feixe de 15 dB, graus	2,40
Eficiência	
Recepção	58%
Transmissão	47,7%
Razão f/D	0,33
Diâmetro do sub-refletor (m)	0,65

4.2.4 - Antena Tipo Gregoriana

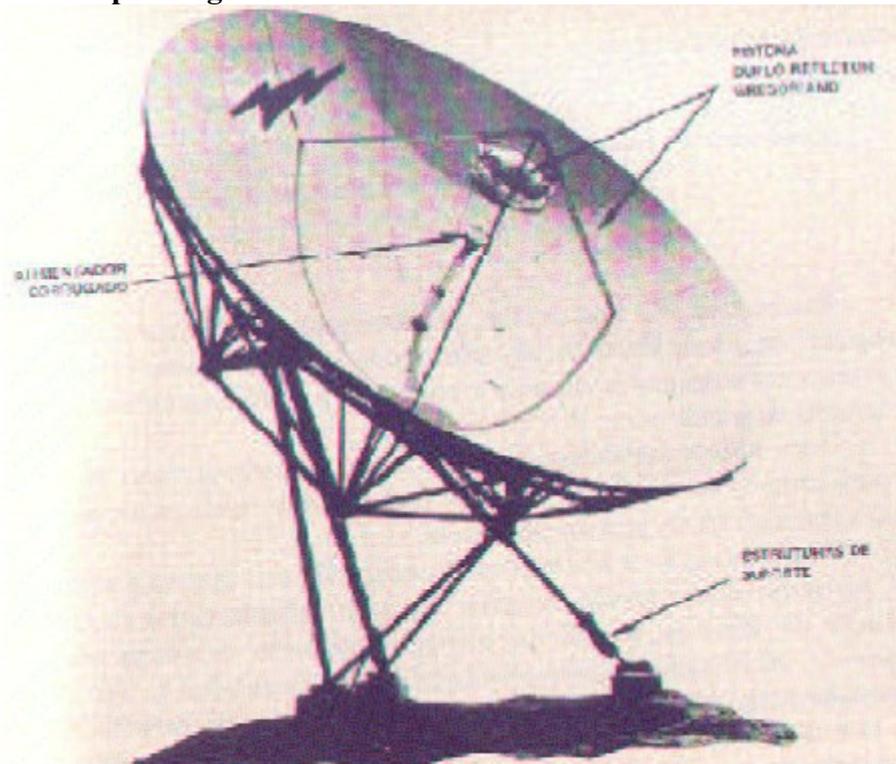


Figura 27: Sistema Gregoriano para Estação Terrena de 10 metros de diâmetro

Esta antena (Figs. 27 e 28) possui altos níveis de eficiência, devido ao feixe ser mais diretivo.

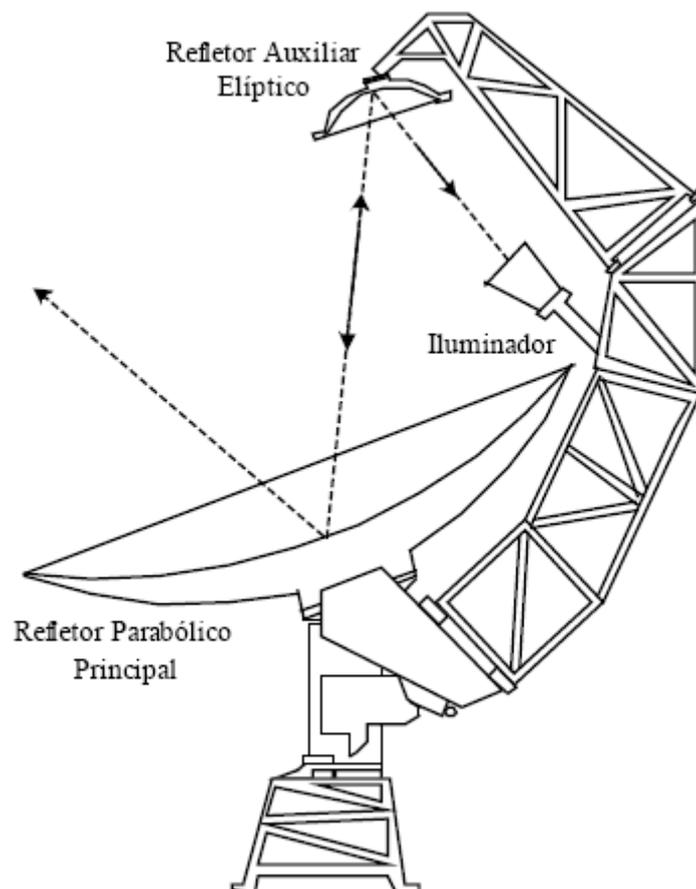


Figura 28: Antena Gregoriana com offset

A tabela abaixo mostra as principais características de um sistema gregoriano de 10 metros de diâmetro.

Tabela 6: Características de um Sistema Gregoriano

	RX 4 GHz	TX 6 GHz
Frequência, GHz	3,7 – 4,2	5,925 – 6,425
Polarização	linear	linear
Ganho, dBi \pm 0,2 dB	51,0	54,3
Temperatura de Ruído (°K) a 10° de elevação	32	--
a 30° de elevação	22	--
COE máximo	1,25	1,20
Larg. Feixe, 3 dB (graus)	0,46	0,31
Larg. Feixe, 15 dB (graus)	0,95	0,60
Discriminação pol. Cruz., dB	30	30
Eficiência	67%	60%
Diâmetro do sub-refletor, m	1,3	
Razão f/D	0,3	

CAPÍTULO 5 - ESTAÇÃO TERRENA

5.1 - ESCOLHA DE LOCALIZAÇÃO

Ao se escolher um local para a implementação de uma estação terrena, alguns fatores devem ser considerados, dentre os quais podemos citar:

a) O local deve ser de fácil acesso de modo a facilitar a implementação e manutenção da estação e, também, deve estar próximo à uma rede primária de distribuição de energia;

b) As características do solo devem ser cuidadosamente investigadas, principalmente em aplicações que utilizam antenas de grande porte, tendo em vista as implicações nas fundações das antenas;

c) O local deve se situar o mais próximo possível da Central de Comutação, de modo a minimizar as necessidades de enlaces de microondas para a integração estação-central;

d) O local deve ser escolhido de modo a que os níveis de interferência mútua entre a estação terrena e estações de microondas sejam mantidos dentro dos limites permissíveis estabelecidos.

5.2 - CONFIGURAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO TERRENA

Numa estação terrena podemos identificar os seguintes sistemas:

- Sistema de Antena
- Sistema de Comunicações
- Sistema de Energia

Evidentemente, cada um desses sistemas apresentará características técnicas e grau de complexidade diferentes dependendo da aplicação a ser dada à estação terrena.

5.2.1 - Sistema de Antena

Esse sistema é subdividido em: refletor principal, subrefletor, alimentador e subsistema de rastreamento.

O refletor principal, o subrefletor e o alimentador configuram apenas antenas do tipo Cassegrain.

O subsistema de rastreamento utiliza, normalmente, como referência um sinal transmitido pelo satélite, para derivar as informações necessárias e comandar o movimento da antena na direção do satélite.

5.2.2 - Sistema de Comunicações

É composto pelos seguintes subsistemas:

- Subsistema Amplificador de Baixo Ruído (LNA)
- Subsistema de Transmissores de Potência (MPA)
- Subsistema GCE (“Ground Communications Equipment”)
- Subsistema TDMA
- Subsistema SCPC

O subsistema Amplificador de Baixo Ruído (LNA) é composto, normalmente, de 2 amplificadores redundantes e equipamentos associados, sendo usado como pré-amplificador na recepção de sinais de satélite (faixa de 3,7 a 4,2 Ghz). A principal

característica desses amplificadores é que sua temperatura equivalente de ruído irá contribuir diretamente no valor de G/T. Dependendo da aplicação, podemos utilizar amplificadores paramétricos, amplificadores a diodo túnel (TDA) ou amplificadores transistorizados (FET).

O subsistema de transmissores é composto de amplificadores de potência e equipamentos associados. Esses amplificadores podem utilizar válvulas TWT (faixa larga – 500MHz) ou KLYSTRON (50MHz), sendo que as válvulas TWT necessitam de um número maior de dispositivos de proteção, são menos eficientes, pois possuem um maior consumo de energia e têm custo mais elevado.

O subsistema GCE é composto de conversores de frequência, moduladores/demoduladores, equalizadores de retardo de grupo, filtros e combinadores/divisores de potência.

O subsistema TDMA (Múltiplo acesso por divisão de tempo) faz com que várias estações tenha acesso a um determinado transponder pela transmissão de dados tal que não haja superposição com os que foram transmitidos por outra estação. Isso permite que a mesma frequência seja alocada a todas as estações, desde que não haja superposição.

O subsistema SCPC serve para modular uma portadora de rádio frequência por um único canal de voz. Muito utilizado em estações de baixa capacidade, pois evita um alto custo e ainda permite uma melhor utilização da faixa de rádio frequência.

5.2.3 - Sistema de Energia

O sistema de energia é composto, basicamente, de:

- Subestação
- Subsistema de Controle e Distribuição de Energia
- Subsistema de Emergência
- Subsistema “No-Break”

A subestação é utilizada para abaixar a alta tensão de entrada para que possa ser utilizada para a operação na estação.

O subsistema de Controle e Distribuição de energia distribui a energia para os diversos pontos da estação, além de controlar o sistema de energia (comutação entre a rede e os geradores).

O subsistema de emergência é composto de um ou mais grupos de geradores, cuja finalidade é suprir energia quando ocorre interrupção no fornecimento de energia.

O subsistema “No-Break” é composto de retificadores, conversores DC/AC e barras de baterias e serve para suprir essa transição da energia comercial para a energia de emergência.

5.3 - SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO (Fig.29)

5.3.1 - Sistema de Transmissão

O equipamento *multiplex* forma uma banda básica composta de N canais de voz de 4 KHZ, além dos canais de serviço. Esse sinal passa por uma *pré-ênfase*, sendo em seguida, a banda básica aplicada a um modulador de frequência de faixa larga, onde o desvio de frequência apropriado é estabelecido dependendo do número de canais da portadora a ser transmitida. A portadora modulada aparece então na saída do modulador

na frequência de FI de 70 MHz, passando a seguir pelo filtro de transmissão que determina a faixa de RF a ser transmitida.

O *conversor de subida* é uma unidade dupla de conversão que translada a entrada de 70 MHz para uma primeira FI e então para a frequência apropriada na faixa de 6 GHz (5,925 - 6,425 GHz). Esta frequência é determinada pelo oscilador local. A saída do conversor (em 6GHz) é encaminhada para o *amplificador de alta potência* (HPA - high power amplifier) que provê a amplificação final da portadora a níveis compatíveis com o enlace Terra-Satélite.

A antena da estação terrena é normalmente uma parábola, com diâmetro de 10 a 15 metros, que rastreia o satélite e provê um ganho suficiente para permitir a ligação Terra-Satélite.

5.3.2 - Sistema de Recepção

A portadora transmitida pela estação terrena é recebida pelo satélite que efetua basicamente 3 operações:

- recepção do sinal em 6 GHz mediante receptores de baixo ruído;
- translação do sinal de 6 GHz para a faixa de 4GHz;
- amplificação do sinal da portadora, agora em 4 GHz;

Para transmissão para a Terra. Em sua passagem pelo satélite a portadora recebe ruído térmico (T_s) na recepção e ruído de intermodulação (T_i) na amplificação final.

O sinal transmitido pelo satélite é recebido pela estação terrena de destino por uma antena que rastreia o satélite e que também serve para transmissão. Em seguida este sinal é encaminhado a um *amplificador de baixo ruído* (LNA - low noise amplifier) . O conjunto antena-LNA introduz quase todo ruído na estação receptora. O LNA tem faixa larga de (500 MHz) e amplifica todas as portadoras na faixa de 4 GHz (3,7 - 4,2 GHz). A seleção da portadora desejada é feita no *conversor de descida*, o qual translada essa portadora para a frequência de FI de 70 MHz. Isso é possível selecionando-se convenientemente a frequência do primeiro oscilador local.

A portadora é então demodulada, reproduzindo-se na saída a banda básica composta que foi transmitida, acrescida de ruídos introduzidos no enlace. A banda básica demodulada é então encaminhada ao equipamento multiplex que separa os canais de voz originalmente transmitidos.

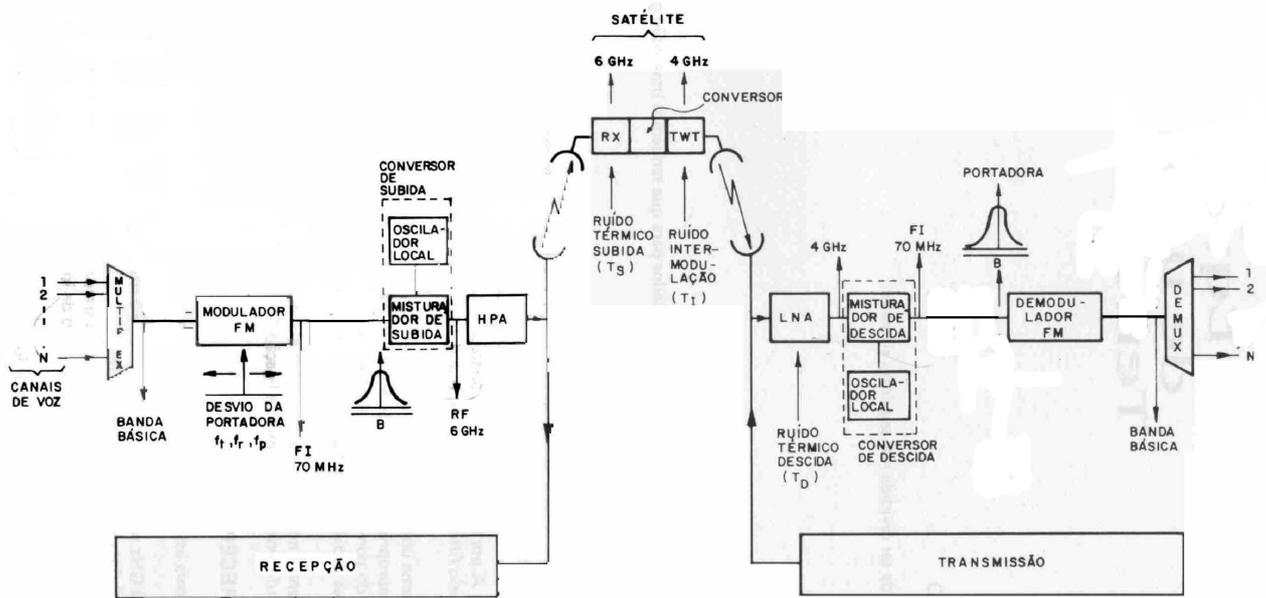


Figura 29: Esquemático dos equipamentos de transmissão e recepção.

CAPÍTULO 6 - NOÇÕES DE CÁLCULO DE ENLACE

O cálculo de enlace na comunicação via satélite, possui uma teoria complexa, envolvendo uma quantidade grande de variáveis. Neste capítulo, é abordado apenas noções para entendimento deste cálculo, trabalhando somente com as variáveis de maior impacto.

Visando subsidiar o tema principal do projeto que são as interferências espaciais entre satélites geo-estacionários.

6.1 - PARÂMETROS DE MAIOR IMPACTO NO CÁLCULO DE ENLACE

Para maior entendimento, a seguir são descritas as variáveis que influenciam com maior intensidade no cálculo de enlace. Sendo estas: a relação sinal-ruído do sinal de interesse (C/N), a EIRP, o ruído térmico, a figura de mérito da antena receptora ou o G/T , o ruído de intermodulação e o ruído causado por interferências.

6.1.1 - C/N

É a relação sinal-ruído entre o sinal de interesse modulado e o ruído referente a largura de banda de sinal, onde C é referente à potência da portadora modulada (EIRP – perdas do enlace) e N a potência do ruído térmico.

Vale ressaltar que a relação sinal-ruído de um sinal analógico em banda básica, é expressa por S/N e possui um valor maior do que a relação C/N . Como no enlace de comunicação via satélite o sinal está modulado, a relação sinal-ruído a ser trabalhada é o C/N .

6.1.2 - EIRP (Effective Isotropic Radiation Power)

A potência isotrópica efetivamente radiada mais conhecida como EIRP, é basicamente toda a potência do sinal medido na saída de uma estação transmissora, já levando em consideração os ganhos e as perdas do sistema de transmissão. A EIRP é diretamente proporcional a potência do amplificador e ao ganho de transmissão da antena, sendo este também diretamente proporcional ao seu diâmetro.

$$EIRP = POT_{amp} - PERDAS + G_{ant}$$

(Equação 15: EIRP)

Onde:

POT_{amp} – Potência do amplificador de transmissão (dBm ou dBW).

$PERDAS$ – Perdas entre o amplificador e a antena (dB).

G_{ant} – Ganho transmissão da antena (dB).

6.1.3 - Ruído Térmico

É o ruído gerado por todo condutor, provocado pelo movimento aleatório dos seus elétrons livres.

Este ruído possui as características de ser diretamente proporcional a temperatura em Kelvin (K) do condutor e possui potência uniforme ao longo de todo o espectro de frequência.

6.1.4 - G/T (Figura de Mérito da Antena)

É o fator de desempenho do sistema de recepção, composto pela antena e o amplificador de baixo ruído (LNA - Low Noise Amplifier).

O G/T é a relação em dB entre o ganho de recepção da antena e o ruído captado e gerado pela antena e seu LNA respectivamente, expresso em temperatura equivalente de ruído em Kelvin - T (K).

A temperatura equivalente de ruído de um equipamento se refere à temperatura real que um condutor estaria submetido ao gerar uma potência de ruído igual a potência de ruído que este equipamento gera.

$$\frac{G}{T} = \frac{G}{T_{ant} + T_{lna}} \quad \left(\frac{dB}{K} \right)$$

(Equação 16: Relação G/T)

Onde:

T_{ant} - Temperatura equivalente de ruído da antena (K).

T_{lna} - Temperatura equivalente de ruído do LNA (K).

Como a atenuação espaço livre é alta devido a grande distância entre o satélite e a Terra, os sinais recebidos, tanto pela antena do satélite quanto pela antena da estação terrena receptora, possuem níveis de potência muito baixos, próximos ao nível de ruído térmico. Portanto, os ruídos gerados pelos equipamentos de recepção se tornam relevantes, uma vez que estes necessariamente possuem níveis mais altos do que o ruído térmico.

Os amplificadores convencionais são grandes geradores de ruído, e portanto não podem ser utilizados na recepção de sinais de satélite, pois o ruído gerado por estes certamente ultrapassariam os níveis de potência do próprio sinal recebido. Porém como é necessário o uso de amplificadores especiais que geram baixos níveis de potência de ruído, utiliza-se o LNA.

Neste cenário de recepção de sinais muito próximos dos níveis de ruído, para avaliar se um sistema de recepção é adequado ou não, deve-se considerar além de seu ganho, o ruído que ele gera, ou seja, a sua relação G/T, diferentemente do sistema de transmissão onde somente o seu ganho é avaliado, pois possuem níveis de potência de transmissão muito maiores que os níveis de ruído gerados pelo próprio sistema de transmissão.

Desta forma, um bom sistema de recepção possui uma relação G/T elevada. Pode-se notar então, que o diâmetro da antena não é o único fator determinante para o dimensionamento do sistema de recepção, cabendo ao LNA um importante papel para o desempenho deste sistema. Como existem LNAs com diversas temperaturas equivalente de ruído, podemos combinar diâmetros diferentes de antenas com temperaturas equivalentes de ruído de LNAs para obtenção de um mesmo G/T.

6.1.5 - Ruído de Intermodulação

É o ruído provocado pela não linearidade da curva de transferência do amplificador do transponder.

Ao inserir mais de dois sinais em um amplificador não-linear, na saída teremos seus harmônicos e as combinações dos harmônicos chamados de produto de intermodulação.

Como no transponder do satélite são amplificados muitos sinais, os produtos de intermodulação são tão numerosos que ocupam toda a faixa de resposta do transponder, se comportando como um ruído.

Este ruído é diretamente proporcional à quantidade e a potência dos sinais injetados no transponder. Sinais de potências muito elevadas provocam níveis de intermodulação elevados, degradando a relação C/N do sinal, devido ao aumento excessivo da potência de ruído (N), embora o nível de potência o sinal (C) aumente um pouco.

Outro aspecto nocivo do ruído de intermodulação (Figs.30 e 31) é o consumo de parte da potência total do transponder, que já é limitado, sendo ideal que toda a potência do transponder seja destinada à amplificação dos sinais de interesse.

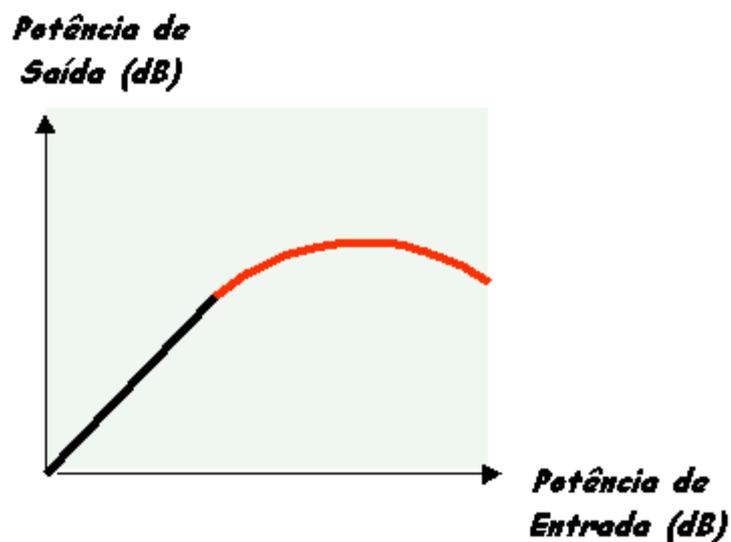


Figura 30: Não linearidade do ruído de intermodulação

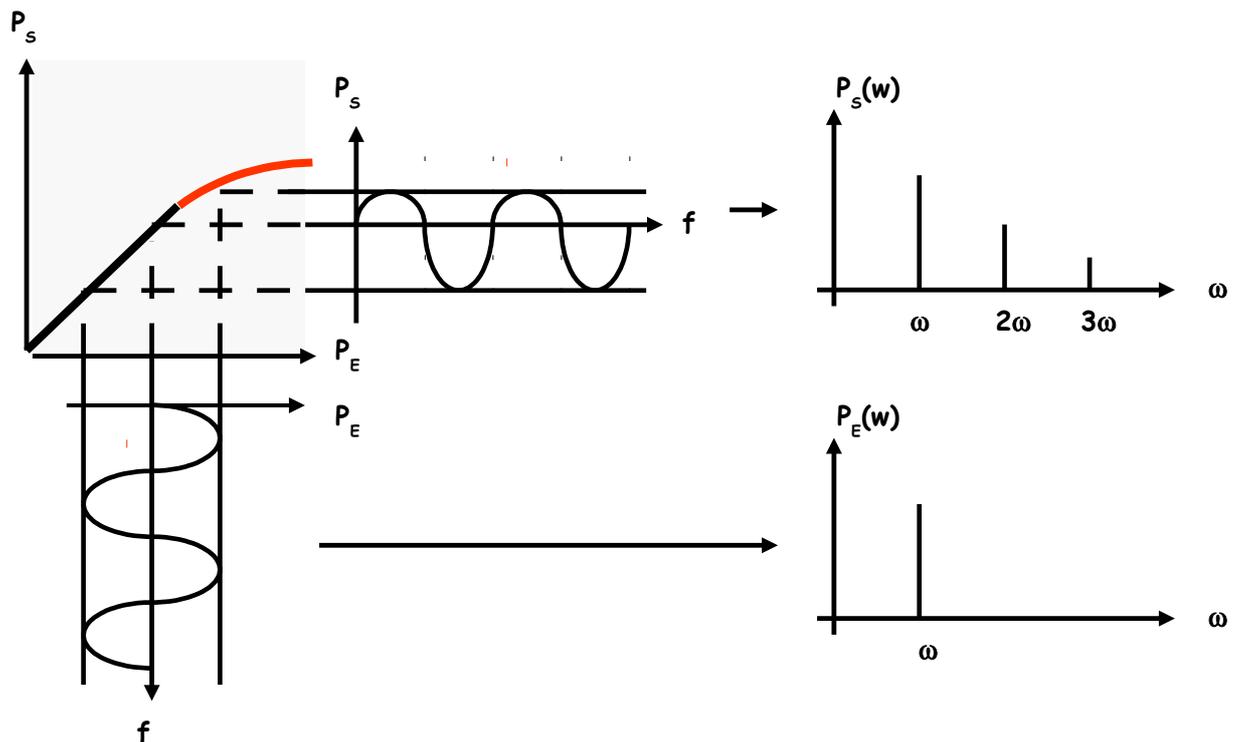


Figura 31: Distorção Harmônica para injeção de apenas um sinal

6.1.6 - Ruído de Interferências

É a parcela de sinais indesejáveis de outros enlaces satélite ou de outros sistemas de telecomunicações que compartilham o espectro de frequência autorizado pela UIT. A UIT regulamenta quais são os níveis máximos que um sistema pode interferir em outro. Este ruído de interferência é quantificado como percentuais do ruído total do enlace, como por exemplo, no caso hipotético abaixo:

- 10 % para interferência terrestre
- 20 % para interferência espacial
- 20 % para interferência de co-transponder
- 5 % para ruídos gerados pela própria estação terrena.

Para fins de cálculo de enlace, estes percentuais do ruído total são somados, importando apenas o percentual total que no exemplo anterior é 55 %. Portanto neste exemplo, o maior nível de potência de interferência admissível no enlace é 55 % do ruído total do enlace. Isto significa que a relação C/N de um sinal neste enlace satélite, é 55 % maior do que a necessária, para evitar que seja degradada a qualidade desejada deste sinal.

Estas interferências ocorrem devido às características do diagrama de radiação das antenas parabólicas, que irradiam potência também em outras direções além da direção de apontamento.

6.1.6.1 - Ruído de Interferência Terrestre(Fig.32)

Ruído referente à interferência dos enlaces de rádio-visibilidade que operam na mesma faixa de frequência do satélite.

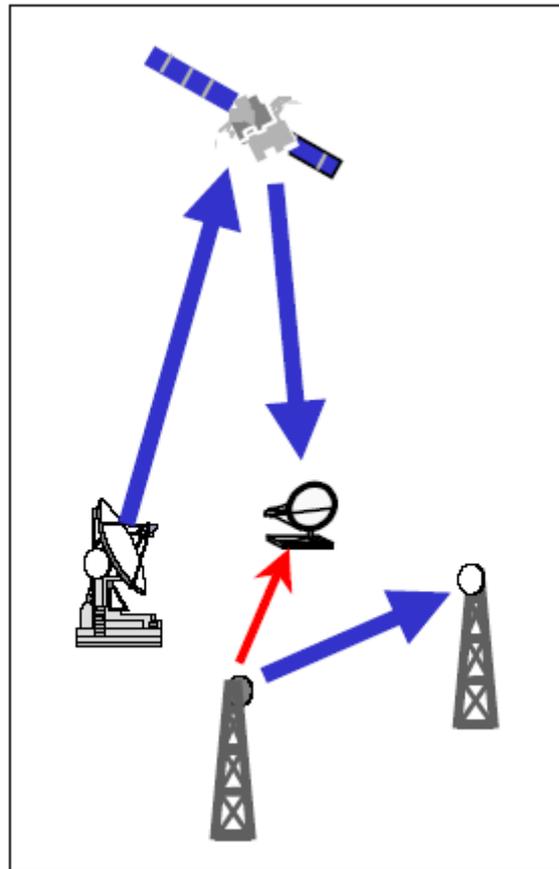


Figura 32: Interferência de Outros Sistemas no Sistema Satélite.

6.1.6.2 - Ruído de Interferência Espacial(Fig.33)

Este ruído é relativo à interferência de outros enlaces satélites no enlace interferido, podendo ocorrer no enlace de subida ou de descida.

a) Interferência Espacial no Enlace de Subida

A estação terrena [A] que transmite sinais para o satélite [X], transmite parte deste sinal para o satélite [Y], que translada este sinal interferente para frequência de descida, o amplifica e transmite-o para a estação terrena [B].

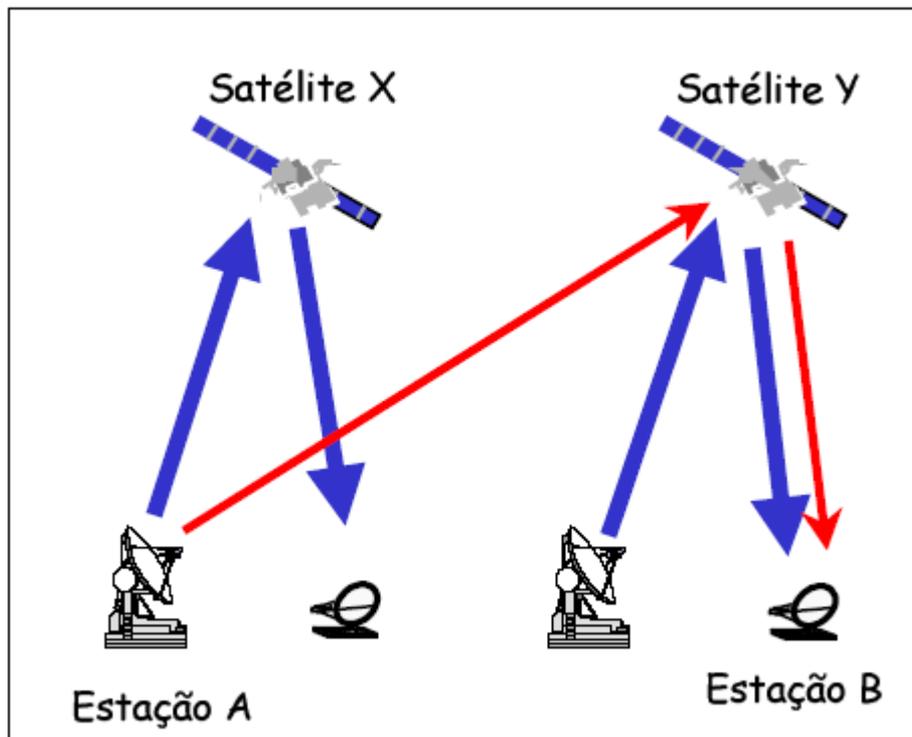


Figura 33: Interferência Espacial no Enlace de Subida.

b) Interferência Espacial no Enlace de Descida(Fig.34)

O satélite [X] que retransmite sinais para a estação terrena [A], transmite parte destes sinais para a estação terrena [B].

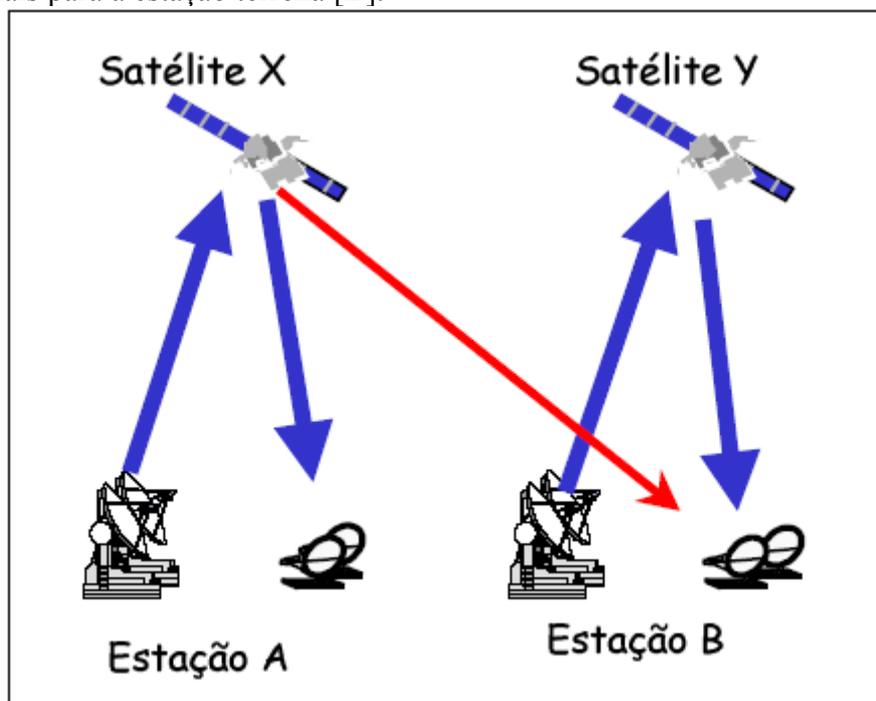


Figura 34: Interferência Espacial no Enlace de Descida.

c) Interferência de Co-Transponder

É parte da potência do sinal transmitido na polarização oposta, provocado pela não isolamento perfeita entre as polarizações de transmissão e recepção das antenas do sistema.

d) Interferência Gerada Pela Própria Estação terrena

É todo ruído gerado pelos equipamentos de transmissão e recepção das estações terrenas do enlace.

6.2 - OBJETIVO DO CÁLCULO DE ENLACE

O cálculo de enlace tem como objetivo determinar a EIRP da estação transmissora, de forma que o enlace atinja o desempenho desejado. Este desempenho é medido na estação receptora.

Com o cálculo de enlace é possível verificar se o amplificador e o diâmetro de antena transmissora são suficientes, ou são excessivos para o bom funcionamento do enlace. Desta mesma forma a mesma verificação é realizada com relação ao diâmetro e o LNA da estação terrena receptora, ou seja, o G/T desta estação.

Porém, o bom desempenho do enlace não depende apenas de EIRP e G/T de grandes valores. Pois além de aumentar o custo do projeto, EIRPs excessivas provocam aumentos diretos no nível do ruído de intermodulação (gerado no amplificador do transponder), degradando a relação C/N total do enlace.

É necessário minimizar ao máximo a potência do ruído de intermodulação, pois esta consome a potência do amplificador diminuindo a potência disponível para amplificação dos sinais de interesse. Em alguns casos a potência de ruído de intermodulação é tão alta que inviabiliza o estabelecimento do enlace.

Deve haver, contudo, um compromisso de cálculo para o estabelecimento do enlace, uma vez que níveis muito baixos de EIRP podem ser insuficientes para garantir uma relação C/N para o estabelecimento do enlace. Neste caso o nível de potência de ruído total do enlace pode ser próximo ou maior do que o nível de potência do sinal modulado.

Da mesma forma, G/T insuficientes, podem inviabilizar o enlace satélite, devido a limitação da EIRP transmitida pelo satélite causado pela limitação de energia a bordo imposta pelos painéis solares do satélite. Um enlace de comunicação via satélite é composto na verdade por dois enlaces. O primeiro chamado de enlace de subida ou up-link, referente ao sentido Terra-Satélite e o segundo de enlace de descida ou down-link, referente ao sentido Satélite-Terra(Fig.35).

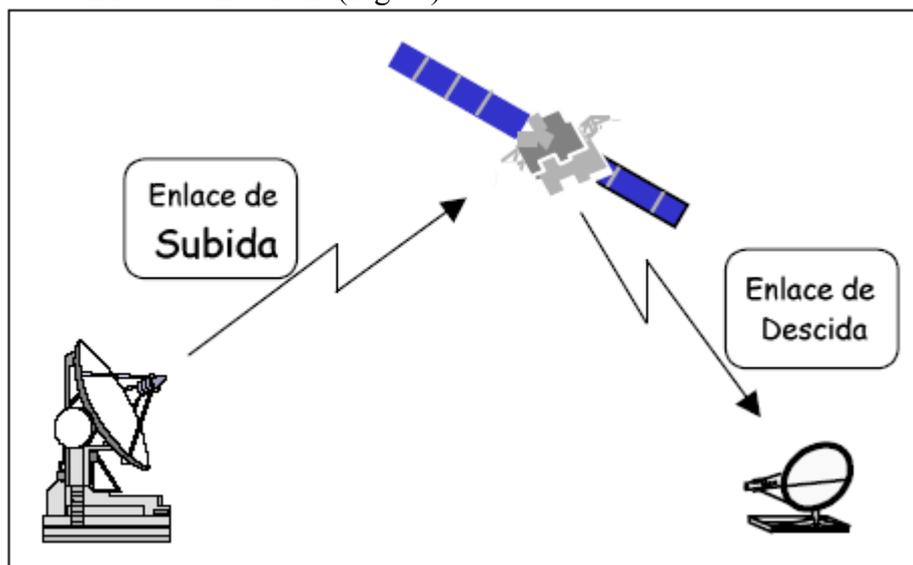


Figura 35: Enlace Satélite Completo

A potência do enlace de descida é dependente da potência do enlace de subida, uma vez que o satélite amplifica o sinal recebido do enlace de subida.

O enlace de comunicação via satélite possui três componentes importantes: o C/N do enlace de subida, o C/N do enlace de descida e o C/N de intermodulação.

O C/N de subida é a relação sinal-ruído medida na saída do LNA do satélite, enquanto o C/N de descida é medido na saída do LNA da estação receptora. O C/N de intermodulação é medido na saída do amplificador do transponder do satélite.

O C/N total do enlace é a relação sinal-ruído, determinada pela potência de sinal recebido na estação receptora e o somatório dos ruídos de todo o enlace.

$$\frac{C}{N}_{total} = \frac{C}{N_{up} + N_{intermod} + N_{down}}$$

$$\frac{C}{N}_{total} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{C}{N}_{up}} + \frac{1}{\frac{C}{N}_{intermod}} + \frac{1}{\frac{C}{N}_{down}}}$$

(Equação 17: C/N)

Basicamente para obter um bom dimensionamento de enlace, o C/N total deve ser igual ao C/N requerido pela estação receptora.

Quando a potência do enlace de subida é baixa, a relação C/N de descida é muito pequena, influenciando com maior intensidade no valor do C/N total. Já, quando a potência do enlace de subida é excessiva, o C/N de intermodulação é muito pequeno, influenciando em maior intensidade no valor do C/N total (fig.36).

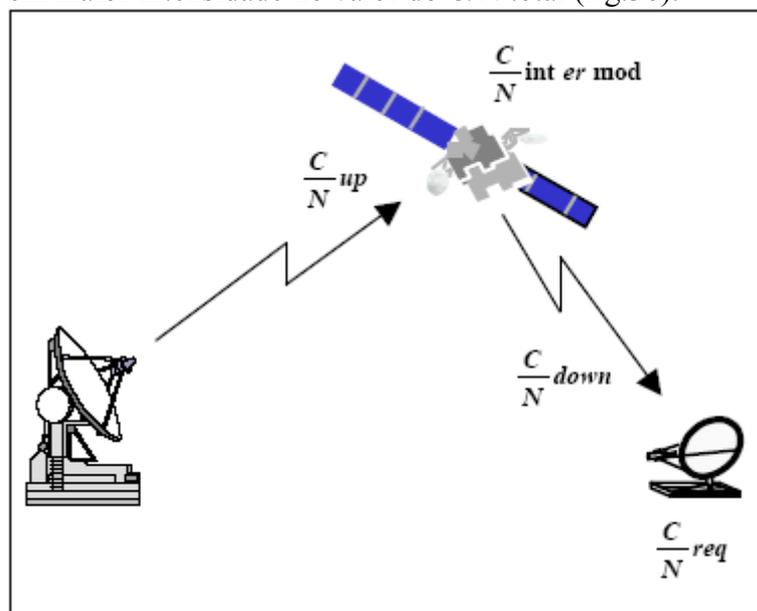


Figura 36: Relações C/N de um Enlace Satélite.

CAPÍTULO 7 – INTERFERÊNCIA

Como foi abordado no capítulo três, a órbita geo-estacionária possui características restritivas onde cada satélite possui uma posição orbital para evitar que a cobertura de um interfira na do outro.

O compartilhamento de uma posição orbital é possível, caso os satélites operem em faixas de frequência diferentes ou ainda cubram regiões muito afastadas uma da outra. Porém, com o crescente número de novos posicionamentos de satélites geo-estacionários na órbita, e conseqüentemente o seu congestionamento, o espaçamento em graus entre as posições orbitais necessitam ser cada vez menores.

Apesar de sua alta diretividade, o diagrama de radiação das antenas parabólicas, tanto as antenas a bordo dos satélites quanto as das estações terrenas, não é suficientemente estreito para evitar que parte da energia seja irradiada fora da direção de seu apontamento.

No caso das antenas das estações terrenas, esta irradiação indesejada interfere em satélites cuja posição orbital é muito próxima do posição do satélite para o qual esta estação terrena está apontada. Da mesma forma, a irradiação indesejada das antenas localizadas a bordo do satélite, interferem nas estações terrenas apontadas para satélites cuja posição orbital é muito próxima do satélite interferente.

Com isso a cada novo posicionamento de satélite em uma posição orbital, é necessário a realização de um estudo de interferência espacial entre o novo satélite e o já existente, de forma que sejam tomadas as medidas cabíveis para não haver interferência entre eles. Na verdade, o estudo gira em torno da proteção de sistema já existente e o sistema a ser implantado é que deverá ser ajustado para que tais interferências não sejam causadas por ele.

Este estudo é conhecido como coordenação espacial e está baseado nas potências transmitidas e recebidas de sinais, em função da envoltória do diagrama de irradiação das antenas parabólicas de ambos os sistemas de comunicação via satélite.

Atualmente, a especificação/projeto de um satélite geo-estacionário é totalmente baseado no estudo de coordenação espacial com os satélites mais próximos de sua futura posição orbital. Nesse projeto, em capítulos futuros, irem mostrar exemplos hipotéticos e possíveis soluções para corrigir a interferência.

7.1 - ÂNGULO DE INTERFERÊNCIA

A posição orbital está representada pela sua longitude em graus, que é referenciada ao centro do planeta Terra (geocêntrico). Isto significa que o valor em graus da posição orbital é o ângulo descrito por um satélite, o centro da Terra e o Meridiano de Greenwich.

Da mesma forma, o ângulo β que é o espaçamento entre duas posições orbitais também é geocêntrico e pode ser obtido pela diferença algébrica de seus valores.

Porém, para calcular o ângulo interferente de apontamento de uma antena parabólica, ou seja, o ângulo em que uma antena “enxerga” um outro satélite mesmo não apontada para ele, não utiliza-se o ângulo β , devido ao próprio posicionamento da antena na superfície terrestre. Então o ângulo utilizado é o φ , que está referenciado a superfície da terra e é um ângulo topocêntrico(Fig.37).

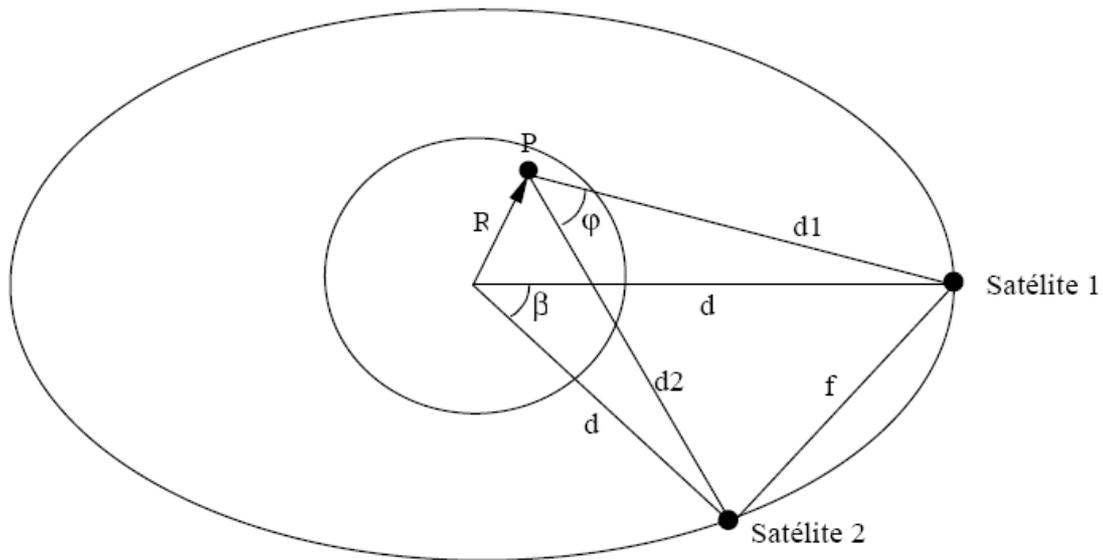


Figura 37: Ângulo Geocêntrico β e Ângulo Topocêntrico φ

7.1.1 - Cálculo de φ

Determinando o ângulo β , e considerando as distâncias d como 42400 km, onde o raio da Terra (R) é 6400 km e a altitude do satélite 36000 km, podemos obter a flecha f pela leis dos co-senos.

$$f = \sqrt{d^2 + d^2 + 2 * d * d * \cos \beta}$$

(Equação 18: Flecha a partir do Ângulo β)

A partir de um ponto P na superfície do globo terrestre, das distâncias d_1 e d_2 (estimadas com base na região de cobertura de interesse), e conhecendo a flecha f , podemos determinar o ângulo φ pela leis dos co-senos.

$$f = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2 * d_1 * d_2 * \cos \varphi}$$

(Equação 19: Flecha a partir do Ângulo φ)

$$\cos \varphi = \frac{f^2 - d_1^2 - d_2^2}{2 * d_1 * d_2}$$

(Equação 20: Cosseno φ)

Dividindo o ângulo φ pelo ângulo β , define-se um fator multiplicativo F .

$$\frac{\varphi}{\beta} = F$$

(Equação 21: Fator Multiplicativo para obtenção de φ através de β)

Para o estudo de coordenação espacial, considerando a situação mais interferente na região que envolve o Brasil, o ângulo β é igual a 2° . Adotando o fator multiplicativo como 1,14, obtêm-se o valor do φ , ou seja:

$$\varphi = 1,14\beta$$

(Equação 22: Relação de φ e β)

7.1.2 - Discriminação de Ganho

O ângulo φ é o ângulo utilizado para calcular o ganho da antena na direção da interferência. Este ganho é obtido pelas equações de ganho de uma antena parabólica descritas no item 4.1.6 (Eq. 9).

A discriminação do ganho da antena é a diferença entre o ganho do feixe principal e o ganho na direção da interferência.

$$DG = G_{m\acute{a}x} - G_{interf}$$

(Equação 23: Discriminação de Ganho)

Onde,

DG – discriminação do ganho da antena (dB)

$G_{m\acute{a}x}$ – Ganho da antena máximo na direção de apontamento (dBi).

G_{interf} – Ganho da antena na direção da interferência (dBi).

Esta discriminação é útil para a determinação da potência de interferência transmitida e recebida pela antena da estação terrena.

7.2 - ISOLAMENTO DE POLARIZAÇÃO

No capítulo três foi abordado que, com o artifício de transmissão de sinais polarizados é possível dobrar a capacidade do satélite em faixa de frequência, uma vez que dois sinais utilizariam a mesma frequência, porém com polarizações opostas, estariam isolados e não haveria interferência entre eles.

Neste item, é visto que este isolamento não é infinito e portanto se o sinal da polarização oposta tem um nível de potência muito elevado pode haver interferência.

Esta imperfeição no isolamento de polarização é causada pela antena parabólica do sistema de comunicação via satélite e varia de antena para antena. As antenas mais baratas e de menor porte possuem valores de isolamento baixos, enquanto que as de grande porte possuem valores de polarização altos.

Este valor de isolamento de polarização é expresso em dB e significa que se dois sinais de mesma potência, porém com polarizações opostas, forem recebidos por uma antena apta para receber apenas em uma das polarizações, o sinal da polarização oposta ao da antena, será medido na saída desta antena com um valor abaixo do outro sinal.

No caso do estudo de coordenação espacial, o valor de isolamento entre polarizações opostas é de 15 dB, e é referente ao valor da pior antena do sistema de comunicação via satélite.

Abaixo estão relacionados os isolamentos de polarização utilizados no estudo de coordenação espacial.

Tabela 7: Valores de Isolamento entre Polarizações.

Isolação de Polarização (dB)	Polarização Vertical	Polarização Horizontal	Polarização Circular Direita	Polarização Circular Esquerda
Polarização Vertical	0	15	3	3
Polarização Horizontal	15	0	3	3
Polarização Circular Direita	3	3	0	15
Polarização Circular Esquerda	3	3	15	0

Repare que o valor de isolamento entre polarizações que não são opostas, é de 3 dB. Isto acontece porque a polarização circular é composta pela oscilação das componentes vertical e horizontal do campo elétrico e quando recebido por uma antena de polarização ortogonal, só é recebido ou a componente vertical ou a horizontal, ou seja, metade das componentes. Da mesma forma quando um sinal polarizado ortogonalmente é recebido por uma antena de polarização circular, apenas metade da componente vertical ou horizontal é recebida.

7.2.1 - Discriminação de Polarização

A discriminação de polarização é justamente o valor do isolamento entre as polarizações dos sistemas de comunicação via satélite a serem analisados no estudo de coordenação espacial.

7.3 - COBERTURA DO SATÉLITE

Como já foi comentado no capítulo três, o satélite geo-estacionário não cobre uma região com potência uniforme, devido às características do diagrama de radiação da antena parabólica a bordo. A consequência é que esta cobertura se dá em forma de curvas de níveis de potência, onde o maior nível está no centro do apontamento do satélite para região que se deseja cobrir. Os níveis de potência mais altos localizam-se no centro da cobertura e à medida que se afastam do centro os níveis de potência diminuem. (Fig.38)

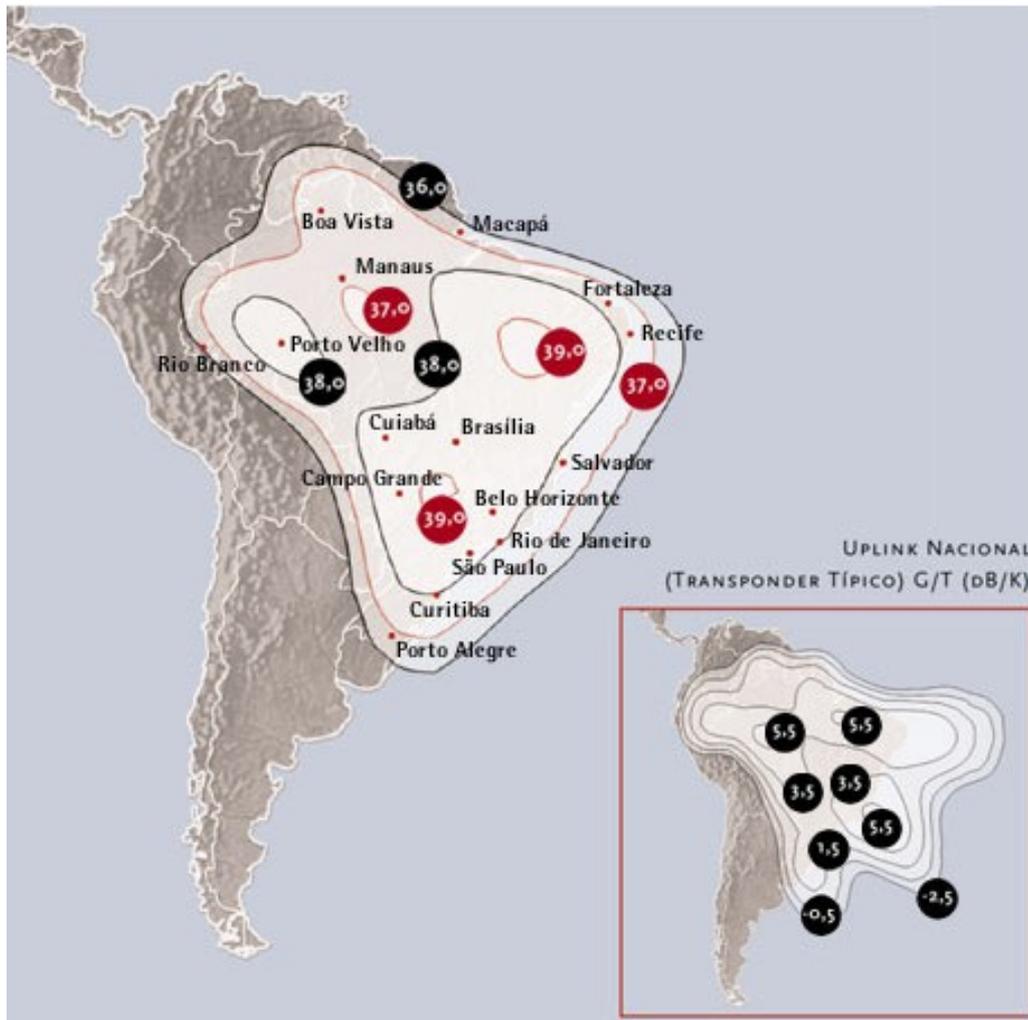


Figura 38: Mapa de Cobertura de Descida do Satélite Brasilsat B1

Cada satélite possui dois tipos de cobertura, uma para o enlace de subida e outra para o enlace de descida.

A cobertura de descida é em função da EIRP do satélite e a de subida em função da densidade de fluxo de saturação do satélite.

7.3.1 - Densidade de Fluxo de Potência de Saturação

Esta densidade de fluxo de Saturação Ψ_{Satur} é a relação entre a potência de recepção e a área efetiva da antena A_{ef} . Esta densidade de fluxo é utilizada como artifício matemático para simplificar as contas de cálculo de enlace, que não será abordado neste estudo. Porém, com o desenvolvimento abaixo se pode equacionar uma forma de obter a potência de recepção na estrada da antena receptora, que será útil para os cálculos do estudo de coordenação espacial que serão descritos no item 6.4.

$$\Psi_{Satur} = \frac{P_R \text{ linear}}{A_{ef}} \xrightarrow{dB} \Psi_{Satur} = P_R - 10 \log A_{ef} \quad (\text{Equação 24: Fluxo de Potência})$$

Sendo:

$$\boxed{A_{ef} = \frac{G_{linear}}{G(1m^2)}} \xrightarrow{dB} \boxed{A_{ef} = G - 10 \log G(1m^2)}$$

(Equação 25: Área Efetiva em Relação ao Ganho.)

$$\boxed{G(1m^2) = \frac{4\pi}{\lambda^2}}$$

(Equação 26: Ganho por m2.)

Onde:

ψ - Densidade de Fluxo de Potência de Saturação (dBW/m²).

$P_{RX linear}$ ou $P_{RX linear}$ – Potência na Recepção da Antena (W).

P_R ou P_{RX} - Potência na Recepção da Antena (dBW).

A_{ef} - Área Efetiva da Antena (m²).

G_{linear} - Ganho da Antena em Escala Linear

G - Ganho da Antena na Escala Logarítmica (dB).

$G(1m^2)$ - Ganho em 1 m².

λ - Comprimento de onda (m)

A fórmula abaixo é utilizada para obter o valor de potência de recepção na entrada da antena do satélite, ou seja, sem considerar o G/T do satélite:

$$\boxed{P_{RX} = \Psi_{Satur} + 10 \log A_{ef_{entrada\ antena}}}$$

$$\boxed{A_{ef_{entrada\ antena}} \equiv \frac{1}{G(1m^2)}} \xrightarrow{dB} \boxed{A_{ef_{entrada\ antena}} \equiv -10 \log G(1m^2)}$$

$$\boxed{P_{RX} = \Psi_{Satur} - 10 \log G(1m^2)}$$

Equação 27: Potência na Entrada da Antena do Satélite

7.3.2 - Vantagem Geográfica

Como a cobertura do satélite possui a característica de curvas de níveis de potência, algumas estações terrenas terão vantagem em relação as outras por estarem localizadas em regiões privilegiadas. Esta relação entre as potências de cobertura devido à localização geográfica da estação terrena é chamada de Vantagem Geográfica (VG) e é expressa em dB.

A VG de valor zero, se refere ao nível de potência que cobre toda a área de interesse satisfatoriamente, sendo os níveis de potência mais altos representados pelas VGs positivas e os mais baixos pelas VGs negativas.

Os mapas de cobertura (Fig.39) expressos em função da vantagem geográfica facilitam a visualização dos níveis de potência que não são satisfatórios para o sistema, no caso os negativos.

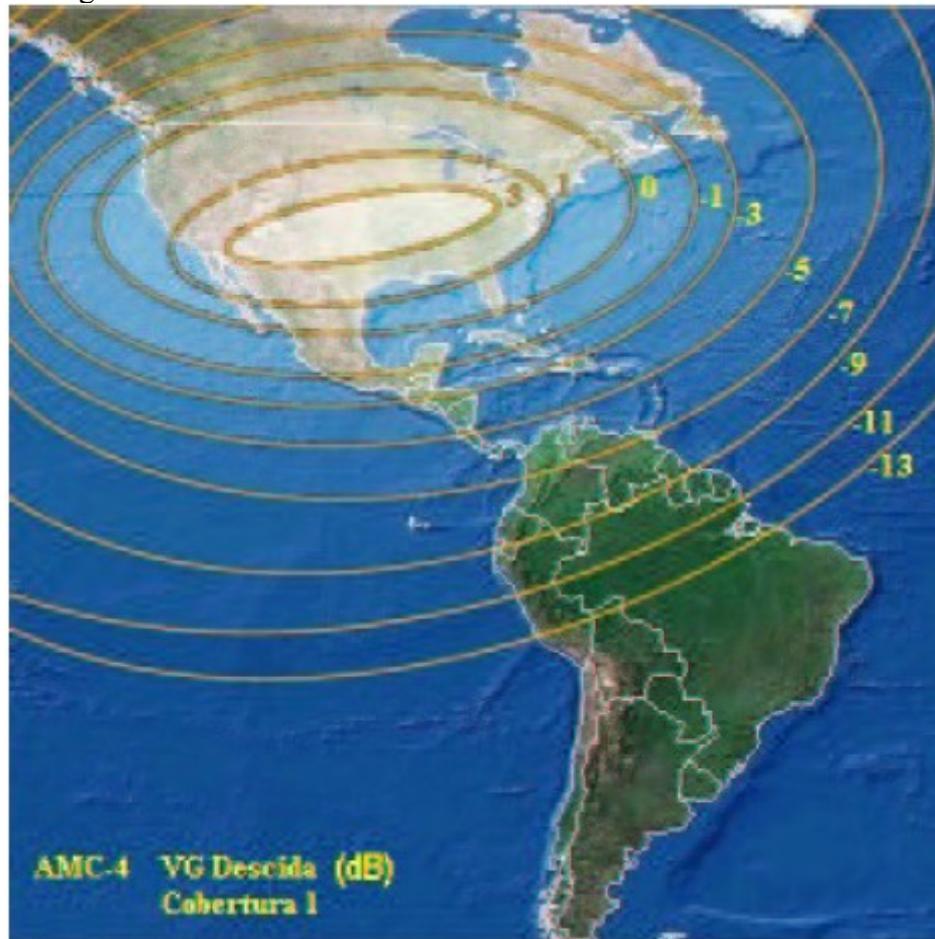


Figura 39: Mapa com as Vantagens Geográficas

7.3.3 - Discriminação de VG

A discriminação de VG (Fig.40) é a diferença algébrica entre a VG de contorno da região de interesse e a VG de maior valor que cobre a região de interferência.

Esta discriminação é útil para a determinação da potência transmitida e recebida pela antena do satélite.

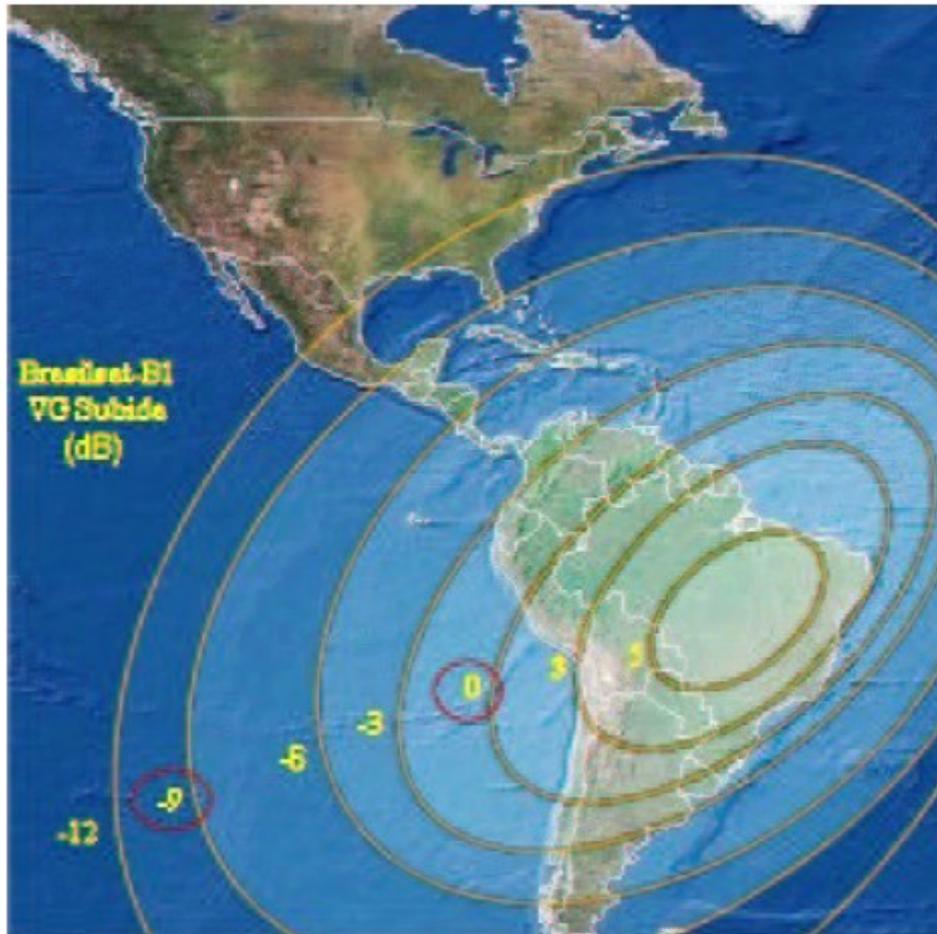


Figura 40: Mapa Discriminação de VG

7.4 - INTERFERÊNCIA ESPACIAL

Como já foi abordado no quinto capítulo, o enlace de comunicação via satélite é composto na verdade por dois enlaces, enlace de subida e o enlace de descida. A antena transmissora de cada enlace é uma fonte de interferência para sistemas de satélites localizados em posições orbitais próximas.

Portanto, o estudo de coordenação espacial deve ser realizado para os dois tipos de enlace.

O objetivo desse estudo é determinar na entrada do sistema de recepção a relação entre a potência do sinal de interesse (C) e a potência da interferência (I), ou seja, a relação C/I , onde C é a potência do sinal interferido e I a potência do sinal interferente.

Porém, é necessário definir um valor limite de C/I para comparar com o C/I medido no sistema de recepção e assim poder avaliar se este C/I medido é suportável pelo sistema interferido ou não.

Este valor limite de C/I é chamado de critério de C/I , onde pela norma da UIT-RREC- S.741-2 é 12,2 dB menor do que o C/N requerido pelo sinal interferido, ou seja, 6 % do C/N do sinal interferido.

$$Cr \frac{C}{I} = \frac{C}{N} + 10 \log(0,06)$$

$$Cr \frac{C}{I} = \frac{C}{N} - 12,2$$

(Equação 28: Critério C/I)

Onde:

 Cr C/I - Critério C/I (dB)

C/N- Relação sinal-ruído do sinal interferido (dB)

O estudo de coordenação espacial para o enlace de subida corresponde a comparação do C/I na entrada da antena do satélite interferido com o critério de C/I adotado, onde o C é a potência do sinal transmitido pela estação B1 e o I é a potência transmitida pela estação A1. (Figs.41 e 42)

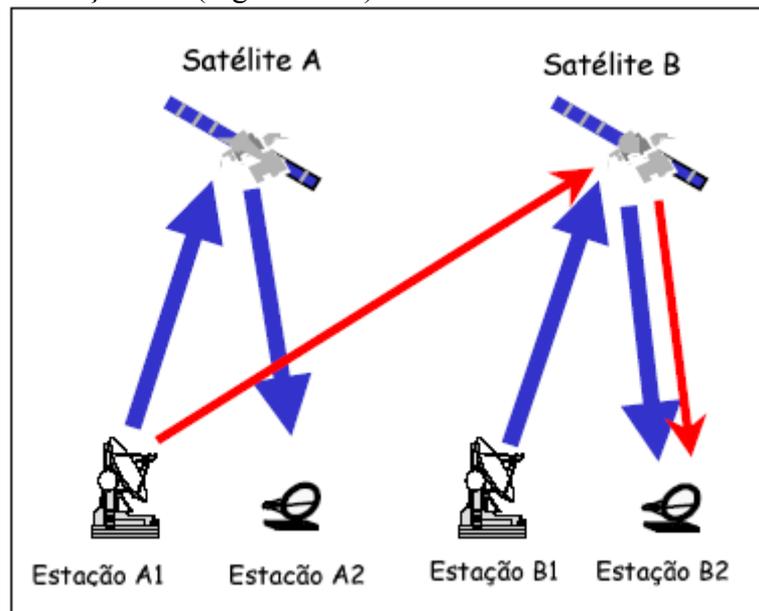


Figura 41: Interferência Espacial no Enlace de Subida.

O estudo de coordenação espacial para o enlace de descida corresponde a comparação do C/I na entrada da antena da estação terrena interferida com o critério de C/I adotado, onde C é a potência transmitida pelo satélite B e I é a potência transmitida pelo satélite A.

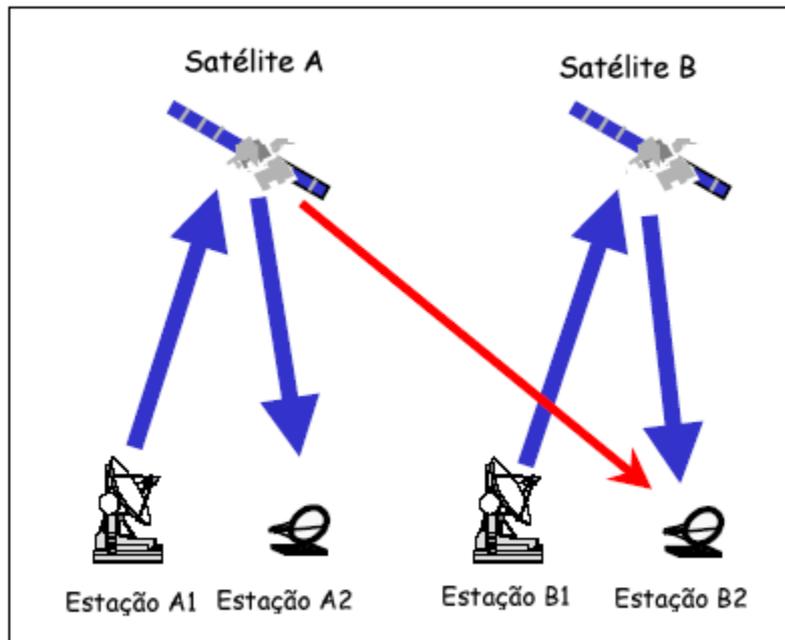


Figura 42: Interferência Espacial no Enlace de Descida.

7.4.1 - Considerações para a Determinação do C e do I

As operadoras de satélite podem trafegar em seus satélites, sinais com diversas características e conseqüentemente com diversos níveis de potência. Isto significa que em condições reais de interferência espacial entre dois sistemas de comunicação via satélite, tanto os sinais interferentes quanto os sinais interferidos, podem assumir quaisquer valores, tornando complexo a determinação da pior relação C/I.

Portanto no estudo de coordenação espacial, a pior relação C/I é determinada pelo máximo sinal interferente e pelo mínimo sinal interferido. O máximo sinal interferente é calculado como se este sinal estivesse ocupando toda faixa de frequência e toda a potência disponível em um transponder, ou seja, toda a capacidade de um transponder. O mínimo sinal interferido é uma fração do máximo sinal interferente, correspondente ao sinal de menor banda de frequência que trafega no satélite interferido. A determinação da menor banda de sinal interferido fica a critério da operadora do satélite interferido.

Nos próximos itens, estão descritos os cálculos para o estudo de Coordenação Espacial.

7.4.2 - Interferência Espacial no Enlace de Subida(Fig.43)

Este tipo de interferência é causado pela característica do diagrama de radiação da antena da estação transmissora A1, que possui ganhos na direção do satélite B, e pela característica do diagrama de radiação da antena de recepção a bordo do satélite B, que possui ganho na direção da estação transmissora A1.

A relação C/I é medida na entrada da antena receptora a bordo do satélite B, onde *C* é a potência oriunda da estação B1 e *I* a potência oriunda da estação A1.

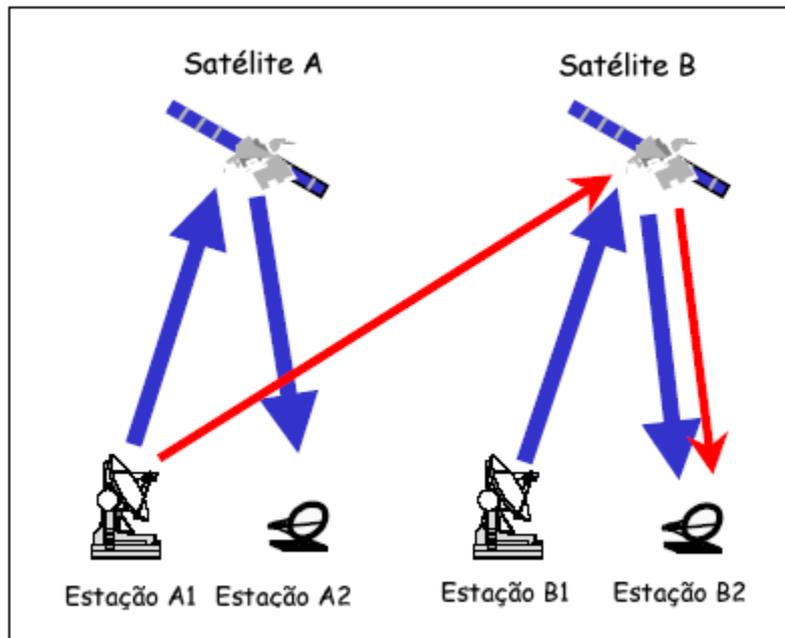


Figura 43: Interferência Espacial no Enlace de Subida.

7.4.2.1 - Cálculo de C da Relação C/I de subida

- a) Determinação do C:

$$EIRP_{B1} = \Psi_{SatB} - 10 \log G(1m^2) + A_{0S}$$

(Equação 29: EIRP da Estação B1)

$$C = EIRP_{B1} - A_{0S}$$

(Equação 30: C da relação C/I de Subida)

Onde:

$EIRP_{B1}$ – EIRP de transmissão da estação terrena B1 (dBW)

Ψ_{SatB} – Fluxo de saturação do satélite B (dBW/m²)

$G(1m^2)$ – Ganho em 1m²

A_{0S} – Atenuação espaço livre do enlace de subida (dB)

C – Potência do sinal de interesse na entrada da antena do satélite B (dBW)

7.4.2.2 - Cálculo de I da Relação C/I de Subida

- a) Determinação do ângulo φ :

$$\varphi = 1,14 \beta$$

(Equação 31: φ em relação a β)

Onde:

φ – Ângulo topocêntrico

β – Ângulo geocêntrico

b) Determinação da discriminação do ganho:

$$DG_S = G_{\text{máxT}} - G(\varphi)_T$$

(Equação 32: Discriminação do Ganho na Subida)

Onde:

DG_S – Discriminação de subida do ganho da antenna (dB)

$G_{\text{máxT}}$ – Ganho máximo de transmissão da antenna (dBi)

$G(\varphi)_T$ – Ganho de transmissão na direção da interferência obtido pelas equações do capítulo quatro (dBi)

c) Discriminação de polarização (DP)

Obtida pela Tabela 7, item 7.2.

d) Discriminação da Vantagem Geográfica

$$DVG_S = VG_{\text{Scontorno}} - VG_{\text{Smais interferente}}$$

(Equação 33: Discriminação da VG de Subida)

Onde:

DVG_S – Discriminação de vantagem geográfica de subida (dB)

$VG_{\text{Scontorno}}$ – Maior vantagem geográfica de subida que contorna a região de interesse do satélite B (dB).

$VG_{\text{Smais interferente}}$ – Maior vantagem geográfica de subida do satélite B na região interferente (dB).

e) Determinação do I:

$$EIRP_{A1(\varphi)} = \Psi_{\text{SaturA}} - 10 \log G(1m^2)$$

(Equação 34: EIRP da Estação A1)

$$I = EIRP_{A1(\varphi)} - A_{OS}$$

(Equação 35: I da relação C/I de Subida)

Onde:

$EIRP_{A1(\varphi)}$ – EIRP de transmissão da estação terrena A1 na direção do satélite B (dBW)

Ψ_{SaturA} – Fluxo de saturação do satélite A (dBW/m²)

$G(1m^2)$ – Ganho em 1m²

A_{OS} – Atenuação espaço livre do enlace de subida (dB)

I – Potência do sinal interferente na entrada da antenna do satélite B (dBW)

7.4.2.3 - Cálculo de C/I de Subida

a) Definição do critério de C/I

Definido no item 7.4.

b) Cálculo final do C/I de subida

$$\frac{C}{I}_{sub} = C - I - 10 \log \left(\frac{BW_{SatB}}{BW_{SatA}} \right)$$

(Equação 36: C/I de Subida)

Onde:

C – Potência do sinal de interesse na entrada da antena do satélite B (dBW)

I – Potência do sinal interferente na entrada da antena do satélite B (dBW)

BW_{SatB} – Largura de banda do sinal interferido que trafega pelo satélite B (kHz)

BW_{SatA} – Largura de banda do sinal interferente que trafega pelo satélite A (kHz)

7.4.3 - Interferência Espacial no Enlace de Descida (Fig.44)

Este tipo de interferência é causado pela característica do diagrama de radiação da antena do satélite A, que possui ganho na direção da estação terrena B2, e pela característica do diagrama de radiação da antena da estação terrena B2, que possui ganho na direção do satélite A^a

A relação C/I é medida na entrada da antena receptora da estação terrena B2, onde C é a potência oriunda do satélite B e I a potência oriunda do satélite A.

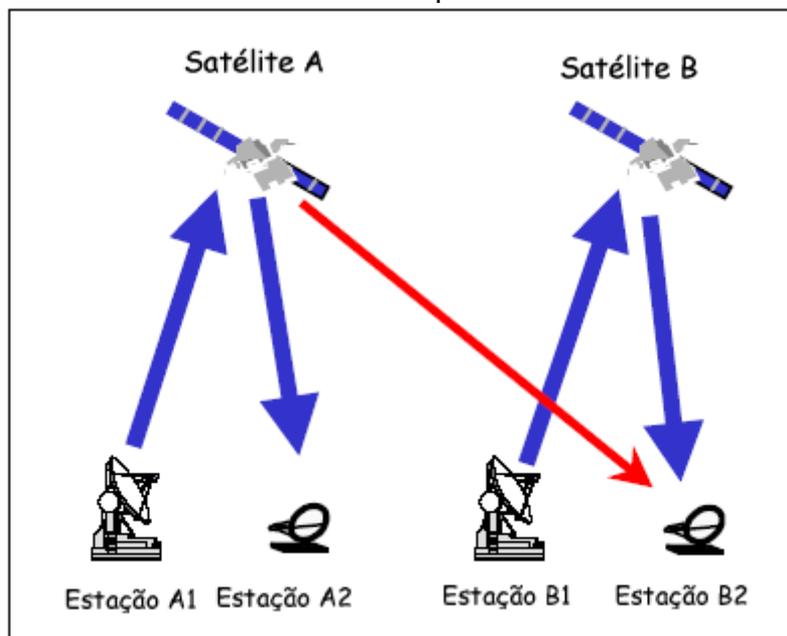


Figura 44: Interferência Espacial no Enlace de Descida

7.4.3.1 - Cálculo de C da relação C/I de Descida

$$C = \text{EIRP}_{\text{satB}} - A_{0D}$$

(Equação 37: C da Relação de C/I de Descida)

Onde:

C – Potência do sinal de interesse na entrada da antena da estação terrena B2 (dBW)

$\text{EIRP}_{\text{satB}}$ – EIRP máxima transmitida pelo satélite B.

A_{0D} – Atenuação espaço livre do enlace de descida.

7.4.3.2 - Cálculo de I da Relação C/I de Descida

a) Discriminação de Vantagem Geográfica do Satélite A:

$$DVG_D = VG_{D\text{contorno}} - VG_{D\text{mais interferente}}$$

(Equação 38: Discriminação da VG de Descida)

Onde:

DVG_D – Discriminação de vantagem geográfica de descida (dB)

$VG_{D\text{contorno}}$ – Maior vantagem geográfica de descida que contorna a região de interesse do satélite A (dB)

$VG_{D\text{mais interferente}}$ – Maior vantagem geográfica de descida do satélite A na região interferente (dB).

b) Determinação do Ângulo φ :

$$\varphi = 1,14 \beta$$

(Equação 39: φ em relação a β)

Onde:

φ – Ângulo topocêntrico

β – Ângulo geocêntrico

c) Determinação da discriminação do ganho:

$$DG_D = G_{\text{máxR}} - G(\varphi)_R$$

(Equação 40: Discriminação do Ganho na Descida)

Onde:

DG_D – Discriminação do ganho da antena de descida (dB)

$G_{\text{máxR}}$ – Ganho máximo de recepção da antena (dBi)

$G(\varphi)_R$ – Ganho de recepção na direção da interferência obtido pelas equações do capítulo quatro (dBi)

d) Discriminação de Polarização (DP)
Obtida pela Tabela 7, item 7.2.

e) Determinação do I:

$$EIRP_{\text{satA}(\varphi)} = EIRP_{\text{satA}} - DVG_D - DG_R - DP$$

(Equação 41: EIRP do Satélite A)

$$I = EIRP_{\text{satA}(\varphi)} - A_{0D}$$

(Equação 42: I da Relação C/I de Descida)

Onde:

$EIRP_{\text{satA}}$ – EIRP max transmitida pelo satélite A na direção da estação terrena A2 (dBW)

$EIRP_{\text{satA}(\varphi)}$ – EIRP de transmissão do satélite A na direção da estação terrena B2 (dBW)

A_{0D} – Atenuação espaço-livre do enlace de descida (dB)

I – Potência do sinal interferente na entrada da antena da estação terrena B2 (dBW)

7.4.3.3 – Cálculo de C/I de Descida

a) Definição do Critério de C/I

Definido no item 7.4.

b) Cálculo Final do C/I de Descida

$$\frac{C}{I}_{desc} = C - I - 10 \log \left(\frac{BW_{\text{SatB}}}{BW_{\text{SatA}}} \right)$$

(Equação 43: C/I de Descida)

Onde:

C – Potência do sinal de interesse na entrada da antena da estação terrena B2. (dBW)

I – Potência do sinal interferente na entrada da antena da estação terrena B2 (dBW).

BW_{SatB} – Largura de banda do sinal interferido que trafega pelo satélite B (kHz)

BW_{SatA} – Largura de banda do sinal interferente que trafega pelo satélite A (kHz)

7.4.4 - Cálculo do C/I Total

O C/I total corresponde a soma algébrica do C/I de subida e o C/I de descida. Descrevendo a relação sinal-interferência total para um enlace unidirecional:

$$\frac{C}{I}^{total} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{C}{I}^{sub}} + \frac{1}{\frac{C}{I}^{desc}}}$$

(Equação 44: C/I Total)

CAPÍTULO 8 – APRESENTAÇÃO DA TABELA DE CÁLCULOS

A planilha apresentada neste capítulo é utilizada no estudo de posicionamento de novos satélites, sem que estes venham a interferir nos sistemas satélites já existentes ou ser interferido por eles.

Abaixo se pode observar esta planilha.

Tabela 8 : Planilha Coordenação Espacial

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	BRASILSAT1
Posição Orbital (°W)	70
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 1
Posição Orbital (°W)	72
Polarização	H

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-11
Discriminação de Subida (dB)	11

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-9
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	9

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	1,8
Gmax (dBi)	35,304
G(Phi) (°)	27,686
Discriminação G(Phi) (dB)	7,618

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	1,8
Gmax (dBi)	39,181
G(Phi) (°)	20,583
Discriminação G(Phi) (dB)	18,5980

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	40
EIRPsat (dBW)	10
Largura de Banda (kHz)	100
Freqüência Downlink(MHz)	4000
Freqüência Uplink(MHz)	6225
Translação de Freqüência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	75
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	0

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	17,181
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	-5,019
Percentual (%)	19,1382

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	20,161
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	-2,039
Percentual (%)	9,6361

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	15,40
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-6,800
Percentual (%)	28,8

As outras planilhas necessárias para os cálculos se encontram no Anexo A, estas são necessárias, pois apresentam células que são utilizadas nos cálculos realizados pela planilha da figura acima.

A coloração dos campos da planilha obedece aos padrões abaixo:

Tabela 9 : Coloração das Células da Planilha

Ciano	Células de preenchimento.
Verde	Células que possuem cálculos
Verde escuro	Células que apresentam o resultado do cálculo do enlace, quando o valor deste é satisfatório.
Vermelho	Células que apresentam o resultado do cálculo do enlace, quando o valor deste é insatisfatório.
Rosa	Valor do Percentual quando o mesmo é insatisfatório.

Os campos presentes na planilha estão descritos a seguir:

Satélites Interferido e Interferente:

- a) *Nome do Satélite* – Nome dado ao satélite pelo seu proprietário.
- b) *Posição Orbital* – Posição assumida na órbita pelo satélite estudado.
- c) *Polarização* – Forma que o sistema está polarizado, a polarização pode ser: ortogonal (horizontal e/ou vertical) ou circular (circular direita ou circular esquerda). A polarização do sinal é utilizada para isolar sinais que operam com a mesma frequência.

Dados VG de Subida:

- d) *VG de subida que contorna toda a região de interesse deste Satélite (VGs)* – É a maior Vantagem Geográfica de subida que contorna toda a área de interesse do satélite interferido.
- e) *Maior VG de subida deste SAT na região Interferente (VGs)* – Maior Vantagem Geográfica de subida deste satélite na região de interesse do satélite interferente.
- f) *Discriminação de Subida* – Diferença entre a VG de contorno da subida e a VG de subida da ETN.

Dados Antenas Rx e Tx:

- g) *Diâmetro da Antena* – Valor do menor diâmetro que será utilizado no enlace.
- h) *Gmax* – Valor do ganho da antena na direção de apontamento, VG = 0.

- i) $G(\Phi)$ – Valor do ganho da antena na direção da interferência.
 j) *Discriminação G (Phi)* – Diferença entre o $G_{\text{máx}}$ e o $G(\Phi)$.

Dados da Portadora do Satélite Interferido:

- k) *EIRP Tx (dBW)* – Valor da EIRP da portadora de transmissão da estação terrena do satélite interferido.
 l) *EIRPsat (dBW)* – Valor da EIRP da portadora do satélite.
 m) *Largura de Banda (kHz)* – Banda de frequência em kHz ocupada pela portadora transmitida para o satélite.
 n) *Frequência Downlink* – Frequência no enlace de descida.
 o) *Frequência Uplink* – Frequência no enlace de subida, é a frequência de descida acrescida do valor de translação de frequência.
 p) *Translação de Frequência* – Este valor varia de satélite para satélite, onde o mais comum é 2225 MHz, que é a diferença entre as frequências de subida e descida. Para maiores detalhes, ler o capítulo cinco.
 q) *C/N* – Valor mínimo que a relação Sinal/Ruído pode assumir.

Dados VG de Descida:

- r) *VG de descida que contorna toda a região de interesse deste Satélite (VGs)* – É a maior Vantagem Geográfica de descida que contorna toda a área de interesse do satélite interferente.
 s) *Maior VG de descida deste SAT na região interferida (VGs)* – Maior Vantagem Geográfica de subida deste satélite na região de interesse do satélite interferido.
 t) *Discriminação de Subida* – Diferença entre a VG de contorno da subida e a VG de subida da ETN.

Dados da Portadora do Satélite Interferente:

- u) *EIRP Tx (dBW)* – Valor da EIRP da portadora transmitida pela estação terrena do satélite interferente.
 v) *EIRPsat (dBW)* – Valor da EIRP da portadora transmitida pelo satélite.
 w) *Largura de Banda (kHz)* – Banda de frequência em kHz ocupada pela portadora transmitida para o satélite.

Dados Sistema:

- x) *Ângulo Topocêntrico (Phi)* – Ângulo descrito pela posição orbital do satélite interferido, a estação terrena e o satélite interferente.
 y) *Discriminação de Polarização* – É o valor da insolação de polarização ente os dois sistemas de comunicação satélite, os valores desta insolação são originados de acordo com o tipo de polarização de cada satélite e são apresentados na Tabela Discriminação de Polarização que se encontra no Anexo A.

Critério de C/I:

- z) *Percentual Admissível C/I (%)* – Máximo percentual admissível de interferência da relação Sinal/Ruído (C/N) do sinal interferido.
 aa) *Critério de C/I* – Limite mínimo que a relação C/I pode assumir.

Cálculo Downlink:

- ab) *C/I downlink* – Valor da relação Sinal/Interferência (C/I) do enlace de descida do sistema analisado.
- ac) $[C/I \text{ downlink}] - [Critério C/I]$ – Margem de C/I do enlace de descida, ou seja, quantos dB o valor do C/I de downlink é maior ou menor que o critério.
- ad) *Percentual* – Percentual de interferência na relação Sinal/Ruído (C/N) no enlace de descida.

Cálculo Uplink:

- ae) *C/I uplink* – Valor da relação Sinal/Interferência (C/I) do enlace de subida do sistema analisado.
- af) $[C/I \text{ uplink}] - [Critério C/I]$ – Margem de C/I do enlace de subida, ou seja, quantos dB o valor do C/I de uplink é maior ou menor que o critério.
- ag) *Percentual* – Percentual de interferência na relação Sinal/Ruído (C/N) no enlace de subida.

Cálculo Total:

- ah) *C/I total* – Valor da relação Sinal/Interferência (C/I) total (subida e descida) do enlace do sistema analisado.
- ai) $[C/I \text{ total}] - [Critério C/I]$ – Margem de C/I total, ou seja, quantos dB o valor do C/I de uplink e downlink é maior ou menor que o critério.
- aj) *Percentual* – Percentual de interferência na relação Sinal/Ruído (C/N) nos enlaces de subida e descida.

CAPÍTULO 9 – CASOS HIPOTÉTICOS

Para que fosse mostrada a utilização da planilha apresentada no capítulo 8, foram desenvolvidos dois casos hipotéticos. Os satélites interferentes não existem e receberam um nome fantasia. Os satélites interferidos já existem e estão em órbita, onde nas planilhas ilustradas neste capítulo constam os reais dados destes satélites.

Para os estudos de coordenação espacial não há possibilidade de alteração de nenhum dado dos satélites já existentes e toda restrição deve ser adotada somente no satélite novo.

Os problemas e as soluções para o posicionamento dos dois novos satélites estão descritos abaixo.

9.1 – CASO 1 – SATÉLITE BRASILSAT B1 X SATÉLITE HIPO 1

Neste primeiro caso é estudado o posicionamento do novo projeto de satélite HIPO 1 que tem sua posição orbital próxima ao do satélite existente BRASILSAT B1.

Estes satélites cobrem duas regiões distintas: O BRASILSAT B1 cobre o Brasil e o MERCOSUL, enquanto que o HIPO 1 cobre os Estados Unidos.

O satélite HIPO 1 possui as seguintes características:

- Será utilizado para sinais de televisão que ocupam um transponder inteiro. O valor da EIRP máxima de transmissão do sinal de sua estação terrena com VG=0 dB, obrigatoriamente deverá ser 75 dBW. A EIRP máxima de transmissão do satélite deste mesmo sinal será de 35 dBW.

- A empresa que lançará o satélite tem a opção de comprar as posições orbitais 72° W e 74° W, sendo que a posição 72° W é mais barata em 10 bilhões de dólares e conseqüentemente é a posição de maior interesse da operadora deste satélite. Vale ressaltar, que em qualquer projeto o custo é muito importante e por conseqüência, deve-se ao máximo reduzi-lo.

Estudo de coordenação espacial do primeiro caso:

Tabela 10: Planilha de Coordenação Espacial - Brasilsat B1 x HIPO 1

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	BRASILSAT1
Posição Orbital (°W)	70
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 1
Posição Orbital (°W)	72
Polarização	H

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-11
Discriminação de Subida (dB)	11

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-9
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	9

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	1,8
Gmax (dBi)	35,304
G(Phi) (°)	27,686
Discriminação G(Phi) (dB)	7,618
Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	40
EIRPsat (dBW)	10

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	1,8
Gmax (dBi)	39,181
G(Phi) (°)	20,583
Discriminação G(Phi) (dB)	18,5980
Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	75
EIRPsat (dBW)	35

Largura de Banda (kHz)	100
Freqüência Downlink(MHz)	4000
Freqüência Uplink(MHz)	6225
Translação de Freqüência	2225
C / N (dB)	10

Largura de Banda (kHz)	36000
Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	0

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	17,181
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	-5,019
Percentual (%)	19,1382

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	20,161
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	-2,039
Percentual (%)	9,6361

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	15,40
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-6,800
Percentual (%)	28,8

Analisando a tabela 10, verifica-se que, se o sistema novo for posicionado com estas características, não atenderá aos critérios estabelecidos de C/I. As soluções estudadas para o problema procuraram atender também ao critério de se posicionar o satélite com menor custo possível.

Os cálculos realizados no estudo deste caso encontram-se no Anexo B.

9.1.1 - Solução 1 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 1)

O menor diâmetro de antena de transmissão das estações terrenas do satélite HIPO 1 foi alterado para 2,4 m, de forma que a diretividade destas antenas aumente ocasionando um maior estreitamento do lóbulo principal e conseqüentemente diminuindo do ganho na direção da interferência. É importante deixar registrado que quanto maior o diâmetro, maior o custo da antena.

O resultado obtido é apresentado na planilha abaixo:

Tabela 11: Planilha da Primeira Solução - Brasilsat B1 x HIPO 1

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	BRASILSAT 1
Posição Orbital (°W)	70
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 1
Posição Orbital (°W)	72
Polarização	H

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-11
Discriminação de Subida (dB)	11

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-9
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	9

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	1,8

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	2,4

Gmax (dBi)	35,304
G(Phi) (°)	27,686
Discriminação G(Phi) (dB)	7,618

Gmax (dBi)	41,679
G(Phi) (°)	19,957
Discriminação G(Phi) (dB)	21,7220

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	40
EIRPsat (dBW)	10
Largura de Banda (kHz)	100
Freqüência Downlink(MHz)	4000
Freqüência Uplink(MHz)	6225
Translação de Freqüência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	75
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	0

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	17,181
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	-5,019
Percentual (%)	19,1382

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	23,285
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	1,085
Percentual (%)	4,6935

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	16,20
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-6,000
Percentual (%)	24,0

A interferência de uplink foi eliminada com 1 dB de folga, atendendo ao critério de C/I. Mas ainda falta resolver o problema do downlink e do enlace como um todo.

9.1.2 - Solução 2 – Alteração da Vantagem Geográfica

O apontamento do satélite HIPO 1 foi alterado e com isso houve mudança nas VG's, o que acarretou na perda de 1 dB no ganho do satélite em sua região de interesse (Estados Unidos). Porém, houve também perda de 2 dB do ganho do HIPO 1 na região interferida e conseqüentemente também houve um aumento de 1 dB na discriminação de vantagem geográfica de descida.

Como somente com a alteração da VG o sistema ainda se apresentou insatisfatório, o tipo de polarização do satélite HIPO 1 também foi alterado de Polarização ortogonal (no caso a Horizontal) para Polarização Circular (no caso Circular Esquerda).

O resultado obtido é apresentado na planilha abaixo:

Tabela 12: Planilha da Segunda Solução - Brasilsat B1 x HIPO 1

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	BRASILSAT1
Posição Orbital (°W)	70
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 1
Posição Orbital (°W)	72
Polarização	LHC

Dados VG de Subida	
--------------------	--

Dados VG de Descida	
---------------------	--

VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-11
Discriminação de Subida (dB)	11

VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-9
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	9

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	1,8
Gmax (dBi)	35,304
G(Phi) (°)	27,686
Discriminação G(Phi) (dB)	7,618

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	2,4
Gmax (dBi)	41,679
G(Phi) (°)	19,957
Discriminação G(Phi) (dB)	21,7220

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	40
EIRPsat (dBW)	10
Largura de Banda (kHz)	100
Freqüência Downlink(MHz)	4000
Freqüência Uplink(MHz)	6225
Translação de Freqüência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	75
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	3

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	20,181
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	-2,019
Percentual (%)	9,5918

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	26,285
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	4,085
Percentual (%)	2,3523

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	19,20
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-3,000
Percentual (%)	12,0

Como pode ser observado, o sistema mesmo com essas alterações realizadas, não atende aos critérios de C/I para interferência de downlink e no enlace com um todo, apesar de haver melhorias em suas margens de interferência.

9.1.3 - Solução 3 – Alteração da Posição Orbital

Diante do verificado nas tentativas anteriores, não existe solução diferente da troca da posição orbital para 74° W, forma que tanto o ângulo β quanto o ϕ aumente, elevando a discriminação dos ganhos de transmissão e recepção das antenas interferentes e interferidas respectivamente.

Essa alteração não era desejável devido ao alto custo, mas não há outra maneira de solucionar o problema, uma vez que não é interessante para a operadora do satélite HIPO 1 baixar a EIRP de transmissão de seu satélite.

Na posição orbital 74° W, o sistema pode retornar as suas características originais de diâmetro da antena, VG's de descida e tipo de polarização. Neste caso, não

é aconselhável a utilização das características das soluções 1 e 2 pois também envolvem custos extras.

Os cálculos para esta nova solução de coordenação espacial podem ser verificados abaixo:

Tabela 13: Planilha da Terceira Solução - Brasilsat B1 x HIPO 1

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	BRASILSAT1
Posição Orbital (°W)	70
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 1
Posição Orbital (°W)	74
Polarização	H

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-11
Discriminação de Subida (dB)	11

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-9
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	9

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	1,8
Gmax (dBi)	35,304
G(Phi) (°)	4,834
Discriminação G(Phi) (dB)	30,470

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	1,8
Gmax (dBi)	39,181
G(Phi) (°)	12,431
Discriminação G(Phi) (dB)	26,7500

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	40
EIRPsat (dBW)	10
Largura de Banda (kHz)	100
Frequência Downlink(MHz)	4000
Frequência Uplink(MHz)	6225
Translação de Frequência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	75
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	4,6
Discriminação de Polarização	0

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	40,033
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	17,833
Percentual (%)	0,0992

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	28,313
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	6,113
Percentual (%)	1,4747

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	28,00
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	5,800

Percentual (%)	1,6
----------------	-----

Diante dos resultados acima pode-se afirmar que as características utilizadas nesta solução atendem aos critérios de interferência nos enlaces de subida, descida e no enlace completo, onde na posição orbital de 74° W não haverá interferência do satélite HIPO 1 no satélite Brasilsat B1.

9.2 – CASO 2 - SATÉLITE PANAMSAT 1R X SATÉLITE HIPO 2

Neste caso será estudado o posicionamento do novo projeto do satélite HIPO 2 que terá sua posição orbital próxima a do satélite PanamSat 1R. Além disso, eles cobrem áreas muito próximas pois o PanamSat 1R cobre o litoral brasileiro e o HIPO 2 os países Andinos.

O satélite HIPO 2 deverá possuir as seguintes características:

- A empresa proprietária do satélite só possui a posição orbital 41.
- A discriminação de VG do sistema não pode ser alterada, pois a cobertura de ambos os satélites estão otimizadas para prestação de serviços específicos e não podem ser alteradas.
- Por necessidades de operação, a operadora não pode alterar as EIRPs de transmissão das estações terrenas e a do satélite.
- O objetivo da empresa é utilizar toda capacidade de faixa de frequência utilizando as duas polarizações disponíveis.

Devido a necessidade de coordenação espacial com outros satélites, o PanamSat 1R possui a restrição de operação de adotar 2,4 m como o menor diâmetro de antena de suas estações terrenas.

Estudo de coordenação espacial do segundo caso:

Tabela 14: Planilha de Coordenação Espacial – Panamsat 1R x HIPO 2

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	PanamSat 1R
Posição Orbital (°W)	43
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 2
Posição Orbital (°W)	41
Polarização	H

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-10
Discriminação de Subida (dB)	10

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-8
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	8

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	2,4
Gmax (dBi)	37,803

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	1,8
Gmax (dBi)	39,181

G(Phi) (°)	24,261
Discriminação G(Phi) (dB)	13,542

G(Phi) (°)	20,583
Discriminação G(Phi) (dB)	18,5980

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	35
EIRPsat (dBW)	8
Largura de Banda (kHz)	100
Freqüência Downlink(MHz)	4000
Freqüência Uplink(MHz)	6225
Translação de Freqüência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	70
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	0

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	20,105
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	-2,095
Percentual (%)	9,7611

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	19,161
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	-3,039
Percentual (%)	12,1311

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	16,60
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-5,600
Percentual (%)	21,9

Analisando a figura, verifica-se que se o sistema novo for posicionado com estas características não atenderá aos critérios e C/I estabelecidos.

9.2.1 - Solução 1 – Troca do Tipo de Polarização

Ao trocar o tipo de polarização para vertical, a discriminação de polarização aumenta muito, sendo suficiente para que o critério de C/I seja atendido e todas as interferências sejam eliminadas, porém haverá a restrição de não utilização da polarização horizontal e conseqüentemente a capacidade de faixa de freqüência do satélite HIPO 2 será reduzida a metade.

Como esta restrição não é razoável para a operadora do HIPO 2, haverá necessidade de alterar o projeto deste satélite para operação em polarização circular, representada na solução 1 como circula direita.

O resultado obtido é apresentado na planilha abaixo:

Tabela 15: Planilha da Primeira Solução - Panamsat 1R x HIPO 2

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	PanamSat 1R
Posição Orbital (°W)	43
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 2
Posição Orbital (°W)	41
Polarização	RHC

Dados VG de Subida	
--------------------	--

Dados VG de Descida	
---------------------	--

VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-10
Discriminação de Subida (dB)	10

VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-8
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	8

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	2,4
Gmax (dBi)	37,803
G(Phi) (°)	24,261
Discriminação G(Phi) (dB)	13,542

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	1,8
Gmax (dBi)	39,181
G(Phi) (°)	20,583
Discriminação G(Phi) (dB)	18,5980

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	35
EIRPsat (dBW)	8
Largura de Banda (kHz)	100
Frequência Downlink(MHz)	4000
Frequência Uplink(MHz)	6225
Translação de Frequência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	70
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	3

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	23,105
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	0,905
Percentual (%)	4,8922

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	22,161
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	-0,039
Percentual (%)	6,0799

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	19,60
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-2,600
Percentual (%)	11,0

A interferência de uplink foi resolvida com 0,9 dB de folga, atendendo o critério de C/I. Porém, ainda falta resolver os problemas de interferência de downlink e do enlace como um todo.

9.2.2 - Solução 2 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 2)

O menor diâmetro de antena de transmissão das estações terrenas do satélite HIPO 2 podem possuir foi alterado para 2,4 m., de forma que a diretividade destas antenas aumente ocasionando um maior estreitamento do lóbulo principal e conseqüentemente diminuindo do ganho na direção da interferência. É importante deixar registrado que quanto maior o diâmetro, maior o custo da antena.

O resultado obtido é apresentado na planilha abaixo:

Tabela 16: Planilha da Segunda Solução - Panamsat 1R x HIPO 2

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	PanamSat

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 2

	1R
Posição Orbital (°W)	43
Polarização	H

Posição Orbital (°W)	41
Polarização	RHC

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-10
Discriminação de Subida (dB)	10

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-8
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	8

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	2,4
Gmax (dBi)	37,803
G(Phi) (°)	24,261
Discriminação G(Phi) (dB)	13,542

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	2,4
Gmax (dBi)	41,679
G(Phi) (°)	19,957
Discriminação G(Phi) (dB)	21,7220

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	35
EIRPsat (dBW)	8
Largura de Banda (kHz)	100
Frequência Downlink(MHz)	4000
Frequência Uplink(MHz)	6225
Translação de Frequência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	70
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	3

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	23,105
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	0,905
Percentual (%)	4,8922

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	25,285
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	3,085
Percentual (%)	2,9614

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	21,00
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-1,200
Percentual (%)	7,9

A interferência de downlink foi eliminada com margem de 3 dB, porém ainda há interferência no enlace total.

9.2.3 - Solução 3 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 2)

Como a relação sinal/interferência do enlace total continuou insatisfatória com o diâmetro empregado na solução anterior, optou-se por aumentar de 2,4 m para 3,6 m o diâmetro da menor antena de transmissão, na tentativa de que um maior estreitamento do lóbulo principal seja suficiente para aumentar a discriminação de ganho das antenas interferentes e interferidas, eliminando a interferência.

As características desta nova solução podem ser verificadas abaixo:

Tabela 17: Planilha da Terceira Solução - Panamsat 1R x HIPO 2

Satélite Interferido		Satélite Interferente	
Nome do Satélite	PanamSat 1R	Nome do Satélite	HIPO 2
Posição Orbital (°W)	43	Posição Orbital (°W)	41
Polarização	H	Polarização	RHC

Dados VG de Subida		Dados VG de Descida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0	VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-8
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-10	Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	10	Discriminação de Subida (dB)	8

Dados Antena Rx		Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Rx (m)	2,4	Diâmetro Antena Tx (m)	3,6
Gmax (dBi)	37,803	Gmax (dBi)	45,201
G(Phi) (°)	24,261	G(Phi) (°)	19,957
Discriminação G(Phi) (dB)	13,542	Discriminação G(Phi) (dB)	25,2440

Dados da Portadora do Satélite - Rx		Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	35	EIRP Tx (dBW)	70
EIRPsat (dBW)	8	EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	100	Largura de Banda (kHz)	36000
Freqüência Downlink(MHz)	4000		
Freqüência Uplink(MHz)	6225		
Translação de Freqüência	2225		
C / N (dB)	10		

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	3

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink		Cálculo Uplink	
[C / I]downlink (dB)	23,105	[C / I]uplink (dB)	28,807
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	0,905	[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	6,607
Percentual (%)	4,8922	Percentual (%)	1,3161

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	22,10
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-0,100
Percentual (%)	6,2

Apesar da melhora do C/I total, o critério de C/I ainda não foi atendido, havendo ainda interferência do satélite HIPO 2 no satélite Panamsat 1.

9.2.4 - Solução 4 – Aumento do Diâmetro da Antena Tx (HIPO 2)

Como a relação sinal/interferência do enlace total continuou insatisfatória com o diâmetro empregado na solução anterior, optou-se por aumentar de 3,6 m para 4,5 m o diâmetro da menor antena de transmissão.

As características desta nova solução podem ser verificadas abaixo:

Tabela 18: Planilha da Quarta Solução - Panamsat 1R x HIPO 2

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	PanamSat 1R
Posição Orbital (°W)	43
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 2
Posição Orbital (°W)	41
Polarização	RHC

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-10
Discriminação de Subida (dB)	10

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-8
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	8

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	2,4
Gmax (dBi)	37,803
G(Phi) (°)	24,261
Discriminação G(Phi) (dB)	13,542

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	4,5
Gmax (dBi)	47,139
G(Phi) (°)	19,957
Discriminação G(Phi) (dB)	27,1820

Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	35
EIRPsat (dBW)	8
Largura de Banda (kHz)	100
Frequência Downlink(MHz)	4000
Frequência Uplink(MHz)	6225
Translação de Frequência	2225
C / N (dB)	10

Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	70
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	3

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	23,105
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	0,905
Percentual (%)	4,8922

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	30,745
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	8,545
Percentual (%)	0,8424

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	22,40
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	0,200
Percentual (%)	5,8

Diante dos resultados acima pode-se afirmar que as características utilizadas nesta solução atendem aos critérios de interferência nos enlaces de subida, descida e no enlace total, onde na posição orbital de 41° W não haverá interferência do satélite HIPO 2 no satélite Panamsat 1R.

CAPÍTULO 10 - CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho foi descrever as informações necessárias para viabilizar o lançamento de um satélite geo-estacionário em uma dada posição orbital, de modo que este não interfira e nem sofra interferência de outro satélite adjacente. Para este projeto foi desenvolvida uma planilha em formato Excel, que possibilita a entrada de dados referentes aos enlaces de subida e descida de dois satélites (o interferido e o interferente). A mesma pode ser utilizada para os cálculos de coordenação espacial entre um satélite existente e outro que se deseja lançar. Com o auxílio desta ferramenta, através de simulações, pode-se analisar se os enlaces possuem boa relação sinal-ruído e se há interferência entre eles.

Foram criados dois casos hipotéticos para demonstração da utilização da mesma. É importante ressaltar que para um maior entendimento deste trabalho, deve-se utilizar a planilha elaborada.

CAPÍTULO 11 - BIBLIOGRAFIA

- 1) EMBRATEL. Departamento de Comunicações Domésticas por Satélite (SAT). Sistema Brasileiro de Telecomunicações por Satélite. Rio de Janeiro, 1984.
- 2) EMBRATEL, Departamento de Comunicações Domésticas por Satélite (SAT). Básico de Comunicações Digitais Via Satélite. Rio de Janeiro, 1994.
- 3) EMBRATEL, Apostila do curso de treinamento interno do SAT. Rio de Janeiro.
- 4) DIAS, José Américo. As antenas que fazem a comunicação por satélite, Revista Nova Eletrônica, p. 30-35, out. 1983.
- 5) SOUSA, Lindeberg Barros de. Redes de Computadores: Dados, Voz e Imagem. 2. ed. São Paulo, Érica, 1999.
- 6) BARRADAS, Ovídio. Você e as Telecomunicações. 1. ed. Rio de Janeiro, Interciência, 1995.
- 7) KRAUS. Antenas. Rio de Janeiro, Guanabara Dois.
- 8) CARDOSO, Guilherme Costa. Estações Terrenas para TV Via Satélite. 2. ed. São Paulo, Érica, 1990.
- 9) ESTEVES, Luiz Claudio. Antenas – Teoria Básica e Aplicações. 1. ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1980.
- 10) Site: <http://www.starone.com.br>
- 11) Site: <http://www.hispasat.com>
- 12) Site: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/5495_4.PDF?NrOcoSis=14650&CdLinPrg=pt
- 13) Site: <http://www.inatel.br/mestrado/Dissertacoes/Carlos%20Nazareth%20Motta%20Marins.pdf>

ANEXO A – Planilhas Auxiliares

PLANILHAS RX E TX

Planilha que contém valores para a plotagem dos gráficos das envoltórias das estações terrenas Rx e Tx. Elas possuem três colunas que se relacionam:

A primeira coluna relaciona os ângulos de apontamento (Topocêntrico - Phi) do sistema.

A segunda apresenta os valores de ganhos calculados para cada ângulo da primeira coluna, estes cálculos podem ser visualizados no item 4.1.6 deste trabalho.

A terceira contém os valores dos ganhos para cada ângulo da primeira coluna superior a 1, a fórmula utilizada também está explicada no item 4.1.6.

A tabela 19, com parte das três colunas relatadas acima, pode ser vista abaixo.

Anexo A – Tabela 19: Planilhas Rx e Tx

Phi (graus)	ITU-R-IS.847-1	29-25log(Phi)
0	37,5621872	
0,1	37,53796806	
0,2	37,46531064	
0,3	37,34421494	
0,4	37,17468095	
0,5	36,95670869	
0,6	36,69029814	
0,7	36,37544931	
0,72	36,30666695	
0,74	36,23594706	
0,76	36,16328964	
0,78	36,08869469	
0,8	36,0121622	
0,82	35,93369219	
0,84	35,85328464	
0,86	35,77093956	
0,88	35,68665695	
0,9	35,60043681	
1	35,14027314	29
1,1	34,63167119	27,96518287
1,2	34,07463095	27,02046885
1,3	33,46915244	26,15141619
1,4	32,81523564	25,34679911
1,5	32,11288056	24,59771852
1,6	31,3620872	23,89700043
1,7	30,56285556	23,23877697
1,8	29,71518564	22,61818737
1,9	28,81907744	22,03115998
2	27,87453095	21,47425011

Além destas colunas elas possuem um grupo de valores que são utilizados no estudo de coordenação espacial proposto pela planilha Coordenação Espacial.

Este grupo de valores está representado na tabela 20:

Anexo A – Tabela 20: Grupo de Valores das Planilhas Rx e Tx

D(m) =	2,4
f (GHz) =	4,0
Lambda(m) =	0,075
D/L =	32
G1 (dBi) =	16,628749
Gmax (dBi) =	37,803
Phim (graus)=	2,8759679
Phir (graus)=	3,125

Descrição dos campos da planilha acima:

- a) D (m) – Diâmetro da antena, preenchido na planilha Coordenação Espacial.
- b) f (GHz) – Freqüência da antena, também preenchida na Planilha Coordenação Espacial.
- c) Lambda (m) – Comprimento de onda, é um valor calculado a partir do valor da freqüência ($\lambda = C/f$).
- d) D/L – Relação entre o diâmetro da antena e o comprimento de onda, esta relação é muito importante para o cálculo do ganho como foi explicado no item 4.1.6.
- e) G1 (dBi) – Ganho no primeiro lóbulo lateral.
- f) Gmax (dBi) - Valor do ganho da antena na direção de apontamento, $VG = 0$.
- g) Phim (graus) – Primeiro nulo do Diagrama de Radiação.
- h) Phir (graus) – Segundo nulo do Diagrama de Radiação.

PLANILHA DISCRIMINAÇÃO DE POLARIZAÇÃO

Os campos desta planilha não devem ter seus valores alterados, estes são valores pré-definidos.

Esta planilha é utilizada pela Planilha de Coordenação Espacial para o preenchimento do valor de isolamento de polarização.

Exemplo de como verificar um valor nesta planilha: Dados: Satélite interferido com polarização horizontal (H) e satélite interferente com polarização circular direita (RHC), pela planilha tem-se em (H-RHC) uma discriminação de 3 dB.

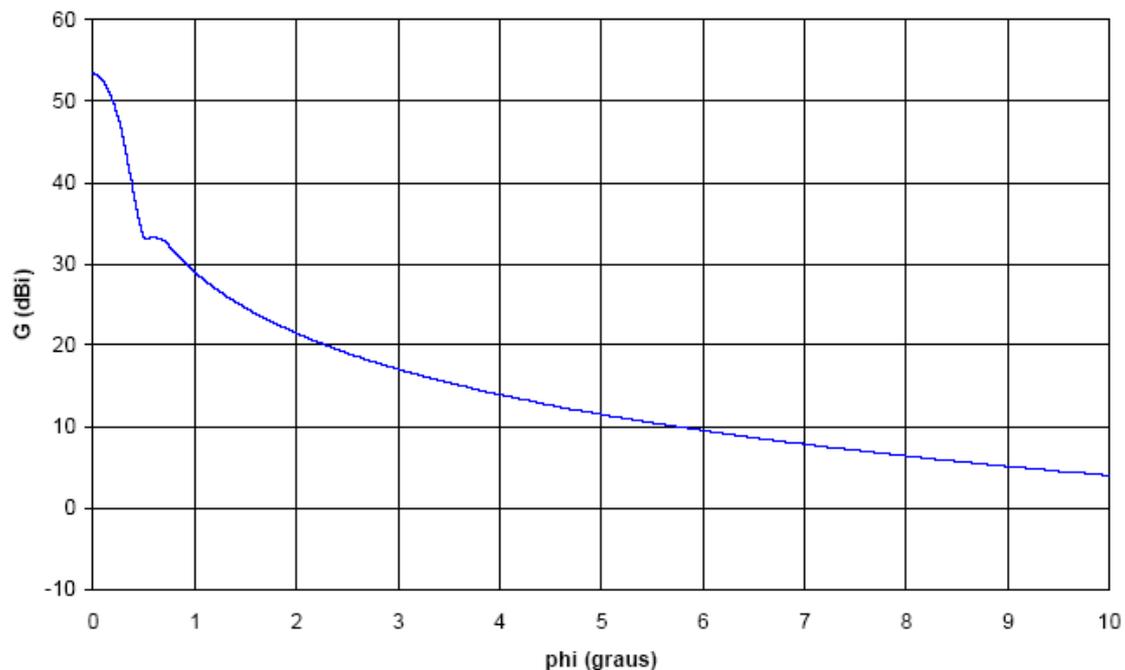
Anexo A – Tabela 21: Planilha Discriminação de Polarização

Discriminação Polarização (dB)	
H-H	0,0
H-LHC	3,0
H-RHC	3,0
H-V	15,0
LHC-H	3,0
LHC-LHC	0,0
LHC-RHC	15,0
LHC-V	3,0
RHC-H	3,0
RHC-LHC	15,0
RHC-RHC	0,0
RHC-V	3,0
V-H	15,0
V-LHC	3,0
V-RHC	3,0
V-V	0,0

GRÁFICO DA ENVOLTÓRIA RX E TX

Estes gráficos plotam os valores dos ganhos em relação ao ângulo topocêntrico (de apontamento - ϕ).

Um exemplo desses gráficos é apresentado abaixo (Fig.45):



Anexo A - Figura 45: Gráfico das Envoltórias Rx e Tx

ANEXO B – Cálculos Realizados para o Estudo do Primeiro Caso

CÁLCULOS REALIZADOS PARA O ESTUDO DO PRIMEIRO CASO

Satélite Interferido	
Nome do Satélite	BRASILSAT1
Posição Orbital (°W)	70
Polarização	H

Satélite Interferente	
Nome do Satélite	HIPO 1
Posição Orbital (°W)	72
Polarização	H

Dados VG de Subida	
VG de subida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	0
Maior VG de Subida deste SAT na ETN interferente (dB)	-11
Discriminação de Subida (dB)	11

Dados VG de Descida	
VG de descida que contorna toda a região de interesse deste satélite (dB)	-9
Maior VG de Descida deste SAT na ETN interferente (dB)	0
Discriminação de Subida (dB)	9

$$DVG_S = VG_{S1} - VG_{S2}$$

$$DVG_S = 0 - (-11) = 11dB$$

$$DVG_D = VG_{D2} - VG_{D1}$$

$$DVG_D = 0 - (-9) = 9dB$$

Dados Antena Rx	
Diâmetro Antena Rx (m)	1,8
Gmax (dBi)	35,304
G(Phi) (°)	27,686
Discriminação G(Phi) (dB)	7,618
Dados da Portadora do Satélite - Rx	
EIRP Tx (dBW)	40
EIRPsat (dBW)	10
Largura de Banda (kHz)	100
Frequência Downlink(MHz)	4000
Frequência Uplink(MHz)	6225
Translação de Frequência	2225
C / N (dB)	10

Dados Antena Tx	
Diâmetro Antena Tx (m)	1,8
Gmax (dBi)	39,181
G(Phi) (°)	20,583
Discriminação G(Phi) (dB)	18,5980
Dados da Portadora do Satélite - Tx	
EIRP Tx (dBW)	75
EIRPsat (dBW)	35
Largura de Banda (kHz)	36000

Dados do Sistema	
Ângulo Topocêntrico (Phi) (°)	2,3
Discriminação de Polarização	0

$$F_S = F_D + 2225 = 4000 + 2225 = 6225MHz$$

$$\lambda_D = \frac{C_{luz}}{F_D} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^9} = 0,075m$$

$$\lambda_S = \frac{C_{luz}}{F_S} = \frac{3 \cdot 10^8}{6,225 \cdot 10^9} = 0,048m$$

$$G_{\text{máxR}} = 7,7 + 20 \log \frac{D}{\lambda_D}$$

$$G_{\text{máxR}} = 7,7 + 20 \log \frac{1,8}{0,075} = 35,304 \text{ dBi}$$

$$G_{\text{máxT}} = 7,7 + 20 \log \frac{D}{\lambda_S}$$

$$G_{\text{máxT}} = 7,7 + 20 \log \frac{1,8}{0,048} = 39,181 \text{ dBi}$$

$$G(\varphi)_R = G_{\text{máxR}} - 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda_D} \cdot \varphi \right)^2$$

$$G(\varphi)_R = 35,304 - 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1,8}{0,075} \cdot 2,3 \right)^2 = 27,686 \text{ dBi}$$

$$G(\varphi)_T = G_{\text{máxT}} - 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda_S} \cdot \varphi \right)^2$$

$$G(\varphi)_T = 39,181 - 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1,8}{0,048} \cdot 2,3 \right)^2 = 20,583 \text{ dBi}$$

$$DG_R = G_{\text{máxR}} - G(\varphi) = 35,304 - 27,686 = 7,618 \text{ dB}$$

$$DG_T = G_{\text{máxT}} - G(\varphi) = 39,181 - 20,583 = 18,598 \text{ dB}$$

Critério de C / I	
Percentual Admissível C/I (%)	6
Critério de C / I (dB)	22,2

$$\varphi = |P_{S1} - P_{S2}| \cdot 1,14 = |70 - 72| \cdot 1,14 = 2,3^0$$

DP = Anexo A Tabela 21

$$Cr \frac{C}{I} = \frac{C}{N} - 10 \log \frac{P\%}{100} = 10 - (-12,2) = 22,2 \text{ dB}$$

Cálculo Downlink	
[C / I]downlink (dB)	17,181
[C / I downlink] - [Critério C / I] (dB)	-5,019
Percentual (%)	19,1382

Cálculo Uplink	
[C / I]uplink (dB)	20,161
[C / I uplink] - [Critério C / I] (dB)	-2,039
Percentual (%)	9,6361

Para o Downlink

$$C = EIRP_{SAT1} - A_{0D}$$

$$I = EIRP_{SAT2} - DVG_D - DG_R - DP - A_{0D}$$

$$\frac{C}{I} D = EIRP_{SAT1} - A_{0D} - (EIRP_{SAT2} - DVG_D - DG_R - DP - A_{0D}) - 10 \log \frac{BW1}{BW2}$$

$$\frac{C}{I} D = EIRP_{SAT1} - EIRP_{SAT2} + DVG_D + DG_R + DP - 10 \log \frac{100}{36000}$$

$$\frac{C}{I} D = 10 - 35 + 9 + 7,6 + 0 - (-25,6) = 17,181 \text{ dB}$$

$$M \frac{C}{I} D = \frac{C}{I} D - Cr \frac{C}{I} = 17,181 - 22,2 = -5,019 \text{ dB}$$

$$P\%D = 100 \cdot 10^{\frac{C - C_D}{N - I}} = 100 \cdot 10^{\frac{10 - 17,181}{10}} = 19,1382\%$$

Para o Uplink

$$C = EIRP_{S1} - A_{0S}$$

$$I = EIRP_{S2} - DVG_S - DG_T - DP - A_{0S}$$

$$\frac{C}{I}S = EIRP_{S1} - A_{0S} - (EIRP_{S2} - DVG_S - DG_T - DP - A_{0S}) - 10 \log \frac{BW1}{BW2}$$

$$\frac{C}{I}S = EIRP_{S1} - EIRP_{S2} + DVG_S + DG_T + DP - 10 \log \frac{100}{36000}$$

$$\frac{C}{I}S = 40 - 75 + 11 + 18,4 + 0 - (25,6) = 20,161 \text{ dB}$$

$$M \frac{C}{I}S = \frac{C}{I}S - Cr \frac{C}{I} = 20,161 - 22,2 = -2,039 \text{ dB}$$

$$P\%S = 100 \cdot 10^{\frac{\frac{C}{N} \frac{C}{I}S}{10}} = 100 \cdot 10^{\frac{10 - 20,161}{10}} = 9,6361\%$$

Cálculo Total	
[C / I]total (dB)	15,40
[C / I total] - [Critério C / I] (dB)	-6,800
Percentual (%)	28,8

$$\frac{C}{I} total = \frac{1}{\frac{1}{\frac{C}{I} D} + \frac{1}{\frac{C}{I} S}}$$

$$\frac{C}{I} total = 10 \log \left(\frac{1}{\frac{1}{10^{\frac{17,2}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{20}{10}}}} \right) = 15,4 dB$$

$$M \frac{C}{I} total = \frac{C}{I} total - Cr \frac{C}{I} = 15,4 - 22,2 = -6,8 dB$$

$$P\% \frac{C}{I} total = 100 \cdot 10^{\frac{\frac{C}{I} total - Cr \frac{C}{I}}{10}} = 100 \cdot 10^{\frac{10 - 15,4}{10}} = 28,8\%$$

**ANEXO C – PROVA DO NÚMERO MÍNIMO DE 3 SATÉLITE GEO
PARA COBERTURA GLOBAL**

CÁLCULO DA ALTURA DA ÓRBITA GEO-ESTACIONÁRIA

Sabendo que a constante de gravitação universal é:

$$G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

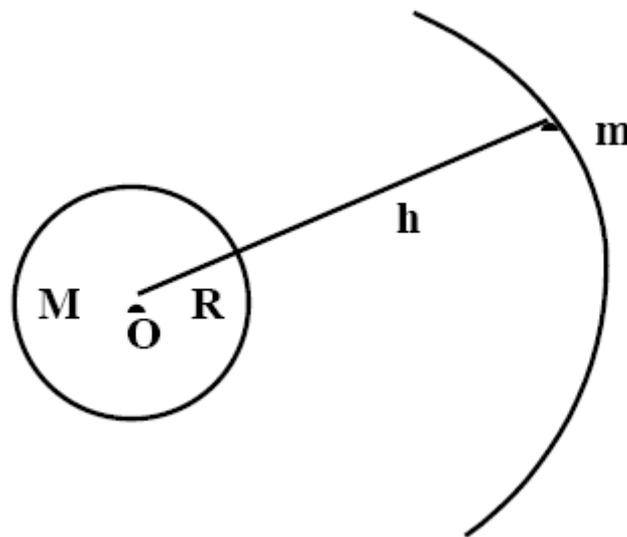
que a massa da Terra, assumindo que seja perfeitamente esférica e homogênea é:

$$M = 5,983 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

e que o raio da Terra, R , é dado por:

$$R = 6,378 \cdot 10^3 \text{ km}$$

é possível determinar a altura h de um satélite na órbita Geoestacionária, conforme esquematizado na figura abaixo. Observe que o plano desta figura coincide com o plano do equador terrestre.



Anexo C - Figura 46: Representação da Órbita Geoestacionária.

Considerando um satélite de massa m em uma órbita de altura h , tem-se que a força gravitacional exercida sobre o satélite tem módulo:

$$F_G = F_C \quad \therefore \quad F_G = G \frac{M \cdot m}{(R + h)^2} = m \cdot \omega^2 (R + h) = F_C$$

Onde:

F_C é Força Centrífuga e ω é a velocidade angular do satélite de massa m .

Tem-se, então:

$$h = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M}{\omega^2}} - R$$

Para que o satélite seja GEO Estacionário é necessário que:

$$W = 2\pi \left(\frac{rd}{dia} \right) = \frac{2\pi}{24.3600} \left(\frac{rd}{s} \right) \quad 1h = 3600s$$

resulta, então:

$$h = \sqrt[3]{\frac{6673.5983}{\left(\frac{2\pi}{24.3600} \right)^2} \cdot 10^{13} - (6378 \cdot 10^6)} \quad (m)$$

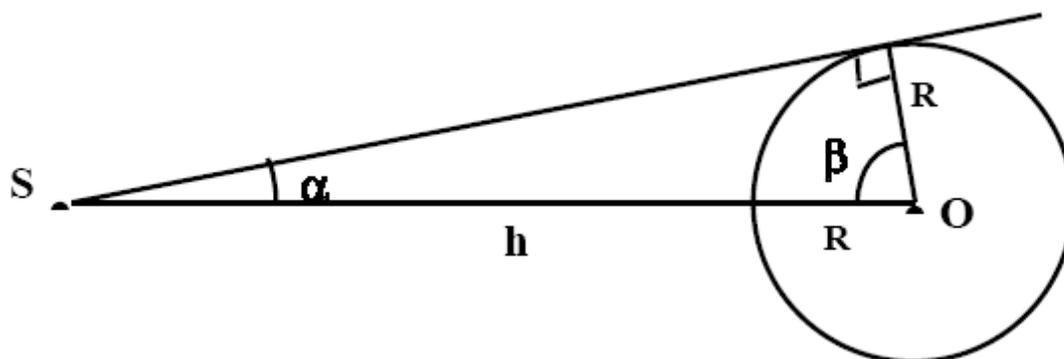
$$h = 35886 \cdot 10^6 = 35886 \quad (km)$$

Aproximadamente $h = 36000$ km

CÁLCULO DO NÚMERO DE SATÉLITES PARA COBERTURA GLOBAL

Como essencialmente todos os satélites hoje empregados para comunicações estão na órbita geo-estacionária, conclui-se que esta órbita é um precioso recurso cuja utilização eficiente deve firmemente ser buscada.

Observa-se, ainda, que o limite de visibilidade geométrica, a partir de uma posição qualquer na órbita geo-estacionária, pode ser facilmente obtido a partir da representação esquemática mostrada na figura abaixo.



Anexo C - Figura 47: Determinação do Limite de Visibilidade Geométrica a Partir de um Satélite na Órbita GEO Estacionária

Tem-se que

$$\text{sen } \alpha = \frac{R}{h + R} = \frac{6400}{36000 + 6400} = 0,151$$

ou seja:

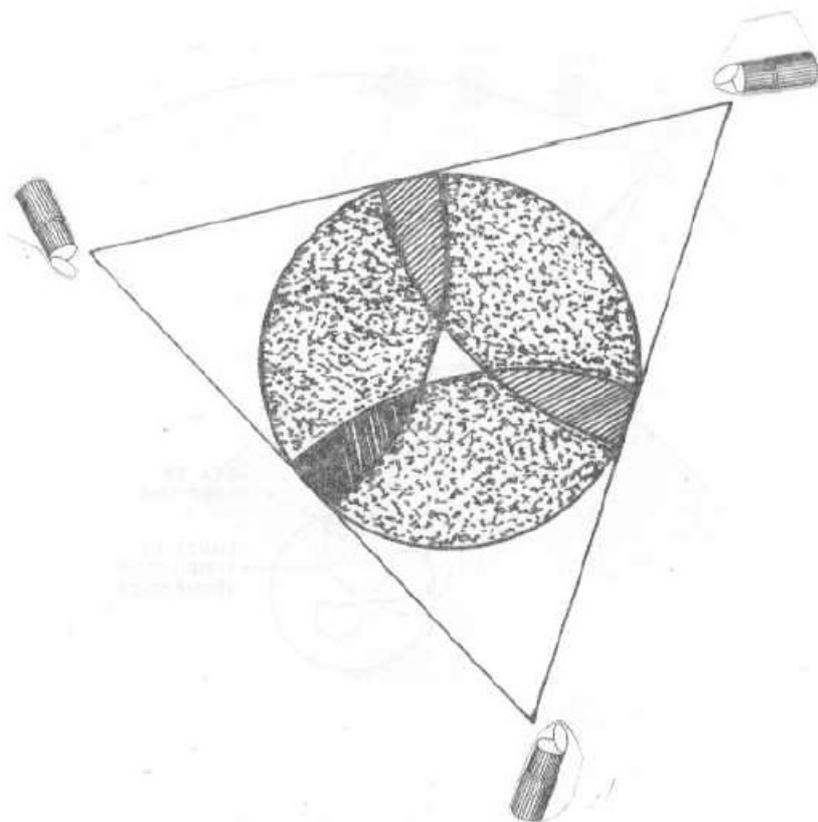
$$\alpha = 8,68^\circ$$

que dá:

$$\beta = 90 - \alpha = 81,32^\circ$$

Verifica-se, assim, que três satélites geo-estacionários seriam suficientes para cobrir essencialmente toda a superfície da Terra. Observa-se, também, que a área de cobertura de um determinado satélite pode reduzir-se a uma pequena fração da calota esférica

definida pelo limite de visibilidade geométrica.



Anexo C - Figura 48: Disposição de Satélites GEO Estacionários para Cobertura Global do Planeta