

### ***Sistemas de Comunicação por Satélite***

- **Conceitos básicos**
- **Órbita dos satélites**
- **Ligações por satélite**
- **Acesso a satélites**
- **Segmento do satélite**
- **Segmento terrestre**
- **Séries de satélites**

---

*Mário Jorge M Leitão*

Neste capítulo faz-se o estudo de sistemas de comunicação por satélite, a maioria dos quais, operando em frequências de microondas, assumem a configuração de um feixe hertziano com um único repetidor a bordo de um satélite.

Tendo em conta esta semelhança com os feixes hertzianos, a abordagem destacará essencialmente os aspectos marcantes dos sistemas de comunicação por satélite que os distinguem dos feixes hertzianos terrestres.

## Conceitos básicos

### Princípios do sistema

- ligações hertzianas com um repetidor (transpositor) a bordo de um satélite no espaço
- a órbita do satélite é uma elipse (caso geral) em que a Terra está num dos focos
- aplicação mais importante: órbita circular equatorial geoestacionária (altitude = 36 000 km)

### Classificação dos satélites

- em função da aplicação
- em função da utilização

Aplicações		Utilização
Telecomunicações	Comunicações Fixas (FSS, <i>Fixed Satellite Service</i> )	Comerciais
	Difusão (BSS, <i>Broadcasting Satellite Service</i> )	Privados
	Comunicações Móveis (MSS, <i>Mobile Satellite Service</i> )	Militares
	– Aeronáutico      – Marítimo      – Terrestre	Experimentais
	Radioamadorismo	Científicos
	Navegação (localização)	
	Observação da Terra e atmosfera	
	– Meteorológicos      – Detecção remota	

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Nas aplicações de telecomunicações concorrentes com sistemas terrestres, os satélites ainda encontram justificação pela sua capacidade ímpar de disponibilizar rapidamente imensas áreas de cobertura, o que é particularmente interessante nos seguintes casos:

- acesso a zonas do globo com baixas densidades populacionais ou níveis baixos de desenvolvimento, que não justificam meios terrestres;
- difusão de um elevado número de programas para um universo alargado de utilizadores individuais.

## Conceitos básicos

### Frequências atribuídas a satélites de telecomunicações

Bandas mais utilizadas

– frequências ascendente e descendente afastadas

reduzem-se as interferências

– frequência ascendente superior à descendente

ruído captado pelo satélite é elevado  
maximiza-se o ganho de recepção

Bandas atribuídas a sistemas por satélite				
Serviço	Banda	Frequências	Ligação ascendente	Ligação descendente
Fixo	C	6 / 4 GHz	5,925 - 6,425 GHz	3,700 - 4,200 GHz
	Ku	14 / 11 GHz	14,000 - 14,800 GHz	10,700 - 11,700 GHz
	Ka	30 / 20 GHz	27,500 - 31,000 GHz	18,100 - 21,200 GHz
Difusão	Ku	18 / 12 GHz	17,300 - 18,100 GHz	11,700 - 12,500 GHz
Móvel	L	1,6 GHz	Atribuições diversas	
	S	2,5 GHz		

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

As bandas de frequências utilizadas em sistemas de comunicação por satélite caem nas bandas de UHF (*Ultra High Frequency*: 300 MHz - 3 GHz) e SHF (*Super High Frequency*: 3 GHz - 30 GHz), tendo designações específicas algo confusas herdadas quer das bandas dos sistemas de radar, quer das bandas dos sistemas de recepção de TV por satélite.

Bandas de sistemas de radar			
Banda L	1	- 2	GHz
Banda S	2	- 4	GHz
Banda C	4	- 8	GHz
Banda X	8	- 12	GHz
Banda Ku	12	- 18	GHz
Banda K	18	- 27	GHz
Banda Ka	27	- 40	GHz

Bandas de sistemas de recepção de TV por satélite			
Banda S	1,7	- 3	GHz
Banda C	3,7	- 4,2	GHz
Banda Ku	10,9	- 12,75	GHz
Banda Ka	27	- 40	GHz

## *Conceitos básicos*

---

### **Evolução dos satélites de telecomunicações**

- *Marcos históricos*

#### Acontecimentos pioneiros

1945	A. C. Clarke	Ideia original da órbita geoestacionária
1957	Sputnik 01	Satélite artificial (URSS)
1958	Score	Satélite de telecomunicações (store-and-forward)
1959	Explorer 07	Satélite com sub-sistema meteorológico
1962	Echo 1	Satélite passivo de comunicações telefónicas e difusão de TV
1962	Telstar 1	Satélite activo (órbita baixa de 158 min.; banda 6/4 GHz)
1964	Syncom 3	Satélite geoestacionário de comunicações
1974	ATS 6	Recepção individual de TV
1980	Intelsat 5	Emissão de sinais de difusão de TV por estações móveis
1984	SMM	Satélite reparado em órbita pelo Space Shuttle

#### Serviços comerciais

1965	Intelsat 1	Serviço fixo e de difusão de TV (satélite geoestacionário)
1972	Anik A1	Serviço de comunicações nacionais (Canadá)
1985	(diversos)	Serviço móvel (diversos transpositores em satélites geoestacionários)
1989	Astra 1A	Serviço de difusão de TV orientado à recepção individual
1998	Iridium	Serviço móvel com terminais de bolso (satélites de baixa altitude)

---

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

O historial das comunicações por satélite é já longo, podendo destacar-se alguns saltos qualitativos que conduziram aos sistemas mais modernos actualmente em operação.

Ao longo do estudo, serão abordados muitos outros aspectos, realçando-se a perspectiva evolutiva.

## Conceitos básicos

Evolução dos satélites de telecomunicações: exemplo da série INTELSAT					
Satélite	INTELSAT 1	INTELSAT 2	INTELSAT 3	INTELSAT 4	INTELSAT 5
Período de lançamento	1965	1966 - 1967	1968-1970	1971-1975	1980-1989
Tempo de vida previsto	1,5 anos	3 anos	5 anos	7 anos	7 anos
Nº satélites	lançados	1	4	8	14
	operacionais	0	0	0	0
Estabilização	rotação	rotação	rotação	rotação	3 eixos
Dimensões	diam = 0,7 m alt = 0,6 m	diam = 1,4 m alt = 0,7 m	diam = 1,4 m alt = 2,0 m	diam =2,4 m alt = 5,3 m	1,7×2,0×1,8 m painéis: 15,6 m
Peso em órbita	38 kg	86 kg	151 kg	700 kg	1 040 kg
Potência DC (fim de vida)	33 W	75 W	125 W	400 W	1 300 W
Banda	C	C	C	C	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin
Capacidade	240 canais telef. ou 2 canais TV	240 canais telef. ou 2 canais TV	1 500 canais telef. e 2 canais TV	4 000 canais telef. e 2 canais TV	12 000 canais telef. e 2 canais TV

Notas: características indicadas dizem respeito à versão base de cada tipo;  
para alguns tipos, foram construídos satélites com características ligeiramente diferentes da versão base.

### Sistemas de Telecomunicações II

### Sistemas de Comunicação por Satélite

O exemplo da série de satélites operados pela Intelsat é revelador dos enormes avanços nesta área, que resultaram numa enorme capacidade das gerações mais recentes, com variadas aplicações em termos de serviços.

## Conceitos básicos

Evolução dos satélites de telecomunicações: exemplo da série INTELSAT					
Satélite		INTELSAT 6	INTELSAT 7	INTELSAT 8	INTELSAT 9
Período de lançamento		1989-1991	1993-1996	1997-1998	2001-
Tempo de vida previsto		13 anos	10 - 15 anos	10 - 15 anos	10 - 15 anos
Nº satélites	lançados	5	9	6	6
	operacionais	5	7	6	6
Estabilização		rotação	3 eixos	3 eixos	3 eixos
Dimensões		diam = 3,6 m alt = 6,4 m	2,4×2,2×2,7 m painéis: 21,8 m	2,5×2,2×3,4 m painéis: 10,8 m	2,8×3,5×5,6 m painéis: 31 m
Peso em órbita		2 560 kg	1 800 kg	1 600 kg	1 900 kg
Potência DC (fim de vida)		2 100 W	3 650 W	4 760 W	7 600 W
Banda		C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin
Capacidade		24 000 canais telef. e 3 canais TV	18 000 canais telef. e 3 canais TV	22 500 canais telef. e 3 canais TV	C / 44×36 MHz Ku / 12×36 MHz

Notas: características indicadas dizem respeito à versão base de cada tipo;  
para alguns tipos, foram construídos satélites com características ligeiramente diferentes da versão base.

### Sistemas de Telecomunicações II

### Sistemas de Comunicação por Satélite

O início da geração seguinte de satélites Intelsat 10 está actualmente na fase final de concretização, com o primeiro lançamento previsto para 2003.

## Conceitos básicos

### Evolução dos satélites de telecomunicações

#### • Situação actual

Satélites lançados e operacionais (Dezembro 2000)

- 2 490 satélites lançados com sucesso no período de 1980-2000
- 570 satélites operacionais (mínimo estimado)

Organizações responsáveis

- lançamento de satélites de órbita alta
  - URSS / CEI Molniya (1960), Proton (1967)
  - EUA Atlas (1962), Titan (1965), Delta (1972), STS-Shuttle (1981)
  - China Longa Marcha (1975)
  - Europa Ariane (1979)
  - Japão NASDA (1981)
- operação de sistemas
  - operadores específicos internacionais: Intelsat, Inmarsat, Eutelsat, Astra, Iridium
  - operadores tradicionais de redes de telecomunicações
- regulamentação
  - organismos internacionais UIT-R (Sector de Radiocomunicações)
  - organismos nacionais Portugal - Anacom

primeiro  
lançamento do  
veículo

tendências gerais:  
globalização  
privatização

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

O modelo de exploração dos sistemas de comunicação por satélite assume duas formas:

- os serviços de satélite são disponibilizados aos utilizadores finais directamente pelos operadores dos próprios satélites, nomeadamente nos casos de redes privadas, difusão directa de TV por satélite e comunicações móveis;
- os serviços de satélite são disponibilizados a operadores genéricos de serviços de telecomunicações, os quais alugam capacidade em satélites aos operadores dos satélites - é o caso da utilização de satélites no transporte da rede fixa ou em aplicações de difusão de televisão, a montante da rede terrestre de distribuição (recolha de notícias, intercâmbio de programas, etc.).

## Conceitos básicos

---

### Aspectos críticos de engenharia

#### Lançamento dos satélites

- veículos de transporte para as órbitas altas
- posicionamento inicial do satélite na órbita correcta

taxa de falhas elevada

#### Problemas da órbita do satélite

- controlo permanente de trajectória e atitude do satélite
- seguimento do satélite pelas antenas das estações terrestres

#### Condicionantes do sub-sistema do satélite

- dimensão física
- peso total em órbita
- alimentação primária apenas por painéis solares
- operação num meio ambiente agressivo
  - ciclo térmico severo durante eclipses
  - radiação solar elevada
  - exposição a micro-partículas e meteoritos
- elevada fiabilidade (*sem* manutenção)

manutenção possível mas  
com custos exorbitantes

---

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A área das comunicações por satélite envolve um conjunto muito vasto de vertentes tecnológicas de natureza muito diferente.

Nesta disciplina, limitar-nos-emos a identificar os principais desafios em termos de engenharia e o impacto nos sistemas de comunicações de alguns compromissos que têm de ser assumidos.



## *Conceitos básicos*

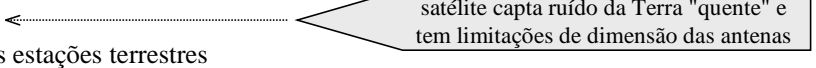
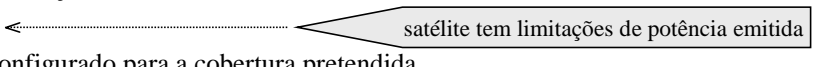
---

### **Aspectos críticos de engenharia**

#### Condicionantes do trajecto

- perdas elevadas em espaço livre
- efeitos de propagação acentuados (sobretudo acima de 10 GHz ou com baixas elevações)

#### Necessidade de optimização da relação portadora-ruído

- ligação terra-satélite 
  - EIRP elevados das estações terrestres
- ligação satélite-terra 
  - EIRP do satélite configurado para a cobertura pretendida
  - receptores terrestres de muito baixo ruído

#### Requisitos especiais de processamento de sinal

- modulações complexas
- esquemas de detecção e correcção de erros

#### Requisitos especiais de operação do sistema

- suporte de acesso múltiplo ao satélite por parte de diversas estações terrestres
- reconfiguração dos recursos radioeléctricos do satélite

---

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Como discutiremos adiante mais em detalhe, as ligações terra-satélite e satélite-terra operam em condições diversas, resultante de diferenças no ruído captado pelas antenas de recepção e de diversas limitações a bordo do satélite.

Além disso, e ao contrário dos feixes hertzianos terrestres, a maioria dos sistemas por satélite suporta a possibilidade de vários utilizadores partilharem os mesmos recursos de satélite - o chamado acesso múltiplo, cujas técnicas serão igualmente abordadas neste capítulo.

# Órbita dos satélites

## Tipos de órbitas

GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*): órbita circular equatorial geosíncrona

- período de revolução: 23 h 56 m 4,091 s
- altitude média: 35 786 km ( $r_s - r_T = 42\,164 - 6\,378$ )

LEO (*Low Earth Orbit*): órbita circular de baixa altitude

- altitude típica: 500 - 1 500 km
- período de revolução 1h 30m - 2h

caso notável  
órbita polar

MEO (*Medium Earth Orbit*): órbita circular de altitude média

- altitude típica: 10 400 km
- período de revolução 6 horas

há outras órbitas  
utilizadas

HEO (*Highly Elliptical Orbit*): órbita fortemente elíptica

- órbita elíptica inclinada
- perigeu de baixa altitude

caso notável: órbita Molniya  
perigeu: 1 000 km alt. apogeu: 39 000 km alt.  
período: 12 horas inclinação: 63,4 °

### Órbitas circulares

$$r_s = \left( \frac{GM T^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \quad (\text{m})$$

$$r_s = 2,161378 \times 10^4 T^{2/3} \quad (\text{m})$$

$r_s$  - raio da órbita

$T$  - período da órbita

$$GM = 3,9861352 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

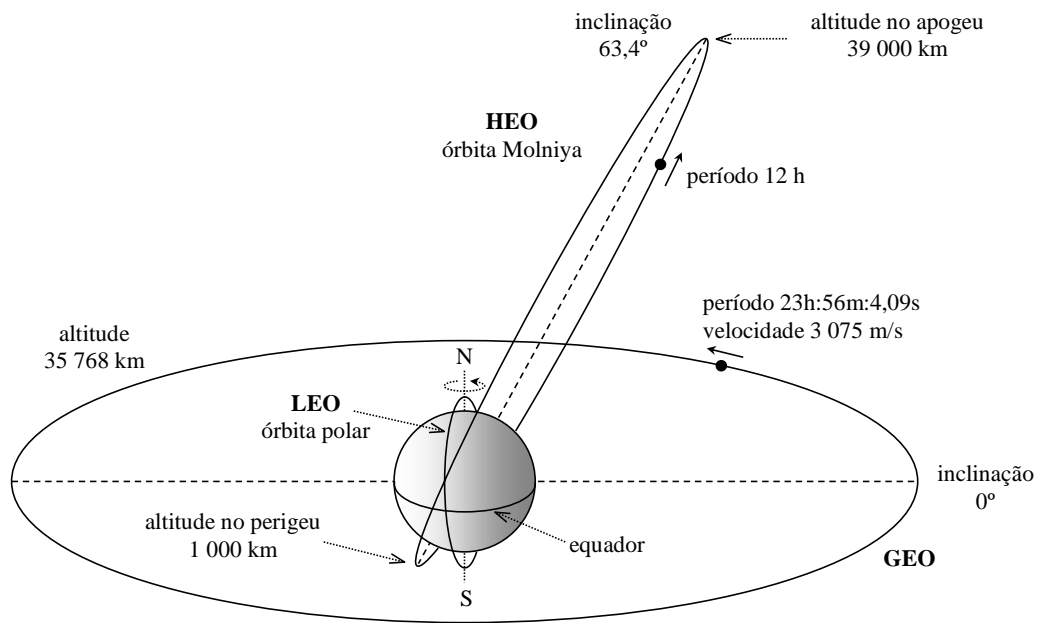
*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Estas órbitas têm como principais vantagens:

- GEO: o satélite mantém-se fixo em relação à Terra;
- LEO: o satélite está a uma distância relativamente curta;
- MEO: o satélite está a uma distância intermédia entre GEO e LEO, permanecendo em visibilidade durante mais tempo do que em LEO;
- HEO: em baixas latitudes, o satélite apresenta-se próximo do zénite durante um período de tempo apreciável.

## Órbita dos satélites



Principais órbitas de satélites

*Sistemas de Telecomunicações II*

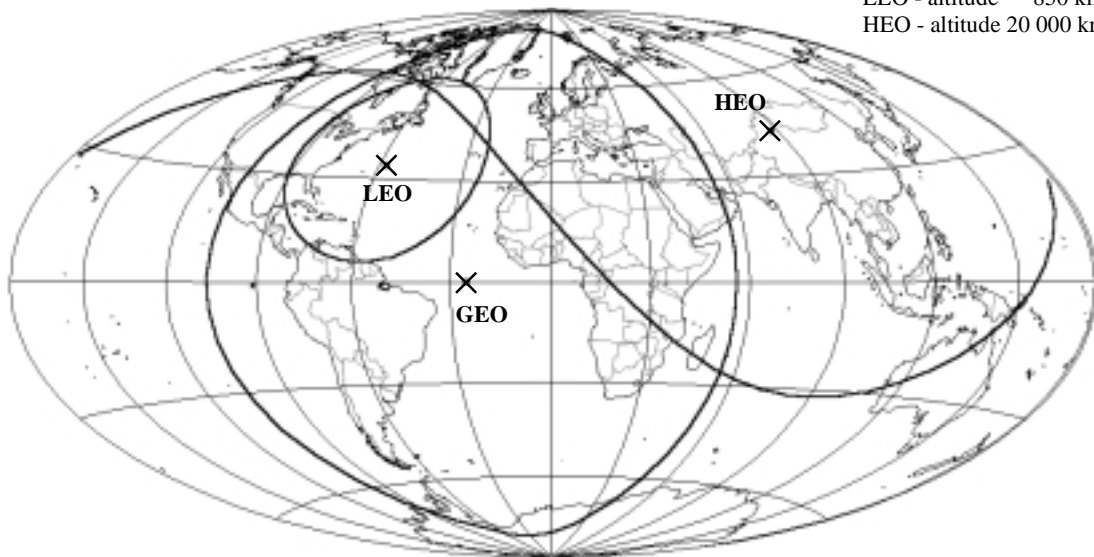
*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Uma visualização dinâmica destas órbitas pode ser obtida através de programas de computador, como por exemplo Nova e Logsat.

## Órbita dos satélites

---

GEO - altitude 36 000 km  
LEO - altitude 850 km  
HEO - altitude 20 000 km



**Cobertura terrestre de satélites com diversas órbitas**

---

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Em virtude das altitudes que os satélites atingem nas diversas órbitas, assim teremos coberturas variáveis: entre relativamente reduzidas para a órbita LEO, até cerca de meio globo para a órbita GEO e igualmente para a órbita HEO, quando o satélite se encontra no apogeu.

Na figura, as cruzes que assinalam os satélites indicam o ponto sub-satélite, isto é, a intersecção com a superfície da Terra do segmento que une o centro da Terra e o satélite.

## Órbita dos satélites

---



**Trajectória terrestre de um satélite com órbita fortemente elíptica (HEO) Molniya**

---

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A trajectória terrestre de um satélite define-se pelo lugar geométrico dos pontos sub-satélite, ao longo do tempo.

No caso da órbita Molniya, a trajectória permanece cerca de 8 horas numa área relativamente reduzida na maior parte do período de 12 horas da órbita. Contudo, a mesma área do globo só tem a referida cobertura de 8 horas em cada 24 horas.

## Órbita dos satélites

Comparação entre os tipos de órbita mais importantes				
Características	Tipo de órbita			
	GEO	LEO (polar)	MEO	HEO (Molniya)
cobertura terrestre assegurada por cada satélite	1/2 - 1/3 da Terra pólos não cobertos	global ↑	global ↑	1/2 - 1/3 da Terra
tempo útil de passagem de cada satélite	ilimitado ↑	10 - 15 min	2 horas	8 horas ↑
necessidade de constelação para cobertura local permanente	não ↑	≥ 48 satélites (ex: 6 sat × 8 planos)	≥ 10 satélites (ex: 5 sat × 2 planos)	3 satélites
perdas em espaço livre (distância terra-satélite)	elevadas	reduzidas ↑	médias ↑	elevadas
atraso propagação (ida e retorno)	250 ms	5 - 7 ms (750 km) 10-25 ms (1 500 km) ↑	70 - 100 ms	150-300 ms
efeito Doppler (velocidade radial)	muito reduzido ↑	médio	médio	elevado
elevação do satélite no ponto de recepção	grande junto do equador ↑	variável com passagem do satélite	variável com passagem do satélite	grande em latitudes intermédias ↑
seguimento do satélite	geralmente não necessário ↑	indispensável, excepto com antenas de feixe largo	indispensável, excepto com antenas de feixe largo	necessário, mas pouco complexo ↑

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A tabela caracteriza os principais parâmetros que permitem comparar as diversas órbitas de satélite, justificando as suas principais aplicações:

- GEO: comunicações fixas, difusão, meteorologia;
- LEO: comunicações móveis, radioamadorismo, observação da Terra e atmosfera;
- MEO: comunicações móveis, navegação;
- GEO: comunicações fixas.

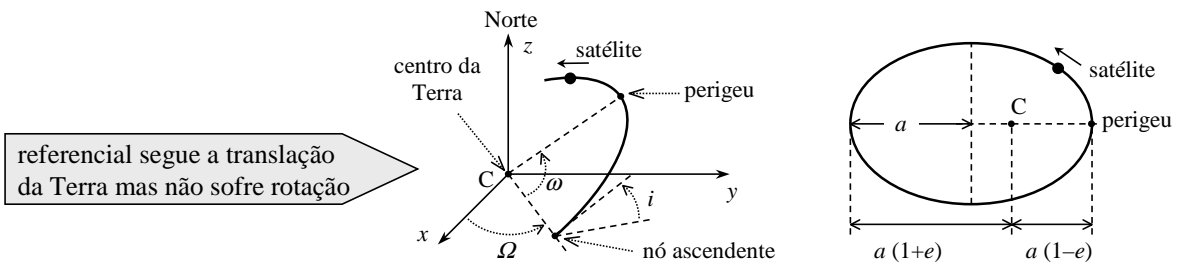
# Órbita dos satélites

## Localização do satélite

### Elementos orbitais

- especificam a órbita e a posição do satélite na órbita num qualquer instante
  - são necessários 6 parâmetros referidos a um sistema de eixos  $xyz$  centrado na Terra
- |   |          |  |
|---|----------|--|
| { | $i$      | inclinação do plano da órbita relativamente ao plano equatorial $xy$                   |
|   | $\Omega$ | ângulo entre o eixo dos $x$ e a intersecção plano da órbita - plano equatorial         |
|   | $\omega$ | ângulo entre a intersecção plano da órbita - plano equatorial e o eixo maior da elipse |
|   | $a$      | semi-eixo maior da elipse  |
|   | $e$      | excentricidade da elipse   |
- $t_p$  tempo na passagem pelo perigeu

possível escolher outros conjuntos de 6 elementos independentes



referencial segue a translação da Terra mas não sofre rotação

### Definição dos elementos orbitais

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Os elementos orbitais, ou keplerianos, exprimem as seguintes características da órbita:

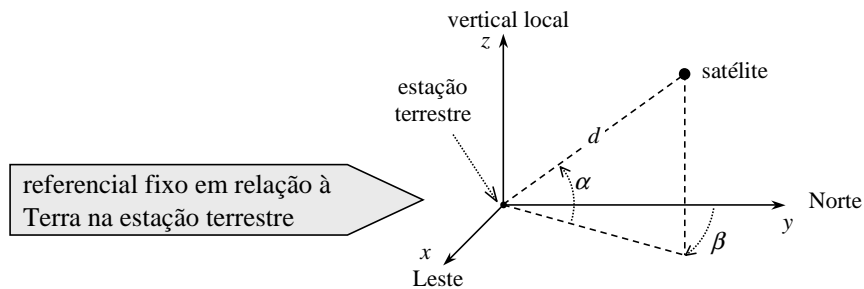
- $i$  e  $\Omega$  orientação do plano da elipse no sistema de eixos;
- $\omega$  orientação da elipse no plano da elipse;
- $a$  e  $e$  geometria da elipse
- $t_p$  referência temporal da passagem do satélite num ponto pré-definido

# Órbita dos satélites

## Localização do satélite

### Parâmetros de visibilidade

- definem a posição do satélite num certo instante, em relação a uma dada estação terrestre
- são necessários três parâmetros referidos a um sistema de eixos  $xyz$  no ponto de recepção
  - $\alpha$  elevação      ângulo entre o plano horizontal e a recta terra-satélite
  - $\beta$  azimuth      ângulo entre o norte e a projecção horizontal da recta terra-satélite no plano horizontal (medido para leste)
  - $d$  distância estação terrestre-satélite



**Parâmetros de visibilidade do satélite a partir de uma estação terrestre**

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Numa estação terrestre, a elevação e o azimuth são os parâmetros necessários para definir a pontaria das respectivas antenas de emissão ou recepção.

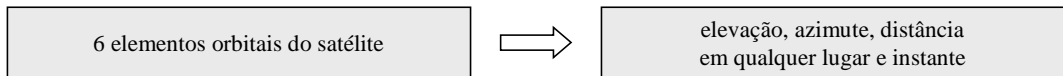


# Órbita dos satélites

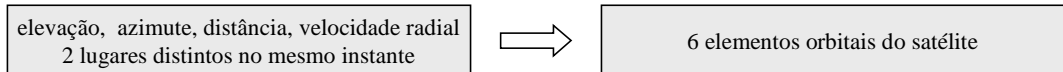
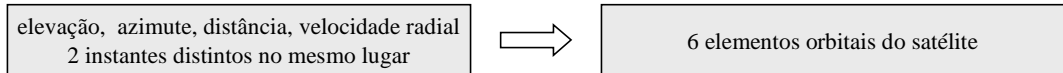
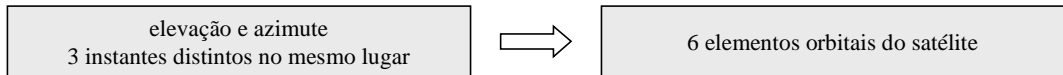
## Localização do satélite

Relação entre os elementos orbitais e os parâmetros de visibilidade

- cálculo dos parâmetros de visibilidade num lugar



- determinação dos elementos orbitais



Ponto sub-satélite

- intersecção da recta centro da Terra-satélite com a superfície da Terra
- define a posição angular do satélite em relação à Terra

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Os elementos orbitais, em conjunto com a latitude e longitude de um lugar, são correntemente utilizados para calcular os parâmetros de visibilidade nesse lugar. Contudo, estes cálculos são relativamente complexos, recorrendo-se normalmente a programas de computador, como os já referidos Nova e Lyngsat, utilizando valores actualizados dos elementos orbitais disponibilizados pelos operadores dos satélites, ou por organizações que têm a missão genérica de seguir satélites (operacionais ou não, destroços de lançadores e outro "lixo" espacial).

A operação inversa que permite determinar os elementos orbitais a partir de duas ou três medidas de parâmetros de visibilidade é normalmente efectuada pelas organizações que efectuam o seguimento de satélites, exigindo equipamentos mais ou menos sofisticados para medir os parâmetros de visibilidade com a precisão necessária.

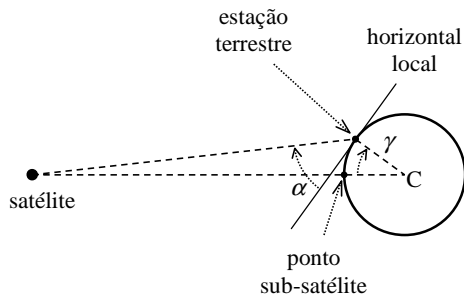
# Órbita dos satélites

## Localização do satélite

Parâmetros de visibilidade de satélites geoestacionários

- o satélite é localizado apenas pela longitude do ponto sub-satélite
- os ângulos de visibilidade e a distância estação terrestre-satélite são facilmente calculados

latitude da estação terrestre	$\theta_E$	razão entre os raios da Terra e da órbita	$r_T/r_S = 0,15127$
longitude da estação terrestre	$\phi_E$	ângulo entre os raios da estação terrestre e do ponto sub-satélite	$\gamma = \arccos[\cos(\theta_E) \cos(\phi_E - \phi_S)]$
longitude do ponto sub-satélite	$\phi_S$		



Geometria de um satélite geoestacionário

**Condição de visibilidade**  $\gamma \leq \arccos(r_T/r_S) = 81,3^\circ$

### Parâmetros de visibilidade

elevação	$\alpha = \arctg[(\cos \gamma - r_T/r_S)/\sin \gamma]$
azimute	$\beta = \pm \arccos[-\tan \theta_E / \tan \gamma]$
distância estação terrestre-satélite	$d = r_S [1 + (r_T/r_S)^2 - 2(r_T/r_S) \cos \gamma]^{1/2}$

Sistemas de Telecomunicações II

Sistemas de Comunicação por Satélite

Num satélite geoestacionário, a latitude e longitude da estação terrestre e a longitude do ponto sub-satélite, são suficientes para determinar os parâmetros de visibilidade, se o satélite se mantiver na sua órbita nominal. Neste caso, a pontaria das antenas é fixa, sendo determinada pela elevação e azimute calculados pelas expressões acima indicadas.

Porém, se ocorrerem desvios da órbita nominal, e especialmente no caso de serem utilizadas antenas com larguras de feixe muito pequenas, poderá ser necessário utilizar os elementos orbitais, devidamente actualizados, para determinar, ao longo do tempo, a elevação e o azimute correctos. Em alternativa, o sistema de recepção poderá utilizar um sistema de controlo de pontaria em malha fechada, que maximiza o nível do sinal recebido para obter a orientação da antena desejada.

# Órbita dos satélites

## Perturbações da órbita

Desvios da órbita em relação à elipse “kepleriana”

- a Terra não é uma esfera uniforme
- existem outras forças que actuam sobre o satélite
  - atracção da Lua, do Sol e de outros planetas
  - campo magnético terrestre
  - pressão da radiação solar
  - atrito na atmosfera (satélites de órbita baixa)

desvios de ciclo diário  
desvios de ciclo longo  
desvios aperiódicos

Previsão precisa da órbita

- elementos orbitais iniciais → válidos por poucos dias

▪ instante  $t_0: (i_0, \Omega_0, \omega_0, a_0, e_0, t_{p0})$

actualizados periodicamente  
através de medidas

- elementos orbitais calculados com correcções de 1ª ordem

▪ instante  $t_1: \left( i_0 + \frac{di}{dt}(t_1 - t_0), \Omega_0 + \frac{d\Omega}{dt}(t_1 - t_0), \dots \right)$

calculadas teoricamente  
ou medidas empiricamente

- elementos orbitais calculados com inclusão das forças perturbadoras mais importantes

▪ previsão com 15 dias de avanço requer a consideração de cerca de 20 forças!

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Na maioria das aplicações, nomeadamente na área das comunicações por satélite, os elementos orbitais, regularmente actualizados, permitem determinar a órbita de um satélite no presente e no futuro próximo.

Contudo, em aplicações que exijam grande precisão, poderá recorrer-se a cálculos em que os elementos orbitais são extrapolados para o futuro com correcções de 1ª ordem.

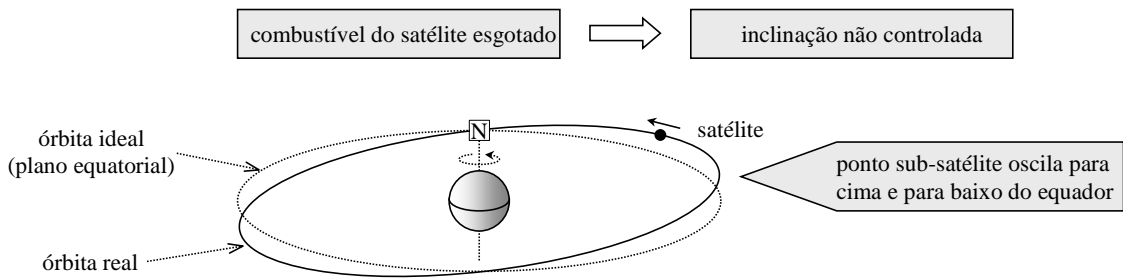
Em casos ainda mais excepcionais, haverá que efectuar um cálculo teórico muito complexo, envolvendo múltiplos efeitos sobre a órbita.

# Órbita dos satélites

## Perturbações da órbita

Efeitos do Sol e da Lua sobre um satélite geoestacionário

- órbita inclina-se com o decorrer do tempo
- desvios da ordem de  $1^\circ$  por ano são possíveis
- medidas de correcção
  - satélite executa manobras de correcção Norte-Sul, com motores de gás
  - satélite lançado numa órbita ligeiramente inclinada, de sentido contrário ao futuro desvio
- proximidade do fim de vida útil do satélite → combustível tende a esgotar-se



**Inclinação da órbita de um satélite geoestacionário por efeito do Sol e da Lua**

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A inclinação do plano da órbita de um satélite geoestacionário provoca nas estações terrestres uma variação de ciclo diário da direcção de visibilidade do satélite, essencialmente em termos de variação da elevação (no caso de uma estação terrestre com a mesma longitude do ponto sub-satélite, apenas variará a elevação; noutros casos, o azimute também irá variar, mas muito menos do que a elevação).

As manobras de correcção da órbita só podem ser executadas por motores que expellem gás numa direcção, de modo a criar um impulso no satélite de sentido contrário (princípio da conservação da quantidade de movimento).

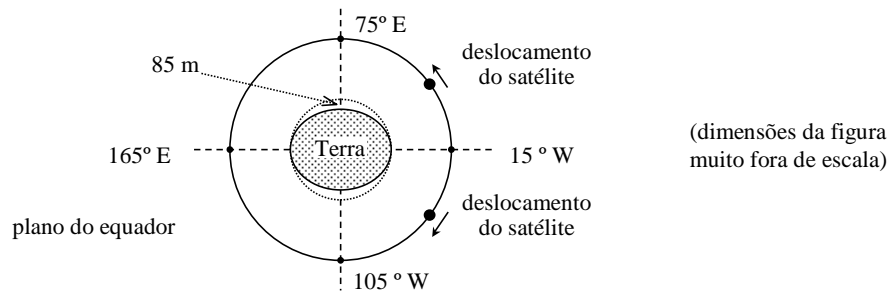
# Órbita dos satélites

## Perturbações da órbita

### Efeitos da Terra

- Terra é achatada ao longo do equador cerca de 85 m a 75°E e 105°W  
(achatamento dos pólos de  $\pm 20$  km é irrelevante para satélites geoestacionários)
- há uma tendência não controlada de deslocamento para 75°E e 105°W
- medidas de correcção → manobras Este-Oeste, com motores de gás

combustível do satélite esgotado

⇒ deslocamento para um “cemitério” → 75°E ou 105°W

### Deslocamentos de satélites geoestacionário por efeito do achatamento equatorial da Terra

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Os pontos a 75°E e 105°W são pontos de menor energia potencial, pelo que constituem pontos de "atração" dos satélites da órbita geoestacionários. A necessidade de efectuar correcções permanentes ao longo da vida útil dos satélites conduz, a prazo, ao esgotamento do combustível, e, conseqüentemente, à incapacidade de controlar a órbita.

# Órbita dos satélites

## Efeitos da órbita nas comunicações

### Efeito Doppler

- já discutido anteriormente na comparação de tipos de órbitas
- requer seguimento da frequência no receptor de satélites não geoestacionários

frequência emitida	$f_e$	$\frac{f_r - f_e}{f_e} = \frac{\Delta f}{f_e} = \frac{v_s}{c}$ $f_r = f_e \left( 1 + \frac{v_s}{c} \right)$
frequência recebida	$f_r$	
velocidade radial do satélite	$v_s$	
velocidade da luz	$c$	

- exemplo: satélite em órbita Molniya

frequência emitida	4 GHz	$\frac{v_s}{c} = 10^{-5}$	$\Delta f = 40 \text{ kHz}$
velocidade radial num ponto	3 000 m/s		

### Variação do atraso de propagação

- efeito esperado em satélites não geoestacionários
- cria problemas em satélites geoestacionários que utilizam acesso múltiplo temporal (TDMA)
  - temporização da transmissão é continuamente ajustada
  - evitam-se tempos de guarda demasiadamente longos

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A variação da distância Terra-satélite induz efeito Doppler, devido ao facto de o satélite apresentar uma componente radial da velocidade em relação à estação terrestre.

Além disso, a variação da distância implica ainda uma variação no atraso de propagação que conduz a que, em comunicações digitais, o número de bits "armazenados" no percurso varie ao longo do tempo. Para restabelecer um débito constante na recepção, será então necessário utilizar memórias tampão que compensarão as variações ocorridas no trajecto (mais bits armazenados na memória, quando o satélite se aproxima e vice-versa).

# Órbita dos satélites

---

## Efeitos da órbita nas comunicações

### Eclipses do satélite

- satélite atravessa o cone de sombra da Terra
- ocorrem nos 23 dias anteriores e posteriores aos equinócios (21 de Março e 23 de Setembro)
- duração máxima de cerca de 70 minutos (atravessamento de 12 800 km a 3 075 m/s)
- satélite opera só com baterias
- produzem-se variações térmicas muito acentuadas

alguns transpositores são desligados

### Ofuscação pelo Sol

- estação terrestre vê o Sol por trás do satélite
- ocorre em 5 ou 6 dias próximos dos equinócios
- duração máxima de cerca de 8 minutos
- duração acumulada no ano de 60 minutos
- temperatura de ruído de sistema torna-se muito elevada
- interfere ou impede as comunicações durante cerca de 100 minutos por ano (0,02%)

ocorre durante o dia, podendo coincidir com períodos de tráfego intenso

---

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

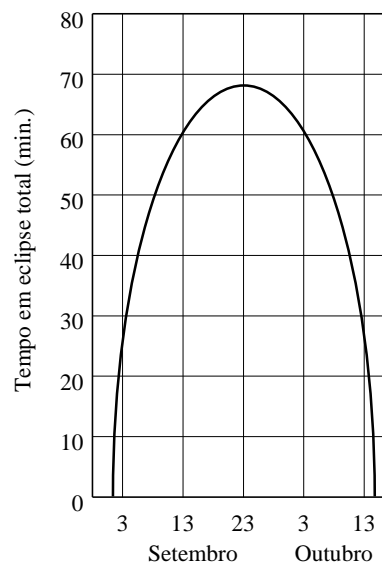
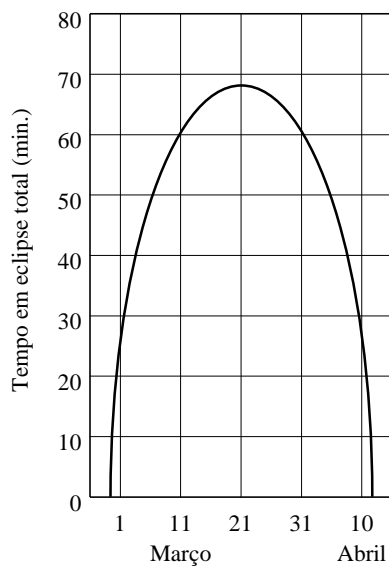
Os períodos de eclipse são os mesmos para todas as estações terrestres, competindo ao operador do satélite tomar as medidas necessárias para reduzir o seu impacto nas comunicações.

Um dos maiores problemas dos eclipses é o efeito do choque térmico resultante do período em que o satélite está na sombra da Terra, durante o qual a temperatura desce imenso (na Terra, o abaixamento nocturno de temperatura é fortemente atenuado pelo efeito moderador da própria Terra e da atmosfera). Grande parte das falhas dos equipamentos electrónicos ocorre nestes períodos.

Os períodos de ofuscação dependem da localização da estação terrestre e provocam perdas de comunicação pontuais (*sun outage*). Os operadores de cada estação terrestre deverão, por isso, conhecer em que alturas ocorre a ofuscação - nos satélites de serviço fixo, esta informação é normalmente disponibilizada pelos próprios operadores de satélite.

## Órbita dos satélites

### Efeitos da órbita nas comunicações



Datas e duração dos eclipses

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Estes gráficos permitem determinar facilmente a duração do eclipse total. Fora destes intervalos, haverá ainda períodos em que o satélite permanece na zona de penumbra.



## *Ligações por satélite*

### **Desvanecimentos de propagação**

#### • *Tipos de desvanecimentos*

Desvanecimentos quase constantes

- absorção pelos gases atmosféricos

normalmente menor do que nos feixes hertzianos terrestres

Desvanecimentos esporádicos mais ou menos lentos

- variações do ângulo de chegada por efeitos de refração

crítico se a largura do feixe das antenas for muito pequena - exige controlo adaptativo de pontaria

- multipercursos devidos a

- reflexão na superfície terrestre
- reflexão/refração em camadas estáveis da atmosfera

efeitos muito acentuados em ligações de baixa elevação ( $\alpha < 5^\circ$ ) (idênticos a feixes terrestres)

- atenuação pela precipitação

normalmente menor do que nos feixes hertzianos terrestres

Desvanecimentos esporádicos rápidos

- multipercursos devidos a não homogeneidades do índice de refração
- cintilações por efeitos de turbulências na troposfera e ionosfera, que provocam dispersão

afectam sobretudo ligações de baixa elevação que operam com pequena margem

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Os desvanecimentos que ocorrem em ligações por satélite apresentam algumas particularidades em relação aos feixes hertzianos terrestre.

Por requererem abordagens diferentes, analisaremos apenas a absorção pelos gases atmosféricos e a atenuação pela precipitação.

## *Ligações por satélite*

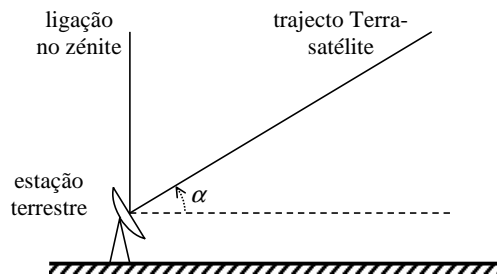
---

### **Desvanecimentos de propagação**

- Absorção pelos gases atmosféricos

- decresce com o aumento da elevação ( $\alpha$ )
- decresce com a altitude da estação ( $h_e$ )
- atenuação no trajecto inclinado calcula-se a partir da atenuação no zénite

$$A_g = \frac{A_{zen}(f, h_e)}{\text{sen}(\alpha)} = -L_g \quad (\text{dB}) \quad \alpha > 5^\circ$$



**Geometria de cálculo da absorção pelos gases atmosféricos**

---

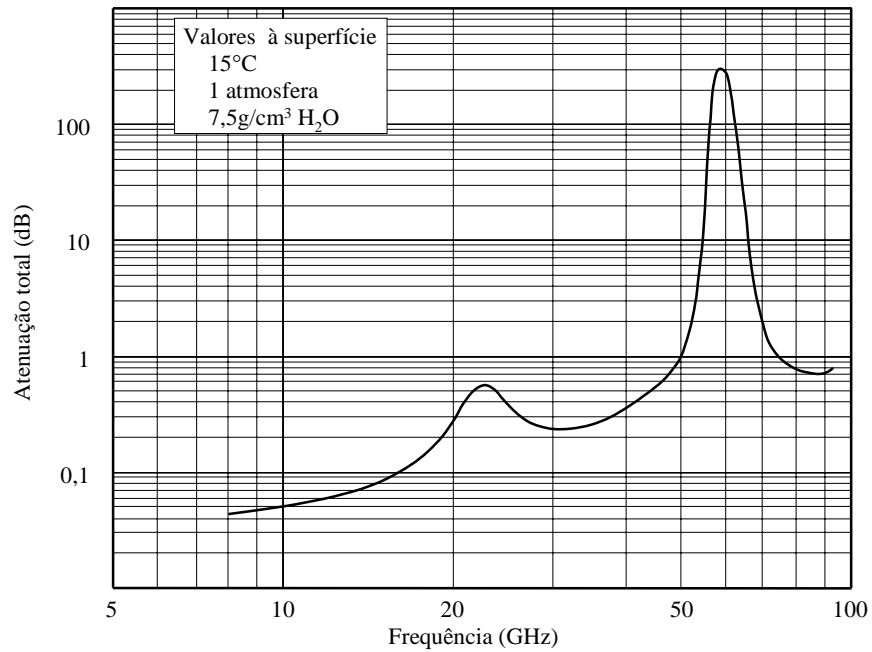
*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A expressão acima permite calcular a atenuação num trajecto inclinado, presumindo uma terra plana e uma atmosfera com absorção variável apenas com a altitude.

No entanto, para baixas elevações, a curvatura da Terra conduz a desvios da expressão, por excesso.

## *Ligações por satélite*



**Absorção pelos gases atmosféricos no zénite, desde o nível do mar ( $h_e=0$ )**

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A figura mostra os valores da absorção para um feixe apontado para o zénite, sendo evidentes os picos correspondentes às frequências de ressonância da água (22 GHz) e do oxigénio (60 GHz).

## Ligações por satélite

### Desvanecimentos de propagação

#### • Atenuação pela precipitação

- meio atenua uniformemente da altitude da estação ( $h_e$ ) até à altitude da isotérmica de 0°C ( $h_0$ )
- atenuação no trajecto inclinado calcula-se a partir da atenuação na projecção horizontal ( $d_{hor}$ )

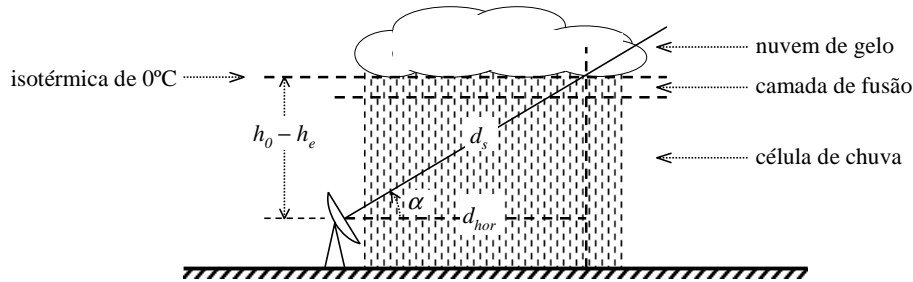
$$A_c = \frac{A_{hor}(f, P, R, d_{hor})}{\cos(\alpha)} \quad (\text{dB})$$

$P$  - probabilidade de ocorrência  
 $R$  - taxa de precipitação pontual

$$d_{hor} = \frac{h_0 - h_e}{\text{tg}(\alpha)}$$

$$h_0(\text{km}) = \begin{cases} 5,0 & 0 < \theta < 23^\circ \\ 5,0 - 0,075(\theta - 23) & \theta \geq 23^\circ \end{cases}$$

$\theta$  - latitude da estação



Geometria de cálculo da atenuação pela chuva

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

O cálculo da atenuação da ligação Terra-satélite tem que considerar a estrutura vertical e horizontal da precipitação.

No primeiro caso, considera-se que a atenuação específica é constante em função da altitude, o que se justifica admitindo, como aproximação, que as gotas caem verticalmente desde a camada isotérmica de 0°C, mantendo as suas dimensões.





O segundo caso corresponde à estrutura já analisada nos feixes terrestres, adoptando-se os mesmos modelos de cálculo.

## *Ligações por satélite*





---

### **Ruído de sistema**

Ruído térmico das ligações ascendente e descendente

- ruído do céu é geralmente reduzido
  - pequena contribuição do ruído cósmico de fundo: cerca de 3 K
  - contribuição dominante resultante da absorção   sobretudo com baixa elevação
  - cresce significativamente se ocorrer precipitação
- ruído do sistema de recepção terrestre pode ser muito baixo
- ruído do sistema de recepção do satélite é elevado   capta ruído da Terra quente

Intermodulação entre canais

- ocorre principalmente no satélite em configurações com
  - transpositores não regenerativos e
  - multi-portadoras com acesso simultâneo ao transpositor   FDMA - *Frequency Division Multiple Access*
- exige amplificadores com boa linearidade
  - amplificação de potência particularmente difícil
  - opera-se alguns dB abaixo da saturação   margem de saturação - *backoff*
  - problema menor com portadoras digitais (margem pode ser menor)

---

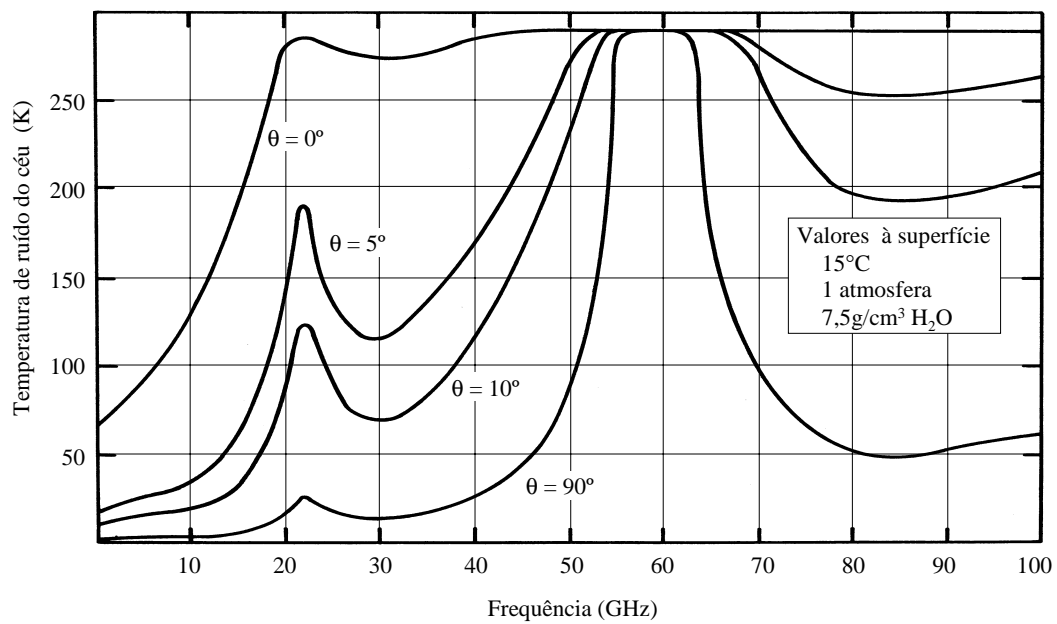
*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Mais uma vez, a análise do ruído térmico efectuada para os feixes hertzianos terrestres é aplicável, com algumas adaptações. A principal diferença ocorre na ligação satélite-terra, em que o ruído do céu pode ser muito baixo.

Em sistemas por satélite que usam acesso múltiplo por divisão nas frequências (FDMA), a intermodulação entre canais terá de ser especialmente considerada.

Note-se que, no caso de existir uma única portadora por canal, como acontece tipicamente nos feixes hertzianos terrestres, ocorrem igualmente produtos de intermodulação entre as várias componentes espectrais do sinal. Contudo, como há um único sinal no canal, é possível utilizar equalizadores para reduzir este tipo de ruído.



Temperatura de ruído do céu em tempo limpo em função da elevação  $\theta$

Sistemas de Telecomunicações II

Sistemas de Comunicação por Satélite

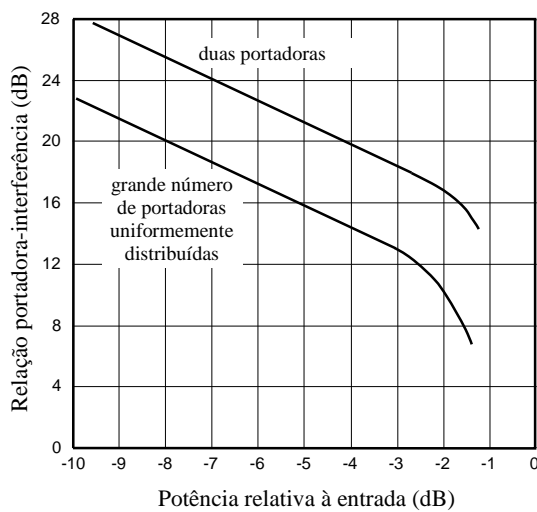
Esta figura reflecte o aumento da temperatura de ruído de céu resultante da absorção nos gases atmosféricos. Como a temperatura de ruído cósmico de fundo  $T_{cosm}$  é muito baixa (cerca de 3 K), a temperatura de ruído do céu  $T_{céu}$  pode ser calculada usando a expressão

$$T_{céu} = LT_{cosm} + (1 - L) T_m \text{ (K)}$$

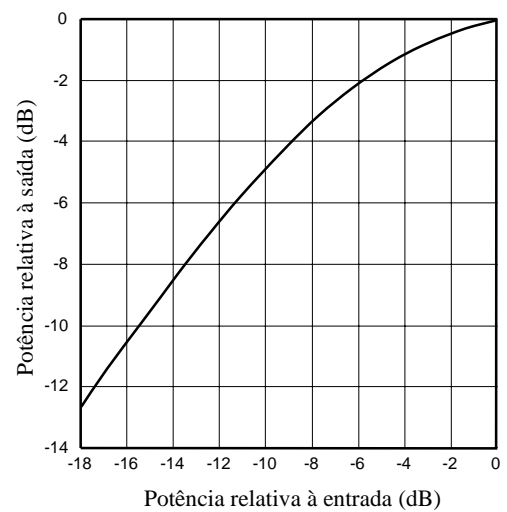
$$T_{céu} \approx (1 - L) T_m \text{ (K)}$$

em que  $L$  é a perda introduzida pelos gases atmosféricos e  $T_m$  é a temperatura de absorção do meio

## Ligações por satélite



**Relação C/I em função da potência à entrada do transpositor**  
(referida à potência de saturação)



**Potência de saída versus potência de entrada num transpositor**  
(valores referidos à saturação)

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Como se pode observar no gráfico da esquerda, admitindo o caso de duas portadoras, se se pretender uma relação C/I de 24 dB, deverá ser assegurada uma margem de saturação à entrada de 7 dB (*input backoff*) - ou seja, a potência à entrada tem de estar 7 dB abaixo da potência de saturação.

Por outro lado, no gráfico da direita pode verificar-se que resulta uma margem de saturação à saída (*output backoff*) de cerca de 3 dB - logo, a potência à saída está 3 dB abaixo da potência máxima de saturação.

Obviamente que a introdução da margem de saturação reduz o EIRP na ligação descendente, degradando por sua vez a relação C/N. Estes efeitos contraditórios terão que ser pesados numa perspectiva de compromisso entre os efeitos em jogo.

## *Ligações por satélite*

### **Ruído de sistema**

#### Interferências entre canais

- resultam da reutilização de frequências

- banda C (6/4 GHz) até 6 vezes por satélite
- banda Ku (14/11 GHz) até 2 vezes por satélite

com separação espacial e polarizações ortogonais

- garante-se separação mínima entre satélites

- banda C (6/4 GHz) 4°
- banda Ku (14/11 GHz) 3°
- banda Ka (30/20 GHz) 1°

capacidade da órbita geoestacionária é limitada

- exige-se planeamento adequado de frequências

coordenação mundial ao nível da UIT

- banda ascendente e descendente muito afastadas entre si
- bandas de guarda entre canais

- agravam-se com efeitos de propagação

- despolarização pela chuva

cria atenuação diferencial

- despolarização pelo gelo ou neve

cria esfasamento diferencial

#### Ofuscação pelo Sol

- já discutido anteriormente

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A análise de interferência entre canais baseia-se na capacidade das antenas discriminarem direccionalmente e na polarização ortogonal, tendo em conta ainda efeitos de propagação que criam despolarização.

Esta análise permite concluir qual o grau permitido de reutilização de frequências e de separação entre satélites, de modo a otimizar a capacidade global dos sistemas por satélite.



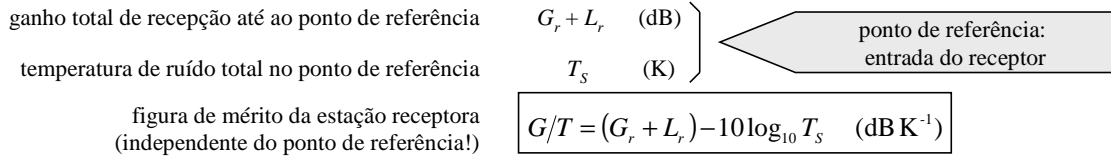
## Ligações por satélite

### Relação portadora-ruído térmico numa ligação simples em espaço livre

Expressão geral para uma ligação

$$C/N = EIRP + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} + L_g + G_r + L_r - 10 \log_{10} k T_s B$$

Figura de mérito da estação receptora



Relação portadora-ruído à saída do receptor	
Ligação	Balanco de potência e de ruído (dB)
Analógica Digital	$C/N = EIRP + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} + L_g + G/T - 10 \log_{10} k - 10 \log_{10} B$
Digital	$E_b/N_0 = EIRP + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} + L_g + G/T - 10 \log_{10} k - 10 \log_{10} R_b$

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A única particularidade da aplicação da relação portadora-ruído aos sistemas por satélite é a identificação da figura de mérito da estação terrestre ( $G/T$ ), que, tal como o nome indica, traduz, num único parâmetro, o desempenho global do sistema de recepção, por combinar o ganho de recepção e a temperatura de ruído de sistema.

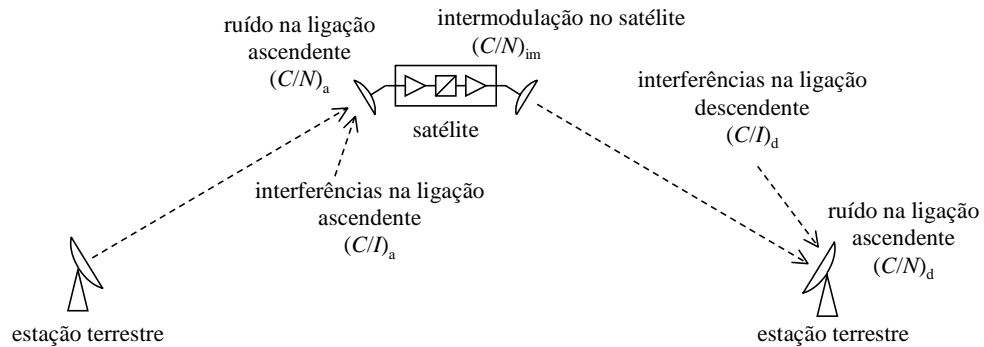
Como já tínhamos visto, do lado da emissão, o parâmetro equivalente que traduz o desempenho do sistema de emissão é a potência isotrópica radiada efectiva (EIRP), uma vez que combina a potência emitida e o ganho de emissão.

## Ligações por satélite

### Relação portadora-ruído total numa ligação completa

- as fontes de ruído podem ser consideradas de tipo gaussiano
- assume-se que não são correlacionadas
  - apenas aproximado, no caso de ruído de intermodulação

$$(C/N)^{-1} = (C/N)_a^{-1} + (C/I)_a^{-1} + (C/N)_{im}^{-1} + (C/N)_d^{-1} + (C/I)_d^{-1}$$



### Relação portadora-ruído total numa ligação completa

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A equação acima presume ruído aditivo, sendo por isso aplicável apenas no caso de não haver regeneração a bordo do satélite. Se este for o caso, teremos de calcular separadamente a relação  $C/N$  na ligação ascendente e na ligação descendente.

Nas páginas seguintes, exemplifica-se o cálculo de ligações em situações típicas de satélites de serviço fixo, de serviço de difusão e de serviço móvel.

## SATÉLITE DE SERVIÇO FIXO (FSS)

### LIGAÇÃO ASCENDENTE 6 GHz

Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de emissão	190 W	22,8 dB W	
Ganho da antena terrestre (1)	61,7 dB	61,7 dB	
EIRP		84,5 dB W	84,5 dBW
$10 \log_{10} (4\pi d^2)$		162,6 dB m <sup>2</sup>	
Densidade de fluxo no satélite		-78,1 dBW/m <sup>2</sup>	
Perdas em espaço livre			-199,6 dB
Ganho da antena do satélite	23,1 dB	23,1 dB	
Temperatura de ruído de sistema do satélite	575 K	(-) 27,6 dB K	
Figura de mérito do satélite		-4,5 dB K <sup>-1</sup>	-4,5 dB K <sup>-1</sup>
Constante de Boltzmann			(-) -228,6 dB W Hz <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Largura de banda do transpositor	36 MHz		(-) 75,6 dB Hz
Perdas diversas	-3,5 dB		-3,5 dB
Relação portador-ruído em tempo limpo			29,9 dB

### LIGAÇÃO DESCENDENTE A 4 GHz

Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de saída do satélite	5 W	7,0 dB W	
Ganho da antena do satélite	22,5 dB	22,5 dB	
EIRP		29,5 dB W	29,5 dB W
$10 \log_{10} (4\pi d^2)$		(-) 162,6 dB m <sup>2</sup>	
Densidade de fluxo na Terra		-133,1 dBW/m <sup>2</sup>	
Perdas em espaço livre			-196,1 dB
Ganho da antena terrestre (1)	58,2 dB	58,2 dB	
Temperatura de ruído de sistema terrestre	75 K	(-) 18,8 dB K	
Figura de mérito do sistema terrestre		39,4 dB K <sup>-1</sup>	39,4 dB K <sup>-1</sup>
Constante de Boltzmann			(-) -228,6 dB W Hz <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Largura de banda do transpositor	36 MHz		(-) 75,6 dB Hz
Perdas diversas			-3,0 dB
Relação portador-ruído em tempo limpo			22,9 dB

### LIGAÇÃO COMPLETA

Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Relação portador-ruído ascendente	29,9 dB		29,9 dB
Relação portador-ruído descendente	22,9 dB		22,9 dB
Relação portador-ruído total (2)			22,1 dB

Notas:

- (1) As antenas terrestres têm cerca de 24 m de diâmetro e larguras de feixe de 0,2° a 4 GHz e 0,15° a 6 GHz
- (2) Assume-se que o repetidor do satélite é não regenerativo e que o ruído térmico é dominante

**SATÉLITE DE SERVIÇO DE DIFUSÃO (BSS)**

<b>LIGAÇÃO DESCENDENTE 12,2 GHz</b>			
<b>Característica</b>	<b>Dados</b>	<b>Cálculos Intermédios</b>	<b>Cálculo Final</b>
Distância	38000 km		
Potência de saída do satélite (1)	120 W	20,8 dB W	
Ganho da antena do satélite (2)	37 dB	37,0 dB	
EIRP		57,8 dB W	
$10 \log_{10} (4\pi d^2)$		(-) 162,6 dB m <sup>2</sup>	
Perdas por absorção	-0,5 dB	-0,5 dB	
Densidade de fluxo na Terra		-105,3 dBW/m <sup>2</sup>	
Diâmetro da antena terrestre	0,7 m	0,7 m	
Eficiência da antena terrestre	60%	0,6	
Área equivalente de recepção		-6,37 dB m <sup>2</sup>	
Estação no limite da cobertura	-3 dB	-3,0 dB	
Perda de polarização	-0,5 dB	-0,5 dB	
Erro de pontaria da antena receptora (3)	-1 dB	-1,0 dB	
Perdas nas ligações	-1 dB	-1,0 dB	
Perdas totais		-5,5 dB	
Potência recebida		-117,2 dB W	-117,2 dB W
Constante de Boltzmann			-228,6 dB W Hz <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Temperatura de ruído de sistema (4)	120 K	20,8 dB K	20,8 dB K
Largura de banda do canal (FI)	36 MHz		75,6 dB Hz
Potência de ruído			(-) -132,2 dB W
Relação portadora-ruído em tempo limpo			15,1 dB
Relação portadora-ruído mínima	10 dB		(-) 10,0 dB
Margem disponível			5,1 dB

Notas:

- (1) A potência de 120 W, sendo elevada, aumenta o custo e complexidade do satélite, mas permite que milhões de utilizadores utilizem pequenos sistemas de recepção, de baixo custo
- (2) A antena do satélite tem uma largura do feixe de 3°x2°, correspondente a uma cobertura de 2000x1400 km
- (3) A antena de recepção de 0,7 m tem 2,5° de largura de feixe; para apontá-la com um erro de 1 dB é necessário uma precisão de 0,7°
- (4) Uma temperatura de ruído de sistema de 120 K é compatível com a tecnologia actual de LNBs de baixo ruído e custo reduzido

**SATÉLITE DE SERVIÇO MÓVEL (MSS)**

**LIGAÇÃO ASCENDENTE 1 636,5 - 1 645 MHz**

Característica	Dados	Cálculos Intermediários	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de emissão	10 W	10,0 dB W	
Ganho da antena do barco (1)	27 dB	27,0 dB	
EIRP		37,0 dB W	
Perdas em espaço livre		-188,3 dB	
Ganho da antena do satélite (2)	18 dB	18,0 dB	
Potência recebida no satélite		-133,3 dB W	-133,3 dB W
Temperatura de ruído de sistema do satélite	500 K	27,0 dB K	
Constante de Boltzmann		-228,6 dB W Hz <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
Largura de banda do canal	30 kHz	44,8 dB Hz	
Potência de ruído no satélite		-156,8 dB W	(-) -156,8 dB W
Relação portador-ruído			23,5 dB

**LIGAÇÃO DESCENDENTE 1 535 - 1543,5 MHz**

Característica	Dados	Cálculos Intermediários	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Número de canais	40	40	
Potência de saída do satélite	10 W	10 W	
Potência de saída por canal		-6,0 dB W	
Ganho da antena do satélite (2)	17,5 dB	17,5 dB	
EIRP		11,5 dB W	11,5 dBW
Perdas em espaço livre			-187,8 dB
Figura de mérito do sistema de recepção	-4 dB K <sup>-1</sup>		-4,0 dB K <sup>-1</sup>
Constante de Boltzmann			(-) -228,6 dBW Hz <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Largura de banda do canal	20 kHz		(-) 43,0 dB Hz
Relação portador-ruído			5,3 dB

Notas:

- (1) A antena do barco tem cerca de 2 m e 8° de largura de feixe  
 (2) Considera-se o valor do ganho no limite de cobertura do satélite

## Ligações por satélite

### Modulações e serviços

#### • Ligações analógicas

- modulação FM idêntica à utilizada em feixes hertzianos terrestres

$$S/N = C/N \frac{3B_{FI} \Delta f_{ef}^2}{f_2^3 - f_1^3} \quad B_{FI} = 2 (\Delta f_{max} + f_{max})$$

Características de ligações analógicas		
Multiplex telefónico FDM /FM	$(S/N)_p = C/N + 20 \log_{10} \frac{\Delta f_{ef}}{f_{max}} + 10 \log_{10} \frac{B_{FI}}{b} + a + p \quad (\text{dB})$	$a = 4,0 \text{ dB}$ $p = 2,5 \text{ dB}$
Monocanal telefónico SCPC	$(S/N)_p = C/N + 20 \log_{10} \frac{\Delta f_{ef}}{f_{max}} + 10 \log_{10} \frac{3B_{FI}}{f_{max}} + a + p + c \quad (\text{dB})$ $c$ - melhoria da relação sinal/ruído resultante da compressão do sinal analógico	$a = 4,0 \text{ dB}$ $p = 2,5 \text{ dB}$ $c = 16 \text{ dB}$ (tipicamente)
Televisão SCPC	$(S/N)_p = C/N + 20 \log_{10} \frac{\Delta f_{ef}}{f_{max}} + 10 \log_{10} \frac{3B_{FI}}{f_{max}} + a + p \quad (\text{dB})$	$a = 2,0 \text{ dB}$ $p = 7,4 \text{ dB}$

SCPC - Single Channel per Carrier

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Para o multiplex telefónico e televisão, as técnicas de processamento utilizadas em banda base são idênticas às utilizadas em feixes hertzianos, nomeadamente a acentuação (ênfase), de que resulta uma melhoria objectiva da relação sinal ruído (parâmetro  $a$  das equações).

Da mesma forma, é habitual considerar uma ponderação, que se traduz numa melhoria subjectiva da relação sinal ruído (parâmetro  $p$  das equações).

No caso do monocanal telefónico, além da acentuação e ponderação, aplica-se a compressão do sinal analógico. Esta técnica consiste no seguinte:

- antes da modulação, reduz-se a gama dinâmica do sinal, isto é, amplifica-se o sinal tanto mais quanto menor for a sua potência - por exemplo, se o sinal original à entrada do compressor cobrir uma gama dinâmica entre -50 dBm e 0 dBm, à saída poderá variar entre -25 dBm e 0 dBm;
- à saída do desmodulador efectua-se a operação inversa.

É sabido que os sinais de baixo nível são os mais afectados pelo ruído. Ora, a vantagem desta técnica decorre precisamente do facto de, nesta situação, os sinais sofrerem uma atenuação à saída do desmodulador, e, conseqüentemente, o ruído ser atenuado do mesmo valor. Resulta, assim, uma melhoria associada à ausência de ruído percebido, por exemplo, durante silêncios da conversação. Considera-se um aumento equivalente da relação sinal-ruído, de um valor típico de 16 dB.

Outra técnica utilizada frequentemente em telefonia monocanal é a activação de voz, que consiste na activação da portadora apenas durante o período de conversação. Durante os períodos de silêncio, a portadora é suprimida, resultando uma redução efectiva da potência média de transmissão.

# Ligações por satélite

## Modulações e serviços

### • Ligações digitais

Características gerais

- modulações de fase de m estados: BPSK ( $M=2$ ) / QPSK - MSK ( $M=4$ )

- eficiência de potência é determinante

ligações limitadas pelo ruído

- modulação MSK tem espectro compacto e permite menores interferências

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

$$\frac{R_b}{\log_2 M} < B_{FI} < \frac{2R_b}{\log_2 M}$$

$$B_{FI} \approx 1,2R_b \quad \text{BPSK}$$

$$B_{FI} \approx 0,6R_b \quad \text{QPSK - MSK}$$

- métodos de correcção de erros

- utilizados em muitos sistemas

- permitem operar com menores  $EIRP$  e  $G/T$

- são usados códigos FEC (*Forward Error Correction*)

- ganho de codificação ( $f$ ) dependente do método

códigos ARQ não são adequados:  
atraso de propagação é elevado

com correcção  
de erros (FEC)

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} f\right)$$

exemplo:  $10 \log_{10} f = 5,5 \text{ dB}$

(código convolucional com eficiência de 50%)

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

Em relação aos feixes hertzianos digitais terrestres, os sistemas por satélite apresentam as seguintes particularidades ao nível dos moduladores:

- modulações com poucos estados, mais eficientes em potência;
- utilização mais frequente de códigos de correcção de erros de tipo FEC;
- adopção de métodos de encriptagem de dados, devido à maior possibilidade de intrusão de estranhos na recepção dos sinais.

## Ligações por satélite

### Modulações e serviços

#### • Ligações digitais

Serviços suportados

- telefonia digital
- dados não restritos
- tele-serviços de tipo RDIS
- televisão

monocanal / multicanal

SCPC - *Single Channel per Carrier* ou  
TDM - *Time Division Multiplex*

SCPC - *Single Channel per Carrier* ou  
MCPC - *Multiple Channel per Carrier*

Serviços digitais por satélite			
telefonia digital	PCM 64 kbit/s ADPCM 32 kbit/s vocoders 16 / 4,8 / 2,4 kbit/s (codificadores de fonte para voz)	dados não restritos	interligação de redes tráfego Internet e Intranets tráfego transaccional
tele-serviços tipo RDIS	videotelefonia teleconferência telemedicina educação à distância controlo remoto	televisão	DPCM 34 Mbit/s MPEG-2 distribuição 4 - 5 Mbit/s contribuição 7 - 8 Mbit/s HDTV 20 - 24 Mbit/s

*Sistemas de Telecomunicações II*

*Sistemas de Comunicação por Satélite*

A designação MCPC é normalmente utilizada em serviços de distribuição de televisão, sendo naturalmente uma forma de multiplexagem temporal TDM.

Na secção seguinte, discutiremos vários exemplos de configurações de comunicação por satélite, adequadas ao suporte deste tipo de serviços.