

3.3 Perdas de Transmissão e Decibéis

Além de distorção de sinal, um sistema de transmissão também reduz o nível de potência ou “vigor” do sinal de saída.

Esta redução no “vigor” do sinal é expresso em termos de perdas de potência na transmissão.

Ganho de potência

Seja P_{in} a potência média do sinal de entrada na Figura 3.3-1; se o sistema é sem distorção, a **potência média** na saída P_{out} será proporcional a P_{in} .



Figure 3.3-1 LTI system with power gain g .

O **ganho de potência** é dado pela razão:

$$g \triangleq P_{out}/P_{in} \quad \text{W/W, adimensional} \quad (1)$$

3.3 Perdas de Transmissão e Decibéis

Além de distorção de sinal, um sistema de transmissão também reduz o nível de potência ou “vigor” do sinal de saída.

Esta redução no “vigor” do sinal é expresso em termos de perdas de potência na transmissão.

Ganho de potência

Seja P_{in} a potência média do sinal de entrada na Figura 3.3-1; se o sistema é sem distorção, a **potência média** na saída P_{out} será proporcional a P_{in} .

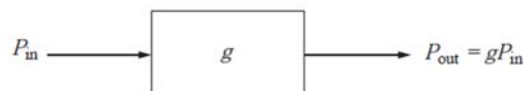


Figure 3.3-1 LTI system with power gain g .

O **ganho de potência** é dado pela razão:

$$g \triangleq P_{out}/P_{in} \quad \text{W/W, adimensional} \quad (1)$$

Sistemas que incluem **amplificação** podem possuir grandes valores de g , e assim, é conveniente expressar o ganho de potência em decibéis (dB):

$$g_{dB} \triangleq 10 \log_{10} g \quad \text{dB, decibeis} \quad (2)$$

$$g \triangleq P_{out}/P_{in} \quad (1)$$

$$g_{dB} \triangleq 10 \log_{10} g \quad (2)$$

Decibel sempre representa a **razão** entre potências.

Amplificação: $g > 1 \rightarrow g_{dB} > 0 \text{ dB}$ (Se $g = 10.000 = 10^4 \Rightarrow g_{dB} = 10 \log_{10} 10^4 = +40 \text{ dB}$)

Ganho unitário: $g = 1 \rightarrow g_{dB} = 0 \text{ dB}$

Atenuação: $g < 1 \rightarrow g_{dB} < 0 \text{ dB}$ (Se $g = 0,0001 = 10^{-4} \Rightarrow g_{dB} = 10 \log_{10} 10^{-4} = -40 \text{ dB}$)

Dado um valor de ganho em dB, ou seja g_{dB} , o valor da **razão linear** g é dado pela inversão de (3.3-2):

$$g = 10^{(g_{dB}/10)} \quad (3)$$

A potência do sinal (P) propriamente dita também pode ser expressa em decibéis, desde que referenciada a um valor de base como **1 W** ou **1 mW**, por exemplo:

$$P_{dBW} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ W}} \quad , \quad P_{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ mW}} \quad (4)$$

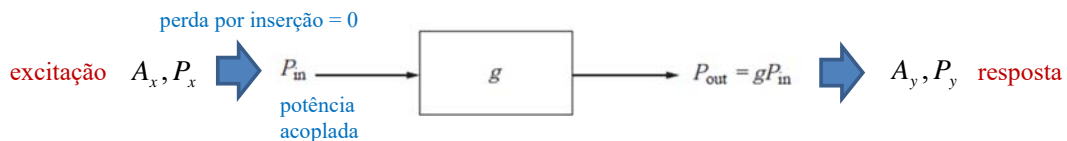
Reescrevendo a relação (3.3-1) como $(P_{out}/1 \text{ mW}) = g(P_{in}/1 \text{ mW})$, e tomando-se o logaritmo de ambos os lados, gera-se a equação em dB:

$$P_{out,dBm} = g_{dB} + P_{in,dBm} \quad \text{Atenção: } P_{in} \text{ e } P_{out} \text{ em dBm ou dBW, e, } g \text{ em dB}$$

Neste tipo de notação, operações como multiplicação e divisão são convertidas em somas e subtração de grandezas em dB.

No caso da resposta em frequência $H(f)$, uma senoide de entrada com amplitude A_x produz a amplitude de saída $A_y = |H(f)|A_x$, e as potências de sinais normalizados são $P_x = A_x^2/2$ e $P_y = A_y^2/2 = |H(f)|^2 P_x$.

Quando o sistema tem os mesmos níveis de **impedâncias** de entrada e saída, ocorre: $P_y/P_x = P_{out}/P_{in}$.



Neste caso, se $H(f) = K e^{-j\omega t}$ (sistema sem distorção), então, de $P_{out} = gP_{in}$ ou $P_y = gP_x$, vem

$$g = |H(f)|^2 = K^2 \quad (5)$$

Numa tal situação, o ganho de potência (3.3-5) também se aplica a **sinais de energia**, no sentido de que

$$E_y = gE_x.$$

Por outro lado, se o sistema for **seletivo em frequência**, a equação (3.3-5) não se aplica, porém, $|H(f)|^2$ ainda informa como o ganho varia com a frequência.

Nestes casos, se escreve:

$$|H(f)|_{dB} \triangleq 10 \log_{10} |H(f)|^2 \quad (6)$$

o qual representa o ganho relativo em dB (diagrama de Bode).

Perdas de Transmissão e Repetidoras

Qualquer meio de transmissão passivo, em vez de **ganho**, tem **perda** de potência, pois $P_{out} < P_{in}$.

Neste caso, é preferível trabalhar com a **perda de transmissão** ou **atenuação** ($L > 1$ unidade):

$$L \triangleq 1/g = P_{in}/P_{out} \quad (7)$$

$$L_{dB} = -g_{dB} = 10 \log_{10} P_{in}/P_{out} \quad L_{dB} = P_{in, dBm} - P_{out, dBm}$$

Portanto:

$$P_{out} = P_{in}/L \quad \text{e} \quad P_{out, dBm} = P_{in, dBm} - L_{dB}$$

No caso de **linhas de transmissão** (cabos coaxiais, guias de ondas e fibras ópticas) a potência de saída decresce exponencialmente com a distância, conforme:

$$P_{out} = 10^{-(\alpha \ell / 10)} P_{in} \quad \text{Lei de Beer-Lambert: perdas dissipativas, por absorção ou espalhamento}$$

onde ℓ é o comprimento do percurso entre fonte e destino, e α é o coeficiente de atenuação medido em dB por unidade de comprimento (dB/km).

Neste caso, a equação (3.3-7) conduz a:

$$P_{out} = P_{in}/L \rightarrow 1/L = 10^{-(\alpha \ell / 10)} \quad L = 10^{(\alpha \ell / 10)} \quad \text{e} \quad L_{dB} = \alpha \ell \quad (8)$$

Obs: $L_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{10^{-(\alpha \ell / 10)} P_{in}} = 10 \log_{10} 10^{(\alpha \ell / 10)} = \frac{\alpha \ell}{10} 10 \log_{10} 10 = \alpha \ell \quad \#$

Alguns valores típicos de α (em dB/km), para vários meios de transmissão e frequências de sinal, são apresentados na Tabela 3.3-1:

Table 3.3-1 Typical values of transmission loss

Transmission Medium	Frequency	Loss dB/km
Open-wire pair (0.3 cm diameter)	1 kHz	0.05
Twisted-wire pair (16 gauge)	10 kHz	2
	100 kHz	3
	300 kHz	6
Coaxial cable (1 cm diameter)	100 kHz	1
	1 MHz	2
	3 MHz	4
Coaxial cable (15 cm diameter)	100 MHz	1.5
Rectangular waveguide (5 × 2.5 cm)	10 GHz	5
Helical waveguide (5 cm diameter)	100 GHz	1.5
Fiber-optic cable	3.6×10^{14} Hz ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$)	2.5
	2.4×10^{14} Hz ($\lambda = 1.30 \mu\text{m}$)	0.5
	1.8×10^{14} Hz ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)	0.2

Obs: $f = c/\lambda = 3 \times 10^8 / \lambda$

Exemplo: Transmissão de sinal através de uma distância $\ell = 30$ km, por cabo com $\alpha = 3$ dB/km (correspondente a cabo coaxial operando em $f = 2$ MHz).

Usando-se:
$$L = 10^{(\alpha\ell/10)} \text{ e } L_{dB} = \alpha\ell \quad (8)$$

obtém-se que
$$L_{dB} = \alpha\ell = 3 \frac{\text{dB}}{\text{km}} 30 \text{ km} = 90 \text{ dB}$$

ou então
$$L = 10^{\alpha\ell/10} = 10^{90/10} = 10^9 \quad (\text{crescimento exponencial})$$

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{L} = 10^{-9} P_{in}$$

Seria necessária uma potência de entrada igual a 1 mW a fim de se obter uma potência de saída de 1 pW (10^{-12} W) na outra extremidade do cabo

Dobrando-se o comprimento do percurso (ℓ), dobra-se a atenuação ($L_{dB} = \alpha\ell$) para 180 dB, tal que

$$L = 10^{\alpha\ell/10} = 10^{180/10} = 10^{18}$$

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{L} = 10^{-18} P_{in}$$

Tal perda é tão grande, que seria necessária uma potência de entrada igual a 1 MW a fim de se obter uma potência de saída de 1 pW (10^{-12} W) na outra extremidade do cabo!!! #

Amplificador repetidor

Na Figura 3.3-2 é mostrado um sistema de transmissão por cabo, que usa um amplificador na saída e um **amplificador repetidor** inserido na metade do percurso a fim de compensar as perdas:

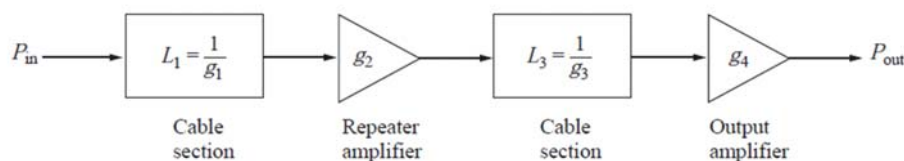


Figure 3.3-2 Cable transmission system with a repeater amplifier.

O repetidor é usado para evitar que a potência de sinal caia abaixo do nível de ruído de cada etapa.

Como os ganhos de potência se multiplicam numa conexão em cascata conforme:

$$P_{out} = (g_1 g_2 g_3 g_4) P_{in} = \frac{g_2 g_4}{L_1 L_3} P_{in} \quad (9a)$$

obtém-se a seguinte equação em dB:

$$P_{out} = (g_2 + g_4) - (L_1 + L_3) + P_{in} \quad (9b)$$

Nesta notação simplificada as grandezas estão em dB, e, as unidades de P_{in} e P_{out} são as mesmas, provavelmente dBW ou dBm.

Fibras Ópticas

Sistemas de cabos para grandes lances têm repetidoras espaçadas por **alguns km's**, e, um enlace telefônico transcontinental pode precisar de 2000 repetidores. (enlace de 2260 km → 1 repetidor a cada 1,33 km)

As fibras ópticas apresentam perdas da ordem de 0,1 dB/km, contra 3 dB/km dos cabos coaxiais, diminuindo significativamente a quantidade de repetidores. (1 a cada 40 km no caso da fibra → 57 repetidores)

Sistemas ópticos operam com frequências de portadoras com aproximadamente 2×10^{14} Hz e com larguras de bandas (teóricas) da ordem de 2×10^{13} Hz, muito superiores as que são possíveis com cabos.

Atualmente é possível transmitir 100.000 chamadas telefônicas simultâneas por fibra, sendo que esta capacidade ainda pode ser ampliada com o uso de tecnologia WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*).

Outras vantagens:

- Guia dielétrico: menor susceptibilidade a interferências de fontes externas.
- Ausência de corrente elétrica: não gera campos eletromagnéticos externos ou energia radiada. (Não geram *crosstalk* ou interferência para outros sistemas de comunicação.)
- Sem interação entre fótons: não se gera ruído dentro da fibra óptica.
- Não operam com altas tensões ou correntes: instalação e manutenção seguras aos operadores.
- Somente é possível acessar o sinal interno com o uso de foto detectores: segurança de rede.
- Pequenos diâmetro (125 μm) e peso: pouco espaço para armazenamento e facilidade de transporte.
- Fabricados a partir de quartzo ou plástico: materiais comercialmente abundantes.
- Cabos robustos, flexíveis e operam diante de maiores variações de temperatura que cabos metálicos.

Principais tipos: monomodo e multi modo com índice degrau, e, multi modos com índice gradual:

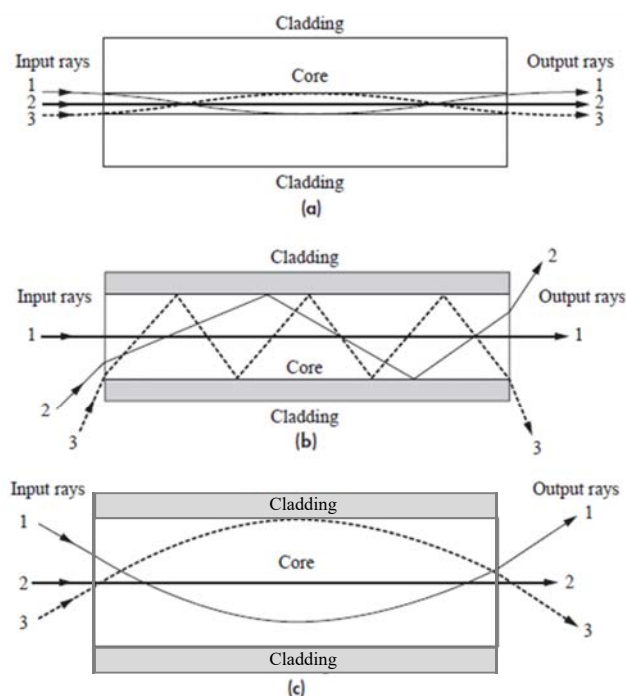


Figure 3.3-3 (a) Light propagation down a single-mode step-index fiber. (b) Light propagation down a multimode step-index fiber. (c) Light propagation down a multimode graded-index fiber.

Para leitura:

Carlson, A.B., Crilly, P. B., **Communication Systems – An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication**, 5rd. Edition, McGraw- Hill, 2010, 686p.

- Elementos do enlace óptico (LEDs, LDs, fotodiodos PIN, avalanche, etc.)
- Partes constituintes da fibra óptica (núcleo, casca, revestimento)
- Tipos de fibras: monomodo e multimodos
- Dispersão modal e operação mono modo
- Perdas por absorção e espalhamento de luz
- Janelas ópticas de transmissão
- Capacidade (bits/s) de transmissão.

Transmissão por Rádio

A transmissão de sinais por rádio-propagação pode reduzir o número de repetidoras e tem a vantagem adicional de eliminar longos cabos (1 repetidora a cada 48 km). *neste quesito, compete com as fibras ópticas*

Na Figura 3.3-4 ilustra-se a propagação por **visada direta** (*line-of-sight propagation*), na qual a onda de rádio percorre um percurso direto entre a antena transmissora e a receptora.

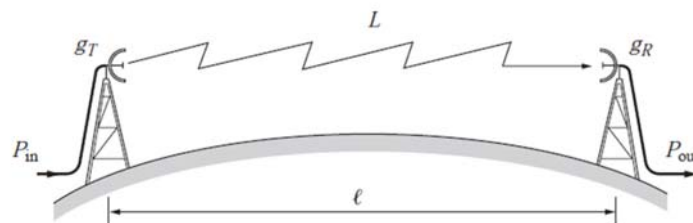


Figure 3.3-4 Line-of-sight radio transmission.

Como a transmissão/ recepção ocorre através de antenas, o processo exige **modulação** do sinal.

Esta forma de propagação normalmente é empregada para comunicações de longa distância, em frequências acima de 100 MHz.

Perda por Difração

A **perda** no espaço livre, em um percurso por visada direta, se deve a **difração esférica** da energia em ondas de rádio:

$$L = \left(\frac{4\pi\ell}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi f\ell}{c} \right)^2 \quad \text{perda linear, W/W} \quad (10a)$$

na qual λ é o comprimento de onda, f é a frequência de sinal e c é a velocidade da luz.

Se ℓ for expresso em km e f em GHz, (3.3-10a) torna-se:

$$L_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi f_{GHz} \ell_{km}}{10^{-9} 10^{-3} 3 \times 10^8} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{10^{-9} 10^{-3} 3 \times 10^8} \right) + 20 \log_{10} f_{GHz} + 20 \log_{10} \ell_{km}$$

$$L_{dB} = 92.4 + 20 \log_{10} f_{GHz} + 20 \log_{10} \ell_{km} \quad (10b)$$

Observe-se que, devido a **difração**, L_{dB} **aumenta com o logaritmo** de ℓ , em vez da proporção direta*: dobrando-se o comprimento do percurso, a perda aumenta apenas de 6 dB.

contra 90 dB no caso do cabo com 3 dB/km

Condições climáticas severas podem aumentar as perdas, devido a **absorção** e **espalhamento** (ar e umidade).

***Obs:** lembre-se que, no caso da **atenuação**: $L = 10^{(\alpha\ell/10)}$ e $L_{dB} = \alpha\ell$ (linear, dB) (8)

Ganho de antenas

Antenas direcionais apresentam o efeito de **focalização** que age como amplificação, no sentido que:

$$P_{out} = \frac{g_T g_R}{L} P_{in} \quad \text{ganhos e perdas lineares, W/W} \quad (11)$$

onde g_T e g_R representam os **ganhos** das antenas transmissora e receptora. ganhos em relação a uma antena isotrópica

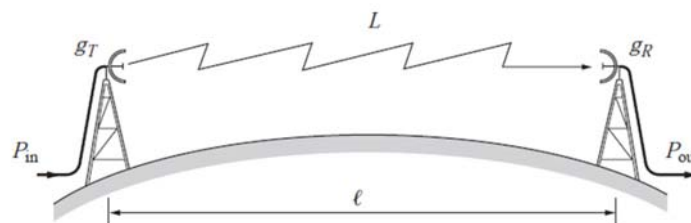


Figure 3.3-4 Line-of-sight radio transmission.

O ganho máximo de transmissão ou recepção de uma antena com **área de abertura efetiva** A_e é:

$$g = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_e f^2}{c^2} \quad \text{ganho linear, W/W} \quad (12)$$

O valor de A_e (em m^2) para uma antena *horn* ou *dish* é aproximadamente igual à sua área física. Um grande refletor parabólico pode proporcionar ganho em excesso da ordem de 60 dB (1 milhão!)

Estações de rádio comerciais costumam usar **compressão**, para gerar um sinal transmitido que tenha alta potência mas que não exceda a região de operação linear do sistema.

Recorde-se que a compressão proporciona maior amplificação para sinais com pequenos níveis, elevando-os para ficar acima do nível de ruído de fundo.

Contudo, como os rádios domésticos não têm um expansor interno para completar o processo de *companding*, alguma distorção audível pode estar presente.

Por isso, as gravadoras frequentemente pré-processam (por exemplo, amplificam os níveis mais altos) o material enviado às estações de rádio a fim de assegurar a integridade do som desejado (*radio edit*).

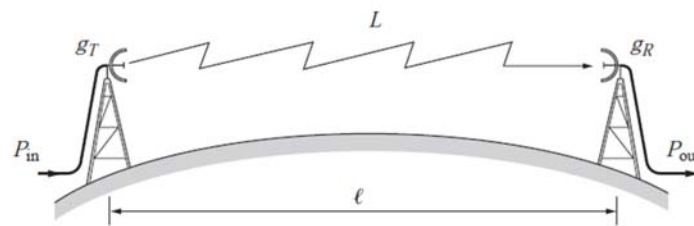


Figure 3.3-4 Line-of-sight radio transmission.

Sistema de Retransmissão por Satélite

Satélites empregam transmissão via rádio por visada direta ao longo de distâncias muito grandes.

Eles têm uma grande área de cobertura e podem atingir locais que não são cobertos por cabo ou fibra, incluindo-se plataformas móveis como navios e aviões.

Possuem **largura de banda** elevada, da ordem de **500 MHz**, que podem ser sub-dividida para uso por *transponders** individuais.

A maioria está em órbita geo-estacionária, em sincronismo com a rotação da Terra e localizados diretamente acima do Equador e, portanto, parecem estacionários no céu (assim, tem-se a vantagem de que as antenas na Terra apontando para o satélite podem ficar fixas).

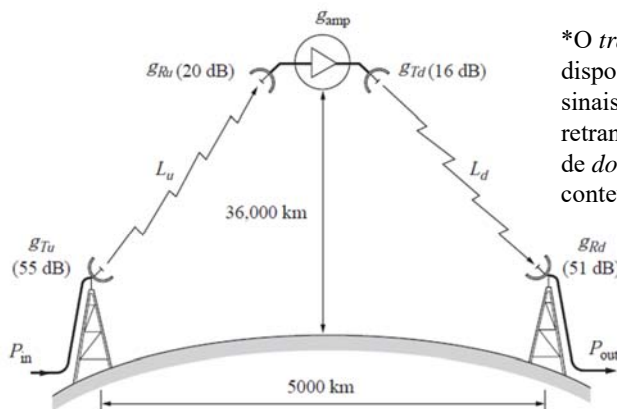


Figure 3.3-5 Satellite relay system.

*O *transponder* (Transmitter-Responder) é um dispositivo de comunicação eletrônico que recolhe sinais ao longo das frequências de *uplink* e os retransmitem, num conjunto diferente de frequências de *downlink*, para receptores em Terra, sem alterar o conteúdo dos sinais recebidos.

Um satélite típico em banda-C tem uma frequência de *uplink* igual a 6 GHz, uma frequência de *downlink* igual a 4 GHz e 12 *transponders*, cada qual com largura de banda de 36 MHz.

$$12 \times 36 \text{ MHz} = 432 \text{ MHz}$$

Vantagens de se usar esta faixa de frequências:

- permite usar equipamentos de microondas relativamente baratos
- apresenta baixa atenuação devido a chuva (a principal causa atmosférica de perdas)
- tem-se um baixo ruído celeste (solar e galáctico) de fundo (janela de ruído mínimo entre 1 e 10 GHz).

Problema: podem sofrer forte interferência de sistemas de microondas terrestres.

Aplicações: sistemas de TV a cabo comerciais.

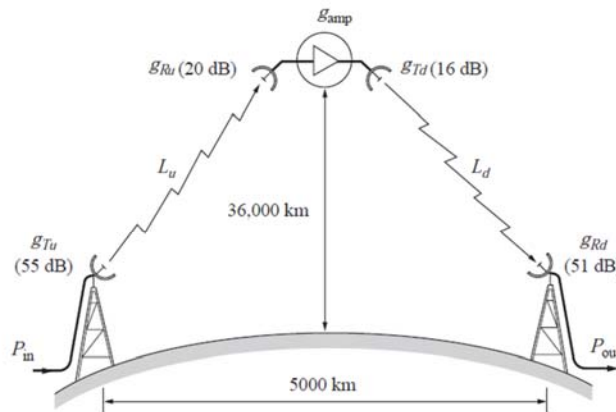


Figure 3.3-5 Satellite relay system.

Exemplo 3.3-1: Sistema transoceânico de retransmissão de TV por satélite

O satélite está em órbita geo-estacionária, em aproximadamente 36.000 km acima do equador, e tem um amplificador repetidor que produz uma saída 18 dBW; a frequência de *uplink* é 6 GHz e a de *downlink* é 4 GHz. Dado: $P_{in} = 35 \text{ dBW}$.

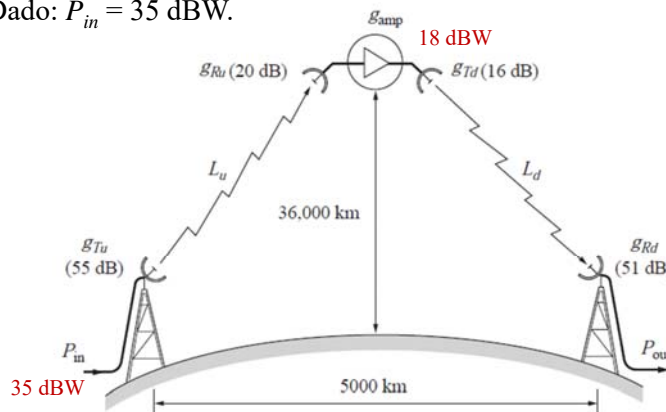


Figure 3.3-5 Satellite relay system.

Perda no percurso de *uplink*:
$$L_{dB} = 92.4 + 20 \log_{10} f_{\text{GHz}} + 20 \log_{10} \ell_{\text{km}} \quad (10b)$$

$$L_u = 92.4 + 20 \log_{10} 6 + 20 \log_{10} 3.6 \times 10^4 = 199.1 \text{ dB}$$

Perda no percurso de *downlink*:
$$L_d = 92.4 + 20 \log_{10} 4 + 20 \log_{10} 3.6 \times 10^4 = 195.6 \text{ dB}$$

uma vez que a distância entre das torres transmissora e receptora até o satélite é aproximadamente a mesma que entre a Terra e o satélite.

(continua...)

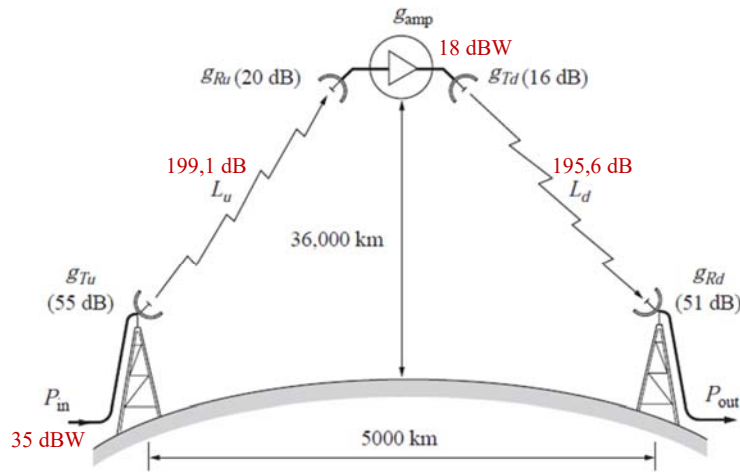


Figure 3.3-5 Satellite relay system.

Os ganhos das antenas estão representados na figura: $g_{Tu} = 55$ dB, $g_{Ru} = 20$ dB, $g_{Td} = 16$ dB e $g_{Rd} = 51$ dB.

(Dados: $P_m = 35$ dBW e o satélite tem um amplificador repetidor que produz uma saída de 18 dBW.)

Se a potência de entrada do transmissor for 35 dBW, a potência recebida no satélite é:

$$35 \text{ dBW} + 55 \text{ dB} - 199,1 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = -89,1 \text{ dBW.} \quad \text{apenas para conhecimento...}$$

A saída de potência no receptor é: $P_{out, dBW} = 18 \text{ dBW} + 16 \text{ dB} - 195,6 \text{ dB} + 51 \text{ dB} = -110,6 \text{ dBW}$.

Invertendo-se $P_{dBW} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ W}}$, obtém-se: $P_{out} = 10^{(-110,6/10)} \times 1 \text{ W} = 8,7 \times 10^{-12} \text{ W}$ #

Deslocamento (*Shift*) Doppler em Rádio Frequência

Se um radiador está **se aproximando** do receptor, o deslocamento Doppler máximo é dado por:

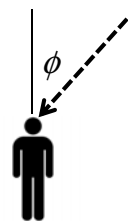
$$\Delta f = +f_c \frac{v}{c} \quad \text{aumento/incremento de frequência} \quad (12)$$

onde Δf é o deslocamento Doppler, f_c é a frequência radiada nominal, v é a velocidade do objeto e c é a velocidade da luz.

Se o objeto está **se movendo para longe** do receptor, então, o sinal em (3.3-12) deve ser negativo.

Se o objetivo se aproximar em elevação, criando um ângulo de aproximação ϕ , (3.3-12) torna-se:

$$\Delta f = f_c \frac{v}{c} \cos \phi \leq \Delta f \quad (13)$$



Exemplo 3.3-2: Deslocamento Doppler

Considere-se a aproximação de um automóvel transmitindo numa frequência de telefone celular igual a 825 MHz. À medida que o automóvel se desloca, o desvio de frequência percebido desde o tempo de observação inicial até a passagem pelo observador é de 40 Hz. Qual a velocidade do automóvel?

$$\Delta f = 40 = \frac{825 \times 10^6}{3 \times 10^8} v \Rightarrow v = 14,5 \text{ m/s} = 52,4 \text{ km/hour}$$

#