

SISTEMAS DE MICRO-ONDAS

PSI3481

SISTEMAS ÓPTICOS E DE MICRO-ONDAS

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra

Sumário

- **Sistemas de comunicação**
 - Introdução
 - Classificação
 - Modelo e componentes do sistema
 - Equação de transmissão de Friis
 - EIRP
 - Antenas
 - Sistema de rádio – transmissor e receptor
 - Arquitetura de receptores de rádio
 - Ruído e distorção não-linear
- **Sistemas RADAR**
 - Radar Pulsado
 - Radar Doppler

SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Sistemas de Comunicação

- **Introdução**

- **Conceito de comunicação sem fio**

- Transferência de informação entre dois pontos
 - Sem contato direto

- **Meios de comunicação sem fio**

- Som – sinal acústico
 - Infravermelho
 - Frequências ópticas
 - RF – 30 KHz a 300 MHz
 - Micro-ondas – 300 MHz a 300 GHz

- **Frequências de micro-ondas**

- Espectro de frequência disponível para novas aplicações
 - Comporta bandas largas de informação
 - Penetra, até certo ponto, neblina, poeira, folhagem, veículos e prédios

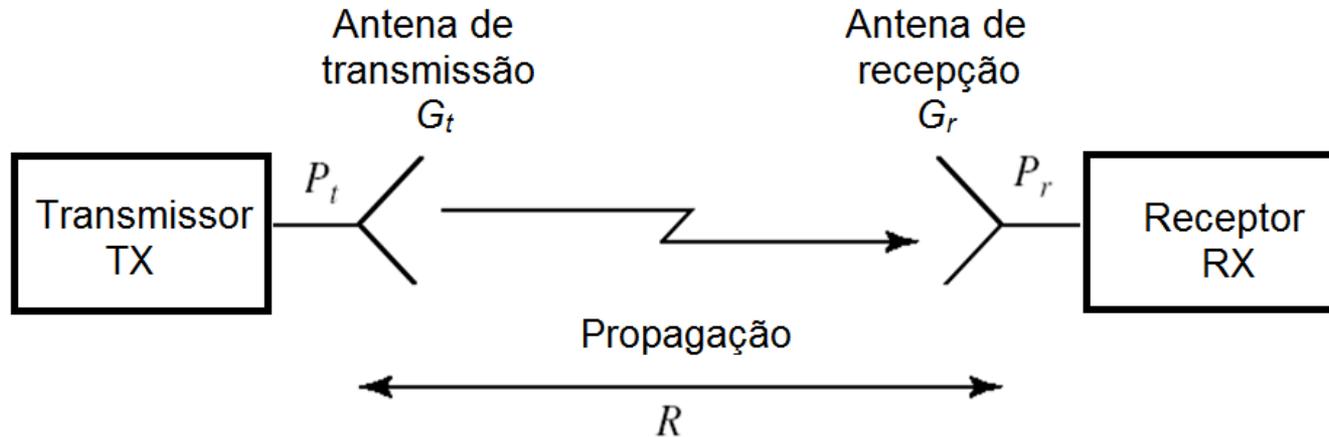
Sistemas de Comunicação

- **Classificação**

- Quanto a posição do usuário
 - Sistemas ponto-a-ponto
 - Sistemas ponto-multiponto
 - Sistemas multiponto-multiponto
- Quanto à direção da comunicação
 - Sistemas simplex
 - Sistemas half-duplex
 - Sistemas full-duplex

Sistemas de Comunicação

- **Modelo do sistema**

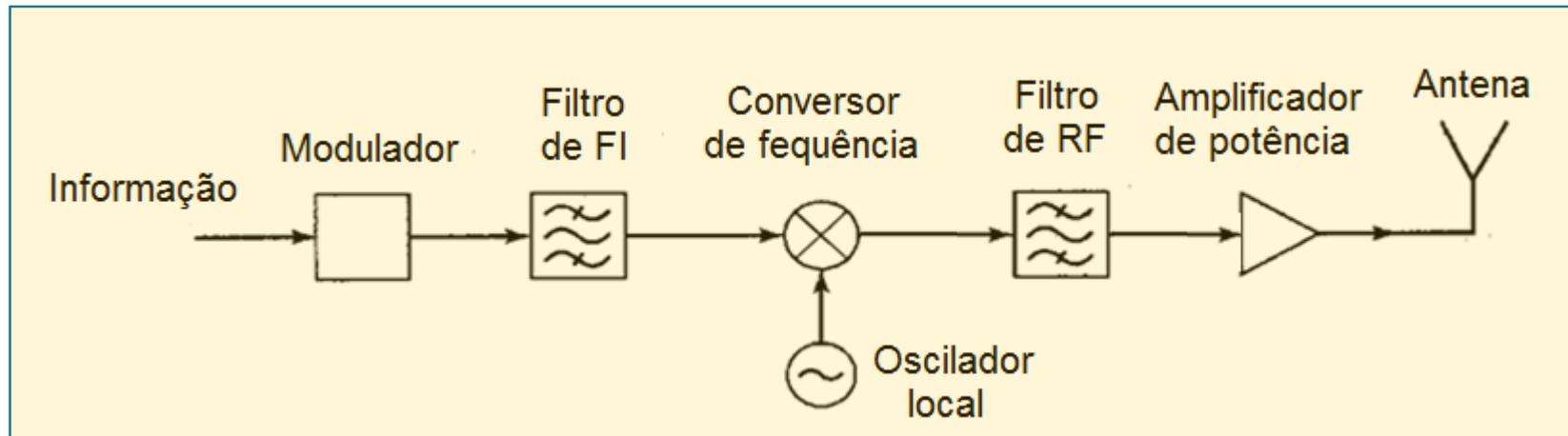
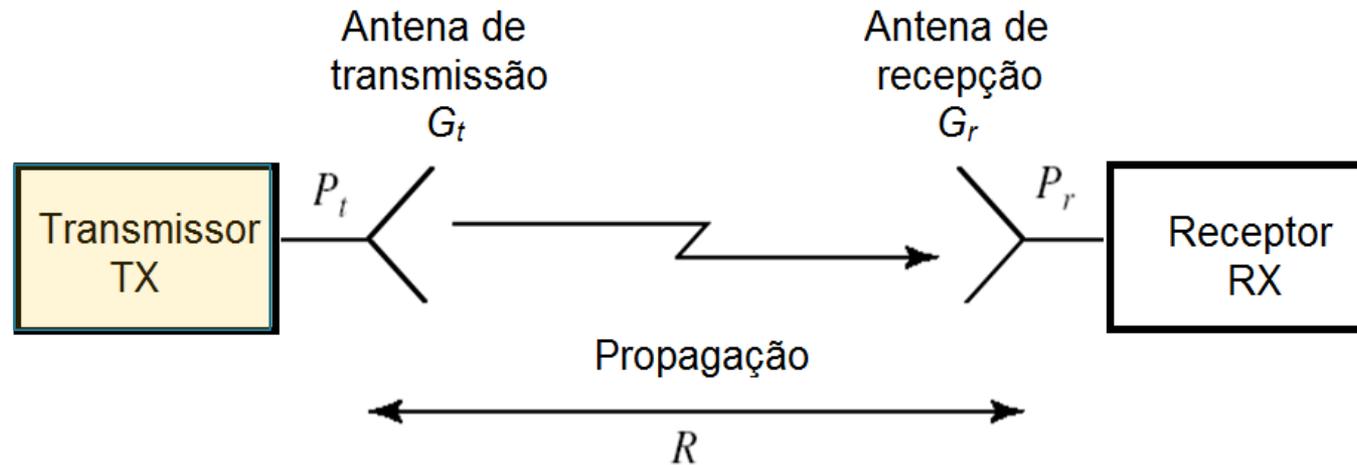


- **Componentes do sistema**

- Transmissor
- Receptor
- Antenas de transmissão e de recepção
- Meio de propagação

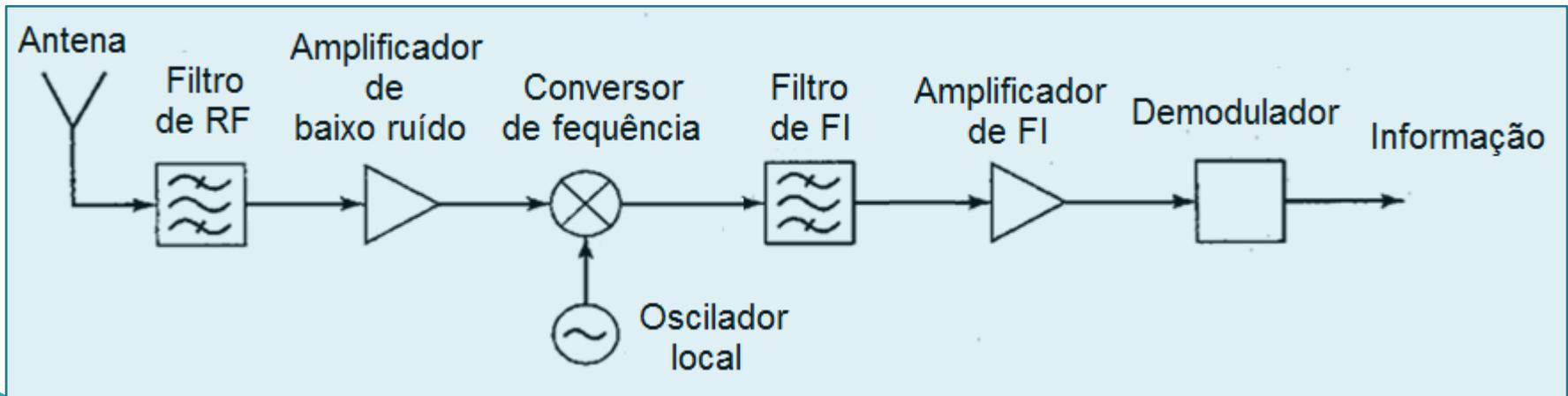
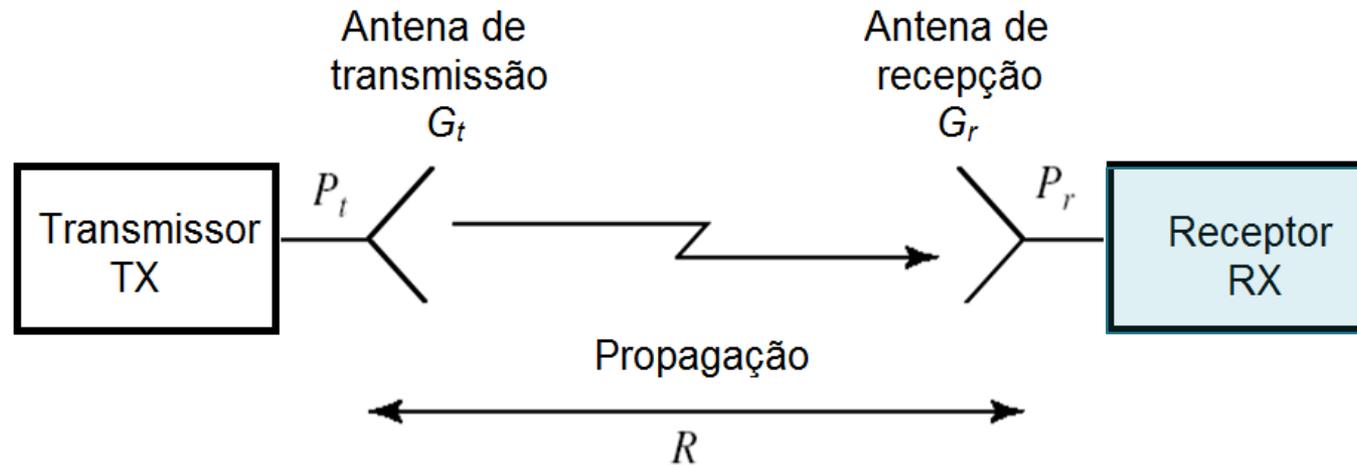
Sistema de rádio

- Exemplo - Transmissor TX

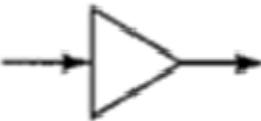
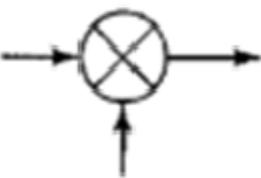


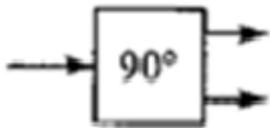
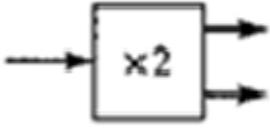
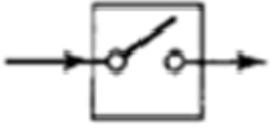
Sistema de rádio

- Exemplo – Receptor RX



Símbolos usados nos diagramas de blocos de RF e micro-ondas

Símbolo do componente	Nome do componente
	Antena
	Amplificador
	Conversor de frequência
	Oscilador

Símbolo do componente	Nome do componente
	Divisor de potência de 90°
	Multiplicador de frequência
	Divisor de frequência
	Chave

Terminologia

Informação

- Sinal de BANDA BÁSICA a ser transmitido/recebido
- Sinal de áudio (som), de vídeo (imagem) ou digital (dados)

Frequência de RF

- Frequência da portadora que é transmitida pelo sistema, levando a informação do Transmissor para o Receptor. Sigla RF – *Radio Frequência*.

Frequência de OL

- Frequência do oscilador local usado no transmissor e no receptor, denominado pela sigla OL – Oscilador Local.

Frequência de FI

- Frequência intermediária modulada pela informação, denominada pela sigla FI – *Frequência Intermediária*.

Terminologia

Amplificador de Baixo Ruído - LNA

- Amplificador de recepção
- Amplifica o sinal recebido pela antena de recepção
- Características – Figura de Ruído reduzida
Ganho elevado
- Denominado pela sigla LNA – *Low Noise Amplifier*.

Amplificador de Potência - PA

- Amplificador de transmissão
- Fornece sinal para a antena de transmissão
- Característica – Potência de Saída elevada
Linearidade especificada para o sistema
- Denominado pela sigla PA – *Power Amplifier*.

Terminologia

Modulador

- Circuito que altera alguma propriedade do sinal de frequência intermediária (amplitude, frequência ou fase), de acordo com o sinal de informação.

Demodulador

- Circuito que recupera o sinal de informação a partir do sinal de FI modulado em amplitude, frequência ou fase.

Oscilador Local

- Oscilador que gera a portadora de frequência f_{OL} que será transmitida.

Oscilador de FI

- Oscilador que gera o sinal de frequência intermediária FI a ser modulado pela informação.

Terminologia

Conversor de frequência – *upconverter*

- Usado no transmissor
- Translada o sinal de FI modulado pela informação para a frequência de RF a ser transmitida:

$$f_{RF} = f_{OL} + FI \quad \text{ou} \quad f_{RF} = f_{OL} - FI$$

Conversor de frequência – *downconverter*

- Usado no receptor
- Translada o sinal de RF recebido – f_{RF} , para a frequência intermediária do sistema – FI:

$$FI = f_{RF} - f_{OL} \quad \text{ou} \quad FI = f_{OL} - f_{RF}$$

Filtro de RF

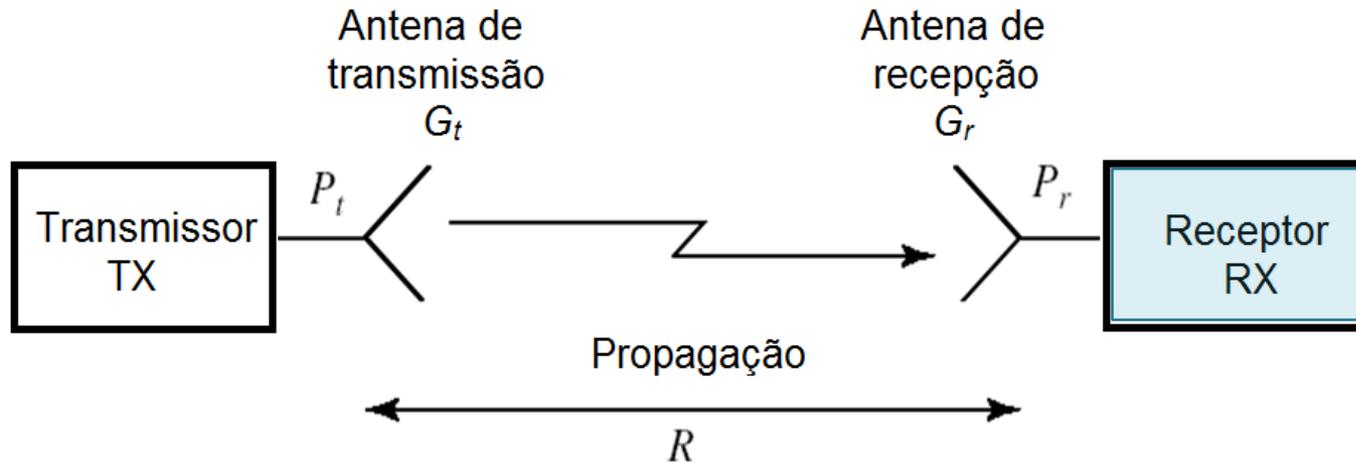
- Filtro passa-faixa, que filtra a faixa de RF

Filtro de FI

- Filtro passa-faixa, que filtra a faixa de FI

Receptor - RX

- **Modelo do sistema**



- **Receptor de sinais de rádio**

- Deve recuperar com confiabilidade o sinal desejado
- Componente crítico do sistema, pois o sinal recebido contém
 - um largo espectro de sinais transmitidos
 - Interferências e ruídos

Receptor - RX

- **Requisitos do receptor de rádio**

- Alto ganho (≈ 100 dB)

- Elevar o baixo nível de potência do sinal recebido
- Para valores próximos da potência do sinal de banda básica
 - ☞ Ganho distribuído entre amplificadores de RF e FI
 - ☞ Evitar oscilações indesejadas

- **Seletividade**

- Receber o sinal desejado
- Rejeitar canais adjacentes, frequência imagem e interferências
 - ☞ Filtros passa-faixa em RF e FI

Receptor - RX

- **Requisitos do receptor de rádio**

- Converter a frequência “para baixo”
 - converte a frequência de RF recebida para a frequência mais baixa de FI, a ser processada
 - ☞ Conversor de frequência – *mixer* ou *downconverter*
- Detetar do sinal recebido
 - Recuperação do sinal de informação analógico ou digital
 - ☞ Demoduladores
- Prover isolamento do transmissor
 - para evitar saturação do receptor
 - ☞ isoladores e diplexer

Arquiteturas de receptor de rádio

- **Receptor de rádio frequência sintonizado**
 - Arquitetura histórica
 - Receptores de baixa frequência
 - Sintonia → capacitores e indutores mecanicamente ajustáveis
 - Todo o ganho é na frequência de RF → risco de oscilação
 - Má escolha em frequências de micro-ondas

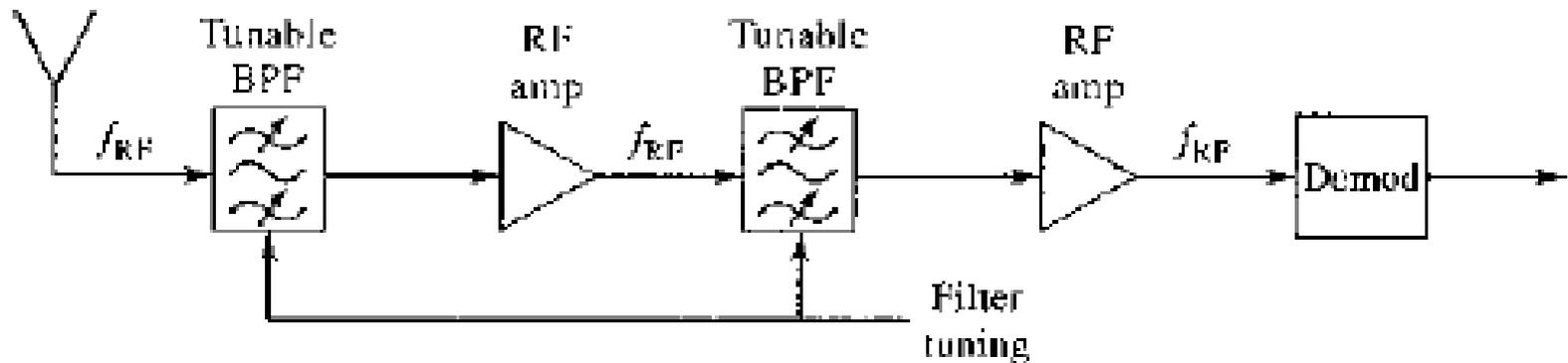


Figura 14.11 – Microwave Engineering, Pozar, M. D. , 4^a ed.

Arquiteturas de receptor de rádio

- **Receptor de conversão direta ou homódino**

- Mesma frequência de LO e RF → frequência de FI é zero
- Modulação AM não requer detecção adicional
- Não usa: amplificador, filtro e oscilador de → simples e de baixo custo
- Mas exige oscilador local de alta estabilidade, com $f_{RF} = f_{OL}$

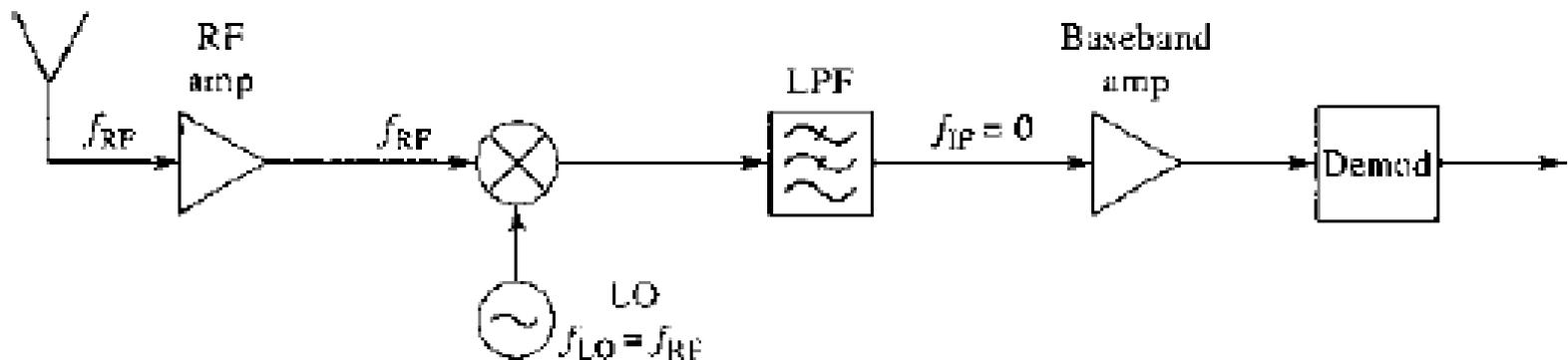


Figura 14.12 – Microwave Engineering, Pozar, M. D. , 4ª ed.

Arquiteturas de receptor de rádio

• Receptor heteródino

- Frequência de LO e RF são diferentes
→ Frequência de FI $\neq 0$, sendo $f_{RF} > FI > f_{informação}$
- Maior seletividade e ganho que o receptor de conversão direta
→ Filtro de FI mais seletivos
→ Amplificação adicional na FI

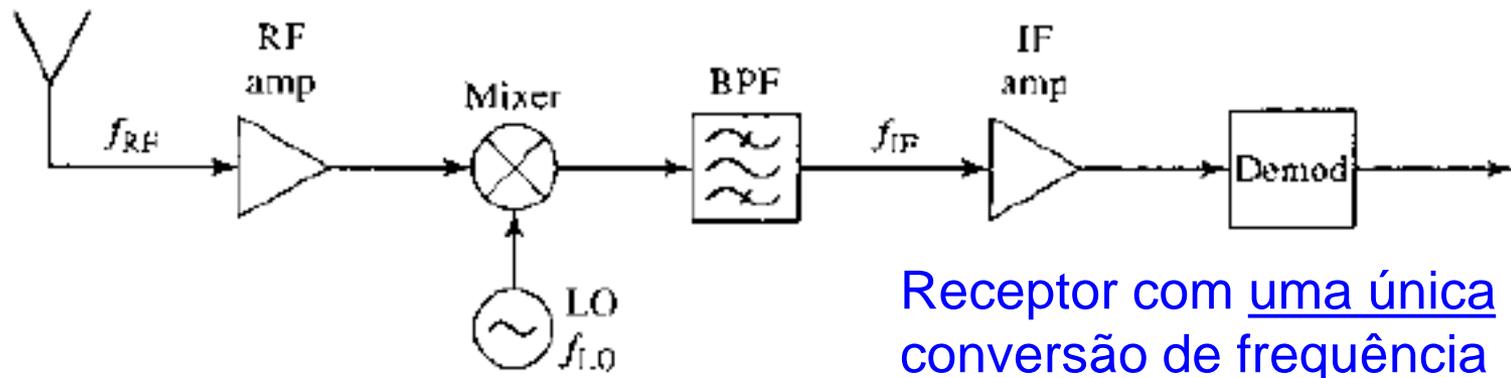
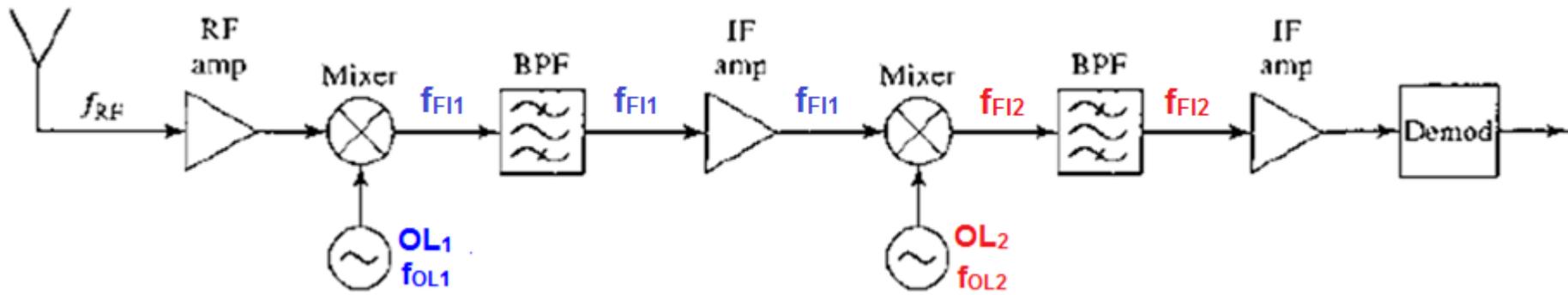


Figura 14.13 – Microwave Engineering, Pozar, M. D. , 4ª ed.

Arquiteturas de receptor de rádio

• Receptor super-heteródino

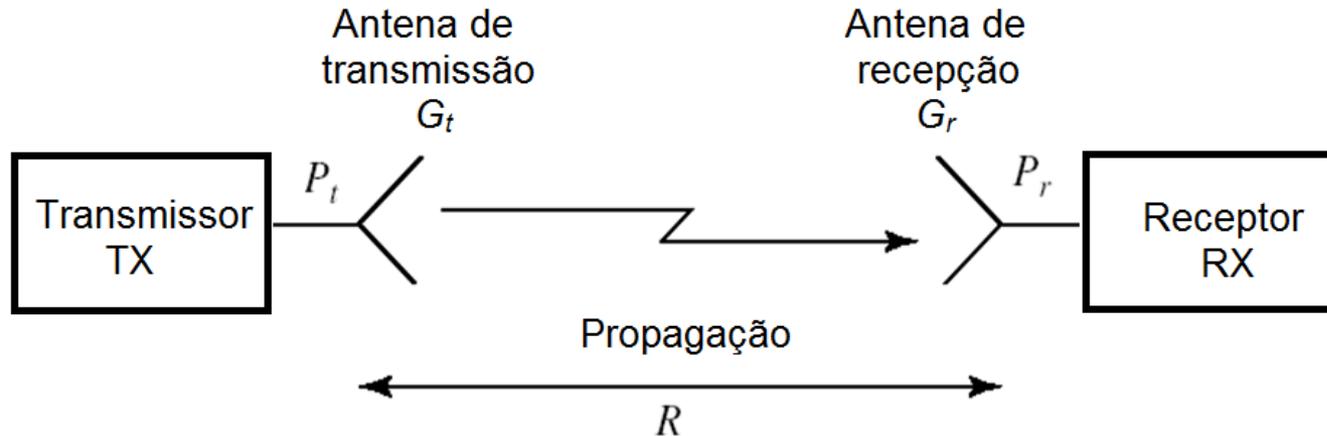
- Receptor mais usado atualmente
- Resultado de 50 anos de desenvolvimento em receptores
- Em micro-ondas e ondas milimétricas
 - Para evitar problemas devido a estabilidade do LO
 - Duas conversões de frequência → duas FIs → f_{I1} e f_{I2}
 - Dois osciladores locais, dois conversores de frequência, dois filtros de FI



Receptor com duas conversões de frequência

Sistemas de Comunicação

- Parâmetros do sistema



P_t Potência do transmissor

P_r Potência recebida no receptor

G_t Ganho da antena do transmissor

G_r Ganho da antena do receptor

R Distância entre o transmissor e o receptor

f Frequência do sinal transmitido

Equação de Transmissão de Friis

- Modelo de propagação de ondas EM
- Em condições ideais de propagação
 - Sem obstáculos entre antenas
 - Sem reflexões, difração e espalhamento do sinal no ambiente
 - Sem recepção multipercurso
 - Recepção do sinal direto e de sinais refletidos
 - Sem efeitos de atenuação outdoor
 - *Outdoor* → atmosfera, chuva, neve
 - *Indoor* → paredes, piso, teto, móveis
 - Sem descasamento
 - de impedância
 - de polarização entre antenas

Podem ser adicionados facilmente à equação de Friis

Equação de Transmissão de Friis

- Sistemas em que se aplica a Equação de Friis
 - Comunicação via satélite
 - Enlaces terrestres ponto-a-ponto
 - Antenas altamente diretivas
 - Sinal direto recebido \gg sinal refletido recebido

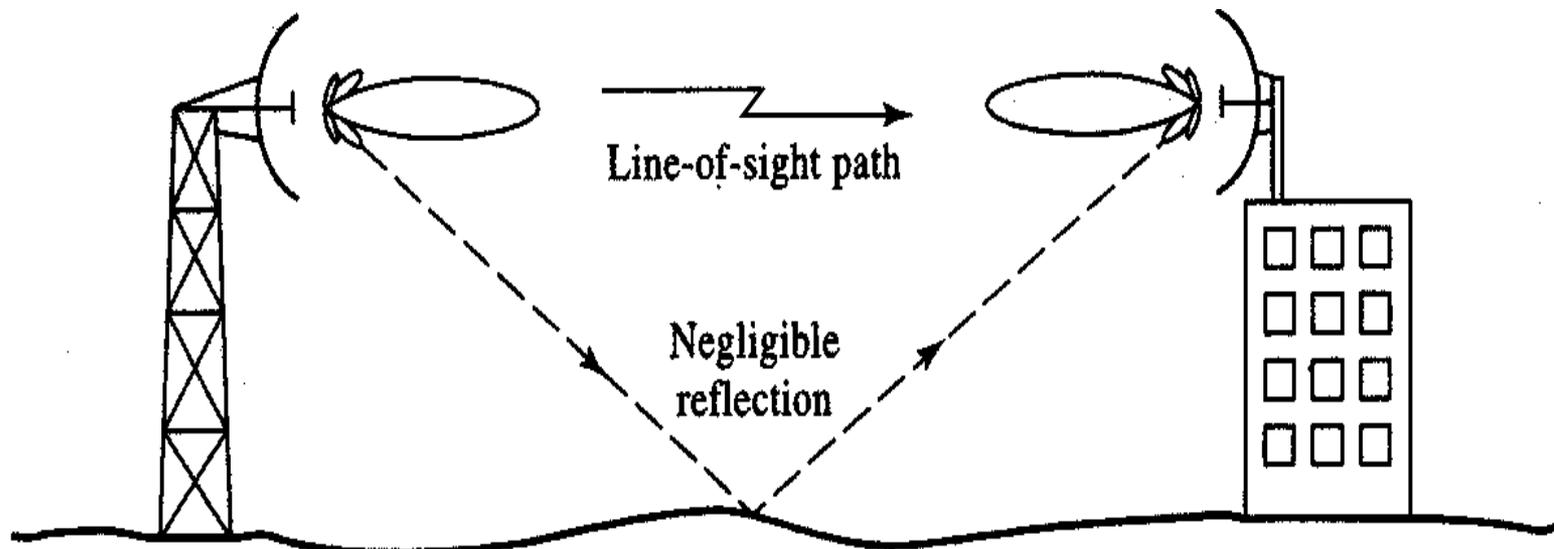
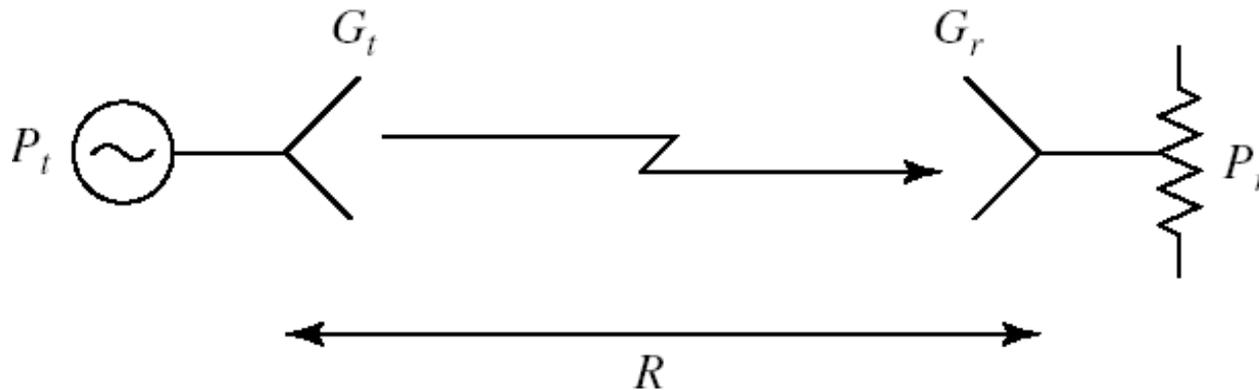


Figura 4.19(a), David. M. Pozar, Microwave and RF Design of Wireless Systems

Equação de Transmissão de Friis

- Seja o sistema



Onde

- P_t Potência do transmissor
- P_r Potência recebida no receptor
- G_t Ganho da antena do transmissor
- G_r Ganho da antena do receptor
- R Distância entre o transmissor e o receptor
- f Frequência do sinal transmitido

Equação de Transmissão de Friis

DIRETIVIDADE da antena

- **Antena isotrópica**
- Antena hipotética \Rightarrow não existe!
- Irradia igualmente em todas as direções
- Diretividade: $D = 1$ ou $D(\text{dB}) = 0$ dB
- **Antenas reais**
- Direções preferenciais de radiação
- Diretividade: $D > 1$ ou $D(\text{dB}) > 0$ dB
- Exemplo: antena parabólica

Equação de Transmissão de Friis

DIRETIVIDADE da antena

- **Diretividade**

- Quanto vezes a mais a antena direciona a potência em uma dada direção relativamente à antena isotrópica
- Depende da geometria da antena

- **Exemplo**

- Antena com $D_{MAX}(dB) = 20 \text{ dB}$ ou $D_{MAX} = 100$
- Na direção de máxima radiação
- Irradia 100 vezes mais potência
 - que uma antena isotrópica
 - alimentada com a mesma potência P_t

Equação de Transmissão de Friis

GANHO da antena

- Considera perdas na estrutura da antena
- É proporcional à diretividade

$$G = e_{rad} \cdot D \quad \text{sendo } 0 \leq e_{rad} < 1$$

- **G** → Ganho
- **D** → Diretividade
- **e_{rad}** → Eficiência de radiação
- Eficiência de radiação
 - Quanto maiores as perdas,
 - menor e_{rad} e menor G

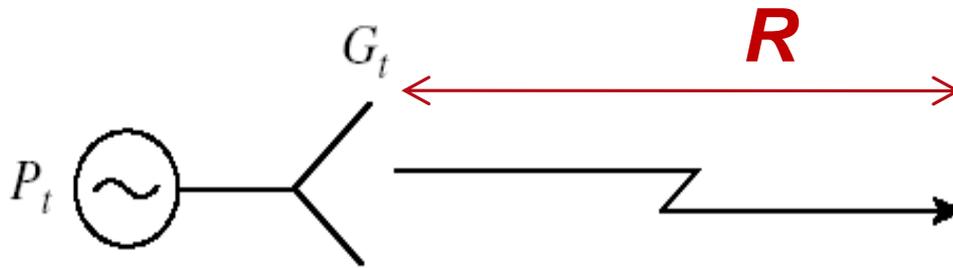
Equação de Transmissão de Friis

- **Consideremos**

- Antena isotrópica, sem perdas

$$D = 1, e_{rad} = 1 \rightarrow G = 1$$

- Potência transmitida P_t



Qual é

$$S_{av} (W / m^2) = ?$$

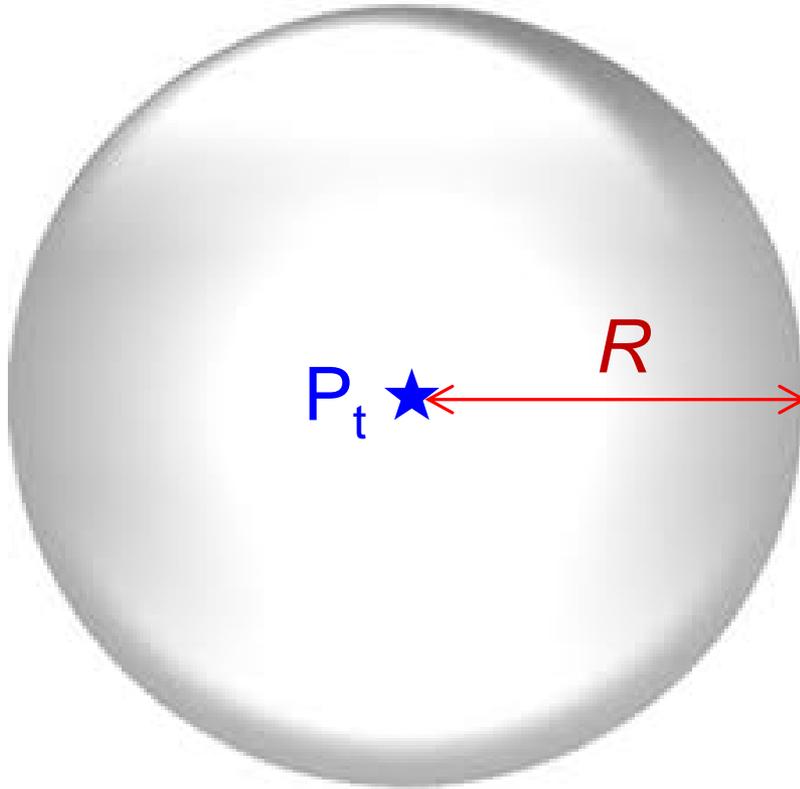
- **Densidade de potência S_{av}**

- Em qualquer ponto
- Que diste R da antena

Equação de Transmissão de Friis

- **Densidade de potência**

- Gerada por antena isotrópica
- Transmitindo potência P_t
- Em qualquer ponto
- Que diste R da antena



Área da esfera de raio R

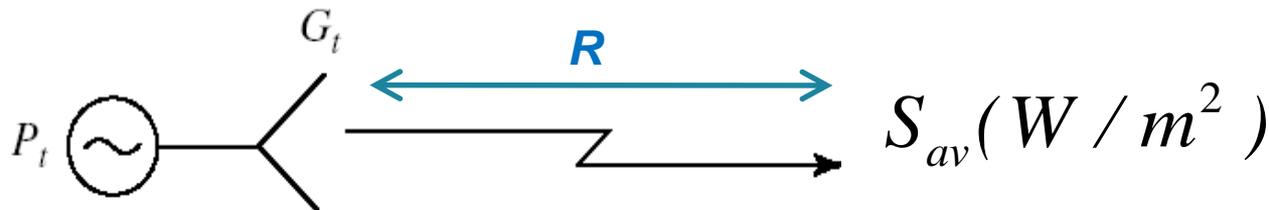
$$4.\pi.R^2$$

$$S_{av} = \frac{P_t}{4.\pi.R^2} \text{ (W / m}^2 \text{)}$$

Equação de Transmissão de Friis

- Antena de transmissão real

- Antena com ganho $G_t > 1$
- Potência transmitida P_t
- Densidade de potência à distância R da antena



Antena isotrópica $G_t = 1$

$$S_{av} = \frac{P_t}{4.\pi.R^2} \quad (W / m^2)$$

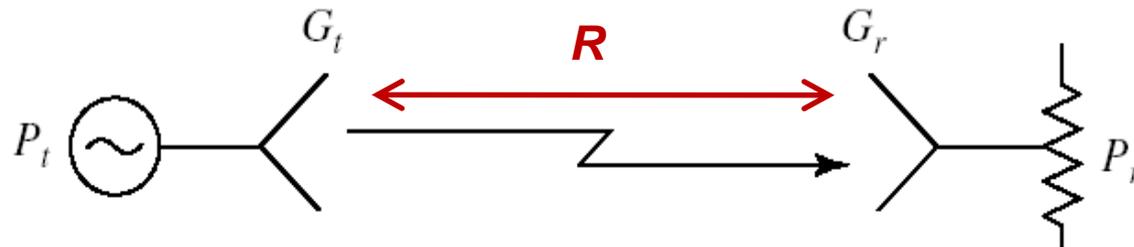
Antena real $G_t > 1$

$$S_{av} = \frac{G_t.P_t}{4.\pi.R^2} \quad (W / m^2)$$

Equação de Transmissão de Friis

- Antena de recepção real

- Antena com ganho $G_r > 1$
- Localizada à distância R da antena de transmissão



- Potência recebida P_r

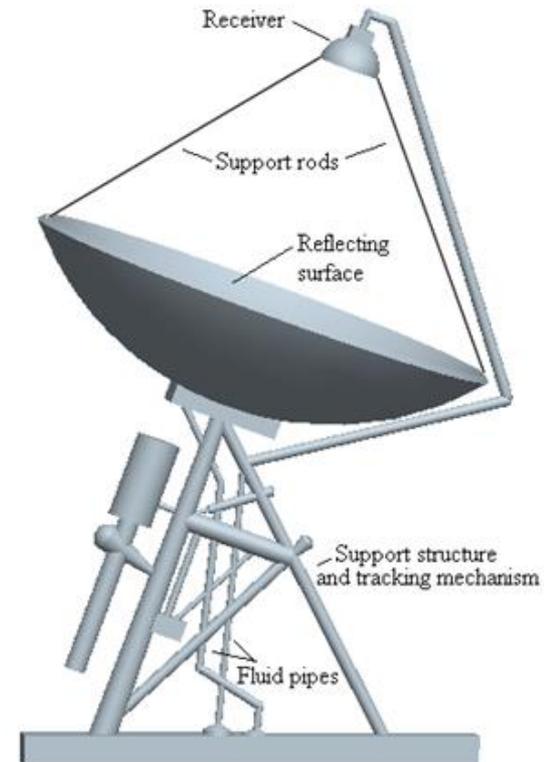
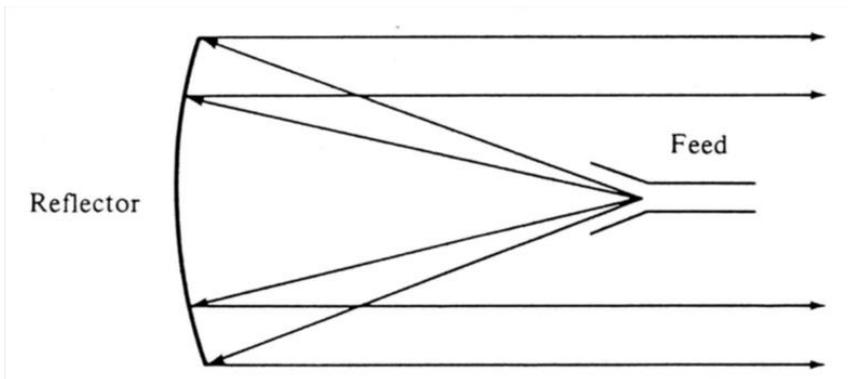
$$P_r = A_e \cdot S_{av} = A_e \cdot \frac{G_t \cdot P_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (W)$$

- Sendo A_e a área efetiva da antena

Equação de Transmissão de Friis

- **Área efetiva da antena**

- Área equivalente de captura da densidade de potência incidente
- Exemplo - Antena parabólica



$A_e \approx$ (área do refletor parabólico) – (sombra do alimentador)

Equação de Transmissão de Friis

- Área efetiva da antena

- Considerando-se o ganho da antena de recepção – G_r

$$A_e = f(G_r)$$

$$A_e = \frac{G_r \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \quad (m^2)$$

- Potência recebida – P_r

$$P_r = A_e \cdot S_{av} = \frac{G_r \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{G_t \cdot P_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (W) \rightarrow P_r = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot P_t \quad (W)$$

Equação de Transmissão de Friis

$$P_r = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot P_t \quad (W)$$

Potência recebida P_r

Em condições ideais de propagação

- Decai com o quadrado da distância $P_r \propto \frac{1}{R^2}$
- Diretamente proporcional aos ganhos das antenas $P_r \propto G_r$ e $P_r \propto G_t$
- Diretamente proporcional à potência transmitida $P_r \propto P_t$
- Decai com o quadrado da frequência do sinal $P_r \propto \lambda^2 \rightarrow P_r \propto \frac{1}{f^2}$

Equação de Transmissão de Friis

- Equação de Transmissão de Friis

$$P_r = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot P_t \quad (W)$$

- Equação de Transmissão de Friis em decibéis

$$P_r (dBm) = G_t (dB) + G_r (dB) + P_t (dBm) - 10 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda} \right)^2$$

“Perda de espaço livre” ou “Perda de percurso” (*path loss*)

$$P_r (\text{decibéis}) = 10 \cdot \log(P_r / P_{ref})$$

$$P_{ref} = 1W \Rightarrow P_r (dBW) \quad P_{ref} = 1mW \Rightarrow P_r (dBm)$$

Equação de Transmissão de Friis

• Atenuação do sinal

- *Outdoor* → atmosfera, chuva, neve
 - Depende da distância percorrida pelo sinal no meio com atenuação
 - Em geral: dada em dB/km
- *Indoor* → paredes, piso, teto, móveis
 - Depende da composição, forma e espessura dos objetos
 - Depende da frequência
 - Em geral: dada em dB, por meio de tabelas
- Potência recebida com atenuações no meio de propagação

$$P_r(dBm) = P_{FRIIS}(dBm) - P_{Aten1}(dB) - P_{Aten2}(dB) \dots - P_{AtenN}(dB)$$

Equação de Transmissão de Friis

• Descasamento de impedância

- Antena transmissora → impedância Z_A
- Transmissor – TX → impedância Z_G

$$\Gamma_t = \frac{Z_A - Z_G^*}{Z_A + Z_G}$$

- Antena receptora → impedância Z_A
- Receptor – RX → impedância Z_L

$$\Gamma_r = \frac{Z_A - Z_L^*}{Z_A + Z_L}$$

- Potência recebida é menor que a prevista na fórmula de Friis

$$P_r (mW) = P_{FRIIS} (mW) \cdot e_{imp} \quad \text{e} \quad e_{imp} = (1 - |\Gamma_t|^2) \cdot (1 - |\Gamma_r|^2) \leq 1$$

Equação de Transmissão de Friis

Exercício

- Um satélite artificial em órbita geoestacionária, 36.000 km acima da Terra
 - transmite 2 W em 20 GHz
 - através de uma antena de transmissão com 37 dB de ganho
- Qual a potência recebida na Terra por uma antena com 46,6 dB de ganho?
- Calcule a potência em mW e em dBm
- Sabendo-se que o limiar de recepção do receptor em Terra é de -100 dBm, o sinal do satélite é recebido adequadamente?
- Por que se usa uma antena em Terra com ganho maior que a antena do satélite?
- Ignore perdas por descasamento de impedância, por erro de apontamento das antenas e por efeitos de propagação

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

- **Potência Radiada Isotrópica Efetiva**

$$EIRP = G_t \cdot P_t \quad (W)$$

- Agrega toda informação do transmissor - P_t e G_t

- **Conceito de EIRP**

- EIRP é a potência que deve ser irradiada por uma antena isotrópica
 - para causar a uma distância R
 - a mesma densidade de potência
 - que uma antena com ganho G_t transmitindo uma potência P_t

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

- **Equação de Transmissão de Friis em função do EIRP**

$$P_r = \frac{G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot G_t \cdot P_t \quad (W)$$



$$P_r = \frac{G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot EIRP \quad (W)$$

$$EIRP = G_t \cdot P_t \quad (W)$$

- Em dB

$$P_r (dBW) = G_r (dB) + EIRP (dBW) - 10 \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda} \right)^2$$

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

- **Mapa de EIRP de satélites artificiais**

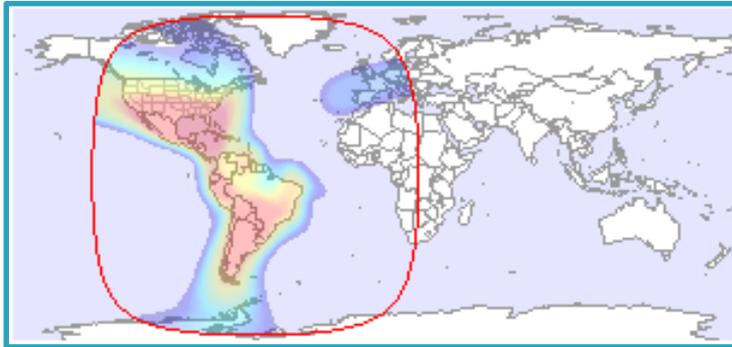
- Curvas de nível de EIRP
- Sobre o mapa de uma localidade
- Produzidas pelo **transmissor de um satélite**
- Fornece o EIRP em cada ponto da área de cobertura do satélite

- **Aplicação de EIRP**

- A partir do mapa de EIRP do transmissor do satélite
 - Cálculo do desempenho de um sistema
 - Dimensionamento do receptor e antena receptora

Mapa de EIRP

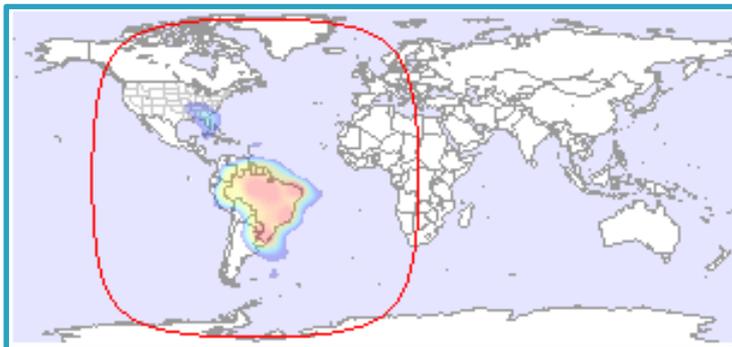
Satélite INTELSAT 9 – ATLÂNTICO – Banda C 3,7 a 4,2 GHz e Ku 11 GHz



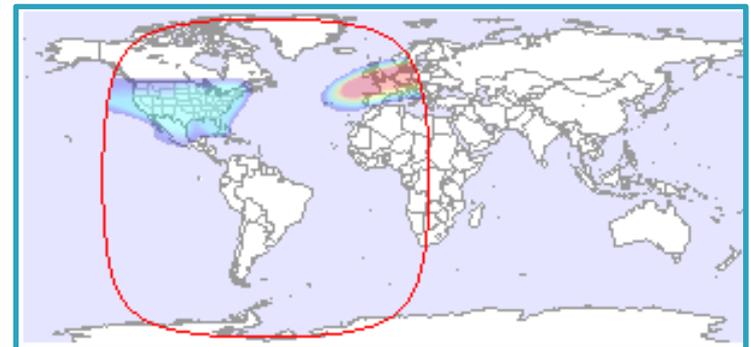
Feixe “Americas”



Feixe “Mexico”



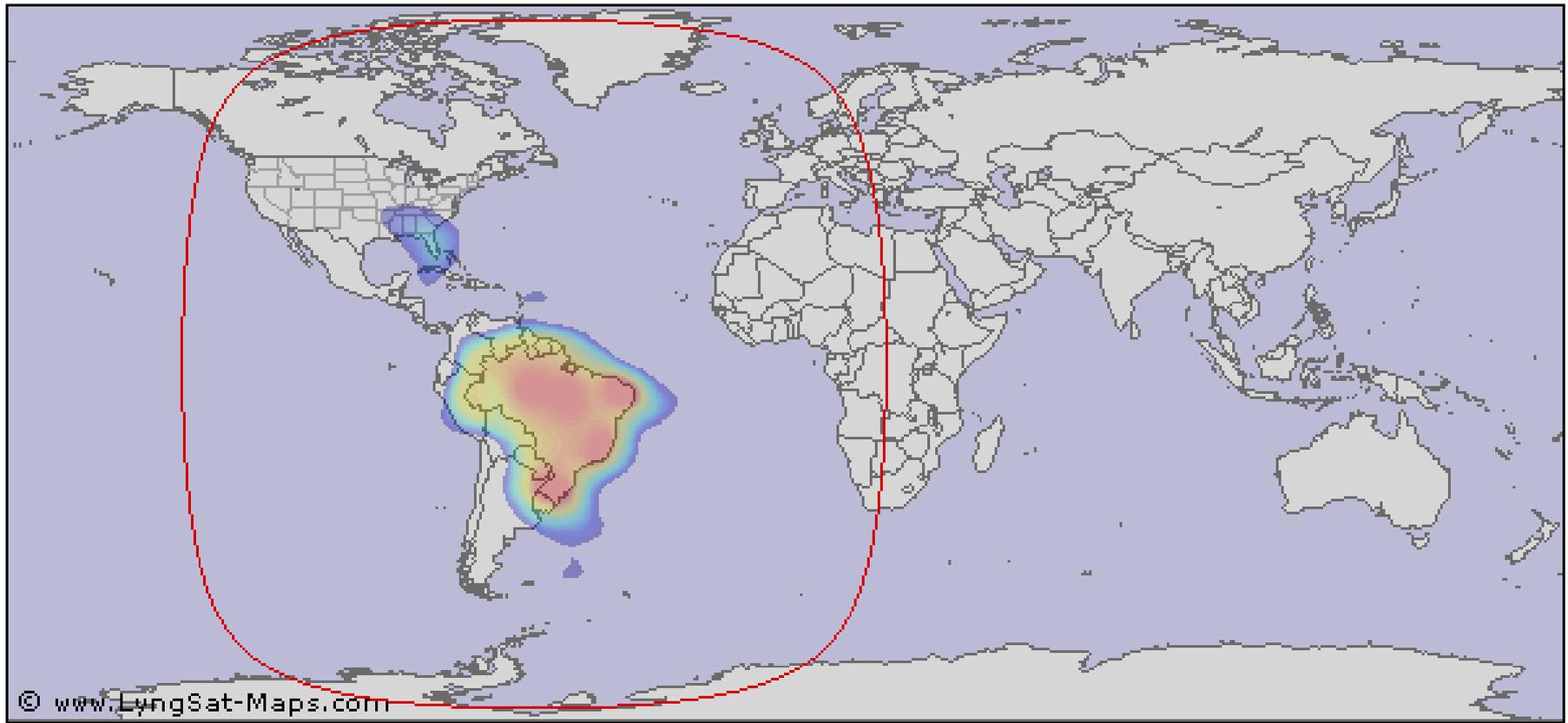
Feixe “Brazil”



Feixe “Conus & Europe”

Mapa de EIRP

Satélite **INTELSAT 9 – ATLÂNTICO** – Banda C 3,7 a 4,2 GHz e Ku 11 GHz
Feixe **“BRAZIL”**

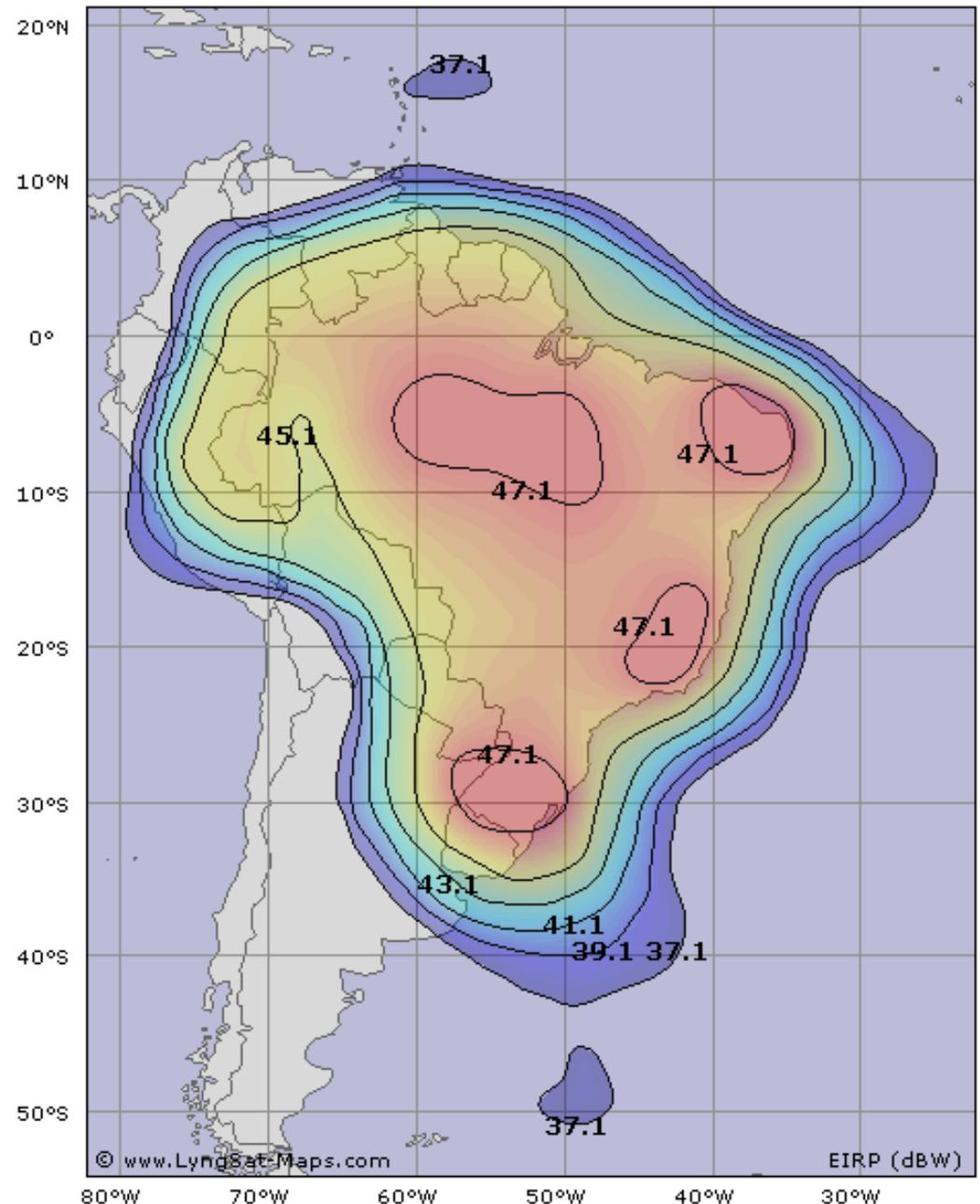


<http://www.lyngsat-maps.com/>

Mapa de EIRP

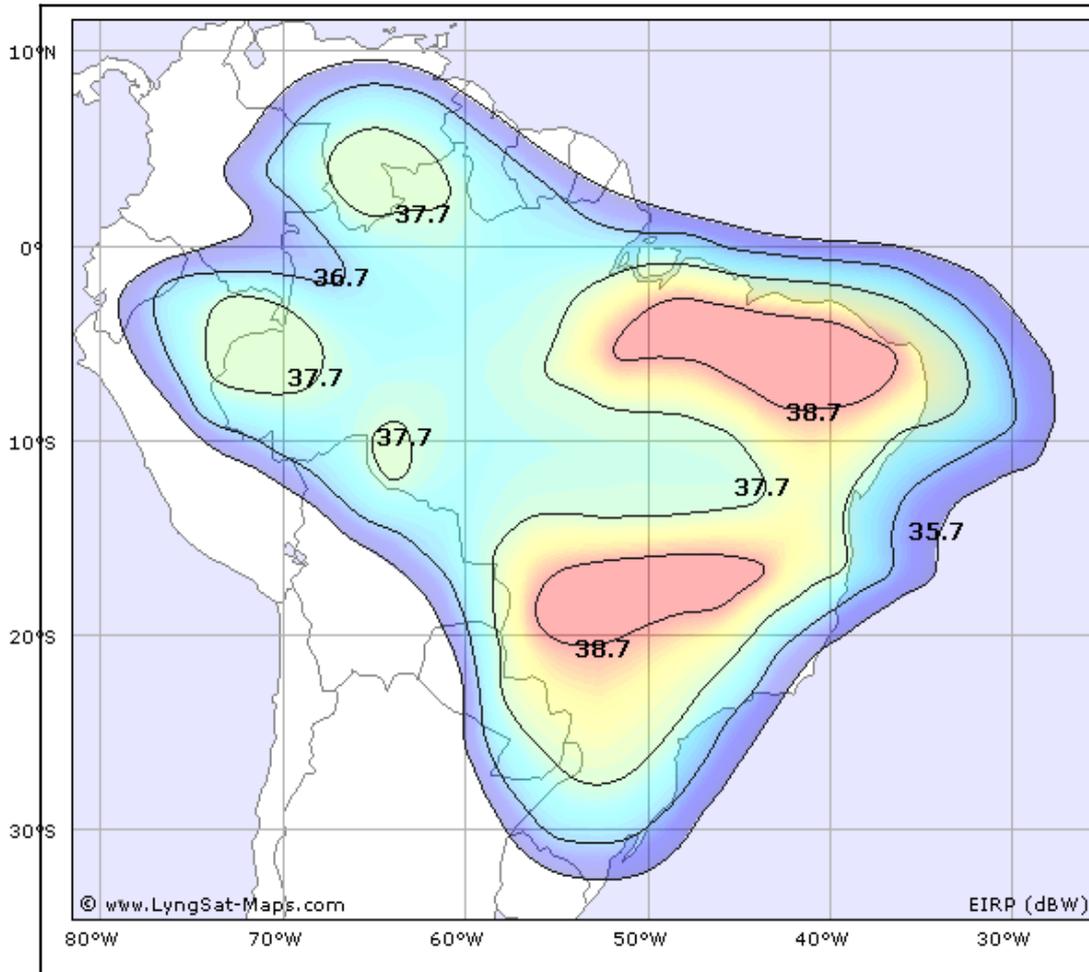
- Satélite INTELSAT 9
- Posição do satélite
 - Linha do Equador
 - ATLÂNTICO a 58° W
- Feixe “BRAZIL”
 - Curvas de nível
 - EIRP em dBW

<http://www.lyngsat-maps.com/>



Mapa de EIRP

- **Satélite BRASILSAT-B4 a 84° W – Banda C / 3,6-4,2 GHz**



EIRP (dBW)	Diâmetro da antena de recepção (cm)
>42	80
42	80-100
41	90-115
40	100-125
39	115-145
38	125-160
37	145-180
36	160-200
35	180-225
34	200-225
33	225-285
32	255-320
31	320-400

Faixa Dinâmica e Ruído

- **Faixa dinâmica**

- Faixa de potência de operação linear de
 - Receptores e transmissores de sistemas
 - Circuitos – amplificadores, conversores de frequência, etc.
 - Componentes – diodos e transistores

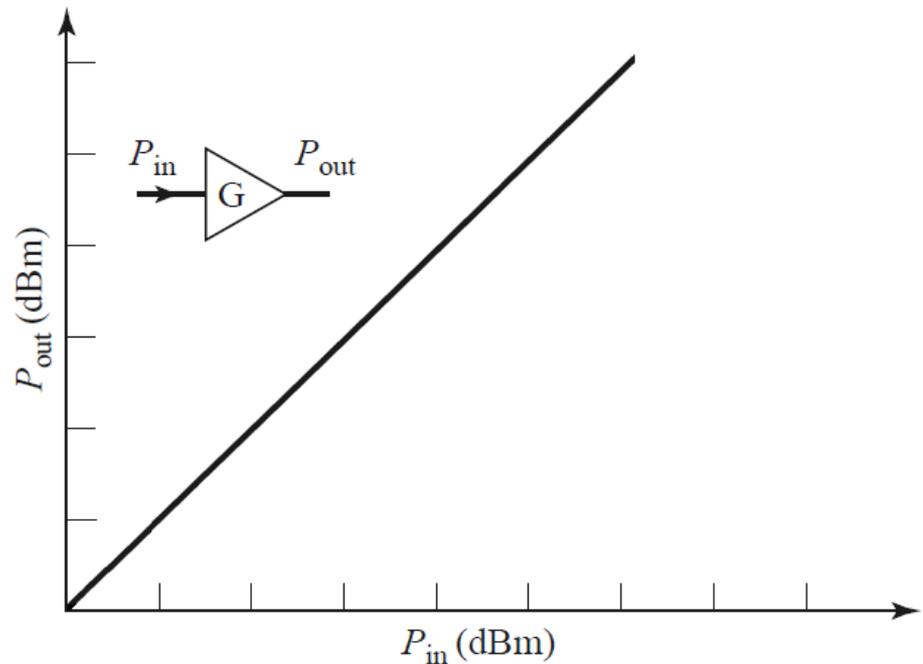
- Exemplo – Amplificador

- Amplificador IDEAL

- Ganho de 10 dB ou 10x

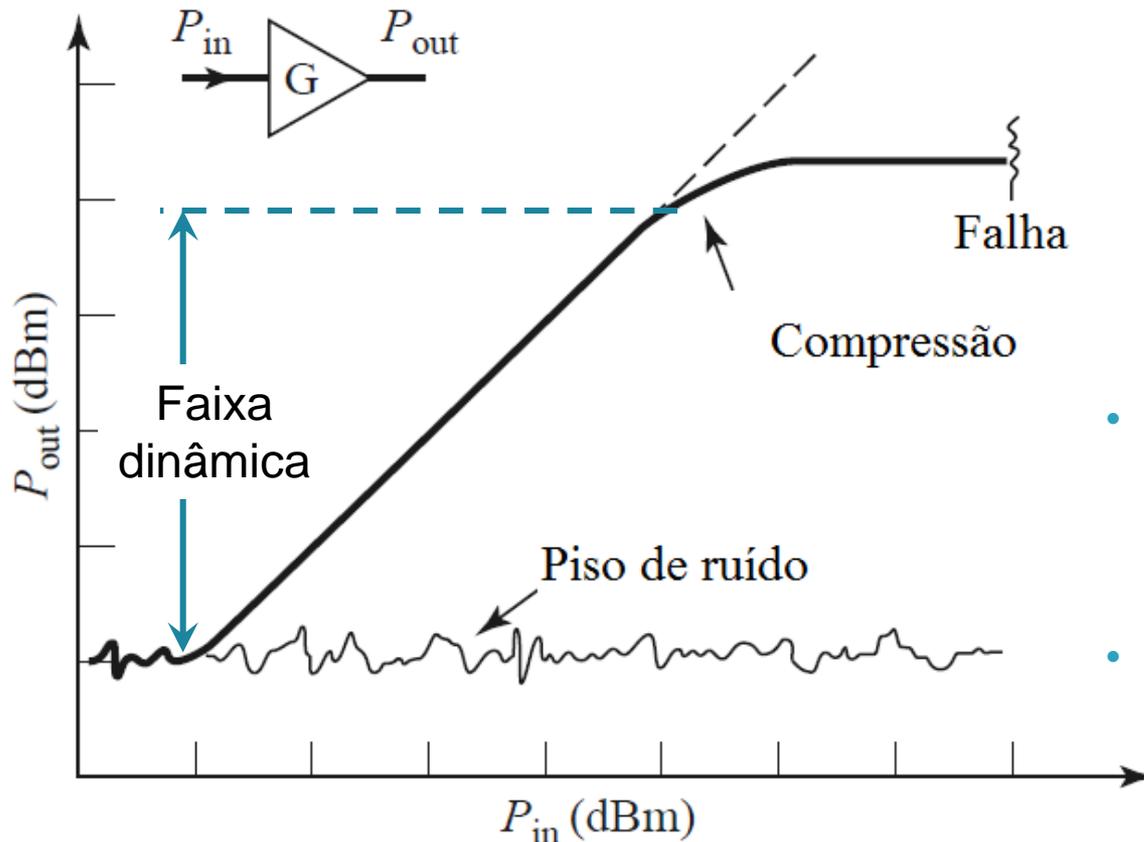
- $P_{in} = 0 \text{ W} \rightarrow P_{out} = 0 \text{ W}$

- $P_{in} = 10^6 \text{ W} \rightarrow P_{out} = 10^7 \text{ W}$



Faixa dinâmica e Ruído

- **Faixa dinâmica**



- Amplificador REAL

- **Piso de ruído**

- Ruído gerado no amplificador
- Em geral, de -100 dBm a -60 dBm na banda do sistema

- **Faixa dinâmica**

- P_{out} cresce linearmente com P_{in}

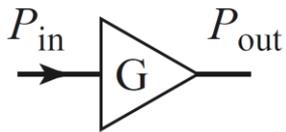
- **Compressão**

- P_{out} não cresce mais linearmente com P_{in}

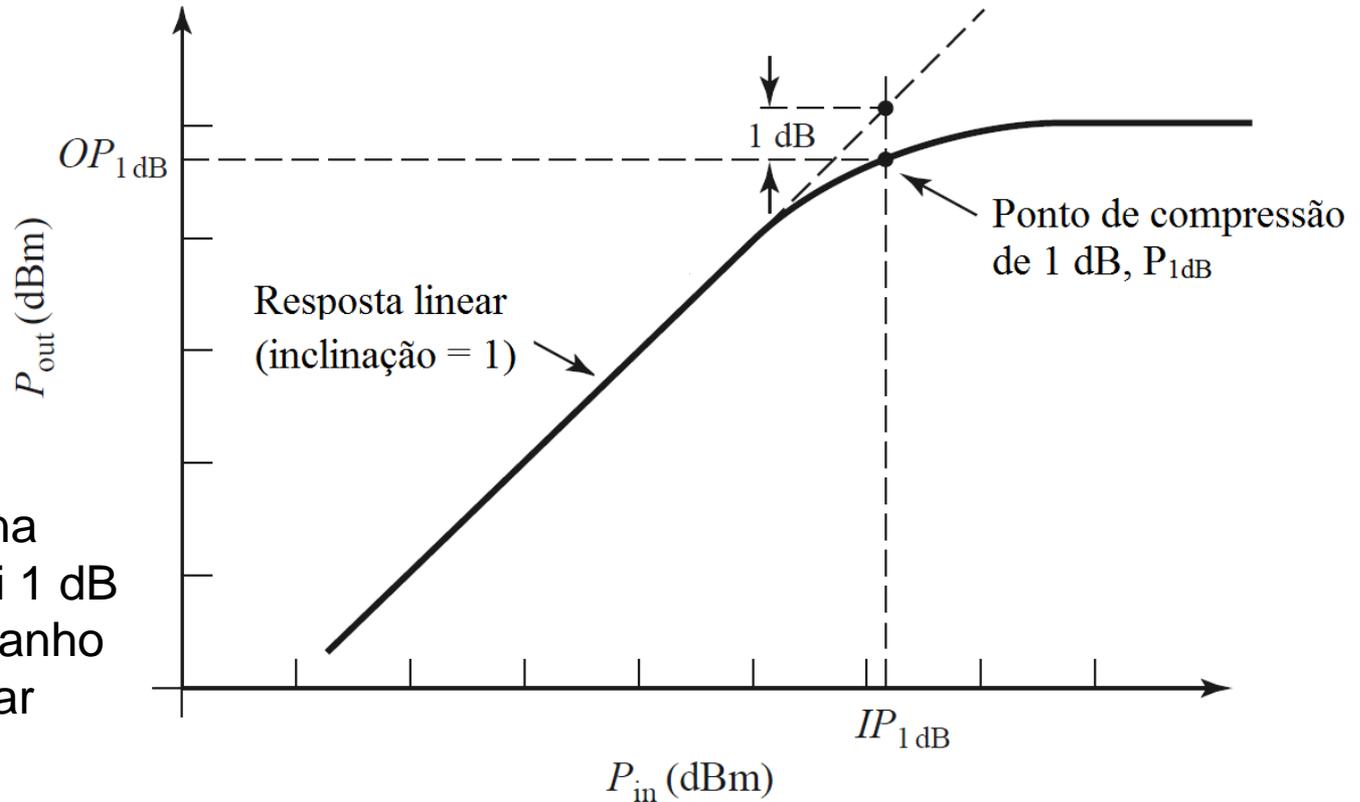
Distorção não-linear

Compressão de ganho – efeito da não-linearidade

- $P_{1\text{ dB}}$ - ponto de compressão de 1 dB do ganho



- $P_{1\text{ dB}}$ - Potência na qual o ganho cai 1 dB em relação ao ganho da resposta linear



$IP_{1\text{ dB}}$ → definido em relação à potência de entrada (em conversores de freq.)

$OP_{1\text{ dB}}$ → definido em relação à potência de saída (em amplificadores)

Distorção não-linear

- Dispositivos reais
 - São não-lineares
 - Comportamento depende da amplitude dos sinais
- Faixa dinâmica
 - Faixa de amplitude de sinais em que o dispositivo pode ser considerado linear
- Dispositivos Semicondutores
 - Transistores e diodos são altamente não-lineares
- Comportamento não-linear
 - Indesejável em amplificadores
 - Desejável em retificadores, conversores de frequência, multiplicadores de frequência
- Afeta principalmente o transmissor do sistema
 - Potência de saída elevada

Distorção não-linear

Rede ou dispositivo LINEAR

Tensão de entrada

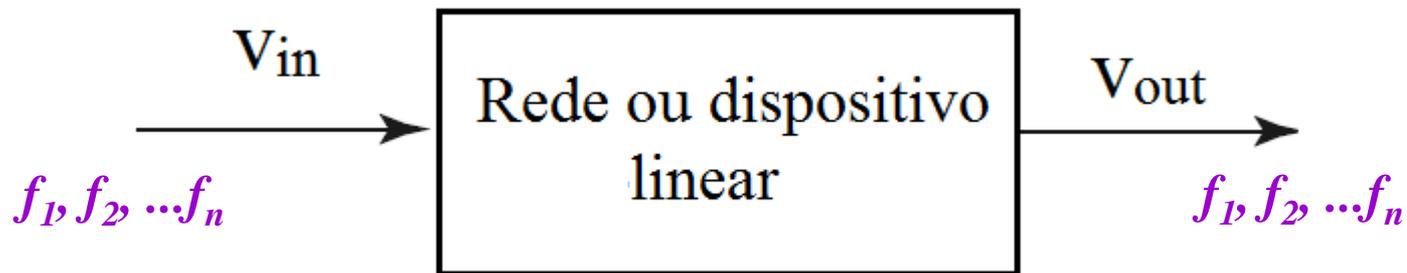
$$v_{in} = \sum_i A_i \cdot (\cos \omega_1 \cdot t)$$

Tensão de saída

$$v_{out} = \sum_i B_i \cdot (\cos \omega_1 \cdot t)$$



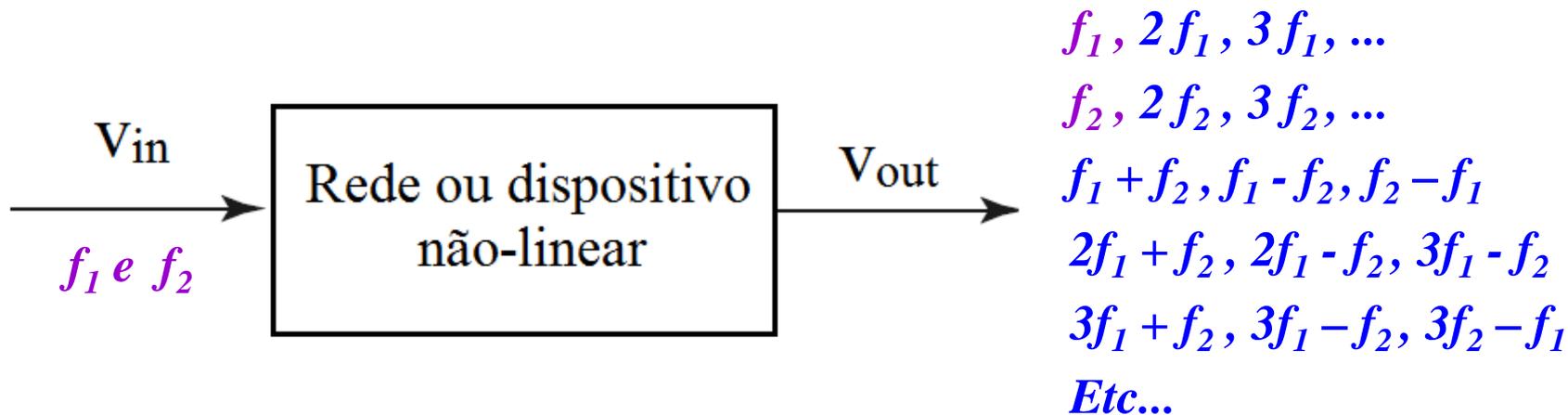
- Qualquer que seja a amplitude dos sinais de entrada A_i



- Redes os dispositivos reais
- São não-lineares
- Podem ser considerados lineares (aproximação) em uma faixa de potências de entrada ou saída → **Faixa Dinâmica**

Distorção não-linear

Rede ou dispositivo NÃO-LINEAR



Tensão de entrada

f_1 e f_2



Tensão de saída

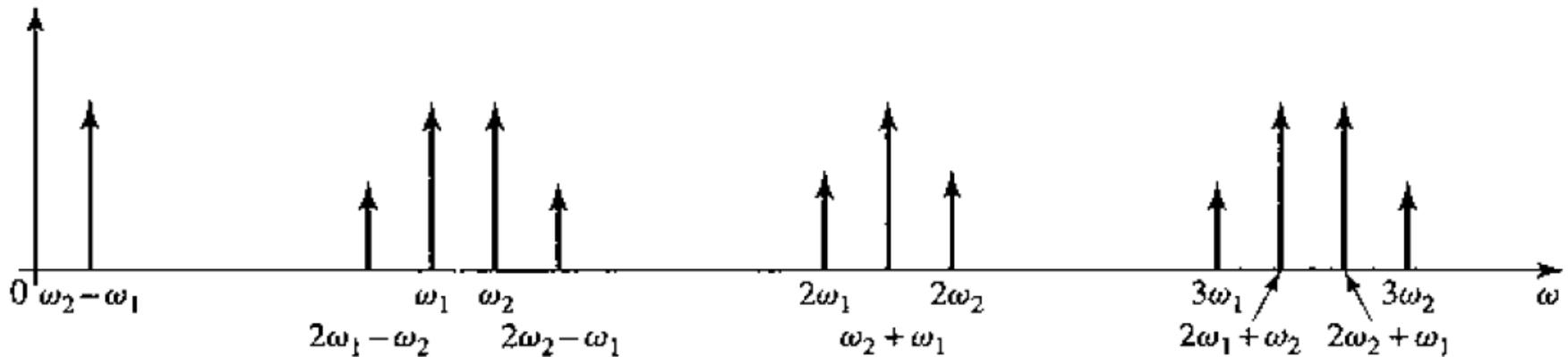
$m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2, \quad m, n = 0, 1, 2, 3 \dots$

- Espectro de frequências do sinal de saída
 - sinais de entrada
 - produtos de intermodulação

Distorção não-linear

Rede ou dispositivo não-linear

- Supondo sinal de entrada com frequências f_1 e f_2
- Espectro do sinal de saída $m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2, m, n = 0, 1, 2, 3 \dots$



- Ordem do produto de intermodulação $\rightarrow |m| + |n|$

$$2f_1 \rightarrow m = 2 \text{ e } n = 0 \rightarrow \text{ordem } 2$$

$$3f_1 \rightarrow m = 3 \text{ e } n = 0 \rightarrow \text{ordem } 3$$

$$2f_2 \rightarrow m = 0 \text{ e } n = 2 \rightarrow \text{ordem } 2$$

$$3f_2 \rightarrow m = 0 \text{ e } n = 3 \rightarrow \text{ordem } 3$$

$$f_1 + f_2 \rightarrow m = 1 \text{ e } n = 1 \rightarrow \text{ordem } 2$$

$$2f_1 + f_2 \rightarrow m = 2 \text{ e } n = 1 \rightarrow \text{ordem } 3$$

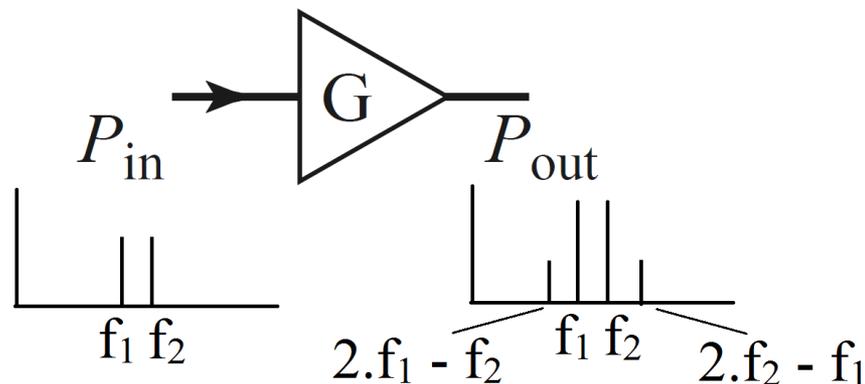
$$f_1 - f_2 \rightarrow m = 1 \text{ e } n = 1 \rightarrow \text{ordem } 2$$

$$2f_1 - f_2 \rightarrow m = 2 \text{ e } n = 1 \rightarrow \text{ordem } 3$$

Distorção não-linear

Produto de intermodulação de 3ª. Ordem

- Caracteriza os produtos de intermodulação de 3ª ordem
 - Frequências próximas às dos sinais de entrada, difíceis de filtrar
- Determinação experimental do IP_3
 - Alimenta-se o dispositivo com
 - Dois tons próximos, f_1 e f_2
 - De mesma amplitude
 - Varia-se a amplitude dos dois tons de entrada.
 - Mede-se na saída as amplitudes de: f_1 e f_2 e $2.f_1 - f_2$ e $2.f_2 - f_1$



Distorção não-linear

Produto de intermodulação de 3ª. Ordem

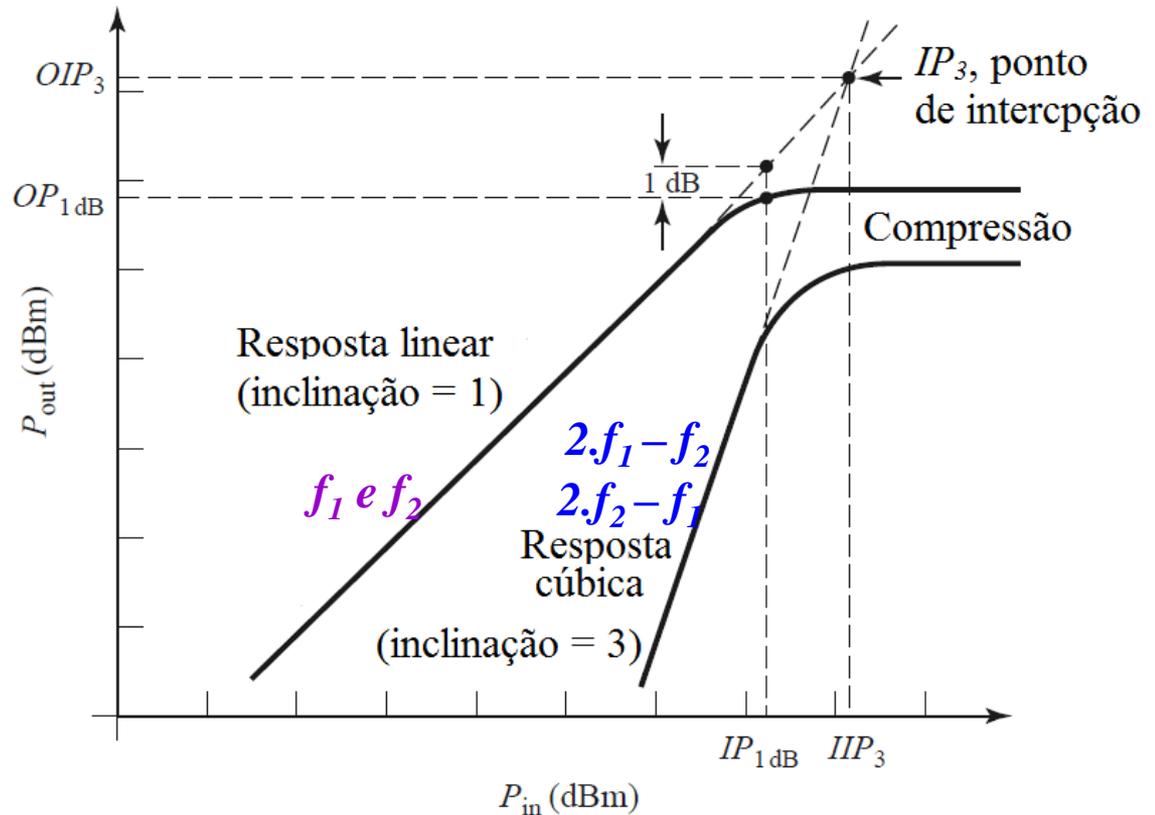
- IP_3 - ponto de intercepção de 3ª. ordem
- Prolonga-se a região linear das curvas

$P_{in} \times P_{out}$ de f_1 e f_2

e

$P_{in} \times P_{out}$ de $2.f_1 - f_2$ e $2.f_2 - f_1$

- Mede-se o ponto de intercepção das retas resultantes



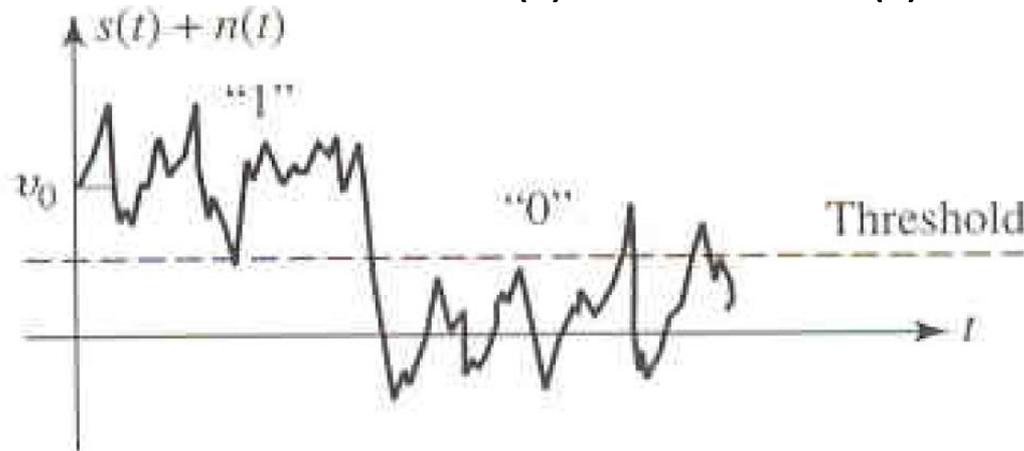
IIP_3 → definido em relação à potência de entrada (em conversores de freq.)

OIP_3 → definido em relação à potência de saída (em amplificadores)

Ruído em receptores de micro-ondas

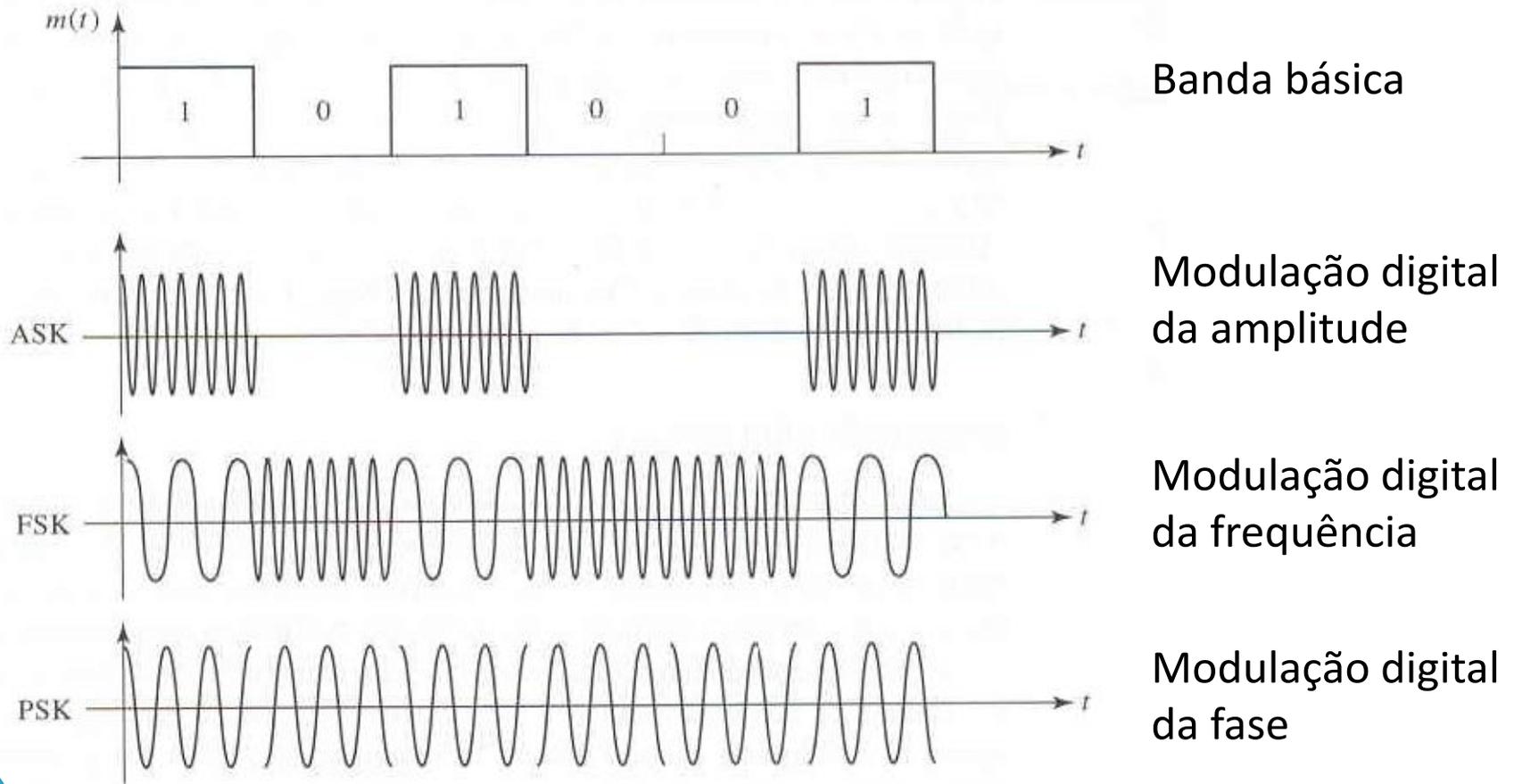
Ruído

- **Efeito do ruído no desempenho do sistema**
 - O ruído é um dos parâmetros mais importantes do sistema
 - Determina o limiar do nível mínimo de sinal recebido pelo sistema que pode ser detectado com confiabilidade pelo receptor
 - Exemplo: um sinal binário $s(t)$ com ruído $n(t)$



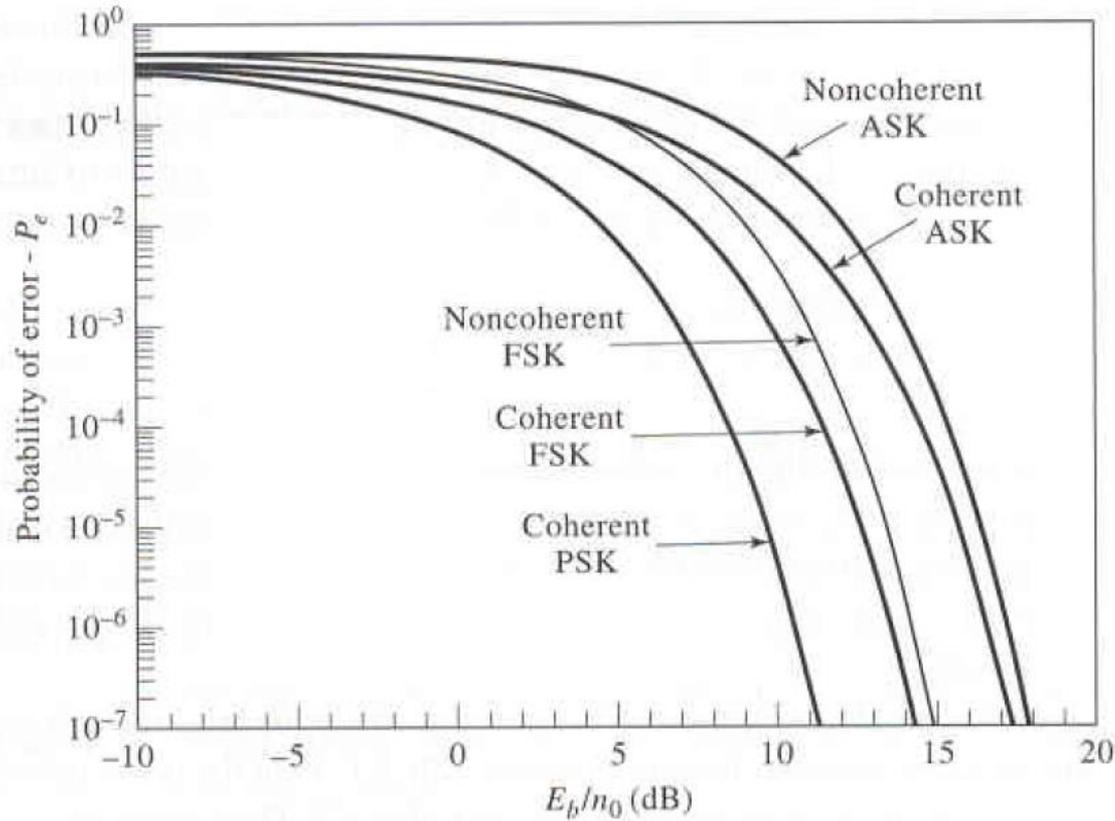
Ruído

- Efeito do ruído no desempenho do sistema
 - Modulação digital
 - Dados da banda básica e sinais modulados em ASK, FSK e PSK



Ruído

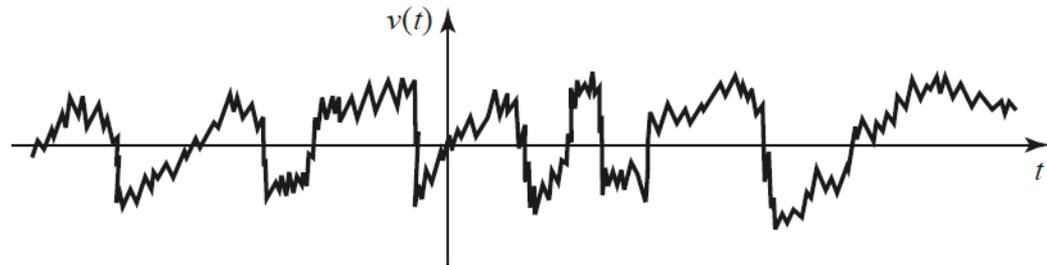
- **Probabilidade de erro**
 - Função do tipo de modulação
 - Relação sinal/ruído



Probabilidade de erro versus relação sinal ruído – modulação ASK, FSK e PSK

Ruído

- **Fontes de ruído em sistemas sem fio**
 - **Ruídos externos** → **captados pela antena do sistema**
 - Ruído de fundo cósmico e radiação de estrelas
 - Ruído térmico do solo
 - Descargas elétricas – raios, ignição de carros, lâmpadas
 - Sinais de estações de rádio, TV, sistemas de comunicação sem fio,...
 - **Ruídos internos** → **gerados pelos componentes do sistema**
 - Antena, linhas de transmissão, amplificadores, filtros, atenuadores, conversores de frequência,....
 - Originados por vários mecanismos físicos distintos
 - **Tensão de ruído $v(t)$**
 - Sinal aleatório



$v(t)$: Valor médio = 0, mas valor eficaz $V_n \neq 0$

Ruído

- **Representação do ruído**

F - Figura de ruído

- Medida da degradação da relação sinal-ruído do sinal entre a entrada e saída do componente, devido ao ruído adicionado pelo mesmo
- É definida para a temperatura **$T = T_0 = 290\text{ K}$**

T_e - temperatura equivalente de ruído

- Seja R a resistência da porta em que se mede o ruído gerado por um dispositivo, circuito ou sistema
- T_e é a temperatura na qual um resistor R deveria estar para gerar a mesma potência de ruído que a gerada pelo dispositivo, circuito ou sistema

Relação

Figura de ruído \leftrightarrow Temperatura Ruído

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

Ruído

Figura de ruído de uma rede

- Ganho G , banda de frequências B e temperatura de ruído T_e
- Alimentada na entrada por resistência casada R a $T = T_0 = 290 \text{ K}$
- Terminada por carga casada R

Na entrada da rede

- Potência de sinal: S_i
- Potência de ruído: N_i
- Relação sinal-ruído: S_i/N_i

Na saída da rede

- Potência de sinal: $S_o = G.S_i$
- Potência de ruído: $N_o = G.S_o + \text{ruído da rede}$
- Relação sinal-ruído: $S_o/N_o < S_i/N_i$

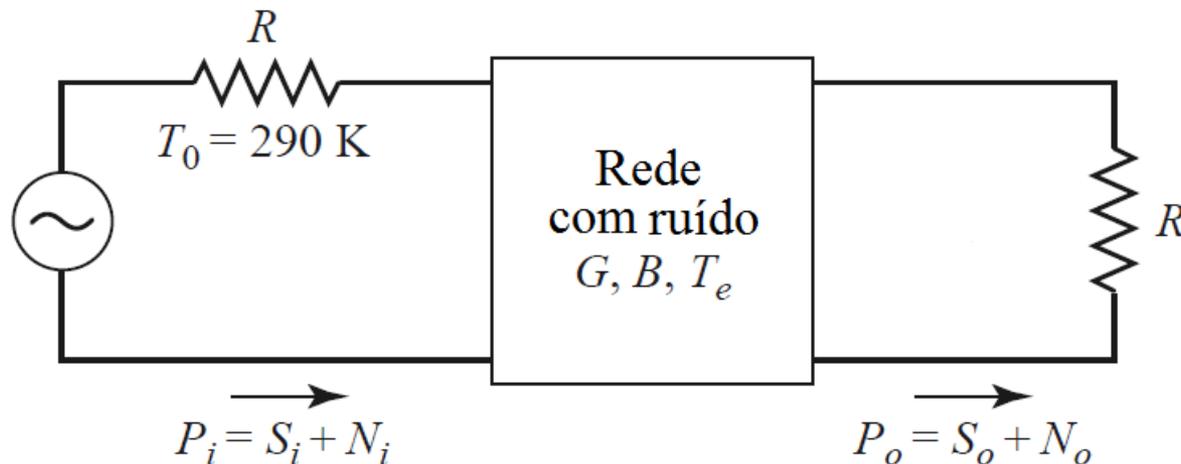


Figura de ruído

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \geq 1$$

$$F(\text{dB}) = 10\log(F)$$

Ruído

F - Figura de ruído

- Usada no projeto do receptor
- Assumi todos os circuitos em temperatura ambiente $T = T_0 = 290 K$
- Permite avaliar o impacto de cada circuito do receptor na Figura de Ruído total do receptor, uma vez conhecidos:
 - Figura de ruído (F) de cada componente do sistema
 - Ganho (G) ou perda (L) de cada componente do receptor

Exemplo

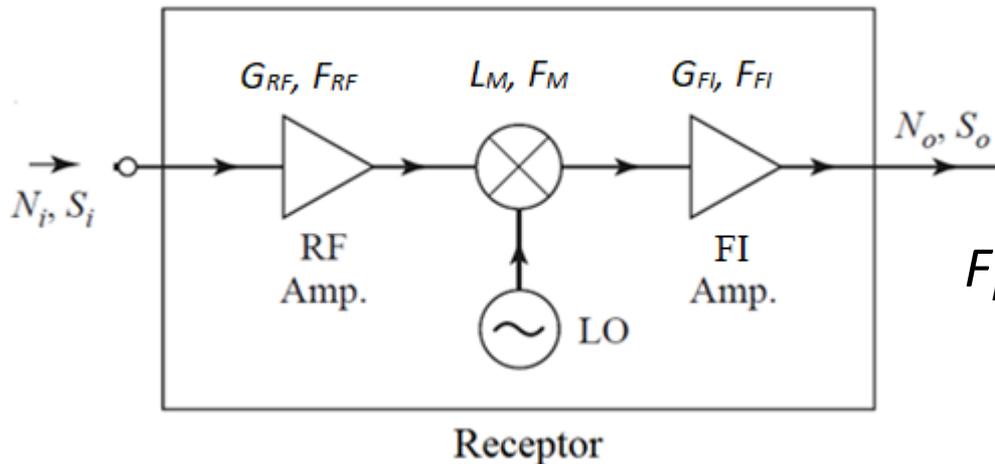


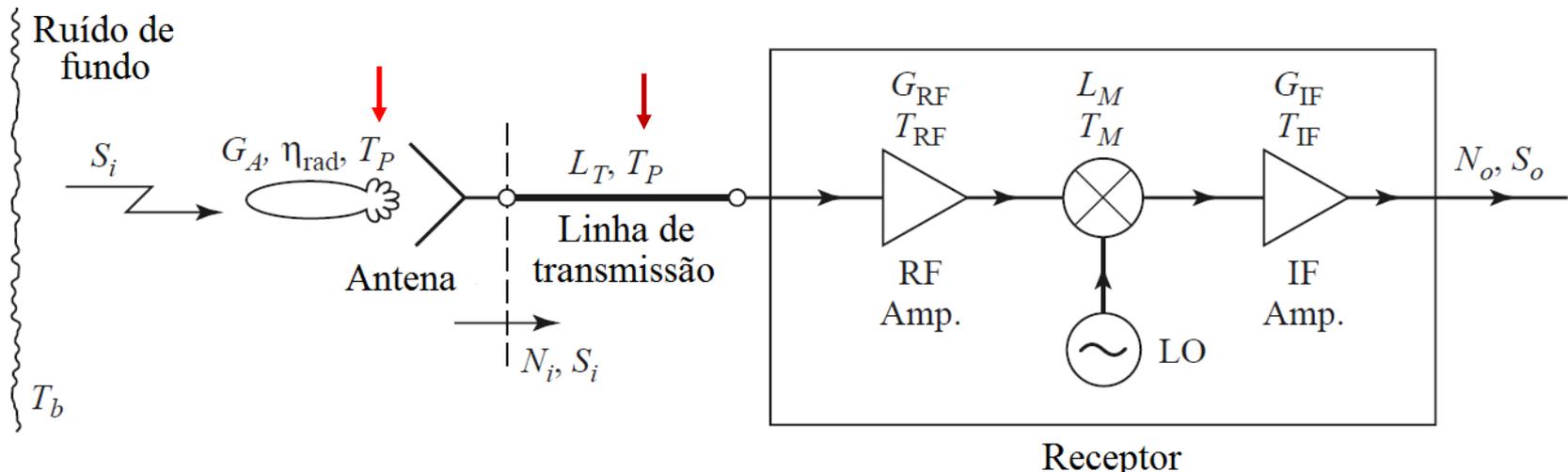
Figura de ruído
do receptor

$$F_{RX} = f(G_{RF}, F_{RF}; L_M, F_M; G_{FI}, F_{FI})$$

Ruído

T_e - temperatura equivalente de ruído

- Permite calcular a relação sinal ruído ao longo do sistema, considerando
 - Ruído externo captado pela antena
 - Ruído gerado pela antena na temperatura física $T_p \neq T_0 = 290\text{ K}$
 - Ruído gerado pela linha de transmissão entre a antena e o receptor, na temperatura física $T_p \neq T_0 = 290\text{ K}$
 - Não se usa Figura de Ruído nesse cálculo, pois a temperatura física da antena e da linha de transmissão usualmente não são 290 K.



Ruído

Análise do ruído recebido pelo sistema

Parâmetros a serem considerados dos componentes

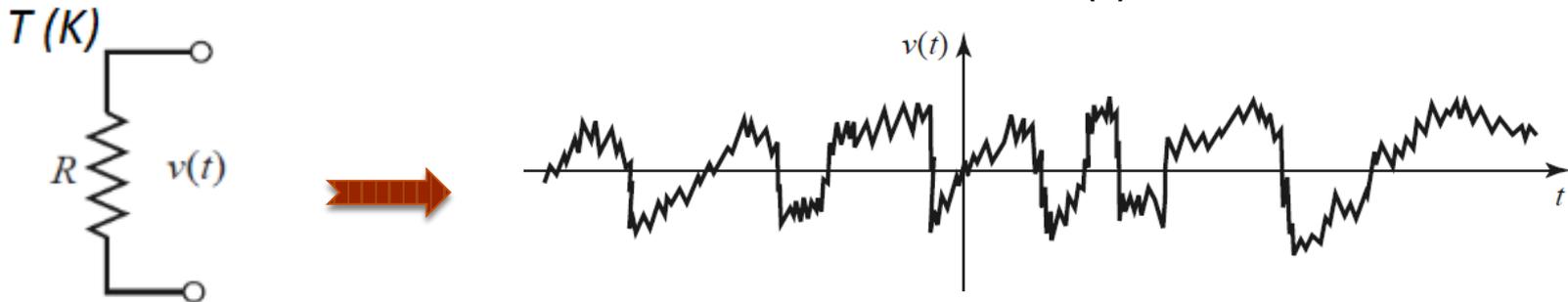
- Amplificadores
 - Conversores de frequência
 - Componentes passivos
 - Filtros
 - Atenuadores
 - Divisores de potência
 - Acopladores
 - Linhas de transmissão
 - Guias de ondas
 - Antena
- 
- Figura de Ruído e/ou
 - Temperatura Equivalente de Ruído
 - Ganho ou perda

Temperatura Equivalente de Ruído

- Potência de ruído gerada por um resistor

- Considere que

- Um resistor R , à temperatura $T(K)$
- Produz uma tensão aleatória de ruído $v(t)$



- Lei de radiação do corpo negro de Planck
- Valor eficaz da tensão de ruído $v(t) \rightarrow V_n$

$$V_n = \sqrt{\frac{4hfBR}{e^{hf/kT} - 1}}$$

h constante de Planck – $6,626 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{Kg/s}$

f frequência

B banda do sistema em Hz

K constante de Boltzmann – $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T temperatura em Kelvin

Temperatura Equivalente de Ruído

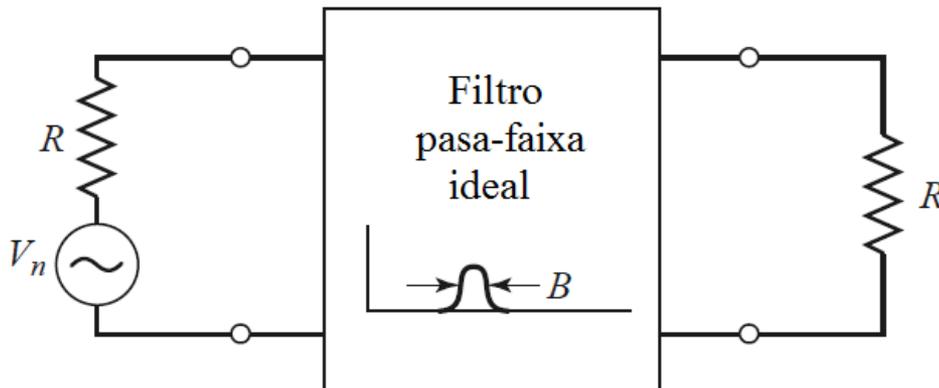
- Em frequências de micro-ondas

- Valor aproximado da tensão eficaz de ruído

$$e^{hf/kT} - 1 \approx \frac{hf}{kT} \implies V_n = \sqrt{4kTBR}$$

- Máxima potência de ruído gerada pelo resistor R na temperatura T (K) entregue a

- Carga resistiva R
- Através de um filtro passa-faixa ideal com banda B



$$P_n = R \cdot i^2 = R \left(\frac{V_n}{2R} \right)^2 = \frac{V_n^2}{4R}$$

$$P_n = kTB$$

Temperatura Equivalente de Ruído

- **Potência de ruído em micro-ondas**

- Aproximação de Rayleigh-Jeans
 - Válida em frequências de micro-ondas

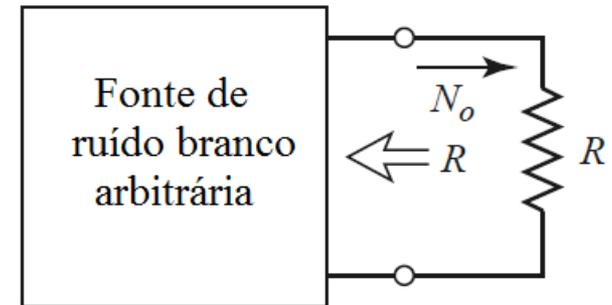
$$P_n = kTB$$

- Ruído branco – potência não depende da frequência
- Quando $B \rightarrow 0$ a potência de ruído $P_n \rightarrow 0$
 - Quanto menor a banda do receptor menos potência de ruído ele coleta
- Quando a temperatura $T \rightarrow 0$ a potência de ruído $P_n \rightarrow 0$
 - Dispositivos e componentes mais frios geram menos potência de ruído

Temperatura Equivalente de Ruído

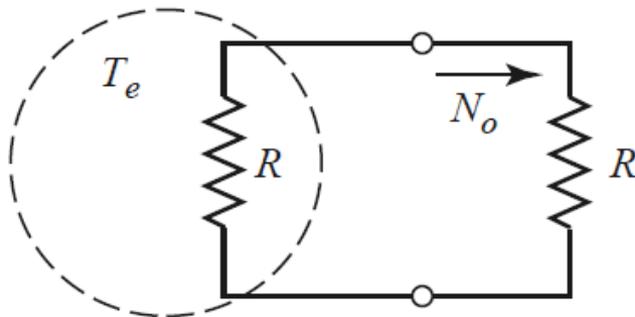
Fonte de ruído branco arbitrária

- Considere uma fonte de ruído branco
- Acesso com resistência interna R
- Alimentando uma carga com resistência R
- Entregando potência de ruído $P_n = N_o$



Temperatura Equivalente de Ruído da fonte de ruído branco

- A temperatura T_e na qual uma resistência R entregue a uma carga casada a mesma potência de ruído N_o que a fonte de ruído branco



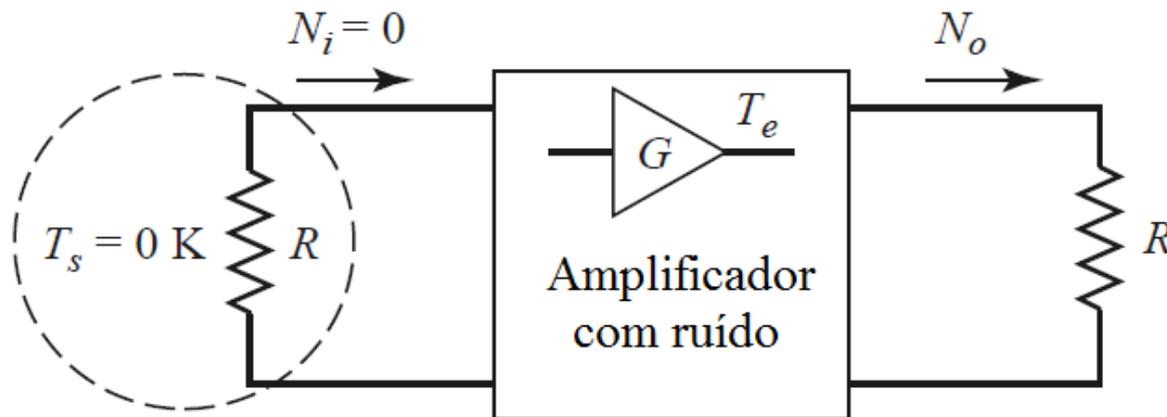
$$N_o = kT_e B$$



$$T_e = \frac{N_o}{kB}$$

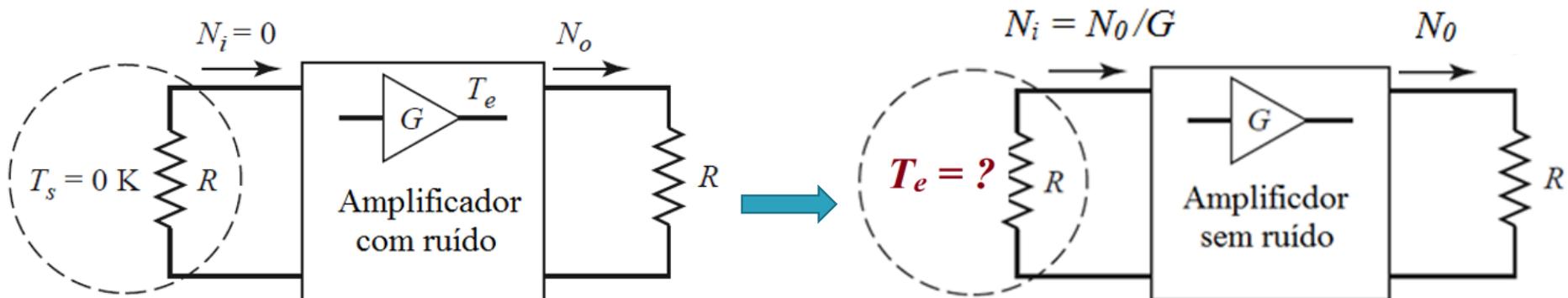
Ruído de Amplificadores

- Considere um amplificador com ruído
 - Com ganho de potência G
 - Alimentado na entrada por resistência casada R a $T_s = 0\text{ K}$ (*sem ruído*)
 - Entregue na saída potência de ruído N_o à carga casada R
- Logo N_o é a potência de ruído gerada pelo amplificador



Ruído de Amplificadores

- Considere
 - Um amplificador sem ruído, com o mesmo ganho G que o amplificador real
 - Com entrada e saída terminadas por cargas conjugadamente casadas R



- Temperatura equivalente de ruído do amplificador
 - A temperatura física da resistência R conectada à entrada do amplificador de modo a gerar uma potência de ruído $N_i = N_o/G$
 - Tal que a resistência de saída R na saída receba a potência de ruído N_o gerada pelo amplificador real

Ruído de Amplificadores

- O ruído gerado pela resistência R

$$N_i = kT_e B = \frac{N_0}{G}$$

- Logo, a temperatura equivalente de ruído do amplificador é

$$T_e = \frac{N_0}{GkB}$$

- Figura de ruído amplificador a temperatura $T_0 = 290$ K

$$\left. \begin{aligned} F &= 1 + \frac{T_e}{T_0} \\ T_e &= \frac{N_0}{GkB} \end{aligned} \right\} \rightarrow F = 1 + \frac{N_0}{GkBT_0}$$

Ruído de componentes passivos

- Componentes passivos usados em sistemas
 - Atenuadores
 - Filtros
 - Acopladores
 - Divisores e combinadores de potência
 - Linhas de transmissão
 - Guias de ondas
- Componentes passivos reais têm perdas
 - Ganho: $G < 1$
 - A perda é definida como $\rightarrow L = 1/G$
- Efeito da perda
 - Adição de ruído ao sistema

Ruído de componentes passivos

- Temperatura equivalente de ruído

$$T_e = (L - 1)T$$

T: temperatura física do componente em Kelvin

- Figura de Ruído em $T = T_0 = 290 K$

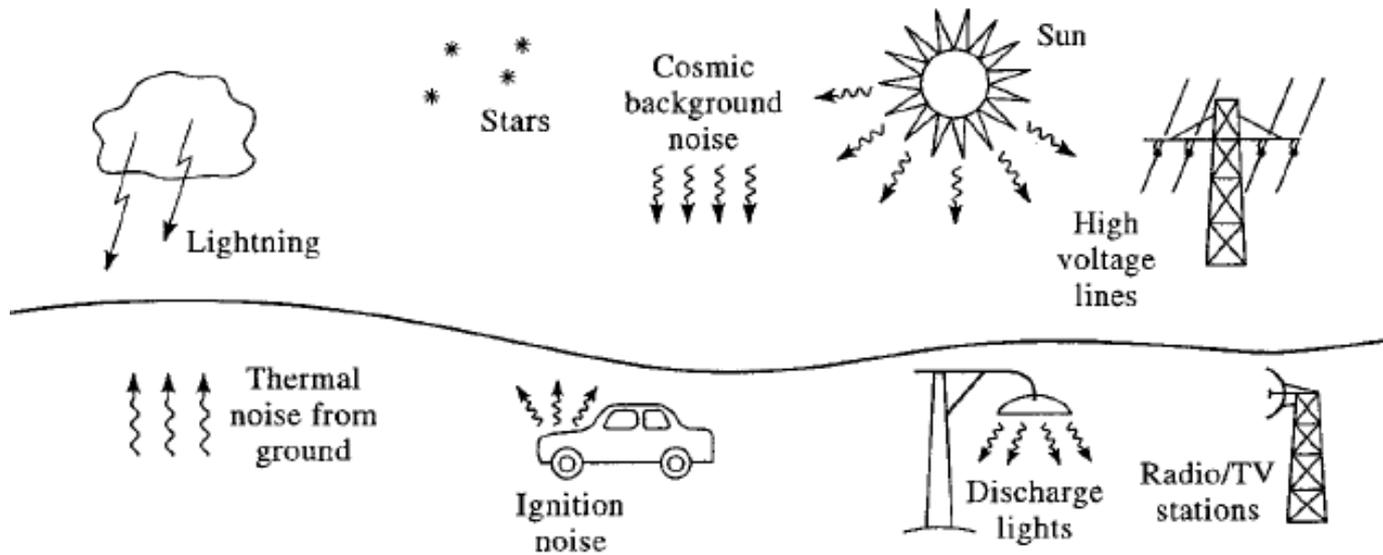
$$\left. \begin{aligned} F &= 1 + \frac{T_e}{T_0} \\ T_e &= (L - 1)T_0 \end{aligned} \right\} \rightarrow F = L$$

Exemplos

- Na temperatura $T_0 = 290 k$
 - Atenuador de 6 dB $\rightarrow F = 6 dB$
 - Filtro com perda de inserção de 0,5 dB $\rightarrow F = 0,5 dB$

Temperatura de Ruído da Antena

- Fontes de ruídos captados pela antena
 - Ruído de fundo cósmico e radiação de estrelas
 - Ruído térmico do solo
 - Descargas elétricas – raios, ignição de carros, lâmpadas
 - Sinais de estações de rádio, TV, sistemas de comunicação sem fio,...



Temperatura de Ruído da Antena

- Temperatura de ruído de fundo (do ambiente)
 - *Background noise temperature* – T_B
 - Temperatura (Kelvin) em que a resistência de referência do sistema gera a potência de ruído de fundo N medida na banda de frequência B

$$N = k.T_B.B \quad K: \text{constante de Boltzmann}$$

- T_B depende da direção de apontamento da antena
 - Céu, direção do zênite $\rightarrow T_B = 3$ a 5 K
 - Céu direção ao horizonte $\rightarrow T_B = 50$ a 100 K
 - Solo $\rightarrow T_B = 290$ a 300 K

Temperatura de Ruído da Antena

- Temperatura de brilho – T_b
 - *Brightness temperature*
 - Valor médio da temperatura de ruído de fundo visto pela antena
 - Função da distribuição espacial do ruído de fundo, $T_B(\theta, \phi)$
 - Função da diretividade da antena, $D(\theta, \phi)$

$$T_b = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} T_B(\theta, \phi) D(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} D(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi},$$

Temperatura de Ruído da Antena

- Temperatura de ruído da antena – T_A
 - Agrega dois tipos de ruído
 - Ruído captado pela antena → temperatura de brilho
 - Ruído devido às perdas da antena → temperatura da antena

$$T_A = \eta_{\text{rad}} T_b + (1 - \eta_{\text{rad}}) T_p$$

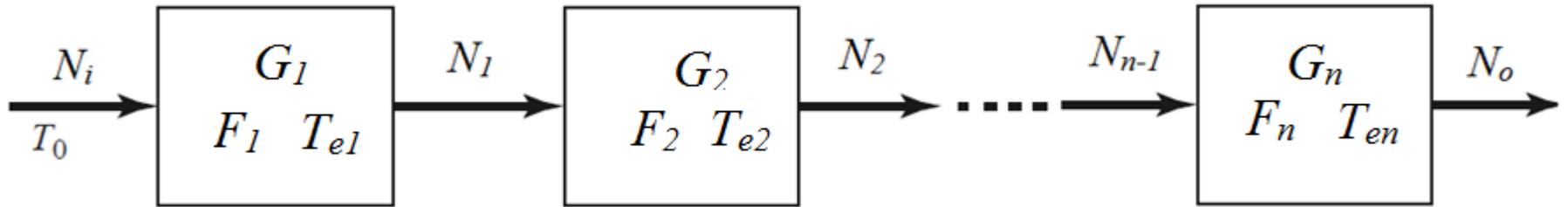
- Sendo

η_{rad} – eficiência de radiação da antena

T_b – temperatura de brilho

T_p – temperatura de ruído relacionada ao ruído gerado pelas perdas ôhmicas da antena

Ruído de Rede em Cascata



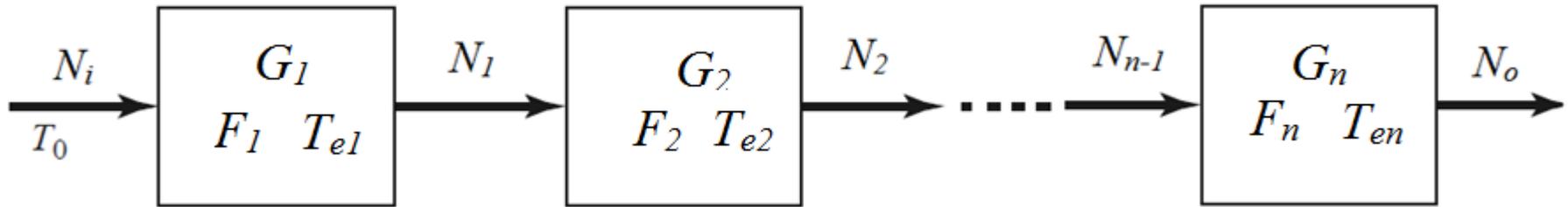
- **Figura de Ruído da Rede**

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- **Temperatura Equivalente de Ruído da Rede**

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

Ruído de Rede em Cascata



• Figura de Ruído da Rede

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- O primeiro elemento da rede → impacto direto na figura de ruído
- Em receptores de micro-ondas o primeiro elemento da rede é habitualmente
 - Amplificador de Baixo Ruído – LNA (*Low Noise Amplifier*), ou
 - Filtro com baixas perdas de inserção seguido do LNA
 - O impacto dos demais elementos da rede no ruído é atenuado pelo ganho dos componentes que o precedem

Ruído de Rede em Cascata

- **Figura de Ruído e Temperatura de Ruído de cascata**

- Para cálculo da Figura de Ruído do Receptor
 - Assumindo temperatura do sistema $T_0 = 290$ K

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- Para cálculo da relação sinal-ruído, S_o/N_o
 - Considerando temperatura de ruído da antena $T_A \neq 290$ K

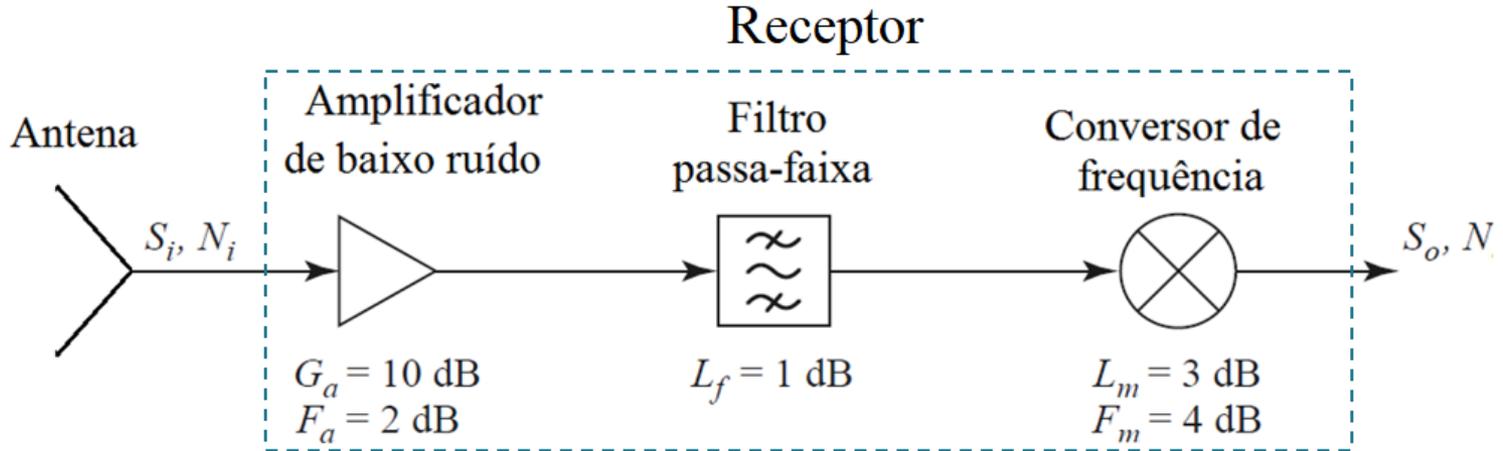
$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- Potência de ruído na saída do receptor

$$N_0 = GkT_e B$$

Ruído de Rede em Cascata

• Exemplo



- Calcule a Figura de Ruído do receptor
- Calcule a Temperatura de Ruído do receptor
- Calcule a potência de ruído
 - Na entrada do receptor, N_i
 - Na saída do receptor, N_o
- Qual deve ser a potência de sinal de entrada, S_i , para que $S_o/N_o = 20$ dB

• Dados:

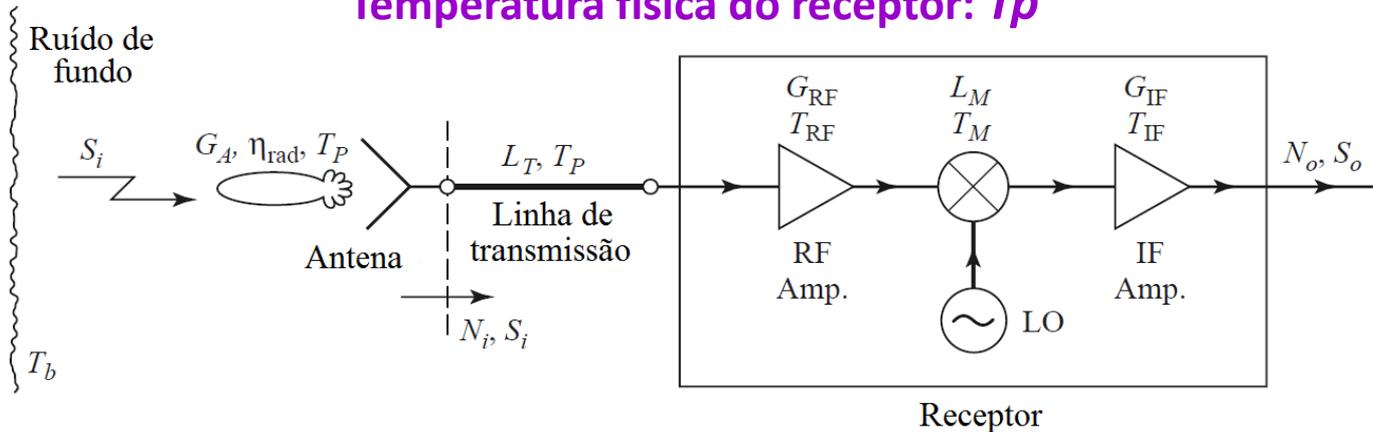
Antena: $T_A = 150$ K

Banda de FI: 10 MHz

K: $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

• Características de ruído do receptor completo

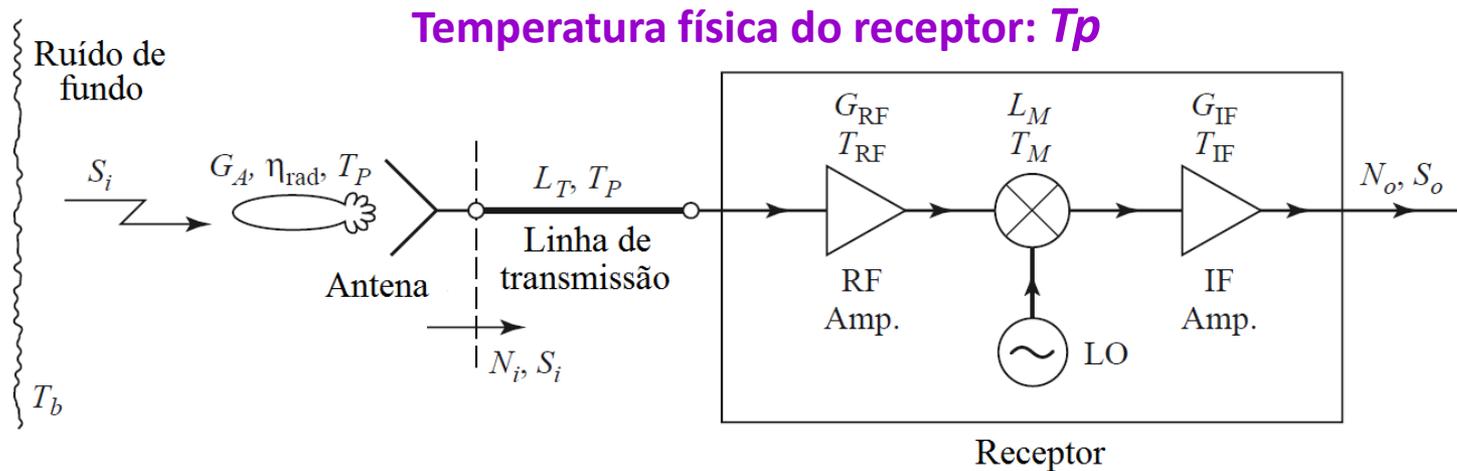
Temperatura física do receptor: T_p



• Temperatura de ruído

- Antena → $T_A = \eta_{\text{rad}} T_b + (1 - \eta_{\text{rad}}) T_p$
- Receptor → $T_{\text{REC}} = T_{\text{RF}} + \frac{T_M}{G_{\text{RF}}} + \frac{T_{\text{IF}} L_M}{G_{\text{RF}}}$
- Linha de transmissão → $T_{\text{TL}} = (L_T - 1) T_p$
- Linha de transmissão + receptor → $T_{\text{TL+REC}} = T_{\text{TL}} + L_T T_{\text{REC}}$
 $= (L_T - 1) T_p + L_T T_{\text{REC}}$

• Características de ruído do receptor completo



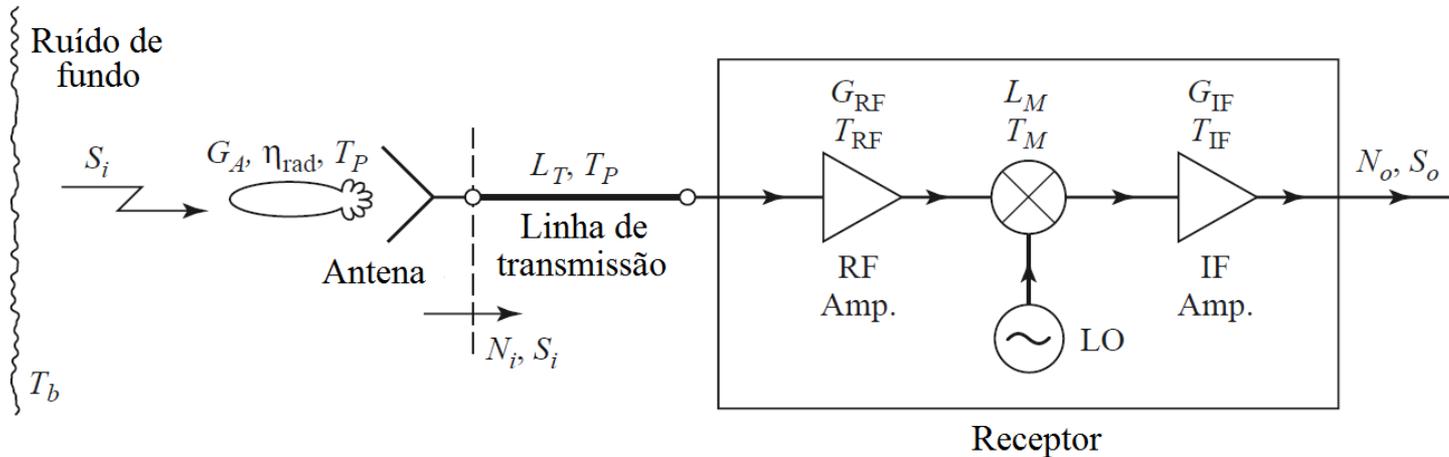
Ruído de entrada do receptor

$$N_i = kBT_A = kB[\eta_{rad}T_b + (1 - \eta_{rad})T_p]$$

Ruído na saída do receptor

$$\begin{aligned} N_o &= (N_i + kBT_{TL+REC}) G_{SYS} \\ &= kB(T_A + T_{TL+REC}) G_{SYS} \\ &= kB[\eta_{rad}T_b + (1 - \eta_{rad})T_p + (L_T - 1)T_p + L_T T_{REC}] G_{SYS} \\ &= kBT_{SYS} G_{SYS}, \end{aligned}$$

• Características de ruído do receptor completo



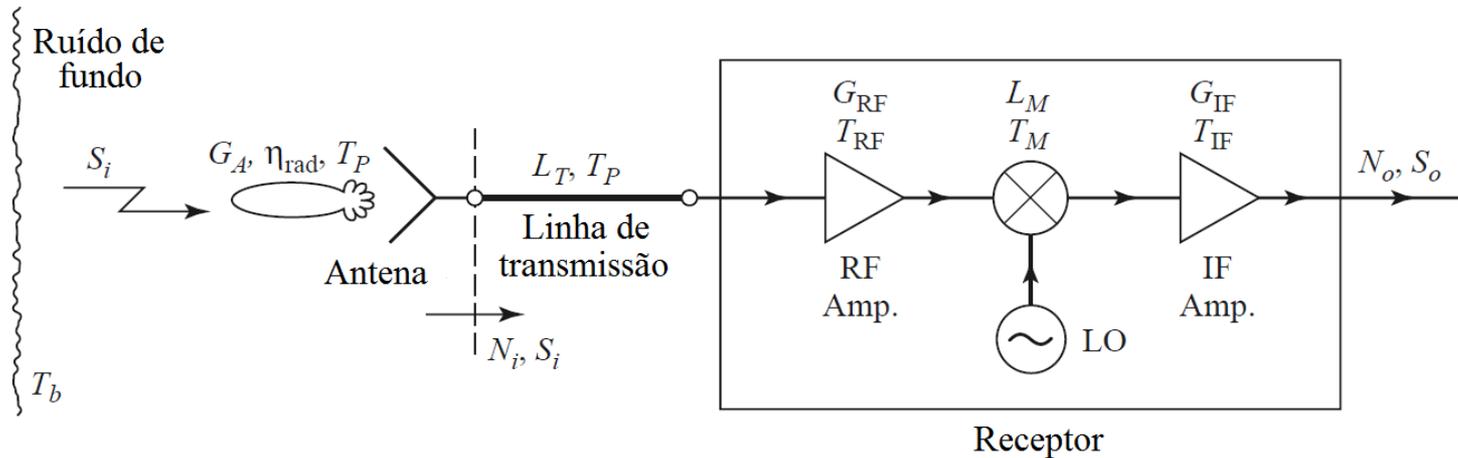
Sinal na saída do receptor

$$S_o = \frac{S_i G_{RF} G_{IF}}{L_T L_M} = S_i G_{SYS}$$

Relação sinal-ruído na saída do receptor

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{kBT_{SYS}} = \frac{S_i}{kB[\eta_{rad}T_b + (1 - \eta_{rad})T_p + (L_T - 1)T_p + L_T T_{REC}]}$$

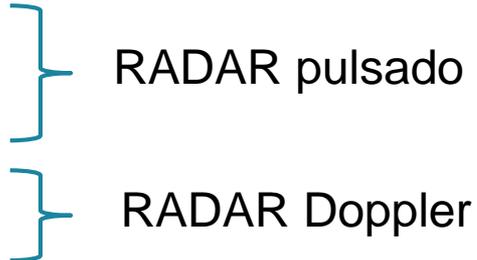
• Características de ruído do receptor completo



- Sistema
 - $f = 4.0 \text{ GHz,}$
 - $B = 1 \text{ MHz,}$
 - $S_i = -80 \text{ dBm,}$
- Antena
 - $G_A = 26 \text{ dB,}$
 - $\eta_{rad} = 0.90,$
 - $T_P = 300 \text{ K,}$
 - $T_b = 200 \text{ K,}$
- Linha de transmissão
 - $L_T = 1.5 \text{ dB}$
- Amplificador de RF
 - $G_{RF} = 20 \text{ dB,}$
 - $F_{RF} = 3.0 \text{ dB,}$
- Conversor de frequência
 - $L_M = 6.0 \text{ dB,}$
 - $F_M = 7.0 \text{ dB,}$
- Amplificador de FI
 - $G_{IF} = 30 \text{ dB,}$
 - $F_{IF} = 1.1 \text{ dB.}$

SISTEMAS RADAR

RADAR

- **RA**dio **D**etction **A**nd **R**anging
 - Opera em frequências de micro-ondas
- **Operação básica**
 - Transmissor emite um sinal
 - Alvo reflete parcialmente o sinal
 - Receptor de alta sensibilidade detecta sinal refletido pelo alvo
- **Aplicações**
 - Medida de distância até o alvo
 - Determinação da posição do alvo
 - Medida da velocidade do alvo
 - RADAR pulsado
 - RADAR Doppler

RADAR

Exemplos de aplicações do Radar

- Aplicações civis
 - Monitoramento de aeroportos
 - Navegação marítima
 - Radar meteorológico
 - Altímetro
 - Alarme de segurança
 - Medida de velocidade
 - Mapeamento geográfico
- Aplicações militares
 - Navegação por ar e mar
 - Detecção de aviões, mísseis..
 - Reconhecimento
 - Mísseis teleguiados
 - Medidas precisa de distância
- Aplicações científicas
 - Imagens médicas
 - Sensoriamento remoto ambiental
 - Radioastronomia

RADAR

- Radar em radome no bico de um jato militar



RADAR

- Radares de aeroportos – 118 a 136 MHz



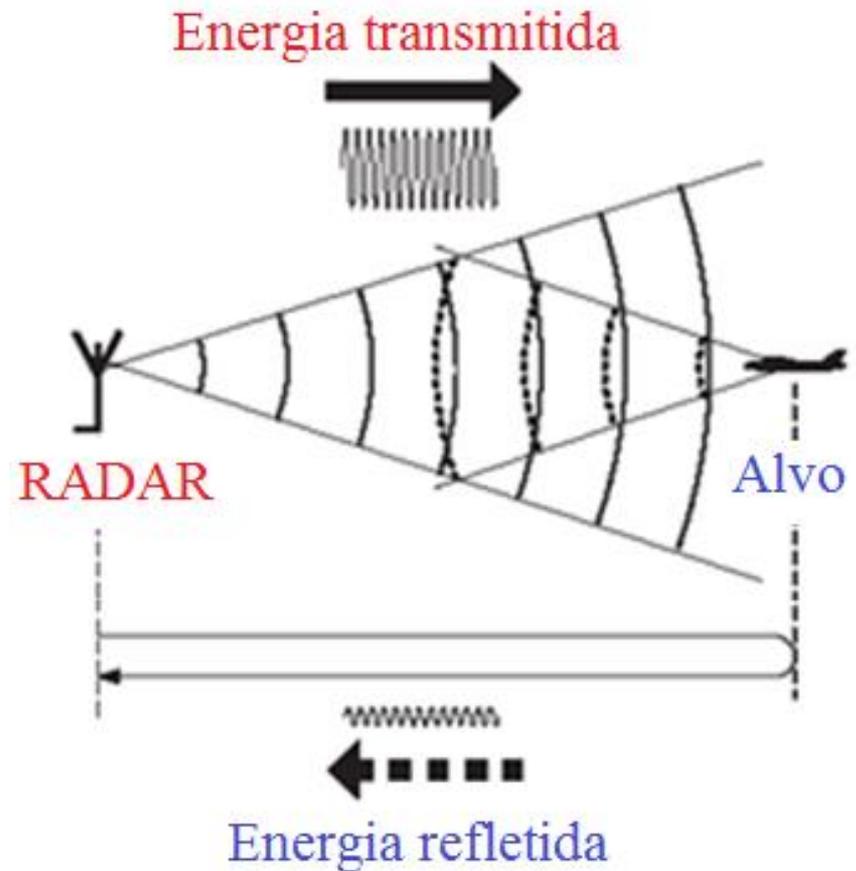
- Antena móvel



- Torre de controle com antena em radome
- Aeroporto de Guarulhos

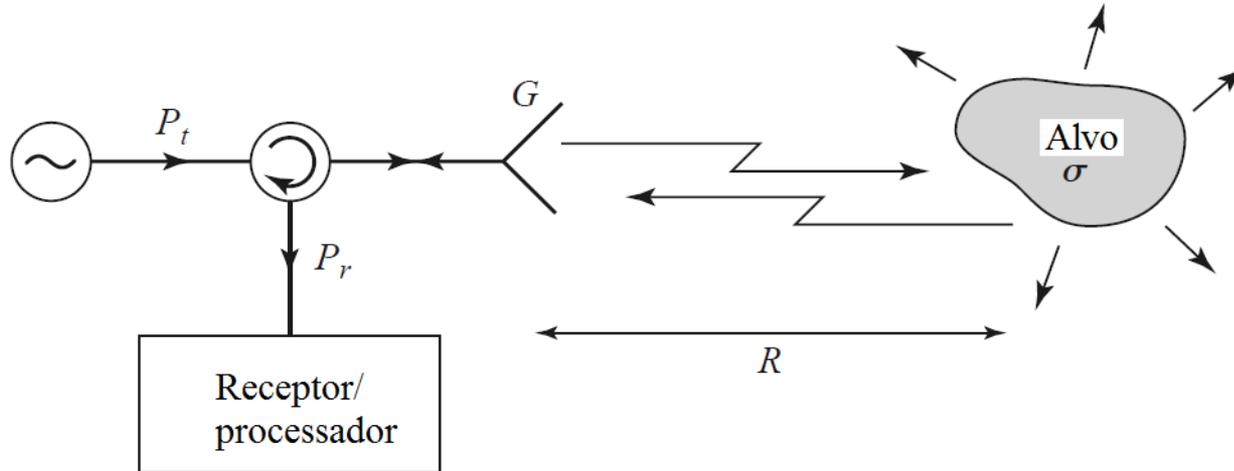
RADAR

- Princípio de operação
- Radar gera um sinal de UHF ou de micro-ondas
- O sinal é transmitido pela antena do radar
- Alvos no caminho do sinal transmitido refletem o sinal de volta para o radar
- A distância do alvo ou sua velocidade são obtidas comparando os sinais transmitido e recebido pelo radar



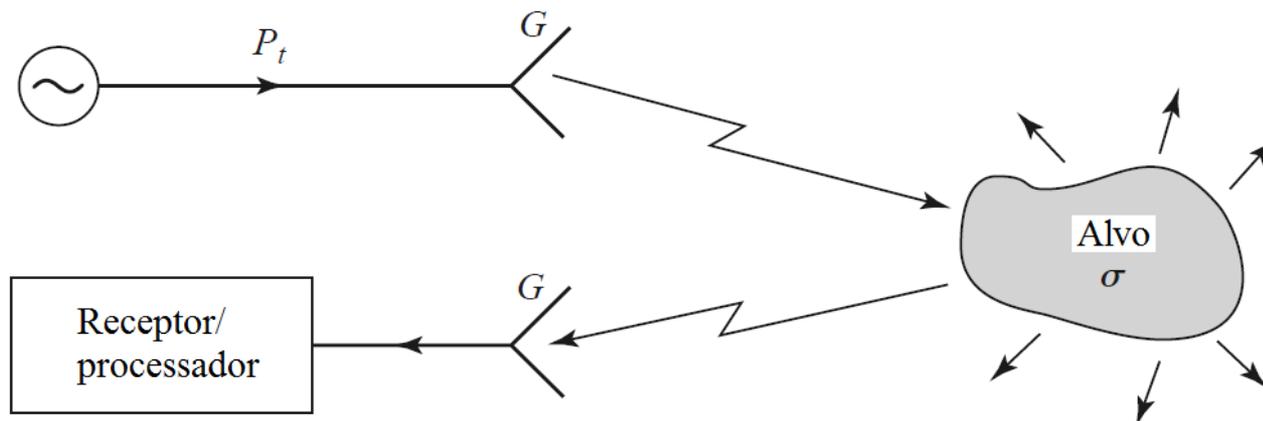
Sistemas RADAR

- **RADAR monoestático**



- Mesma antena para transmissão e recepção

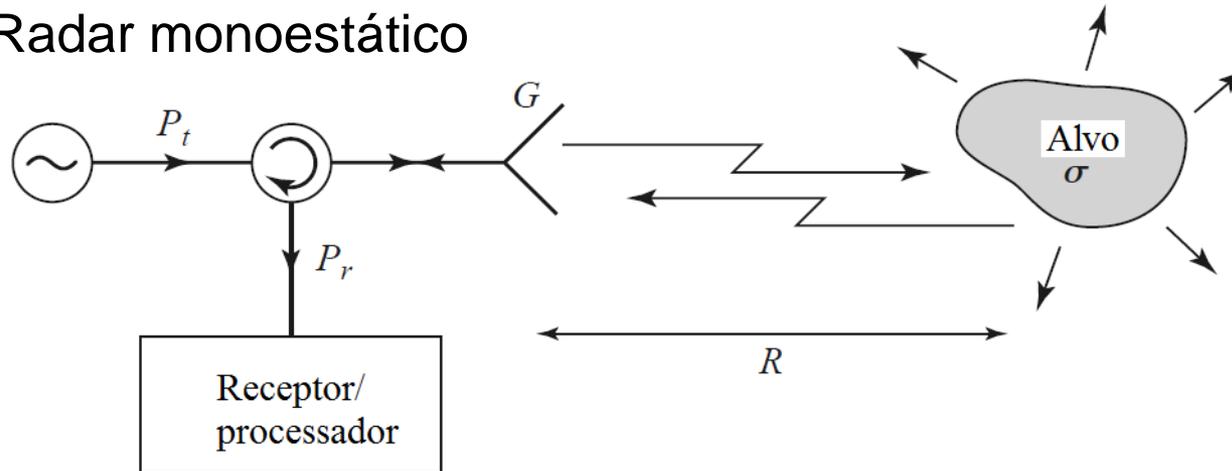
- **RADAR biestático**



- Antenas diferentes para transmissão e recepção

Equação do RADAR

- Qual a potência P_r , recebida pelo radar?
- Radar monoestático



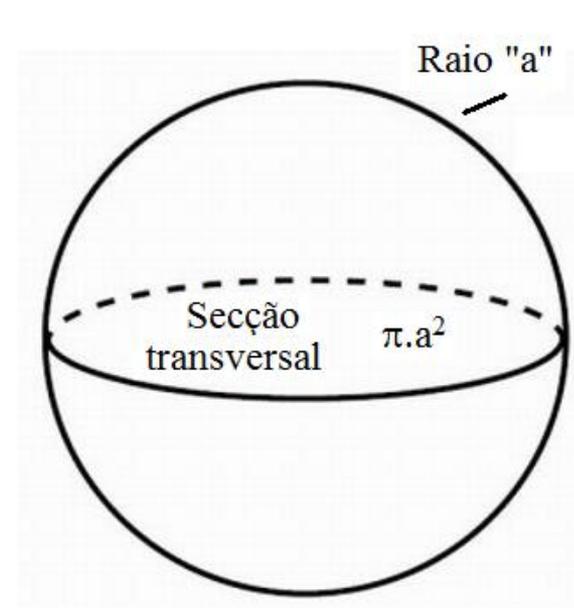
- P_t Potência do transmissor do radar
- G Ganho da antena do radar
- R Distância entre o radar e o alvo
- P_s Potência espalhada pelo alvo
- σ Secção Transversal Radar do alvo
- P_r Potência recebida pelo radar

Equação do RADAR

- **Secção Transversal Radar - σ**
- Relacionada com a área da secção transversal do alvo que espalha o sinal emitido pelo radar
- Função da frequência e polarização do sinal incidente no alvo
- Função do ângulo de incidência e reflexão do sinal no alvo

- **Exemplo**

- Alvo \rightarrow esfera de raio a
- σ proporcional a $\pi \cdot a^2$
(maior secção transversal da esfera)



Equação do RADAR

- Valores típicos de secção transversal radar - σ

ALVO	σ (m ²)
Pássaro	0,001
Míssil	0,5
Pessoa	1
Avião pequeno	1 a 2
Bicicleta	2
Barco pequeno	2
Bombardeiro	30 a 40
Avião de carreira	100

Equação do RADAR

- Densidade de potência que atinge o alvo - S_t

$$S_t = \frac{P_t \cdot G}{4\pi R^2}$$

- Secção Transversal Radar - σ

$$\sigma = \frac{P_s}{S_t} \text{ (m}^2\text{)}$$

- S_t – densidade de potência que atinge o alvo
- P_s – potência espalhada pelo alvo
- Densidade de potência espalhada pelo o alvo, recebida pelo radar - S_r

$$S_r = \frac{P_s}{4\pi R^2} \rightarrow S_r = \frac{S_t \cdot \sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi R^2)^2}$$

Equação do RADAR

- Potência espelhada pelo alvo, recebida pelo radar, P_r

$$P_r = S_r \cdot A_{ef}$$

- A_{ef} – área efetiva da antena do radar
- Tem-se

$$S_r = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad \text{e} \quad A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

- Logo

$$P_r = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi R^2)^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G \rightarrow$$

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Equação
do radar

- Potência recebida pelo radar cai com R^4
 - Sistema necessita um receptor de baixo ruído sensível

Equação do RADAR

- Alcance máximo do radar
 - Distância máxima entre radar e alvo $R = R_{MAX}$
 - Tal que $P_r = P_{min}$, sensibilidade do receptor do radar

$$P_{min} = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R_{max}^4}$$

- Logo.

$$R_{max} = \left[\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{min}} \right]^{1/4}$$

Alcance
do radar

Equação do RADAR

Exercício

Um radar pulsado operando em 10 GHz tem uma antena com 28 dB de ganho e a potência de seu transmissor é 2 kW (potência do pulso). Deseja-se detectar um alvo com secção transversal de radar de 12 m². com um sinal detectável de no mínimo $P_{\min} = -90$ dBm. Qual é o máximo alcance desse radar?

- Alcance máximo do Radar

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{\min}} \right]^{1/4}$$

Equação do RADAR

Exercício

Dados

$$f = 10 \text{ GHz} \Rightarrow \lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 10 \cdot 10^9 = 0,03 \text{ m}$$

$$P_t = 2 \text{ kW} = 2.000 \text{ W}$$

$$G_{dB} = 28 \text{ dB} \Rightarrow G = 10^{28/10} = 631$$

$$\sigma = 12 \text{ m}^2$$

$$P_{min} = -90 \text{ dBm} \Rightarrow P_{min} = 10^{-90/10} = 10^{-9} \text{ mW} = 10^{-12} \text{ W}$$

- Alcance máximo do Radar

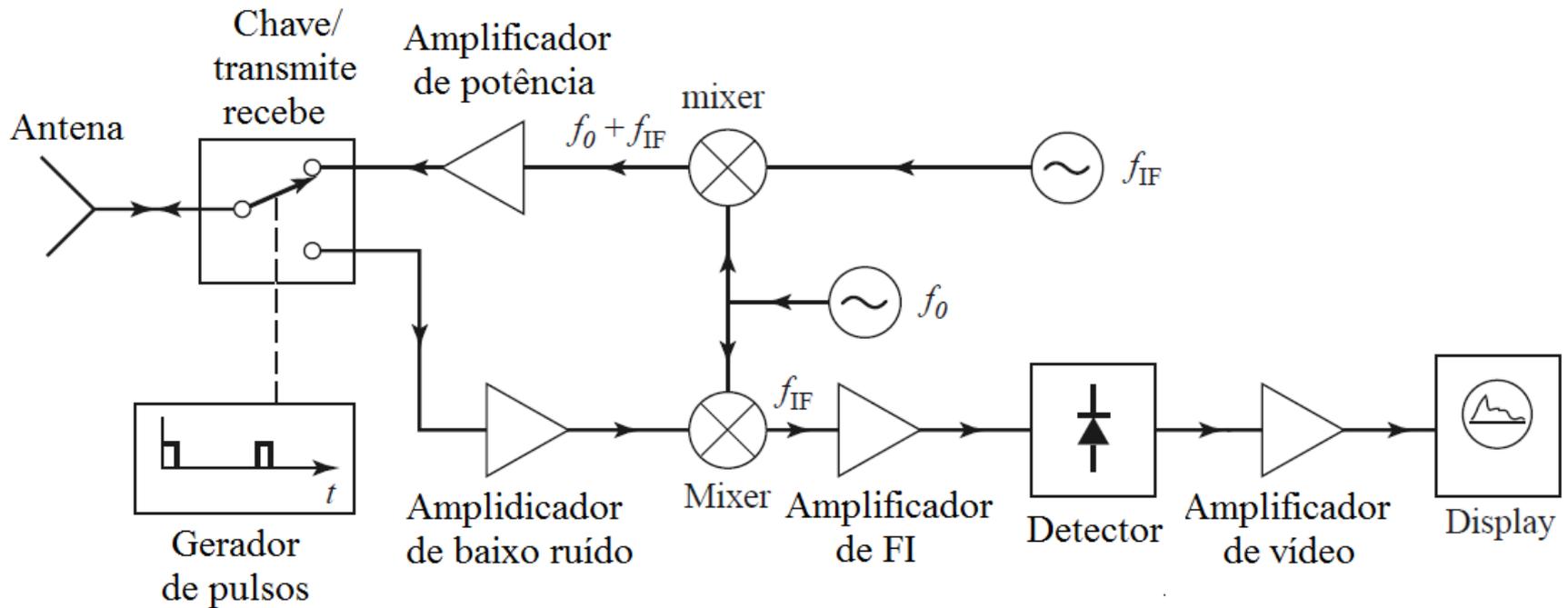
$$R_{max} = \left[\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{min}} \right]^{1/4} = \left[\frac{(2 \cdot 10^3) \cdot (631)^2 \cdot (0,03)^2 \cdot 12}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot (10^{-12})} \right]^{1/4} = 8.114 \text{ m}$$

Radar Pulsado

- **Aplicação**
 - Detectar alvos
 - Determinar a posição do alvo relativa ao radar
- **Sinal transmitido**
 - Pulso periódico de micro-ondas
 - Alta potência → kWatts
 - Duração do pulso → 50 ns a 10 ms
 - Taxa de repetição do pulso → 100 Hz a 100 KHz
- **Sinal recebido**
 - Eco do pulso de micro-ondas transmitido
 - Baixa potência

Radar Pulsado

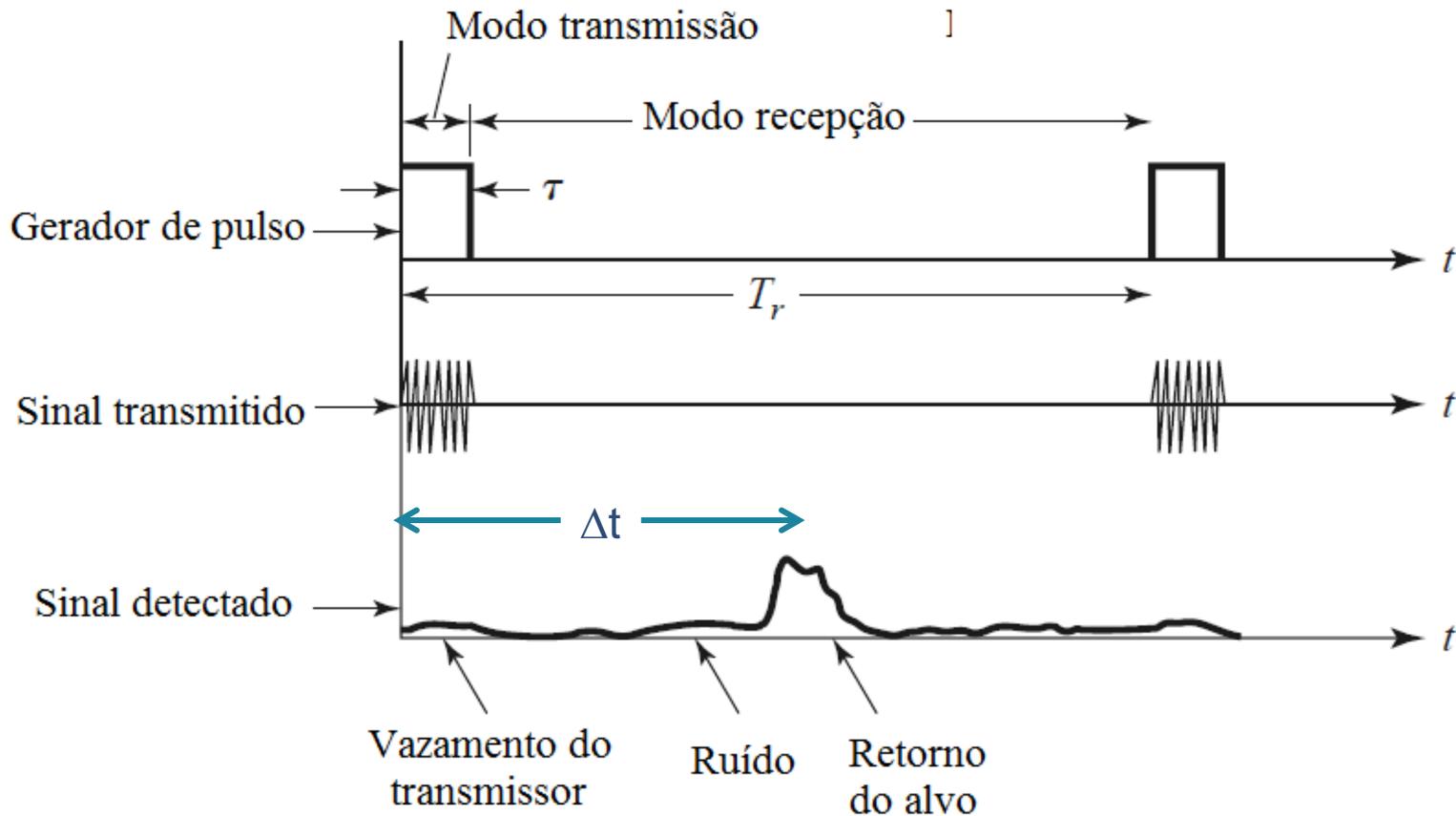
- Diagrama de blocos



- Chave transmite/recebe com alta isolação entre saídas
 - Isolação de 80 a 100 dB
 - Para minimizar vazamento do transmissor para o receptor

Radar Pulsado

- Sinais transmitido e recebido pelo radar



Radar Pulsado

- Radar Pulsado → posição do alvo
 - Distância radar-alvo → proporcional ao tempo entre
 - Emissão do sinal pelo transmissor e recepção do sinal refletido pelo alvo
 - Tempo de ida e volta do sinal entre o radar e o alvo

$$d = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

c : velocidade da luz Δt : intervalo de tempo entre emissão do pulso de micro-ondas e recepção do eco

Direção do alvo

- Dada com precisão pelo apontamento da antena
- Se for usada uma antena de feixe estreito

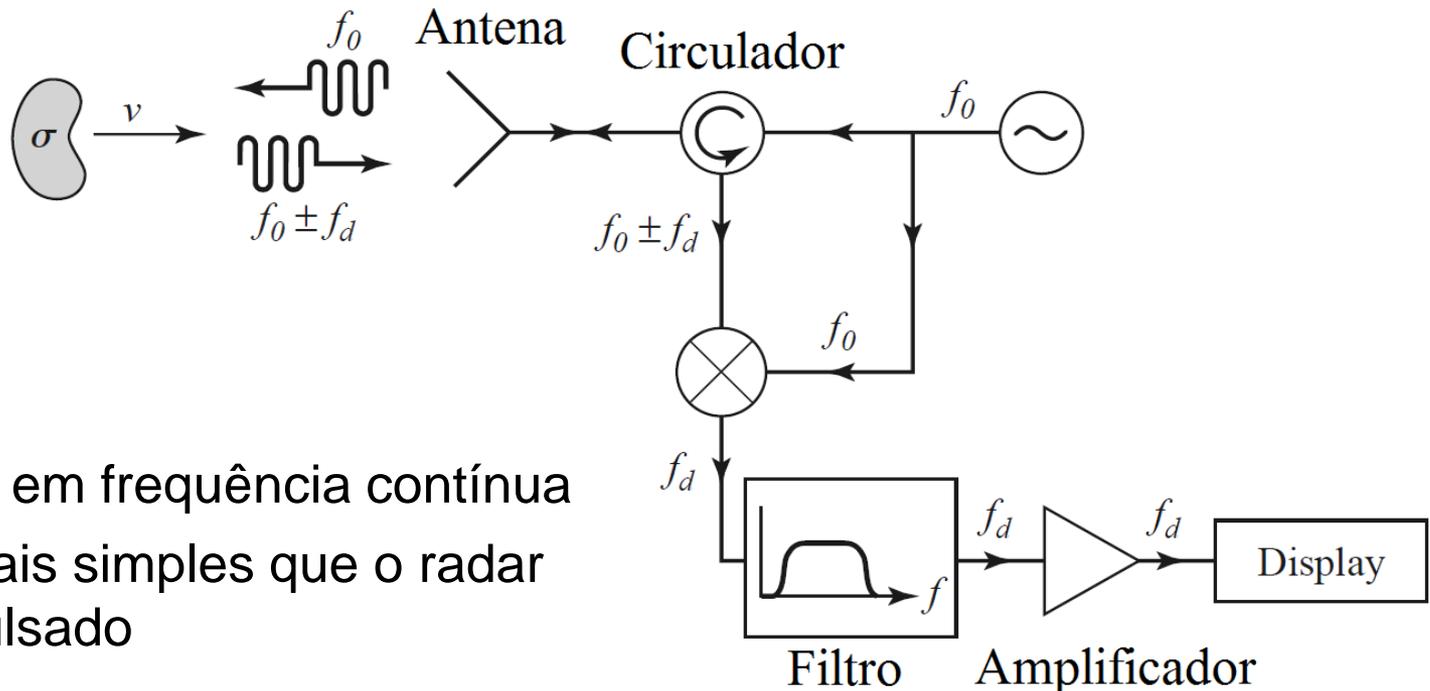
Radar Doppler

- Exemplos de aplicação
 - Radar de trânsito – mede velocidade de veículos
 - Radar meteorológico – monitora as nuvens
- Princípio de funcionamento
 - Utiliza o efeito Doppler para medir velocidade de alvos
 - Radar Doppler emite um sinal contínuo , de frequência f_0
 - Um alvo com velocidade v , na direção da visada do radar
 - Reflete o sinal de volta para o radar, com sua frequência alterada pela *frequência Doppler* , f_d

$$f_d = \frac{2 \cdot v \cdot f_0}{c}$$

Radar Doppler

- Frequência do sinal recebido pelo radar
 - $f_0 + f_d \rightarrow$ o alvo aproxima-se do Radar Doppler
 - $f_0 - f_d \rightarrow$ o alvo afasta-se do Radar Doppler
- Diagrama de blocos



- Opera em frequência contínua
 - Mais simples que o radar pulsado

Radar Doppler

- **Oscilador local**
 - Gera o sinal transmitido de frequência f_0
 - Fornece o sinal de OL do conversor de frequência
 - Deve ter alta estabilidade de frequência
- **Conversor de frequência**
 - Recebe o sinal refletido $f_0 = \pm f_d$
 - Fornece sinal de saída com frequência f_d proporcional à v velocidade do alvo
- **Filtro passa-faixa**
 - Limites da faixa de passagem
 - Correspondentes às velocidades máxima e mínima do alvo
 - Elimina respostas de reflexões em alvos parados
 - Resposta ao vazamento do sinal transmitido

$f_d = 0 \rightarrow$ *sinal de saída DC*
- **Circulador** – alta isolamento, par minimizar vazamento de sinal

Radar Doppler

- Exemplo de radar de trânsito, para medir velocidade dos carros

Câmara fotográfica
acoplada ao radar



Antena com radome

Alvo móvel

