

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
 - 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
 - RF – 30 KHz a 300 MHz
 - Micro-ondas – 300 MHz a 300 GHz
 - Infravermelho
 - Frequências ópticas
- **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
- Quanto à localização dos componentes do sistema
 - Sistemas terrestres
 - Sistemas usando satélites

Sistemas de Comunicação

- **Classificação quanto à posição do usuário**

Sistemas ponto-a-ponto

Exemplo: Rádio Enlace de Micro-ondas



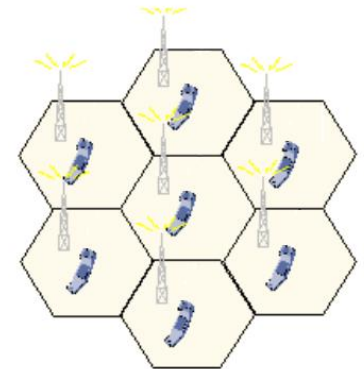
Sistemas ponto-multiponto

Exemplo: Rádio difusão de sinais de Rádio e TV



Sistemas multiponto-multiponto

Exemplo: Telefonia celular

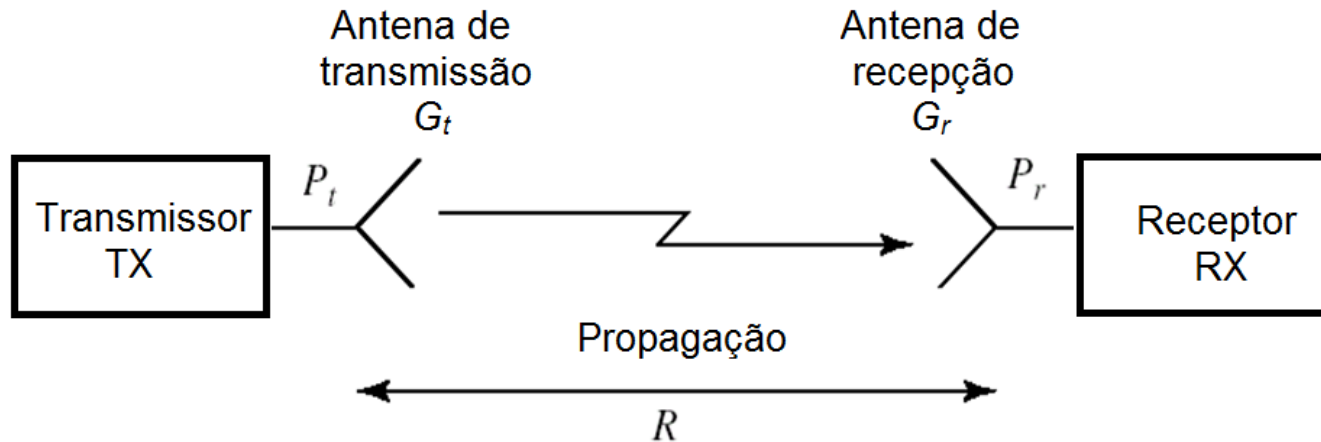


Sistemas de Comunicação

- **Classificação quanto à direção da comunicação**
 - **Sistemas simplex**
 - Comunicação unidirecional
 - Exemplos: Radiodifusão de sinais de rádio e TV
 - **Sistemas half-duplex**
 - Comunicação bidirecional não-simultânea
 - Exemplo: Walk-Talk
 - Mesma frequência (canal) de TX e RX
 - **Sistemas full-duplex**
 - Comunicação bidirecional simultânea
 - Exemplos: telefonia móvel, comunicação via-satélite
 - Frequências diferentes de TX e RX

Sistemas de Comunicação



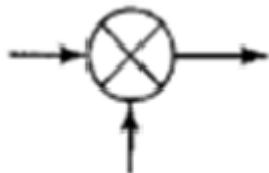
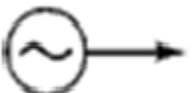
- **Modelo do sistema de comunicação sem fio**



- **Componentes do sistema**

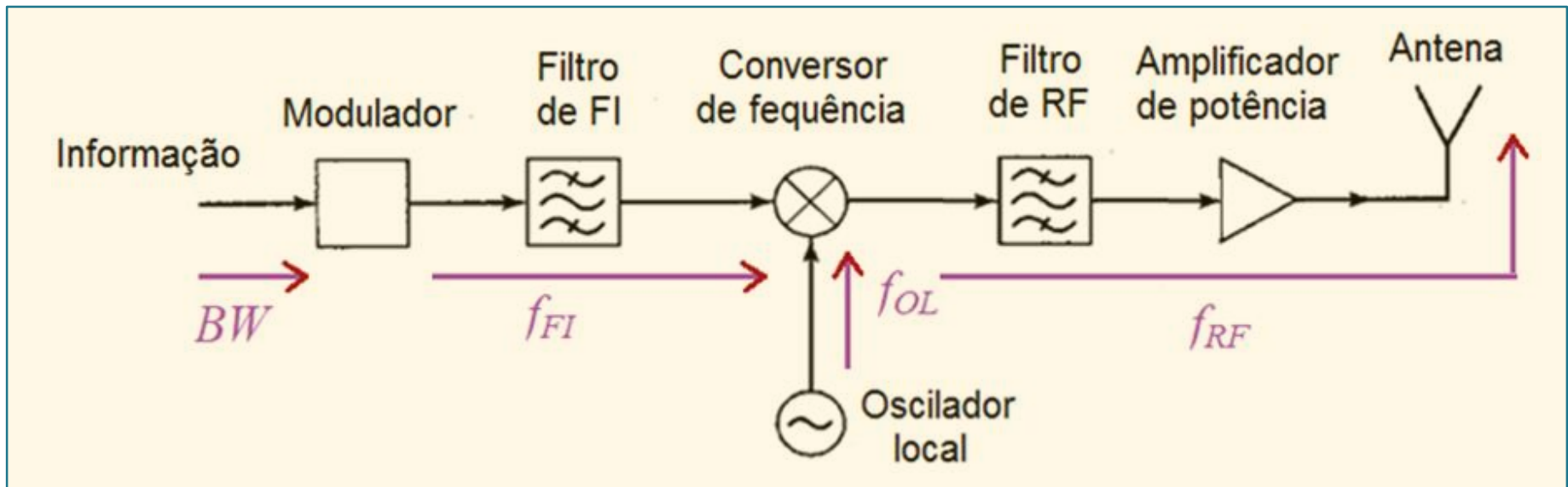
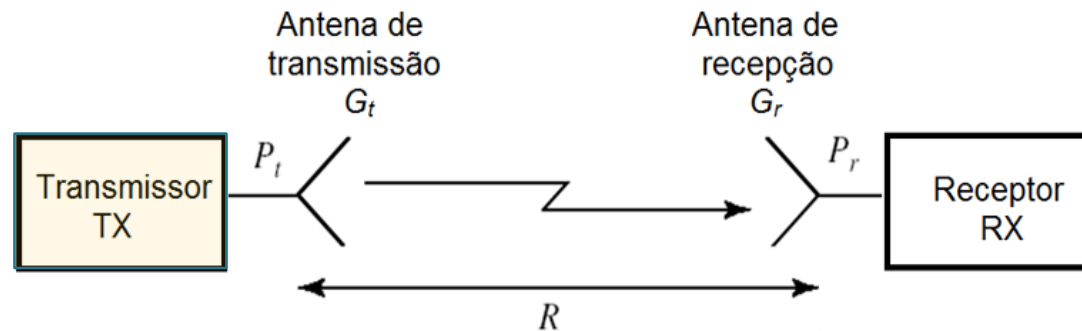
- Transmissor
- Receptor
- Antenas de transmissão e de recepção
- Meio de propagação

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

Símbolo do componente	Nome do componente	Elementos do sistema
	Antena	<ul style="list-style-type: none">- Antena de transmissão- Antena de recepção
	Amplificador	<ul style="list-style-type: none">- Amplificador de baixo ruído- Amplificador de potência
	Conversor de frequência	<ul style="list-style-type: none">- “para cima” → up converter- “para baixo” → down converter
	Oscilador	<ul style="list-style-type: none">- Oscilador local do transmissor e do receptor

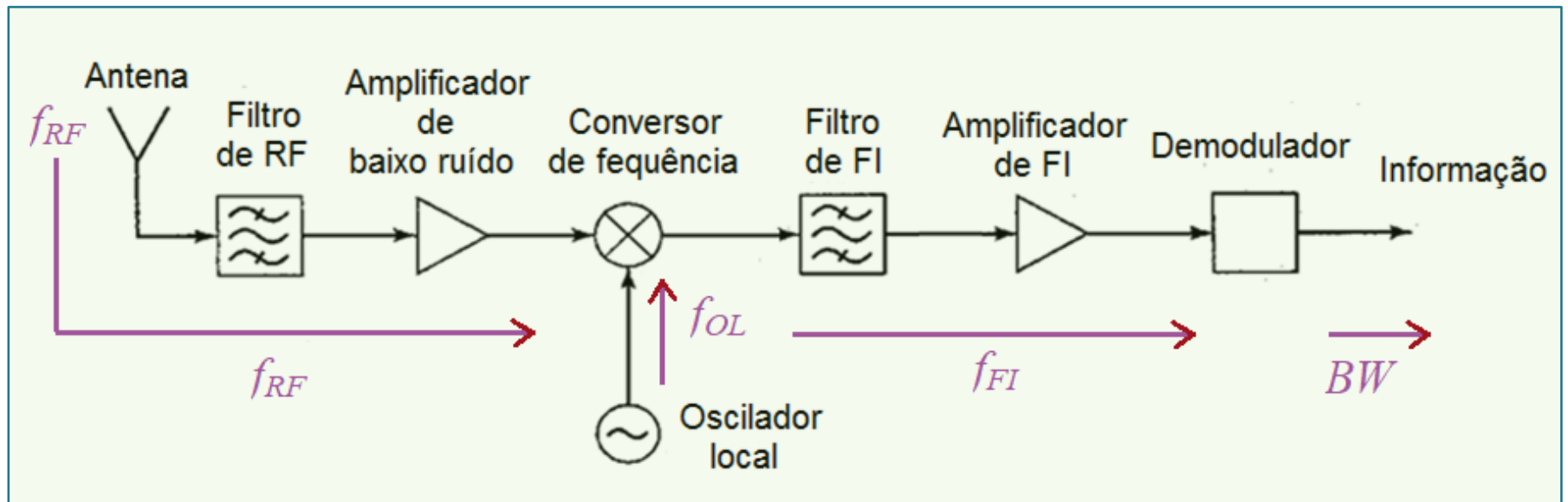
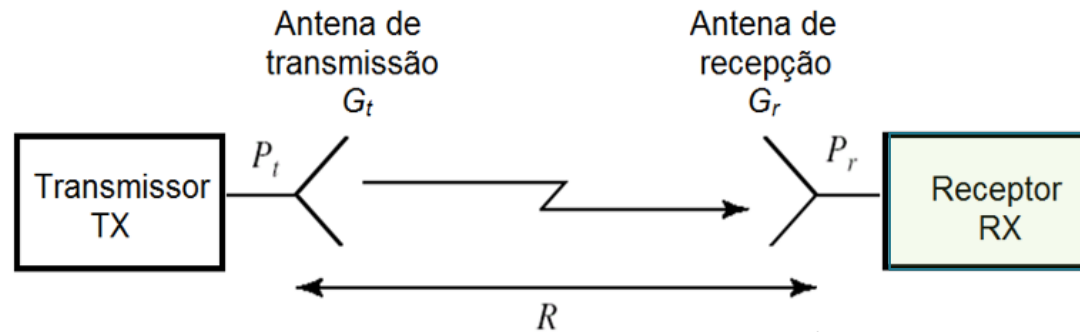
Sistema de rádio

- Transmissor TX - exemplo

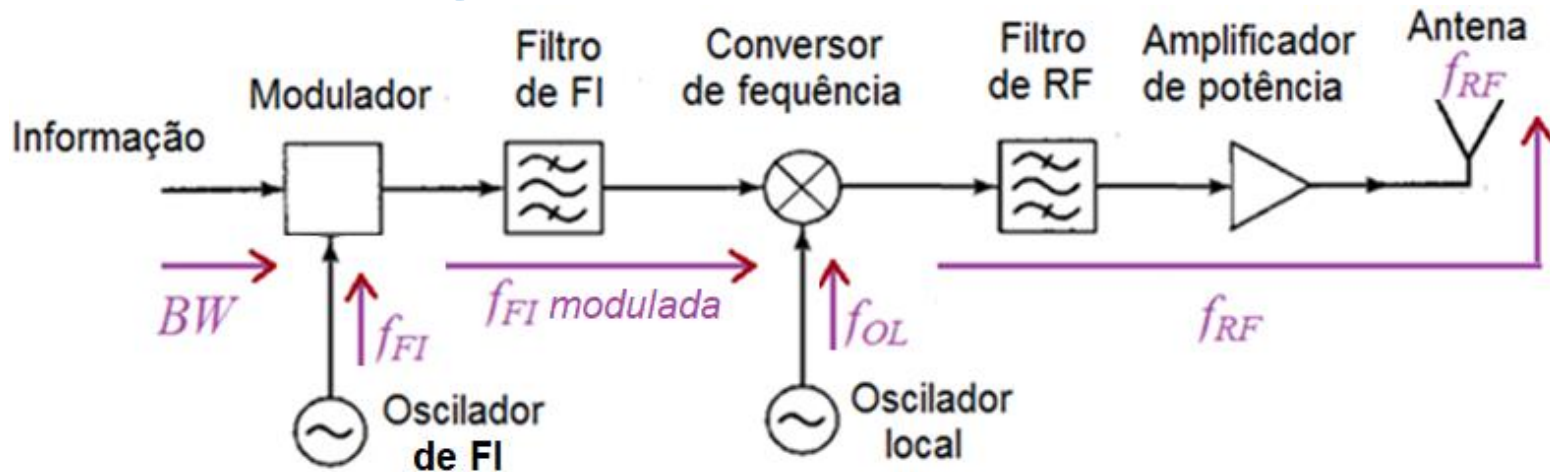


Sistema de rádio

- Receptor RX- exemplo



Terminologia – frequências do sistema



Informação - BW

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

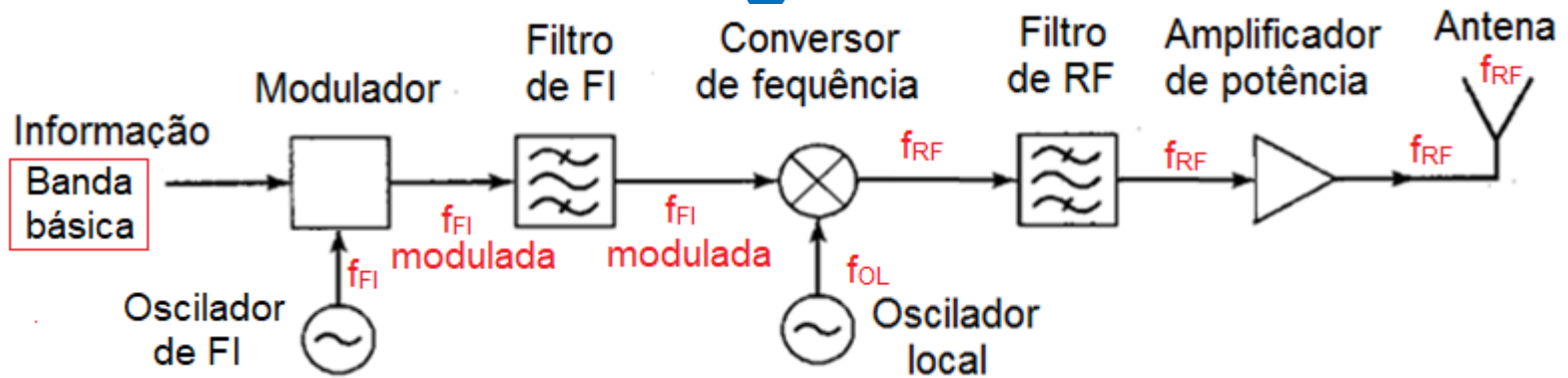
Frequência de FI

- Frequência intermediária modulada pela informação.

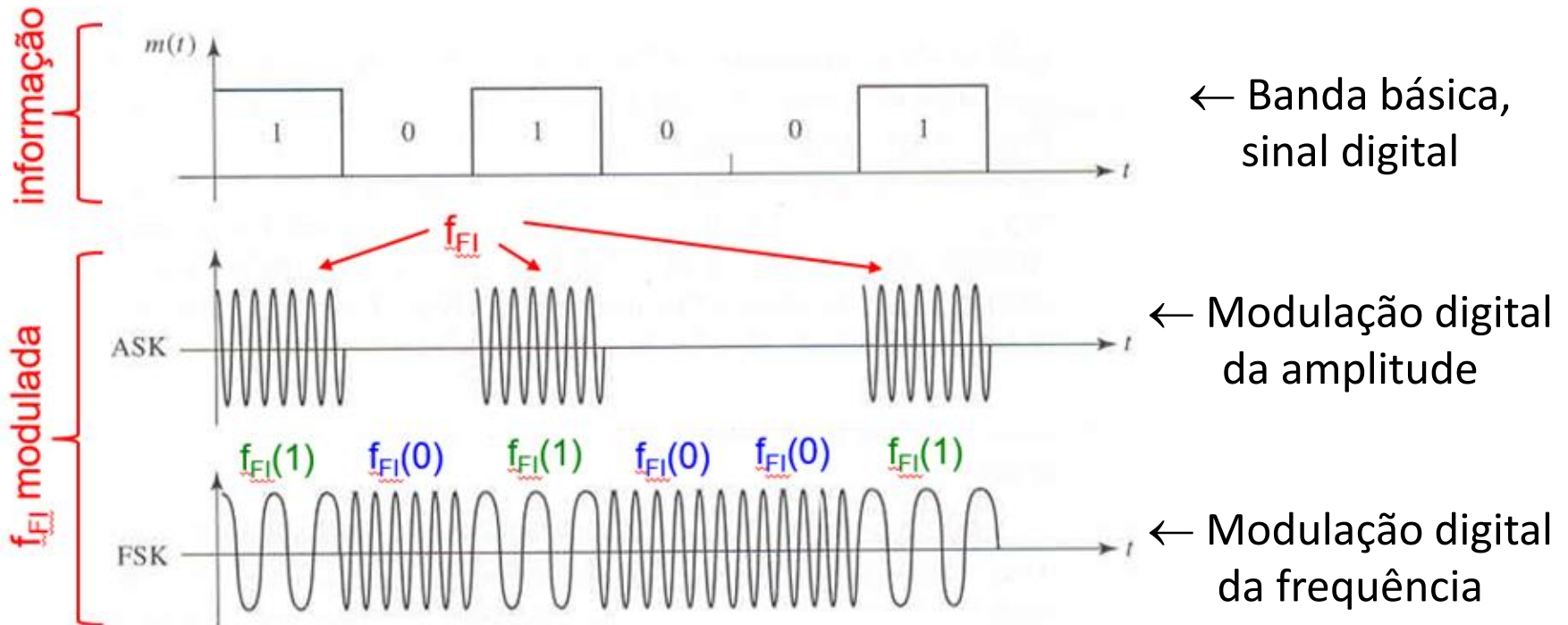
$$BW < f_{FI} < f_{RF}$$

- Sigla FI – *Frequência Intermediária*.

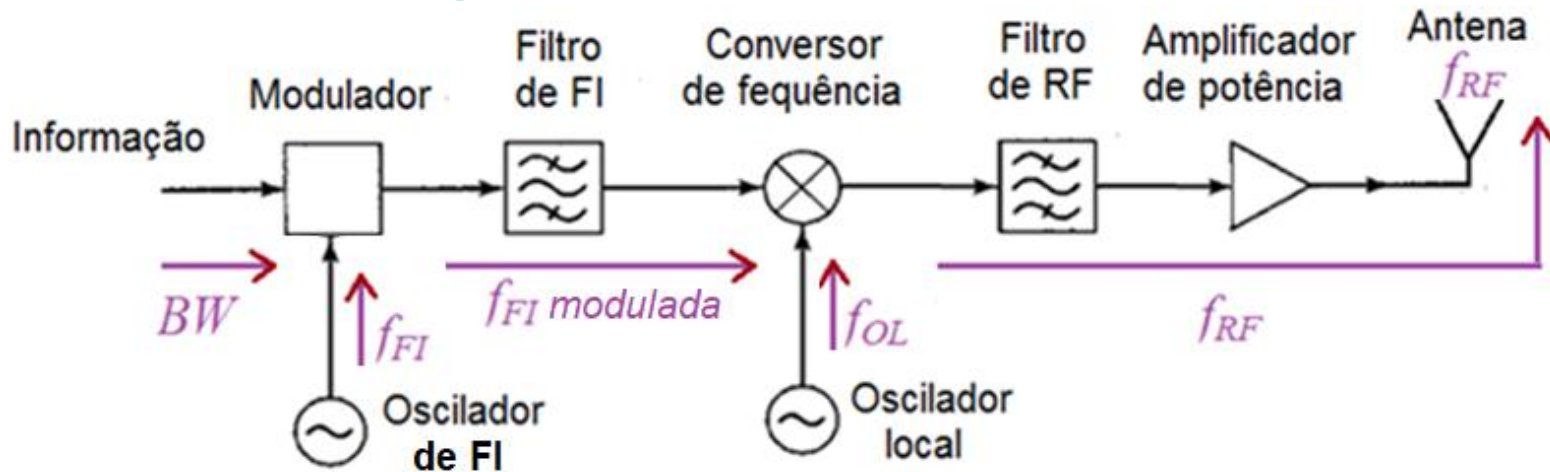
Sinais ao longo do sistema



- Exemplo: banda básica digital e frequência de FI modulada em ASK e FSK



Terminologia – frequências do sistema



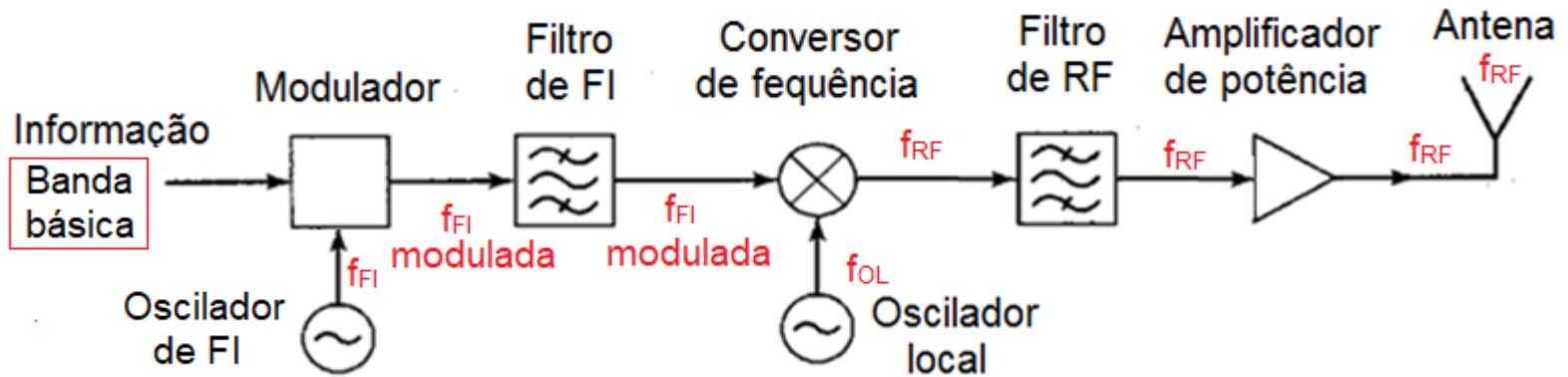
Frequência de OL

- Frequência do oscilador local que é usado no transmissor e no receptor.
- Sigla OL – Oscilador Local.

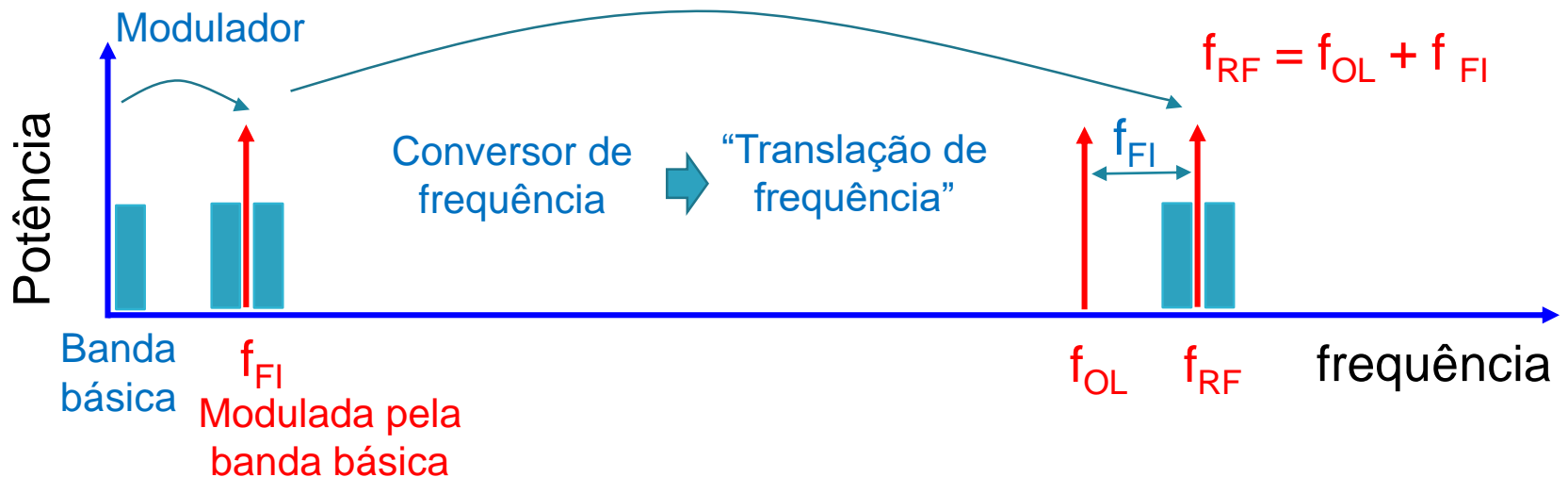
Frequência de RF

- Frequência da portadora que é recebida/transmitida pelo sistema
- Transporta a informação entre Transmissor e Receptor.
- Sigla RF – *Radio Frequência*.

Sinais ao longo do sistema



- Exemplo de espectro de frequência

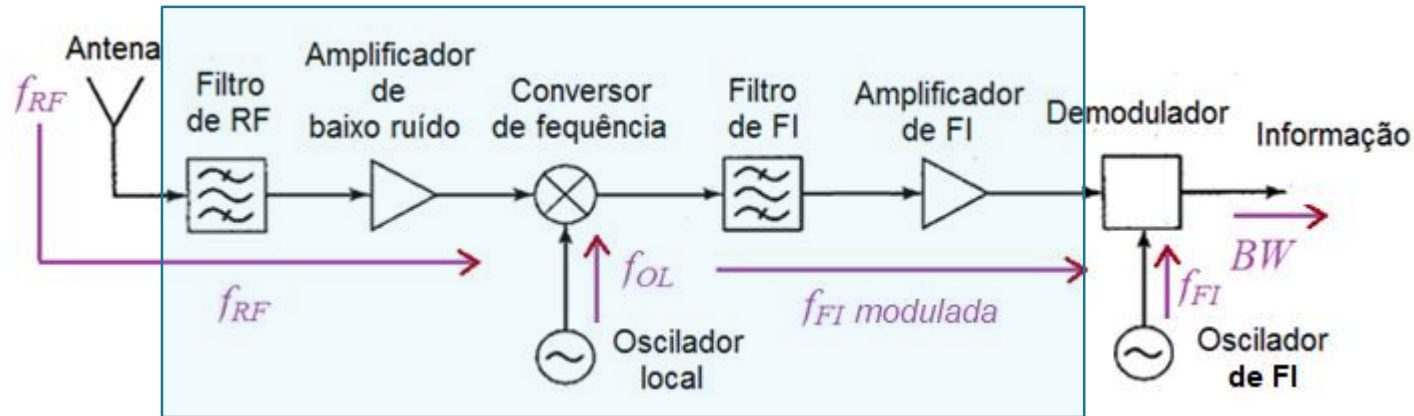


$$f_{RF} = f_{OL} + f_{FI}$$

$$\text{Banda básica} < f_{FI} < f_{RF}$$

Portadora → Transporta a informação

Simulação do Receptor



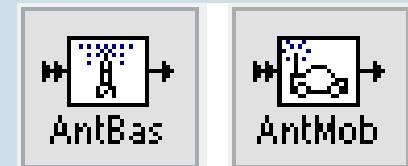
Componente

Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

Antena de recepção – Antena RX

Menu → Antennas & Propagation

- Recebe o sinal de RF



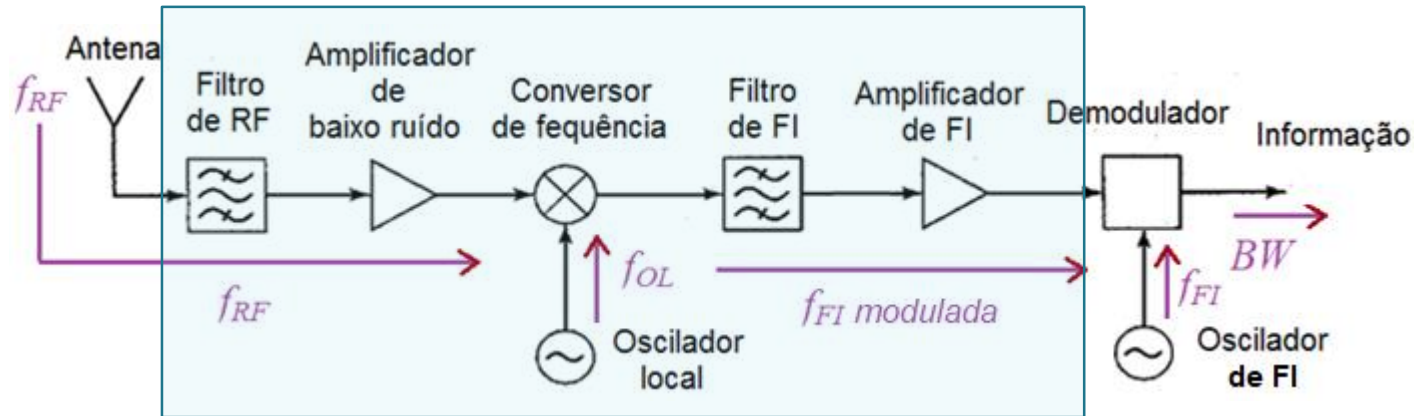
Filtro de RF

Menu → Filters Bandpass

- Filtro passa-faixa, que filtra a faixa de RF
- Elimina sinais fora da banda captados pela antena



Simulação do Receptor



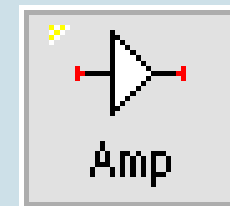
Componente

Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

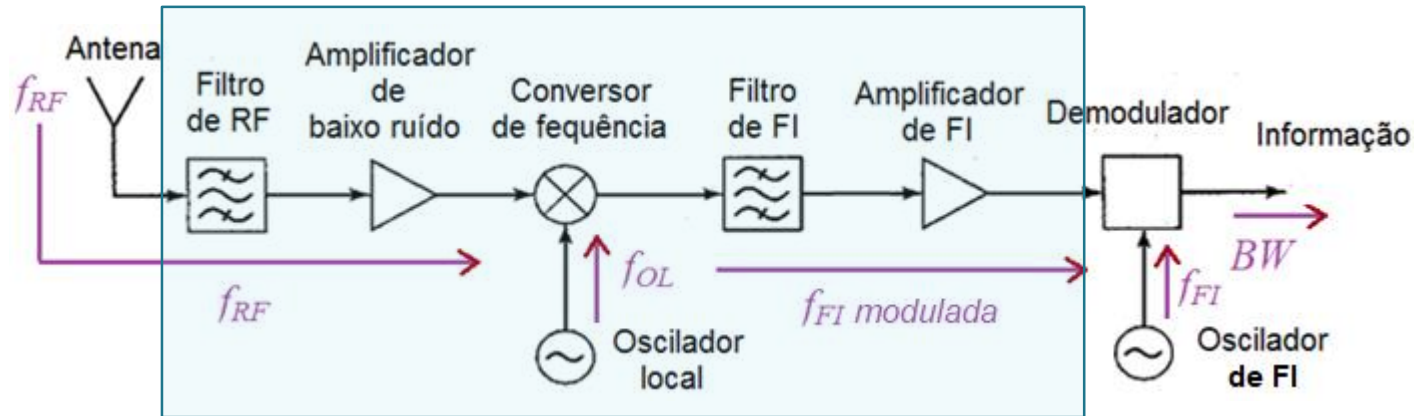
Amplificador de Baixo Ruído - LNA

- Amplificador de recepção
- Amplifica o sinal recebido pela antena RX
- Figura de Ruído reduzida
- Ganho elevado
- Sigla → LNA – *Low Noise Amplifier*.

Menu → Systems-Amps & Mixers



Simulação do Receptor



Componente

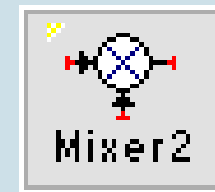
Conversor de frequência – *downconverter*

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

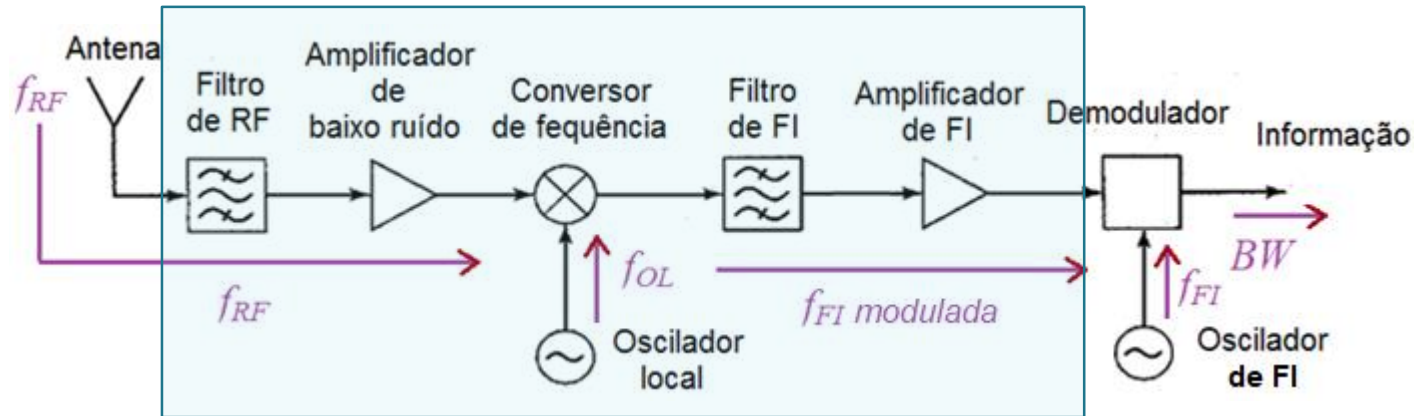
$$f_{FI} = f_{RF} - f_{OL} \text{ ou } f_{FI} = f_{OL} - f_{RF}$$



Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

Menu → Systems-Amps & Mixers

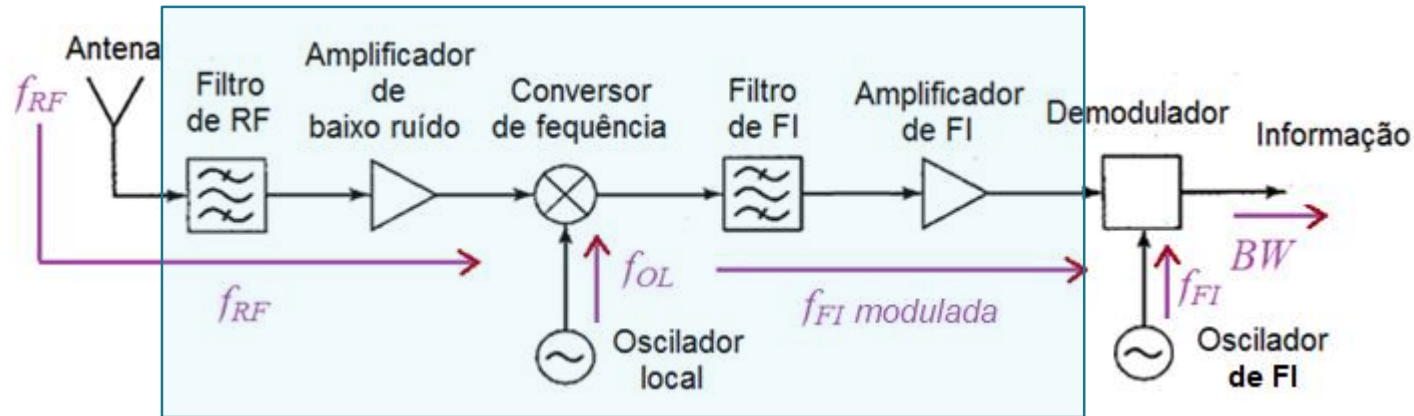


Simulação do Receptor



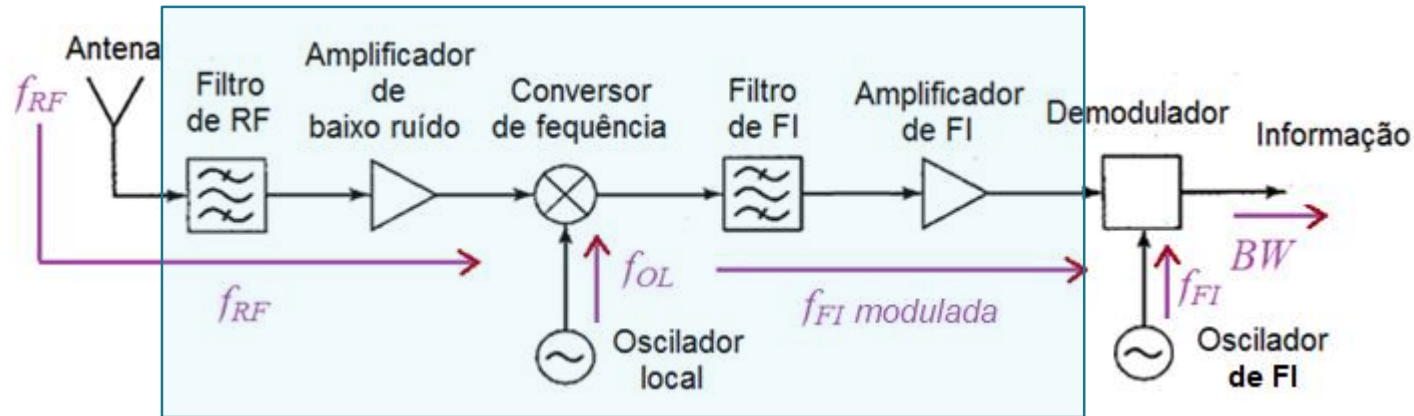
Componente	Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático
Oscilador Local <ul style="list-style-type: none"> Gera a frequência f_{OL} 	Menu → Sources-Freq. Domain 
Filtro de FI <ul style="list-style-type: none"> Filtro passa-faixa, filtra a faixa de FI Elimina sinais fora da banda de FI 	Menu → Filters Bandpass 

Simulação do Receptor



Componente	Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático
Amplificador de FI <ul style="list-style-type: none"> Amplifica o sinal de FI 	Menu → Systems-Amps & Mixers
Oscilador de FI <ul style="list-style-type: none"> Gera a frequência de FI 	Menu → Sources-Freq. Domain

Simulação do Receptor



Componente

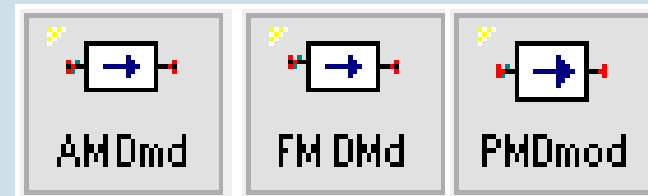
Demodulador

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

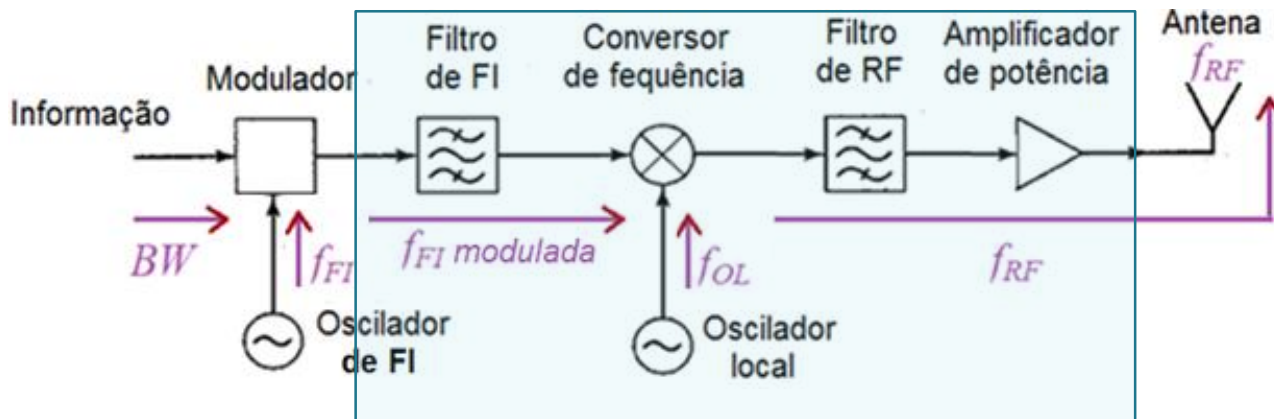
Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

Menu

- Systems-Mod/Demod



Simulação do Transmissor



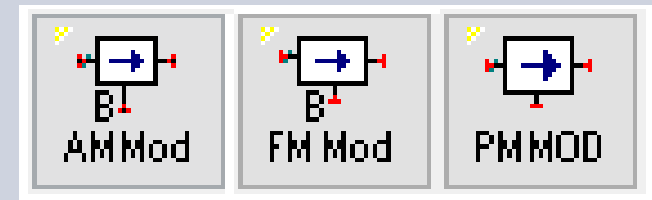
Componente

Modulador

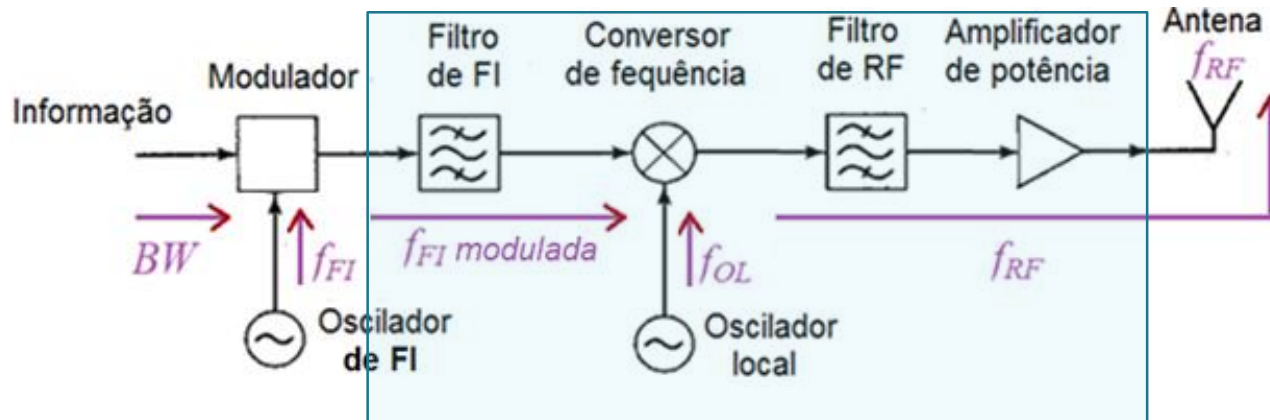
- Circuito que modula o sinal de FI com a informação
- Modulador de amplitude, de frequência ou de fase.



Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

Menu → Systems-Mod/Demod

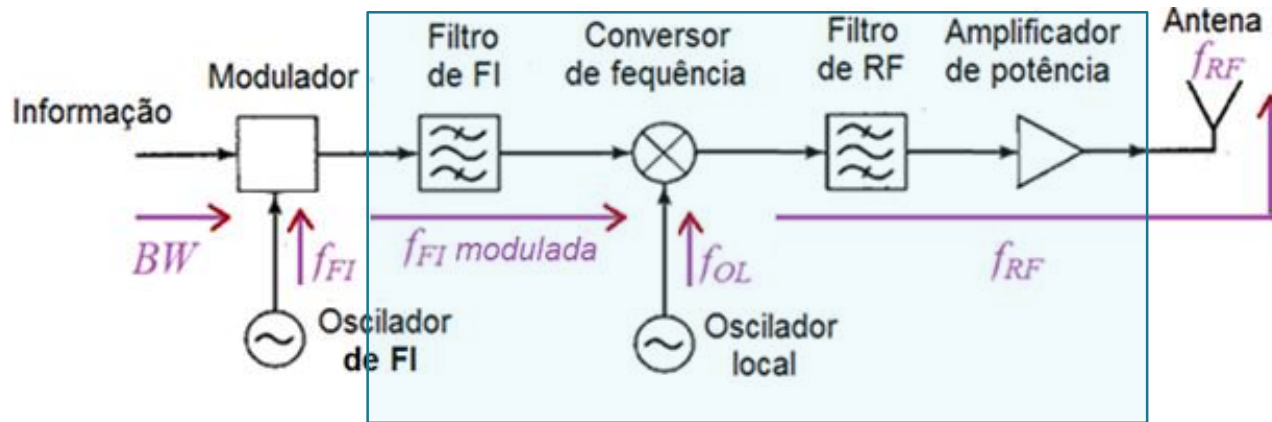


Simulação do Transmissor



Componente	Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático
<p>Oscilador de FI</p> <ul style="list-style-type: none"> Gera a frequência de FI 	<p>Menu → Sources-Freq. Domain</p> 
<p>Filtro de FI</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtro passa-faixa, filtra a faixa de FI Elimina sinais fora da banda de FI 	<p>Menu → Filters Bandpass</p> 

Simulação do Transmissor



Componente

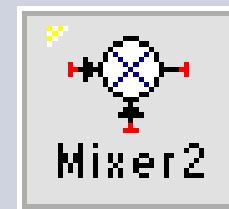
Conversor de frequência – *upconverter*

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

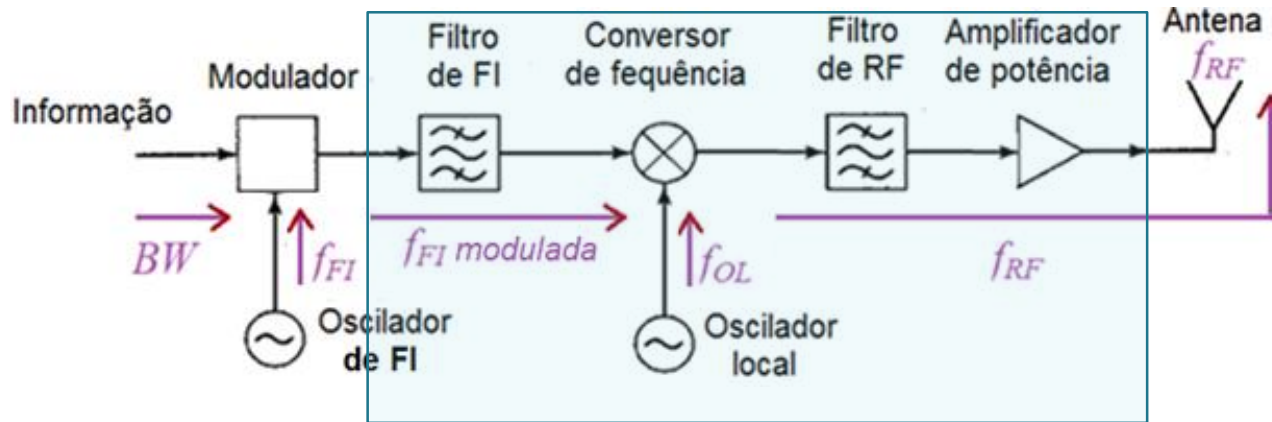
$$f_{RF} = f_{OL} + f_{FI} \quad \text{ou} \quad f_{RF} = f_{OL} - f_{FI}$$



Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

Menu → Systems-Amps & Mixers

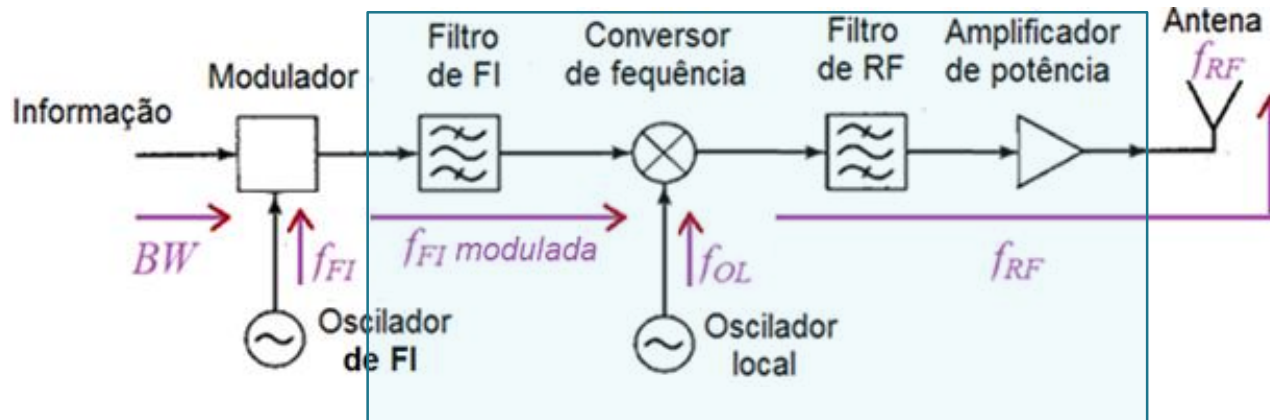


Simulação do Transmissor



Componente	Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático
<p>Oscilador Local</p> <ul style="list-style-type: none"> Gera a frequência f_{OL} 	<p>Menu → Sources-Freq. Domain</p> 
<p>Filtro de RF</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtro passa-faixa, que filtra a faixa de RF Elimina sinais fora da banda de RF 	<p>Menu → Filters Bandpass</p> 

Simulação do Transmissor



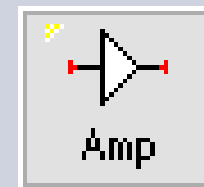
Componente

Modelo comportamental ADS – Janela de Esquemático

Amplificador de Potência

- Amplificador de transmissão
- Fornece sinal para antenaTX
- Potência de Saída elevada
- Linearidade especificada para o sistema
- Sigla → PA – *Power Amplifier*.

Menu → Systems-Amps & Mixers



Antena do transmissor – Antena TX

Menu → Antennas & Propagation

Arquiteturas de receptor de rádio

- **Receptor de conversão direta ou homódino**

- A frequência de RF é modulada diretamente pela informação
- Mesma frequência de LO e RF → frequência de FI é zero
- Não usa: amplificador, filtro e oscilador de FI → simples e de baixo custo
- Mas exige oscilador local de alta estabilidade, com $f_{RF} = f_{OL}$

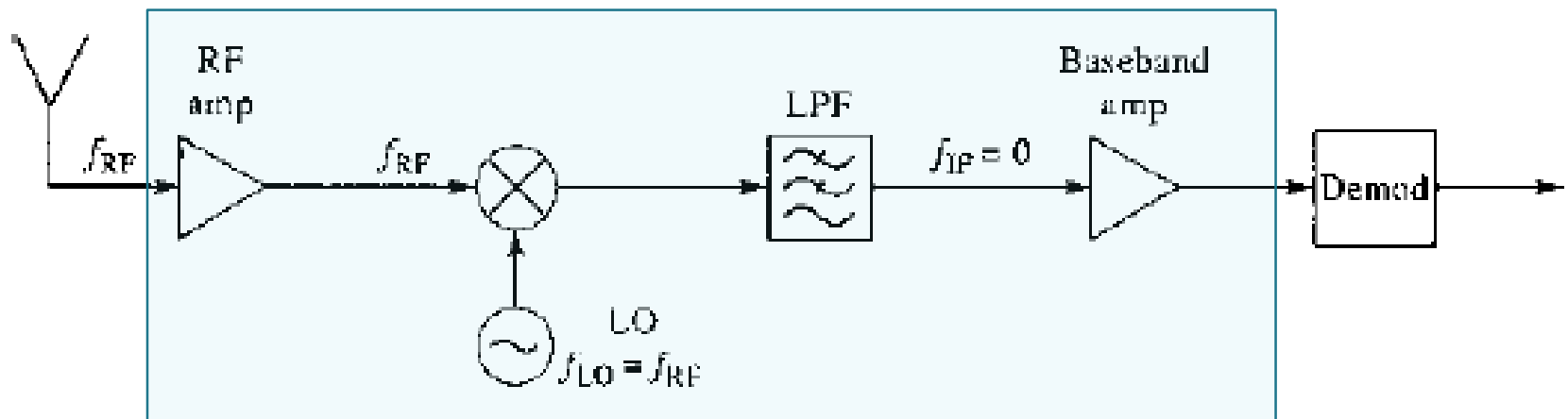


Figura 14.12 – Microwave Engineering, Pozar, M. D. , 4ª ed.

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

Receptor com uma única conversão de frequência

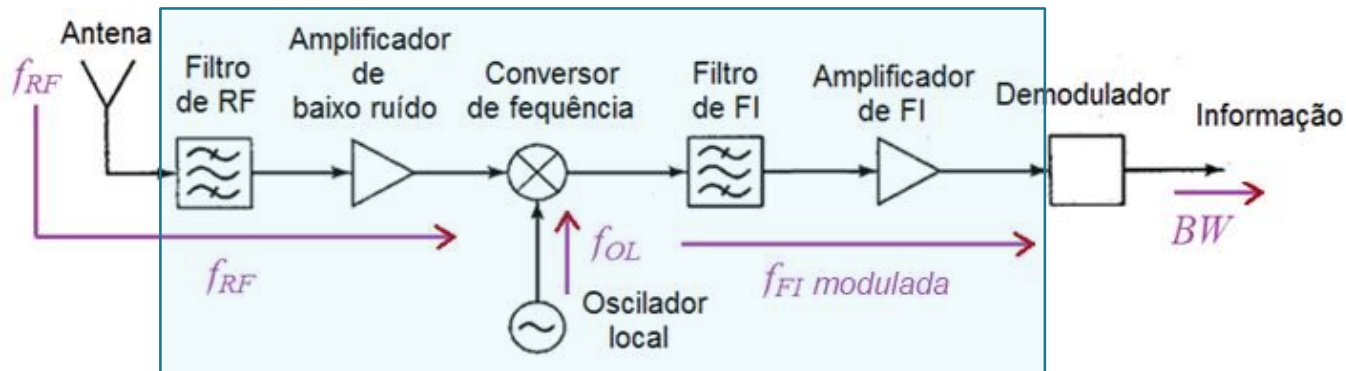


Figura 14.13 – Microwave Engineering, Pozar, M. D. , 4ª ed.

Arquiteturas de receptor de rádio

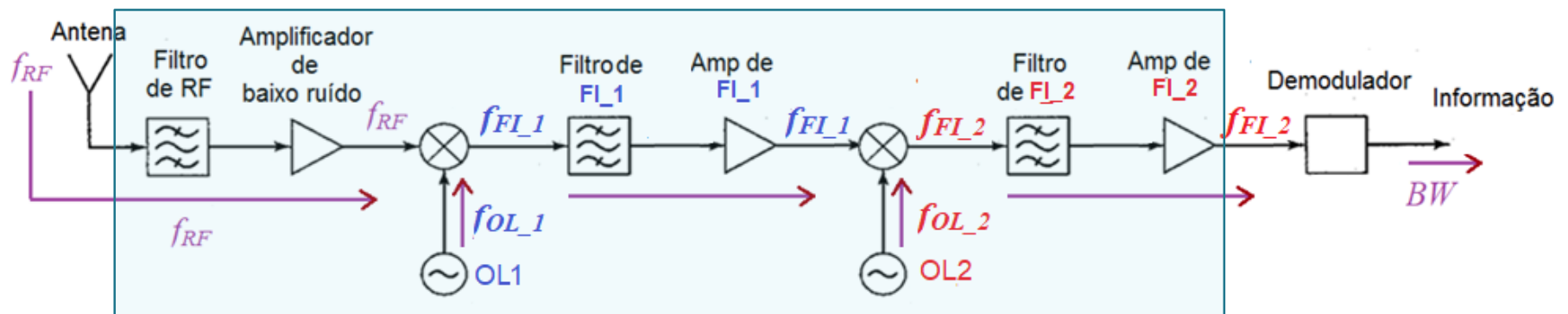
• Receptor super-heteródino

- 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 OL

→ Duas conversões de frequência → duas FIs → FI_1 e FI_2

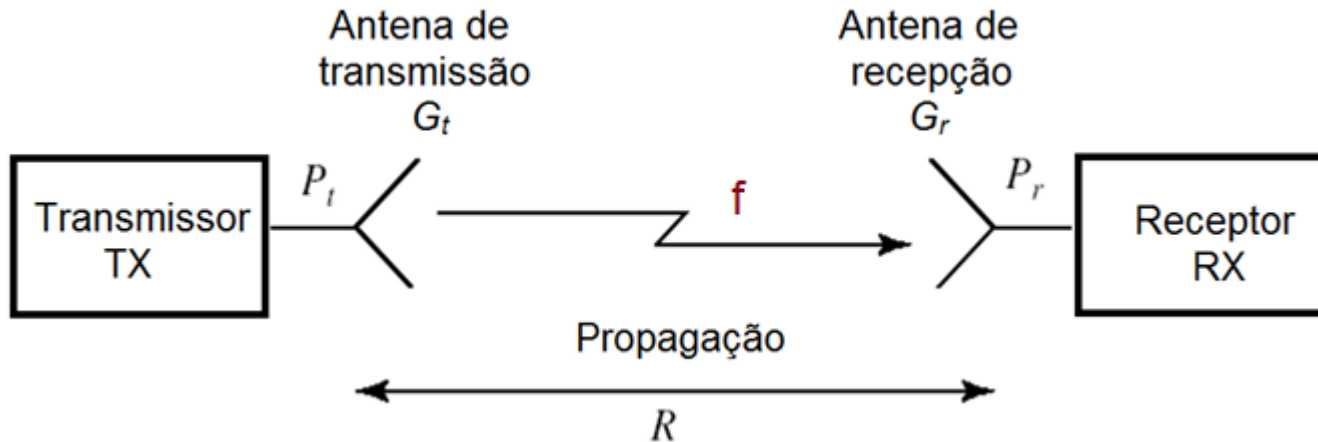
→ Dois osciladores locais, dois conversores de frequência, dois filtros de FI



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

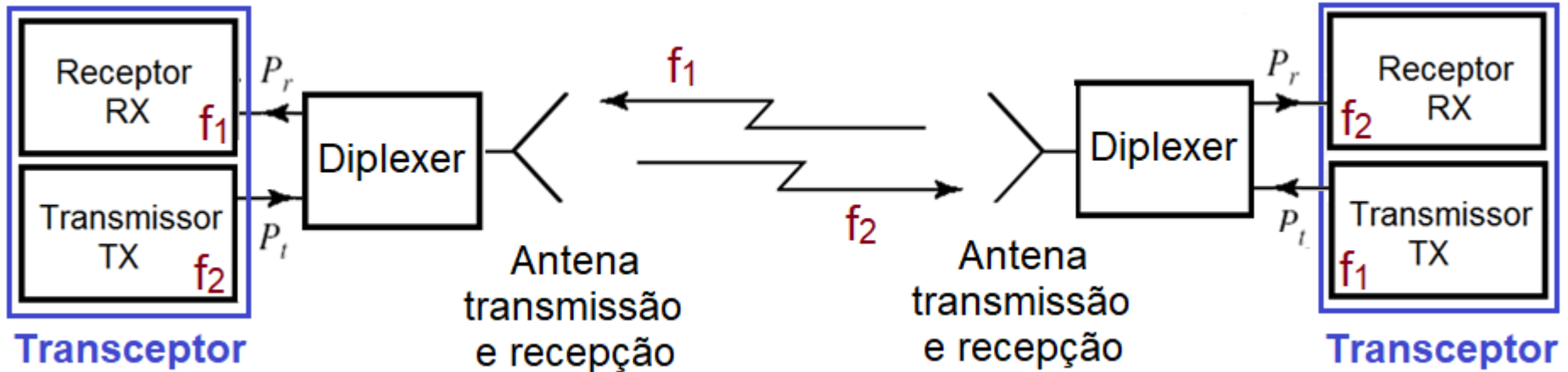
G_r Ganho da antena do receptor

R Distância entre o transmissor e o receptor

f Frequência do sinal transmitido

Sistemas de Comunicação

Considerando comunicação bidirecional



- Transceptor → conjunto “Receptor” e “Transmissor”
- Diplexer → filtros que separam sinais transmitido e recebido
 - Isola transmissor e receptor
 - Evita que a potência transmitida sature o receptor
 - Permite usar a mesma antena na transmissão e na recepção

Equação de Transmissão de Friis

Modelo de propagação de ondas EM usado

- 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

Condições de validade

- **Propagação no espaço livre**
 - Sem atenuação da atmosfera ou por chuva
 - Sem reflexão ou difração do sinal
- **Sistemas com linha de visada**
 - *Line-of-Sight* – LOS
 - Recepção direta do sinal transmitido
 - Não há obstáculos entre as antenas de RX e TX
 - Antena de recepção “vê” a antena de transmissão

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

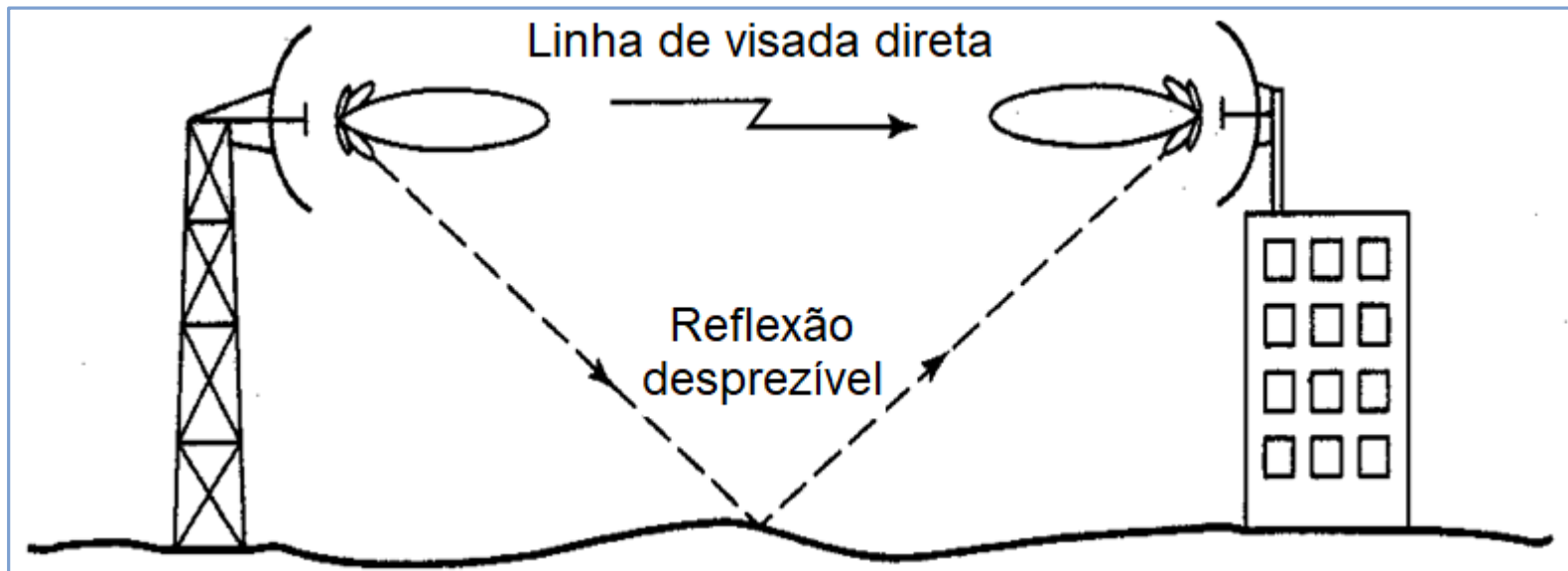
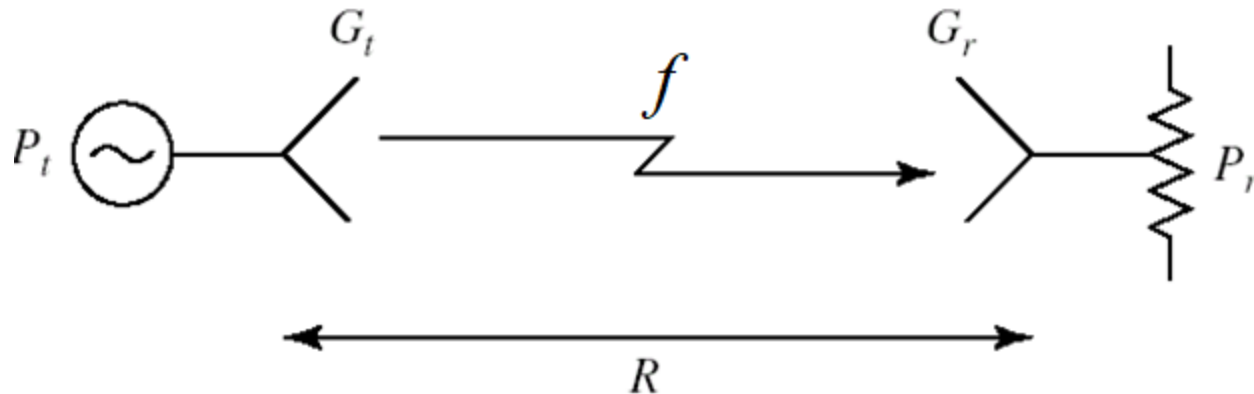


Figura 4.19(a), David. M. Pozar, Microwave and RF Design of Wireless Systems

Equação de Transmissão de Friis

- Seja o sistema



Onde

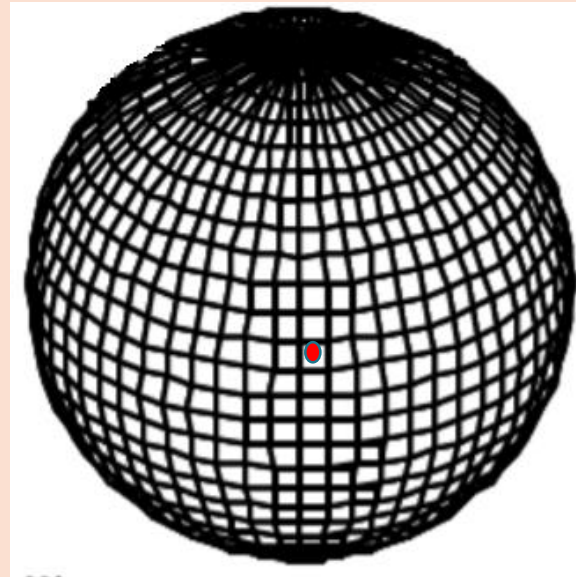
- P_t Potência do transmissor
- P_r Potência recebida no receptor
- R Distância entre o transmissor e o receptor
- f Frequência do sinal transmitido
- G_t Ganho da antena do transmissor
- G_r Ganho da antena do receptor

Equação de Transmissão de Friis

DIRETIVIDADE (D) da antena

- **Antena isotrópica**
 - Antena hipotética \Rightarrow não existe!
 - Irradia igualmente em todas as direções
 - Diretividade: $D = 1$ ou $D(dB) = 0 \text{ dB}$

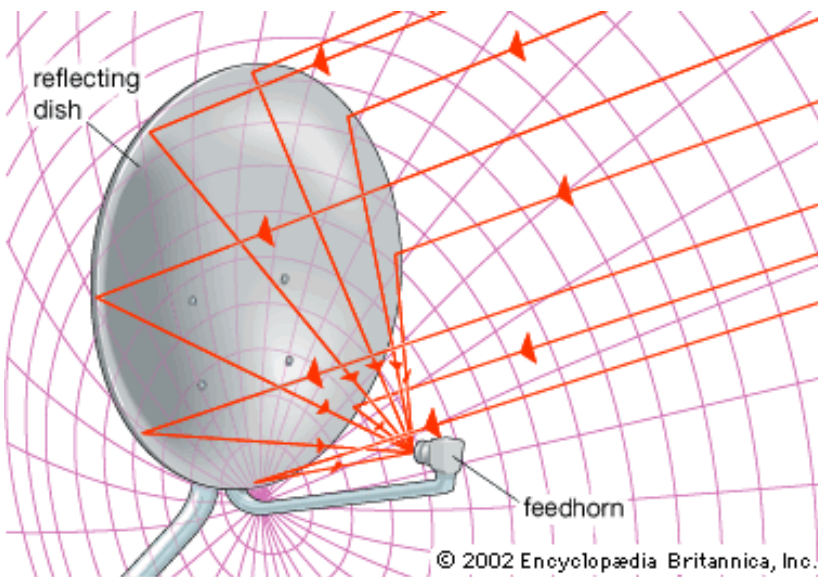
- Diagrama de radiação de uma antena isotópica
 - Esfera
 - Alimentação no ponto central



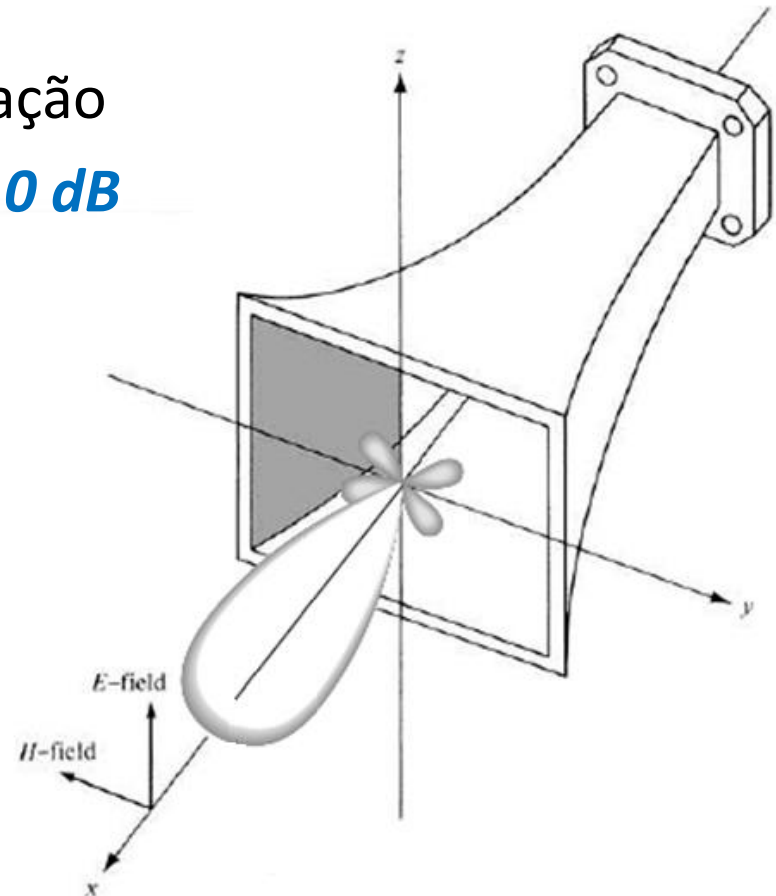
Equação de Transmissão de Friis

DIRETIVIDADE (D) da antena

- Antenas reais
- Direções preferenciais de radiação
- Diretividade: $D > 1$ ou $D(\text{dB}) > 0 \text{ dB}$
- Exemplos



Antena parabólica offset



Antena corneta

Equação de Transmissão de Friis

DIRETIVIDADE da antena

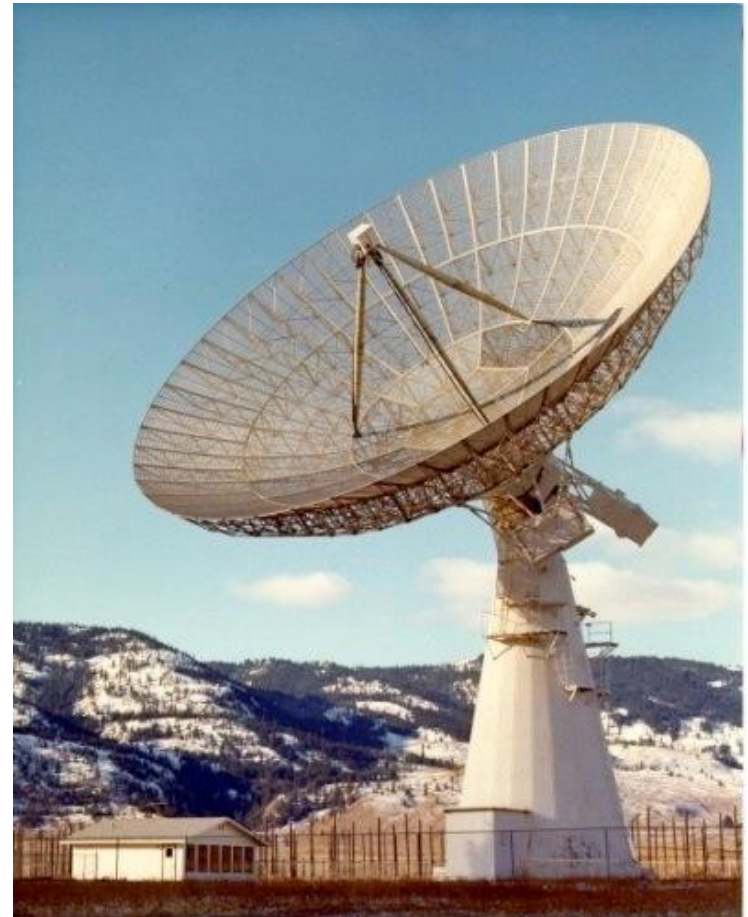
- **Diretividade**
- Quanto vezes a mais a antena direciona a potência em uma dada direção relativamente à antena isotrópica
- Depende da geometria da antena
- **Exemplo**
 - Antena com $D_{MAX}(dB) = 20 \text{ dB}$ ou $D_{MAX} = 100$
 - Na direção de máxima radiação
 - Irradia 100 vezes mais potência
 - que uma antena isotrópica
 - alimentada com a mesma potência P_t

Equação de Transmissão de Friis

Exemplos de antenas de micro-ondas



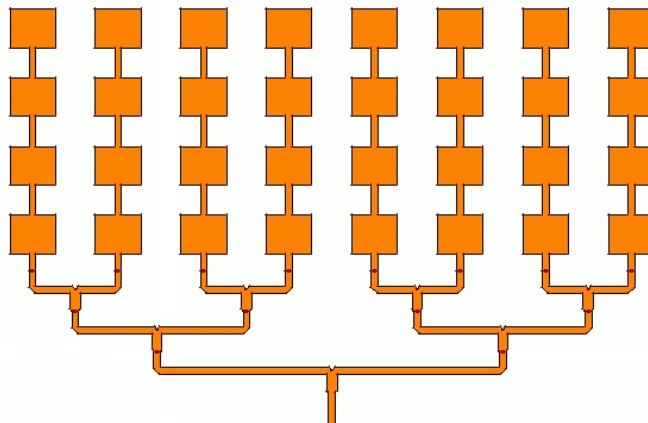
Antenas corneta



Antena parabólica



Antena patch



Arranjo de antenas patch

Equação de Transmissão de Friis

GANHO da antena

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

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

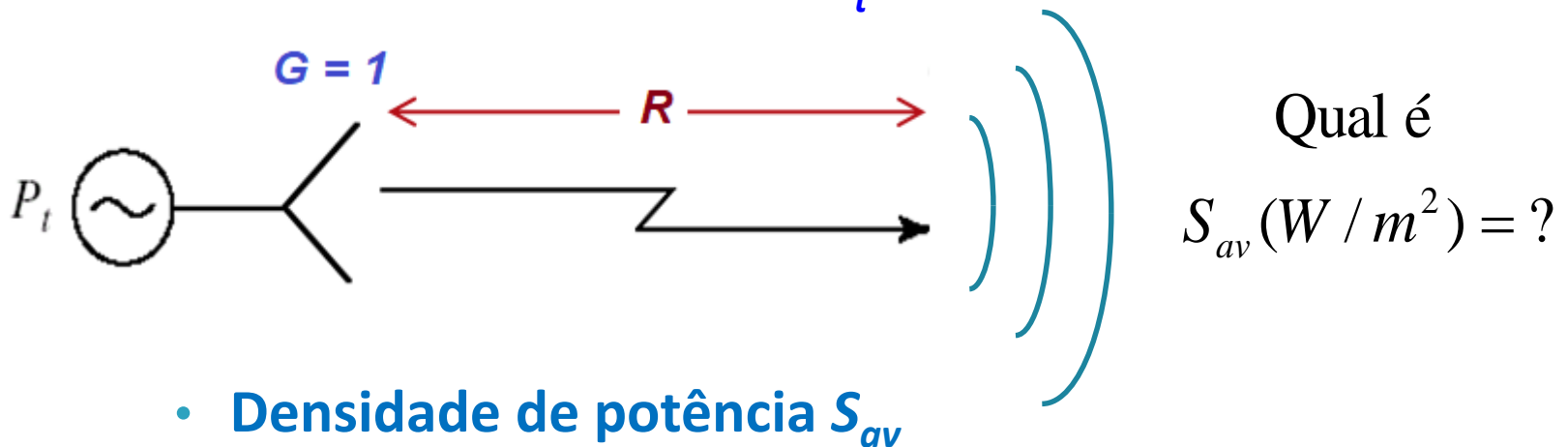
- **G** → Ganho
- **D** → Diretividade
- **e_{rad}** → Eficiência de radiação
- Eficiência de radiação
 - Quanto maiores as perdas,
 - Menor e_{rad} → menor G

Equação de Transmissão de Friis

- Consideremos
 - Antena isotrópica, sem perdas

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

- Potência transmitida P_t

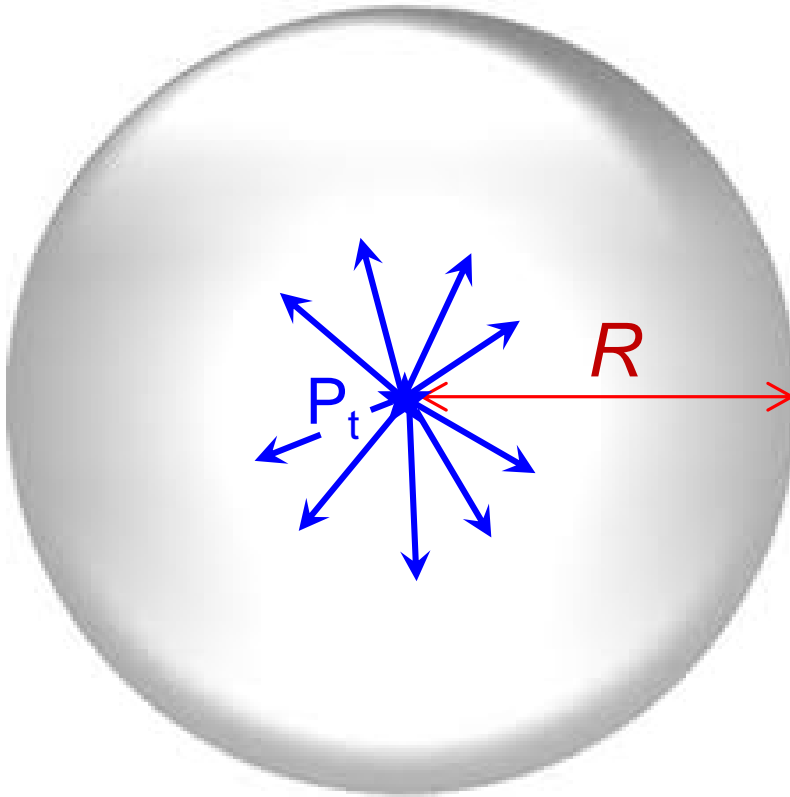


- Densidade de potência S_{av}
 - Em qualquer ponto
 - Que diste R da antena

Equação de Transmissão de Friis

- **Densidade de potência**

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



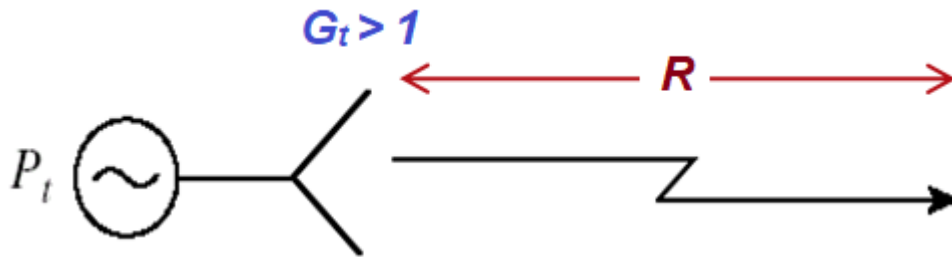
Área da esfera de raio R

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

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

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 $G_t = 1$
Em qualquer direção

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

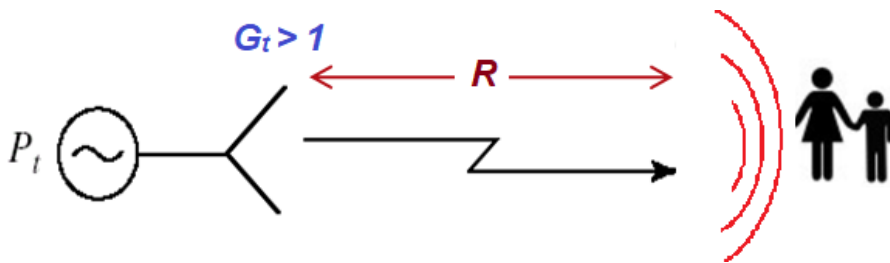
Antena real $G_t > 1$
Na direção de máximo ganho

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

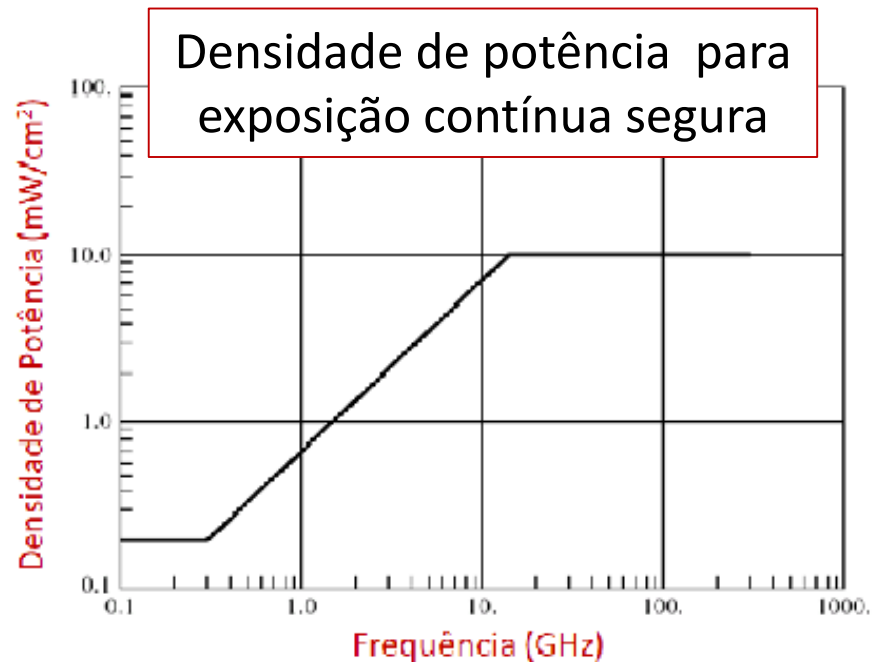
Equação de Transmissão de Friis

- Densidade de potência

- Permite verificar se os níveis de radiação a que uma pessoa está exposta é seguro de acordo com regras internacionais.
- Densidade de potência à distância R da antena



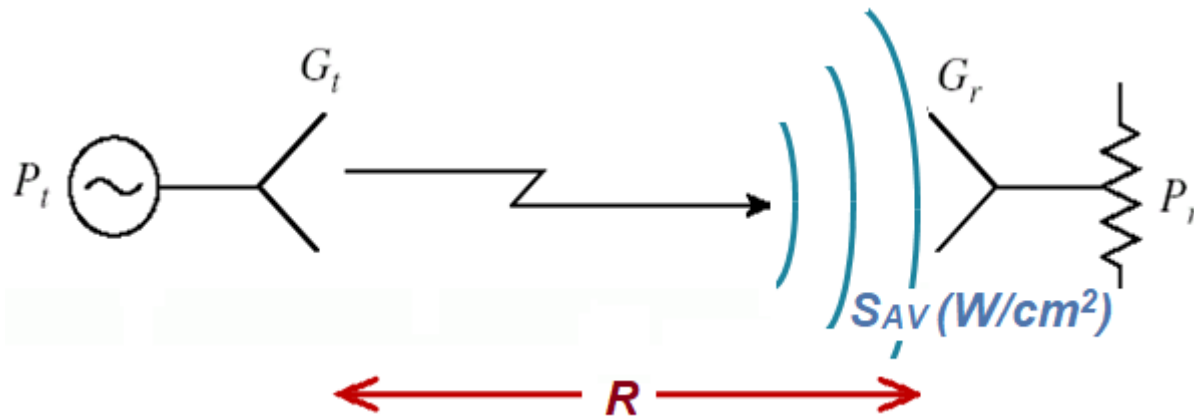
$$S_{av} = \frac{G_t \cdot P_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (W / m^2)$$



Equação de Transmissão de Friis

- Antena de recepção real

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



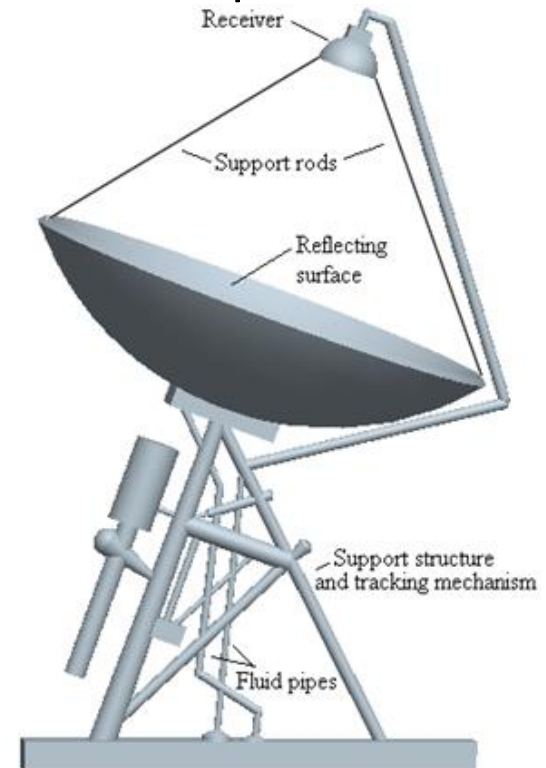
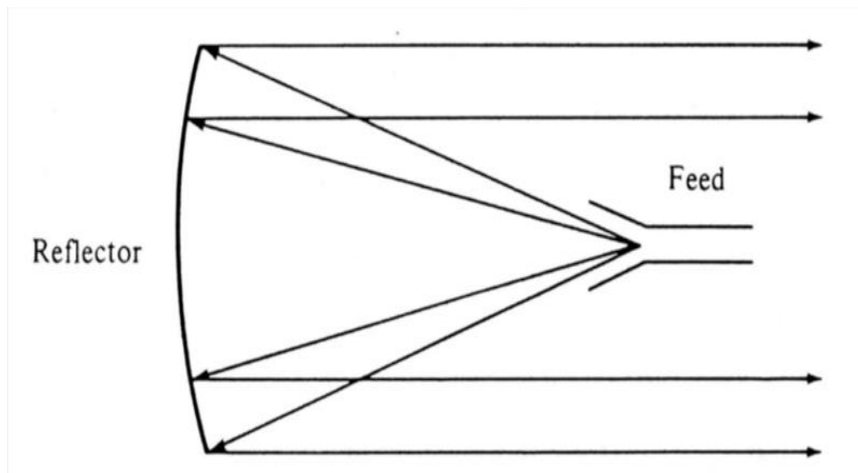
- Sendo A_e a área efetiva da antena de recepção que capta a densidade de potência que atinge antena

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

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

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

- Potência recebida – P_r

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

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

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, a potência recebida

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

Equação de Transmissão de Friis

- Equação de Transmissão de Friis

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

- Equação de Transmissão de Friis em decibéis → dBm

- Para potência em mW

$$P_r(dBm) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_r(mW)}{1 mW} \right)$$

$$P_r(dBm) = 10 \cdot \log \left(\frac{G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi \cdot R)^2} \cdot \frac{P_t(mW)}{1 mW} \right)$$

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

Equação de Transmissão de Friis

- Equação de Transmissão de Friis

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

- Equação de Transmissão de Friis em decibéis → **dBW**

- Para potência em W

$$P_r(dBW) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_r(W)}{1 W} \right)$$

$$P_r(dBW) = 10 \cdot \log \left(\frac{G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi \cdot R)^2} \cdot \frac{P_t(W)}{1 W} \right)$$

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

Equação de Transmissão de Friis

- Equação de Transmissão de Friis

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

- Equação de Transmissão de Friis em decibéis

$$P_r(dBm) = G_r(dB) + G_t(dB) + P_t(dBm) - \underbrace{10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right)^2}_{\text{Perda de espaço livre ou Perda de percurso ou Path loss}}$$

$$10 \cdot \log \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right)^2 \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ Perda de espaço livre ou} \\ \bullet \text{ Perda de percurso ou} \\ \bullet \text{ Path loss} \end{array} \right.$$

Devido ao espalhamento do sinal transmitido até alcançar o receptor

Equação de Transmissão de Friis

• Atenuação do sinal

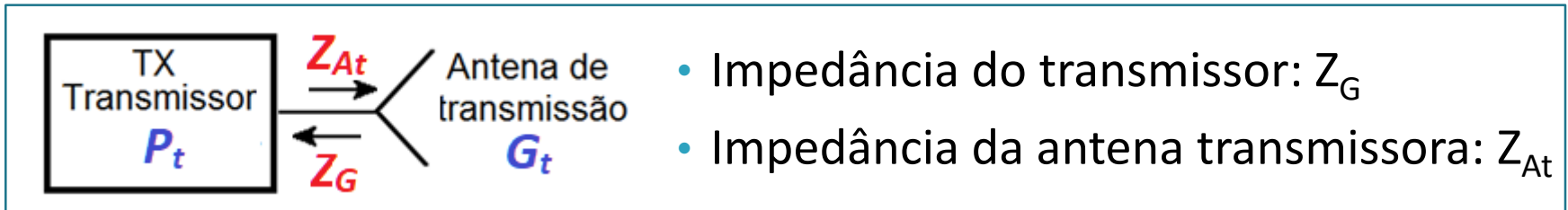
- *Outdoor* → atmosfera, chuva, neve
 - Depende da distância percorrida pelo sinal no meio com atenuação
 - Atenuação: “*Aten*” fornecida em dB (total) ou dB/km (por distância)
- *Indoor* → paredes, piso, teto, móveis
 - Depende da composição, forma e espessura dos objetos
 - Depende da frequência
 - 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 – perda por reflexão

- No lado do transmissor



- Coeficiente de reflexão entre transmissor e antena de transmissão

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

Idealmente



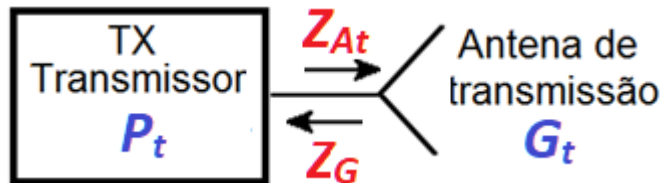
$$Z_{At} = Z_G^* \rightarrow \Gamma_t = 0$$

- Casamento de impedância entre o transmissor e a antena
- Máxima transferência de potência do transmissor para a antena
- Toda potência P_t do transmissor é radiada pela antena

Equação de Transmissão de Friis

- Descasamento de impedância – perda por reflexão

- No lado do transmissor



- Impedância do transmissor: Z_G
- Impedância da antena transmissora: Z_{At}

Na prática

- Casamento de impedância imperfeito, com $Z_{At} \approx Z_G^*$



$$Z_{At} \neq Z_G^* \rightarrow \Gamma_t \neq 0$$

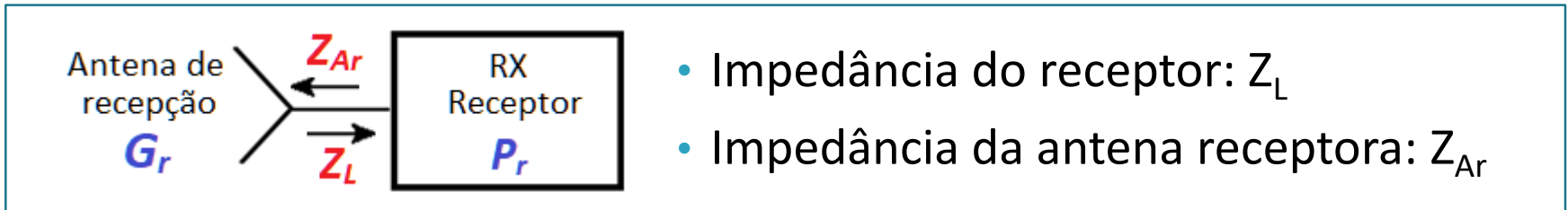
Perda por reflexão

- A antena de transmissão reflete parte da potência P_t do transmissor de volta para o mesmo
- A antena radia uma potência menor que P_t

Equação de Transmissão de Friis

- Descasamento de impedância – perda por reflexão

- No lado do Receptor



- Coeficiente de reflexão entre receptor e antena de recepção

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

Idealmente

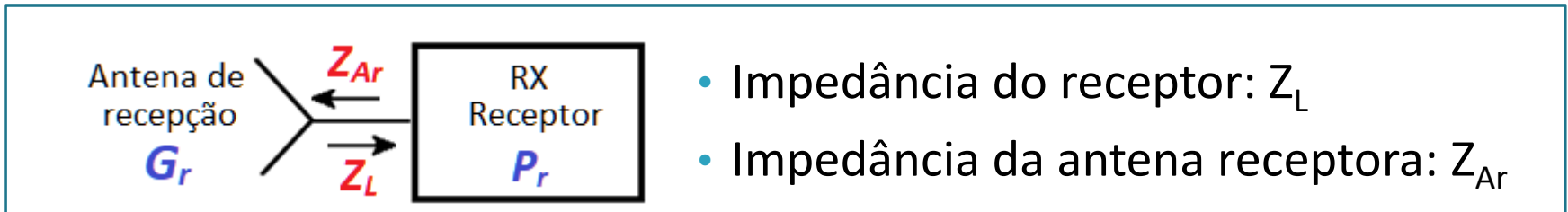


$$Z_{Ar} = Z_L^* \rightarrow \Gamma_r = 0$$

- Casamento de impedância entre o receptor e a antena
- Máxima transferência de potência recebida pela antena para o receptor
- Toda potência P_r recebida pela antena é entregue ao receptor

Equação de Transmissão de Friis

- Descasamento de impedância – perda por reflexão
 - No lado do receptor



Na prática

- Casamento de impedância imperfeito, com $Z_{AR} \approx Z_l^*$



$$Z_{Ar} \neq Z_L^* \rightarrow \Gamma_r \neq 0$$

Perda por reflexão

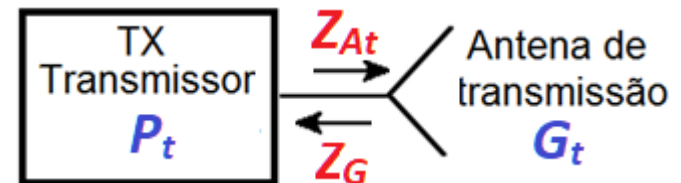
- O receptor reflete de volta para a antena parte da potência P_r que seria entregue pela antena
- O receptor recebe uma potência menor que P_r

Equação de Transmissão de Friis

- Descasamento de impedância – perda por reflexão

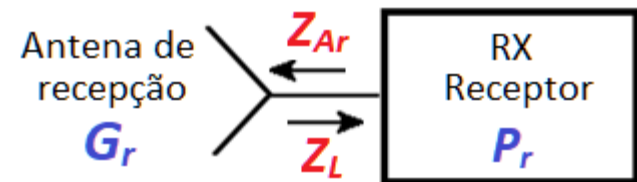
- Antena transmissora → impedância Z_{At}
- Transmissor – TX → impedância Z_G

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



-
- Antena receptora → impedância Z_{Ar}
 - Receptor – RX → impedância Z_L

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



Equação de Transmissão de Friis

- Descasamento de impedância – perda por reflexão

- Quando ocorre descasamento de impedância entre transmissor e antena, receptor e antena ou ambos

$$\Gamma_t = \frac{Z_A - Z_G^*}{Z_A + Z_G} \neq 0 \quad \text{e/ou} \quad \Gamma_r = \frac{Z_A - Z_L^*}{Z_A + Z_L} \neq 0$$

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

$$P_r (mW) = P_{FRIIS} (mW) \cdot e_{imp}$$

$$e_{imp} = (1 - |\Gamma_t|^2) \cdot (1 - |\Gamma_r|^2) \leq 1$$

e_{imp} → Erro por descasamento de impedância

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

Equação de Transmissão de Friis

Cálculo de P_r em mW

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

P_t em **mW**

G_t **adimensional**

G_r **adimensional**

R e λ na mesma unidade de comprimento

λ : comprimento de onda, depende da frequência da portadora

Comprimento de onda no espaço livre

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

f em Hz

$$c = 3 \cdot 10^{11} \text{ mm/s} \rightarrow \lambda \text{ em mm}$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ mm/s} \rightarrow \lambda \text{ em cm}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ mm/s} \rightarrow \lambda \text{ em m}$$

Equação de Transmissão de Friis

Cálculo de P_r em dBm

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

P_t em **dBm**

G_t em **dB**

G_r **dB**

R e λ na mesma unidade
de comprimento

λ : comprimento de onda,
depende da frequência
da portadora

Comprimento de onda
no espaço livre

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

f em Hz

$$c = 3 \cdot 10^{11} \text{ mm/s} \rightarrow \lambda \text{ em mm}$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ mm/s} \rightarrow \lambda \text{ em cm}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ mm/s} \rightarrow \lambda \text{ em m}$$

Equação de Transmissão de Friis

Exercício – Pr em mW e em dBm

- Satélite está a 36.000 km acima da Terra $\rightarrow R = 3 \cdot 10^6 \text{ m}$
- O satélite transmite 2 W em 20 GHz
 - $P_t = 2 \text{ W} = 2.000 \text{ mW} \rightarrow P_t = 10 \cdot \log(2.000) = 33 \text{ dBm}$
 - $f = 20 \text{ GHz} = 20 \cdot 10^9 \text{ Hz}$
 - $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{20 \cdot 10^9} = 0,015 \text{ m}$
- Antena de transmissão do satélite tem 37 dB de ganho
 - $G_t(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G_t) = 37 \text{ dB} \rightarrow G_t = 10^{3,7} = 5.011$
- Antena de recepção na Terra tem 46,6 dB de ganho
 - $G_r(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G_r) = 46,6 \text{ dB} \rightarrow G_r = 10^{4,66} = 45.709$

Equação de Transmissão de Friis

Exercício – resolução P_r em mW

- Potência recebida usando a fórmula de Friis

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

$$P_t = 2.000 \text{ mW} \quad G_t = 5.011 \quad G_r = 45.709$$

$$R = 3 \cdot 10^6 \text{ m} \quad \lambda = 0.015 \text{ m}$$

$$P_r = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot P_t = \frac{(5.011) \cdot (45.709) \cdot (0.015)^2}{(4 \cdot \pi \cdot 36 \cdot 10^6)^2} \cdot 2.000 \text{ mW}$$

$$P_r = 5,03 \cdot 10^{-10} \text{ mW}$$

- E em dBm $\rightarrow P_r(\text{dBm}) = 10 \cdot \log(P_r) = -92,97 \text{ dBm}$

Equação de Transmissão de Friis

Exercício – resolução P_r em dBm

- Potência recebida usando a fórmula de Friis em decibéis

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

$$P_t = 33 \text{ dBm} \quad G_t = 37 \text{ dB} \quad G_r = 46,6 \text{ dB}$$

$$R = 36 \times 10^6 \text{ m} \quad \lambda = 0,015 \text{ m}$$

$$P_r (dBm) = 37 + 46,6 + 33 - 10 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 36 \cdot 10^6}{0,015} \right)^2$$

$$P_r (dBm) = -92,98 \text{ dBm}$$

- Em mW $\rightarrow P_r (mW) = 10^{-9,298} = 5,025 \cdot 10^{-10} \text{ mW}$

Equação de Transmissão de Friis

Exercício – resolução P_r em dBm

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

- Perda do espaço livre $10 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda}\right)^2 = 209,58 \text{ dB}$
- Sabendo-se que o limiar de recepção do receptor em Terra é de -100 dBm , o sinal do satélite é recebido adequadamente?

Sim, pois o sinal recebido tem potência maior que o limiar de recepção

$$\rightarrow P_r = -92,97 \text{ dBm} > -100 \text{ dBm}$$

- Por que se usa uma antena em Terra com ganho maior que a antena do satélite?

Porque uma antena de ganho mais elevado tem maiores dimensões

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

- **Comunicações via satélite**

- Satélites artificiais enviam sinas para grandes áreas da Terra
- Usualmente operam em mais de uma banda de frequência
- Cada banda tem potência de transmissão (P_t) bem definida
- Empregam diversas antenas para iluminar diferentes regiões
- O ganho G_t dessas antenas varia ao longo da área iluminada pelas mesmas, sendo função da posição geográfica
- Para cada posição geográfica coberta pelo satélite, utiliza-se a grandeza EIRP - Potencia Radiada Isotrópica Efetiva

$$EIRP = G_t \cdot P_t \text{ (W)}$$

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

- **Potência Radiada Isotrópica Efetiva**

$$EIRP = G_t \cdot P_t \text{ (W)}$$

- 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

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

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

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

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

- Em decibéis

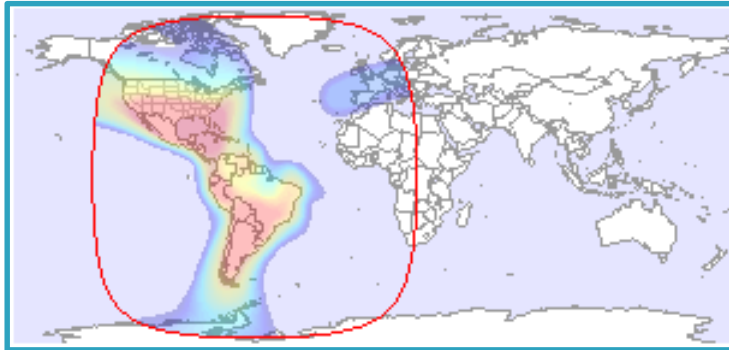
$$P_r (dBW) = G_r (dB) + EIRP (dBW) - 10 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda} \right)^2$$

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

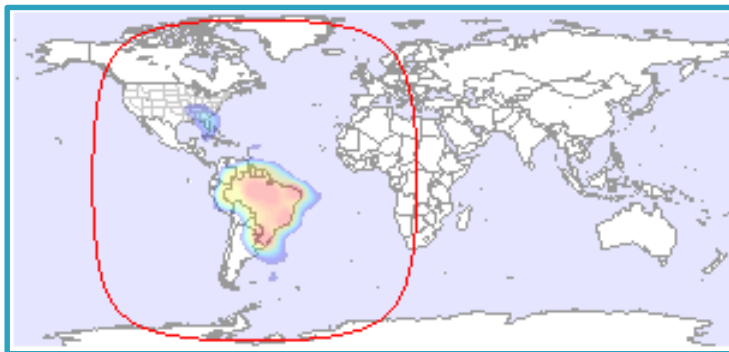
Satélite INTELSAT 9 – ATLÂNTICO – Bandas C (3,7 a 4,2 GHz) e Ku (11) GHz



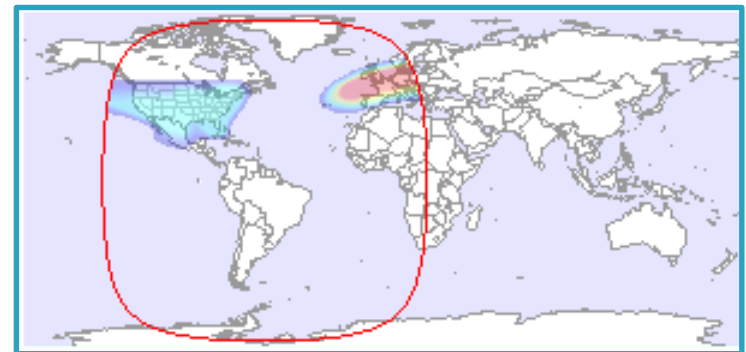
Feixe “Americas”



Feixe “Mexico”



Feixe “Brazil”

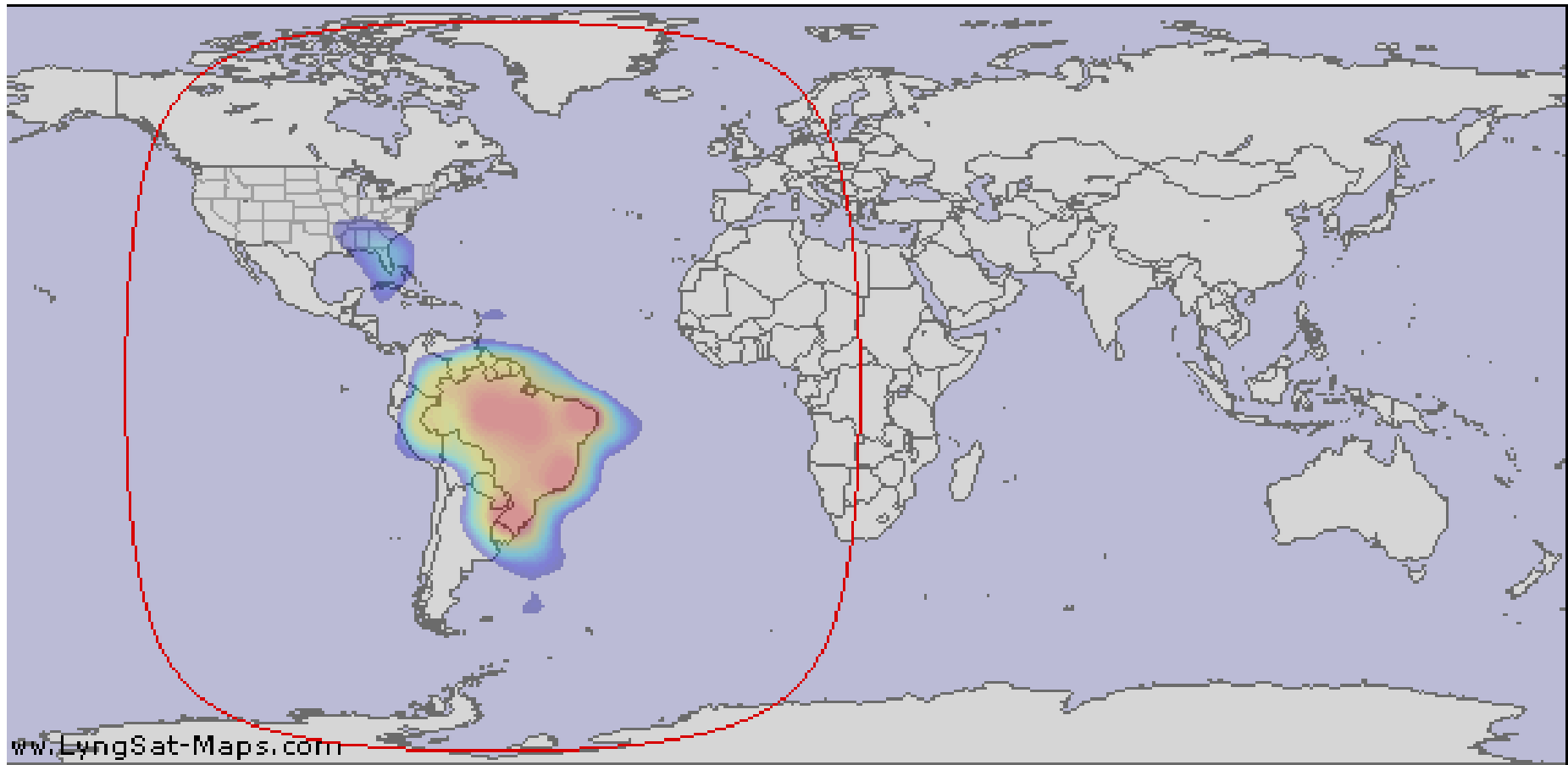


Feixe “Conus & Europe”

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

Mapa de EIRP

Satélite INTELSAT 9 – ATLÂNTICO – Feixe “BRAZIL”

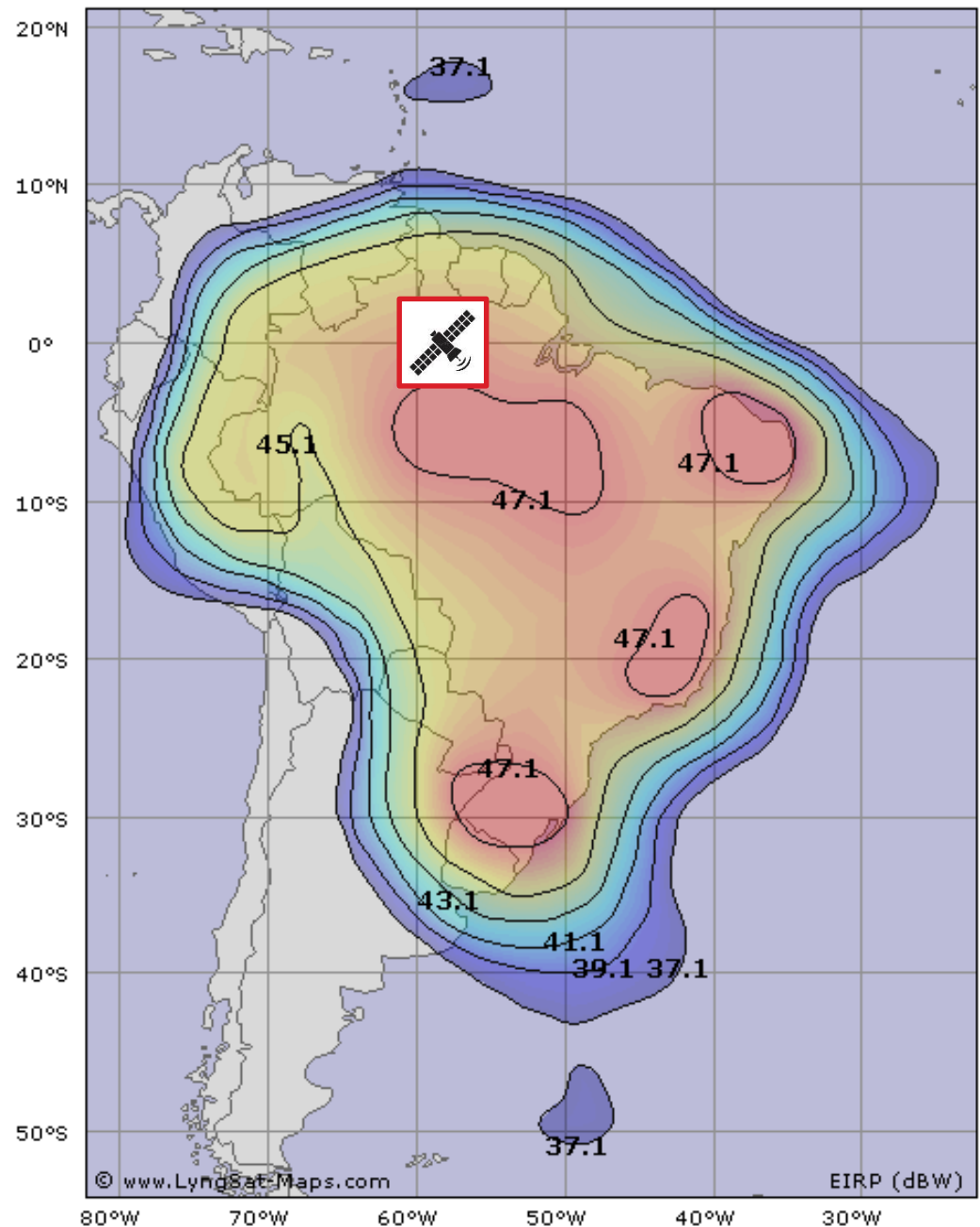


<http://www.lyngsat-maps.com/>

Mapa de EIRP

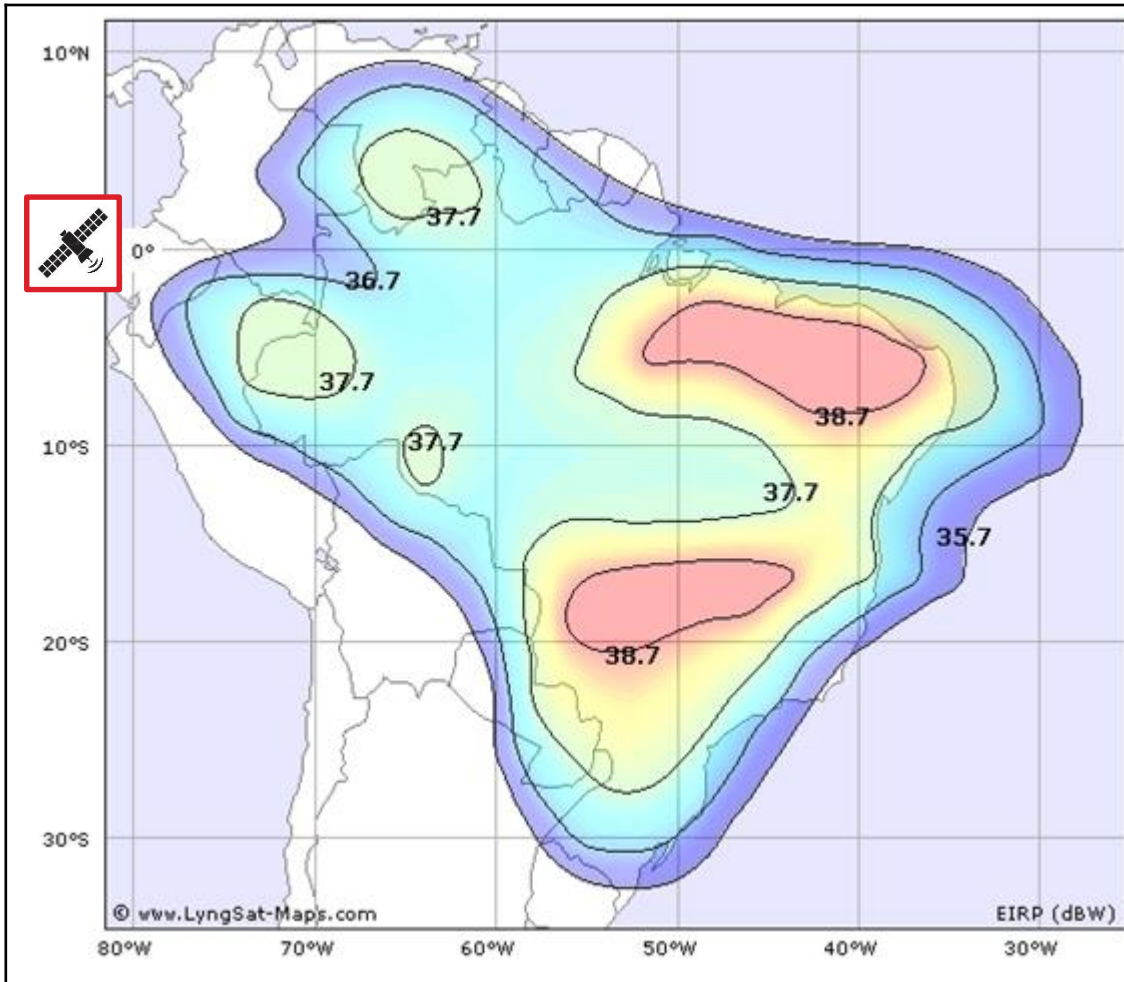
- Satélite INTELSAT 9
- Posição do satélite
 - Linha do Equador
 - ATLÂNTICO a 58° W
- Feixe “BRAZIL”
 - Curvas de nível
 - EIRP em dBW

<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

Projeto de sistemas

- **Equação de Friis**

- Permite dimensionar os componentes do sistema, relacionando

A potência
recebida no RX



- Frequência de operação do sistema
- Potência transmitida pelo TX
- Distância entre TX e RX
- Ganho das antenas de TX e RX

- **Fatores que limitam a escolha dos componentes do sistema**

- Aplicação e o tipo do sistema
- Características de componentes comercialmente disponíveis
- Compromisso “Custo – Benefício”
- Conjunto de componentes que atenda às especificações com o menor custo possível

Projeto de sistemas

- **Aplicação do sistema define**
 - A frequência de operação
 - A máxima potência que pode ser transmitida
- **Tipo de sistema**
 - Ponto-a-ponto, ponto-multiponto, multiponto-multiponto
 - Define tipo de antena a ser usada
 - Mais direcional → ganho elevado (20, 30 dB, p. ex.) ou
 - Menos direcional → ganho moderado (7, 10 dB, p. ex.)
- **Faixa dinâmica de operação do sistema**
 - Depende do tipo modulação usada
 - Qualidade do sistema (taxa de erro de bit especificada , p. ex.)
 - Especificações de linearidade do transmissor
 - Especificações de ruído do receptor

Faixa Dinâmica

- **Faixa dinâmica**

- Faixa de potência em que um componente, circuito ou sistema opera linearmente
 - Resposta não varia quando se varia amplitude do sinal de entrada
- Aplica-se a
 - Receptores e transmissores de sistemas
 - Circuitos – amplificadores, conversores de frequência, etc.
 - Componentes – diodos e transistores
- Faixa dinâmica de componentes, circuitos e sistemas reais é limitada por fenômenos de

Ruído

Distorção não-linear

Faixa Dinâmica

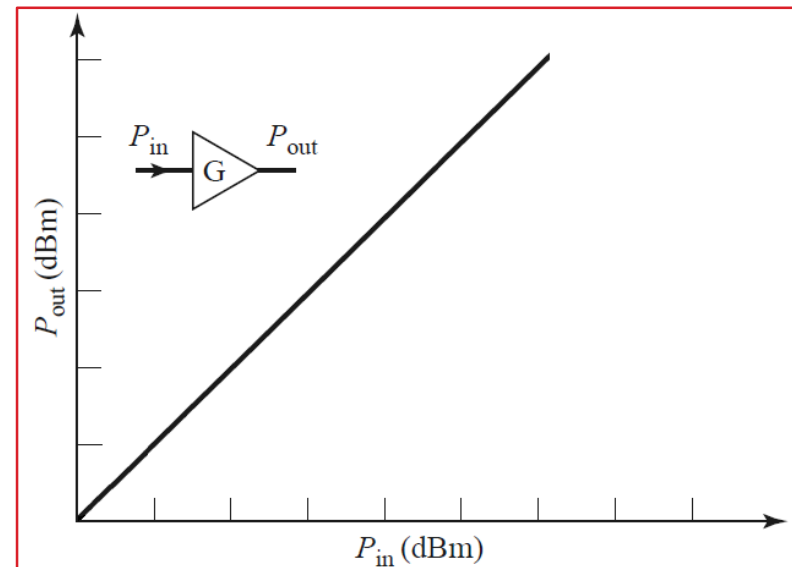
- **Exemplo: faixa dinâmica de um amplificador ideal**

- Amplificador com ganho G

- Potência de entrada P_{in} (mW)
- Potência de saída P_{out} (mW) = $G \times P_{in}$ (mW)
- **Qualquer** que seja o valor de P_{in}

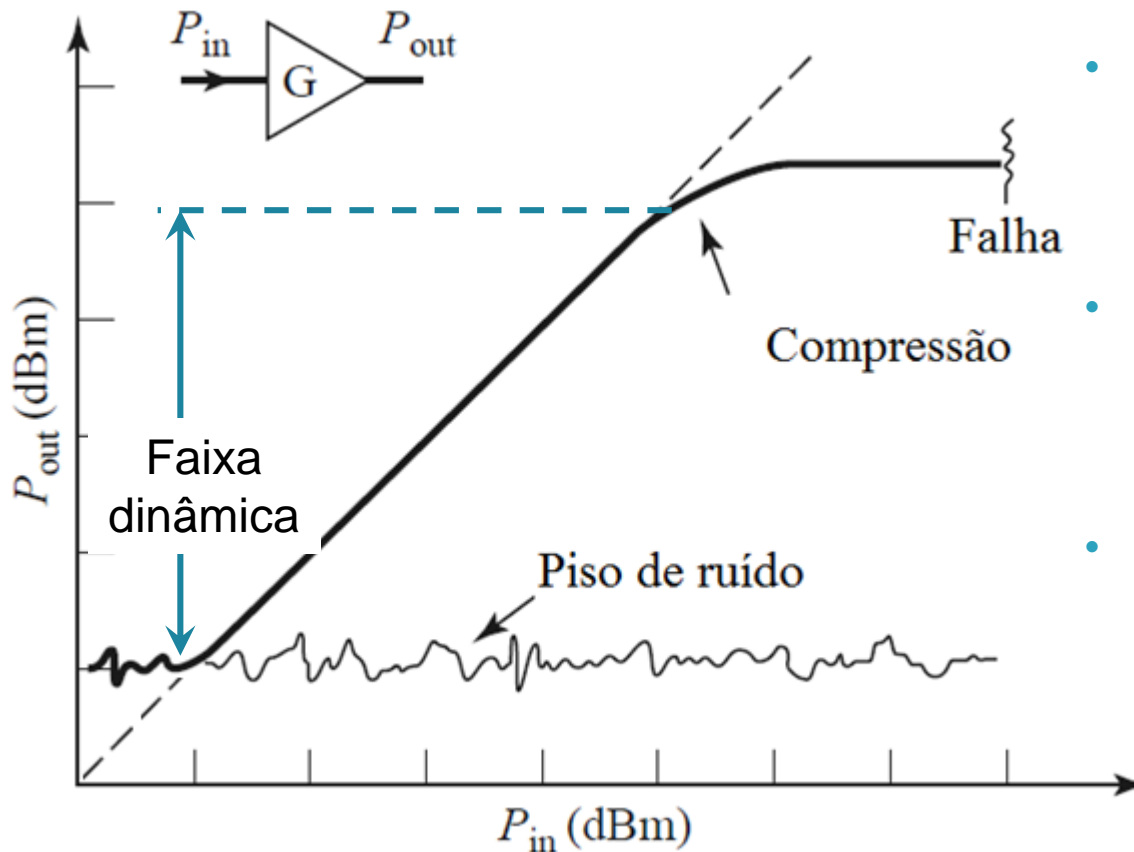
- Amplificador ideal com ganho $G = 10 \rightarrow P_{out} = 10 \times P_{in}$

- $P_{in} = 0 \text{ nW} \rightarrow P_{out} = 0 \text{ nW}$
- $P_{in} = 1 \text{ } \mu\text{W} \rightarrow P_{out} = 10 \text{ } \mu\text{W}$
- $P_{in} = 1 \text{ mW} \rightarrow P_{out} = 10 \text{ mW}$
- $P_{in} = 1 \text{ W} \rightarrow P_{out} = 10 \text{ W}$
- $P_{in} = 1 \text{ kW} \rightarrow P_{out} = 10 \text{ kW}$
- $P_{in} = 1 \text{ MW} \rightarrow P_{out} = 10 \text{ MW}$
- Faixa dinâmica infinita!



Faixa dinâmica

- **Faixa dinâmica de amplificador real**



- **Piso de ruído**

- Ruído gerado pelo próprio amplificador

- **Faixa dinâmica**

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

- **Compressão**

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

Faixa dinâmica

- **Limitações da faixa dinâmica de amplificador real**
- **Compressão**
 - Distorção não-linear devido a nível elevado de sinal de entrada que satura componentes semicondutores (diodos e transistores)
 - Reduz o ganho dos amplificadores
 - Gera harmônicas e produtos de intermodulação dos sinais de entrada
 - Degrada operação do transmissor do sistema
- **Piso de ruído**
 - Ruído gerado pelos diversos componentes dos circuitos, como transistores e resistores
 - Depende da temperatura de operação
 - Em geral, piso de ruído é de -100 dBm a -60 dBm na banda de sistemas de micro-ondas
 - Limita operação do receptor do sistema

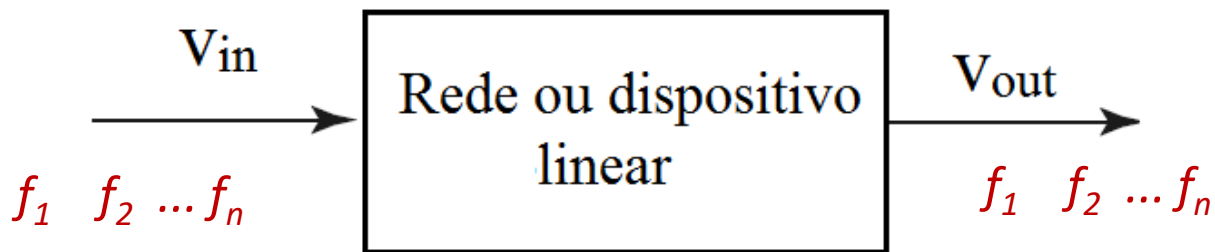
Distorção não-linear

Distorção não-linear

Rede ou dispositivo LINEAR

Tensão de entrada $v_{in} = \sum_i A_i \cdot (\cos \omega_i \cdot t)$ \longrightarrow Tensão de saída $v_{out} = \sum_i B_i \cdot (\cos \omega_i \cdot t)$

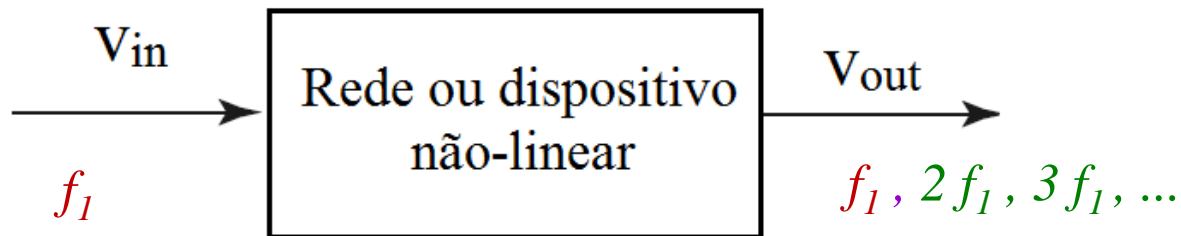
- Qualquer que seja a amplitude dos sinais de entrada A_i



- **Redes os dispositivos reais**
 - São não-lineares
 - Mas podem ser considerados lineares (aproximação) quando operando em pequenos sinais
 - Baixo nível de potências, com distorção reduzida \rightarrow **Faixa Dinâmica**

Distorção não-linear

Rede ou dispositivo NÃO-LINEAR

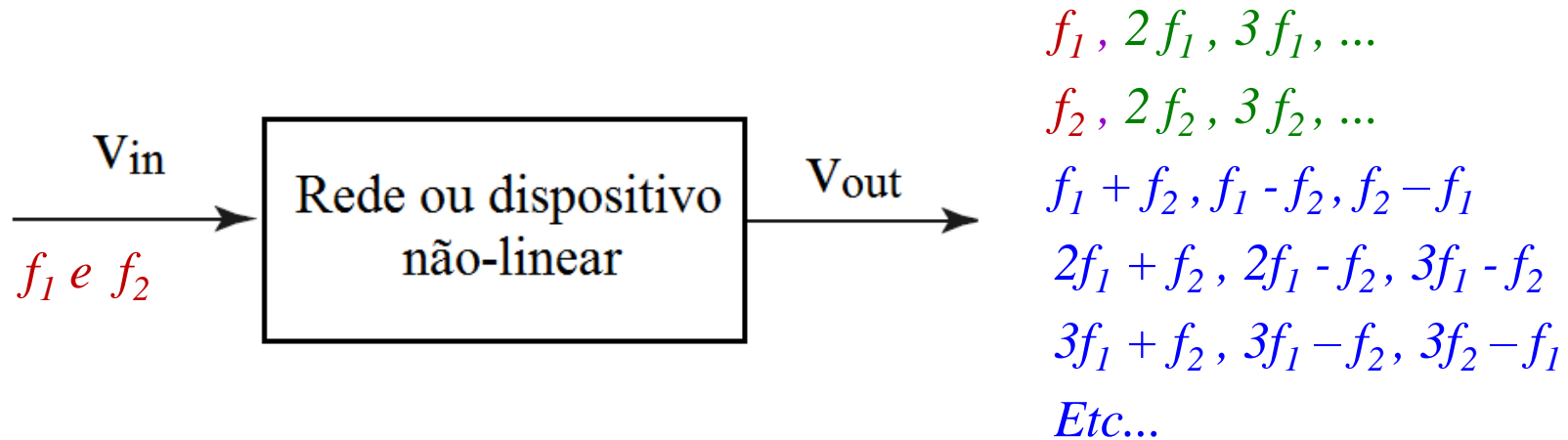


Tensão de entrada \rightarrow Tensão de saída
 f_1 $m \cdot f_1, m = 1, 2, 3 \dots$

- Espectro de frequências do sinal de saída
 - \rightarrow sinal de entrada
 - \rightarrow harmônicas do sinal de entrada

Distorção não-linear

Rede ou dispositivo NÃO-LINEAR



Tensão de entrada

→

Tensão de saída

f_1 e f_2

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

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

Distorção não-linear

Componentes de sistemas de micro-ondas

Componentes lineares

- Circuitos passivos
 - Filtros
 - Atenuadores
 - Divisores de potência
 - Acopladores, etc.

Componentes não-lineares

- Circuitos ativos
 - Amplificadores
 - Osciladores
 - Conversores de frequência
 - Multiplicadores de frequência

Amplificadores operando em pequenos sinais

- Operam com sinais de baixa potência, que não alteram o desempenho do amplificador
- Comportam-se como circuitos lineares → “lineares”

Distorção não-linear

- Componentes passivos usam

- Resistores, capacitores e indutores
- Linhas de transmissão
- São considerados “lineares”

Comportamento
NÃO DEPENDE
da amplitude dos sinais

- Componentes ativos usam

- Resistores, capacitores e indutores
- Linhas de transmissão
- Dispositivos semicondutores
 - Diodos e transistores
- São considerados “não-lineares”
- Exceção → amplificadores em “pequenos sinais” → “lineares”

Comportamento
DEPENDE
da amplitude dos sinais

Distorção não-linear

Comportamento não-linear: desejável ou indesejável?

- Indesejável

- Em amplificadores
 - Compressão do ganho
 - Geram harmônicas
 - Produtos de intermodulação

Deseja-se:
Linearidade → Baixa distorção

- Desejável

- Retificadores de sinais
- Conversores de frequência
- Multiplicadores de frequência

Não linearidade
↓
Princípio de operação

Simulação computacional de sistemas

Modelos comportamentais

- Representam os componentes do sistema
 - Filtros
 - Atenuadores
 - Amplificadores
 - Osciladores
 - Conversores de frequência
- Parâmetros do modelo comportamental
 - Operação linear
 - Parâmetros S
 - Operação não-linear
 - Parâmetros para cálculo de compressão de ganho
 - Parâmetros para cálculo de sinais harmônicos e intermodulação

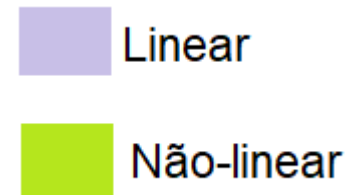
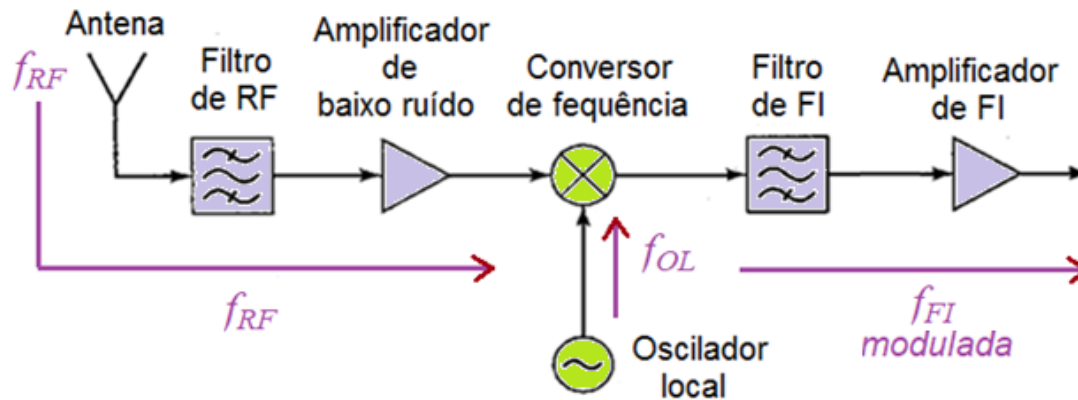
Modelo comportamental



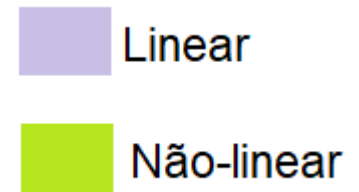
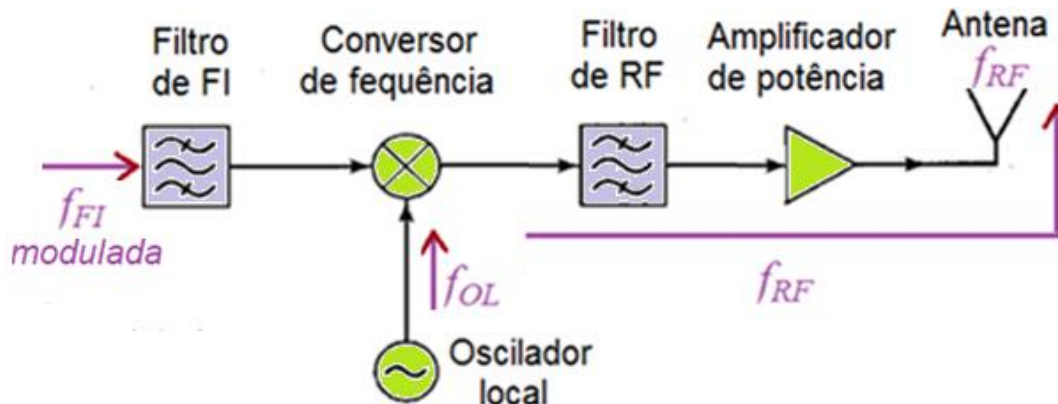
Específico para cada componente

Distorção não-linear

Receptor Heteródino



Transmissor Heteródino



Simulação computacional de sistemas

Simulação linear

Simulador

- Parâmetros de Espalhamento
 - Figura de Ruído incluso

- Componentes passivos
 - Filtros, atenuadores, etc.
- Amplificadores operando em pequenos sinais

Simulação não-linear

Simulador

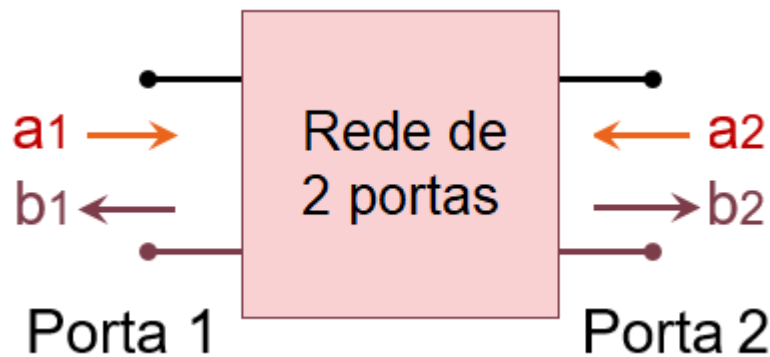
- Balanceamento Harmônico

- Componentes ativos
 - Amplificadores de potência
 - Conversores de frequência
 - RX e TX de sistemas

Simulação Linear

Parâmetros de Espalhamento ou Matriz S

- Simulação de componentes passivos
 - Filtros
 - Atenuadores, etc.
- Simulação de amplificadores operando em pequenos sinais



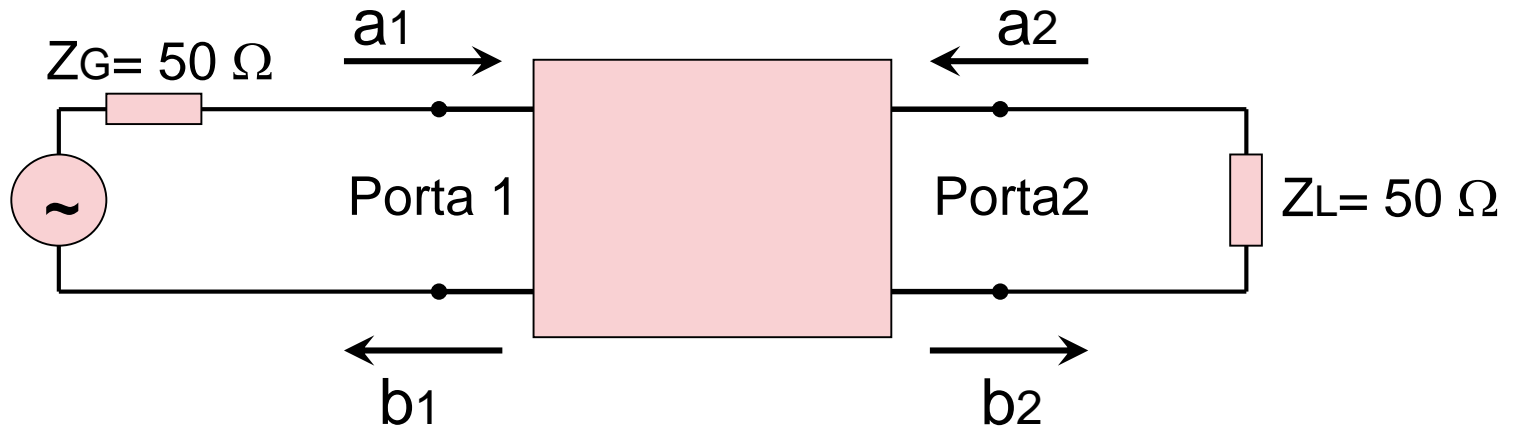
Matriz S

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

- a_1 e a_2 : ondas de potência incidentes nas portas 1 e 2
- b_1 e b_2 : ondas de potência refletidas nas portas 1 e 2

Simulação Linear

Conceito de S_{21} (dB) – ganho direto



- Coeficiente de transmissão direto



$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$

- Ganho direto de potência em 50Ω



$$|S_{21}|^2 = G(@50\Omega)$$

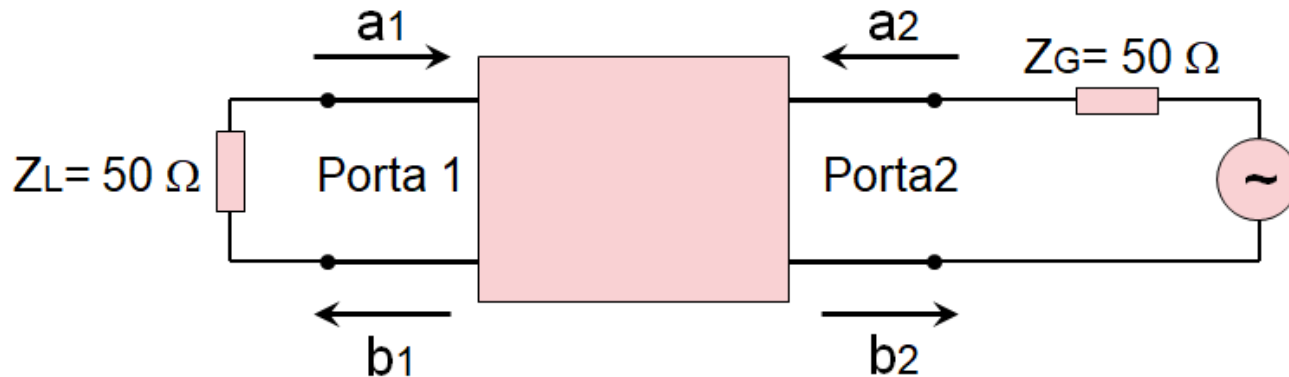
$$S_{21} (dB) = 20 \cdot \log(|S_{21}|)$$



Ganho direto de potência em dB

Simulação Linear

Conceito de S_{12} (dB) – ganho reverso



- Coeficiente de transmissão reverso



$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$

- Ganho reverso de potência em 50Ω



$$|S_{12}|^2 = G_{rev} (@ 50\Omega)$$

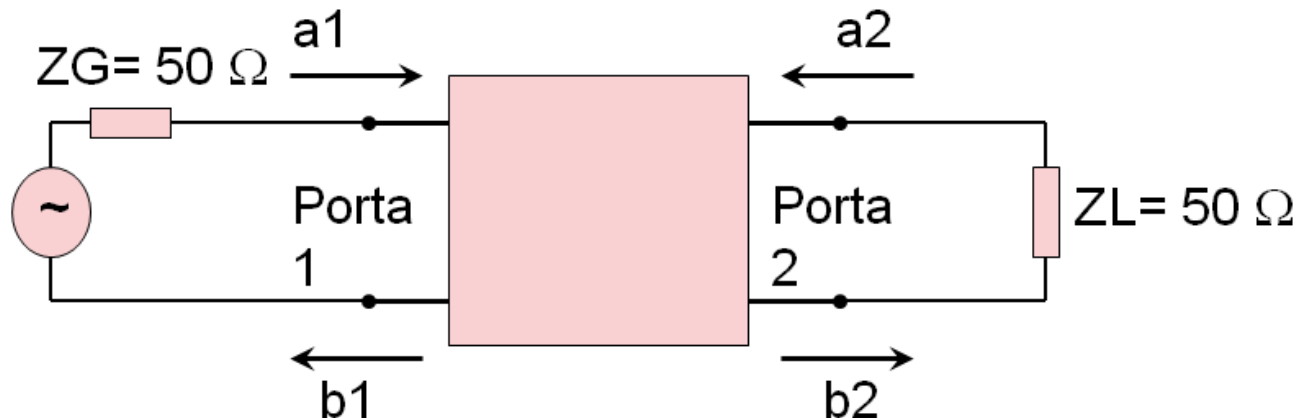
$$S_{12} (dB) = 20 \cdot \log(|S_{12}|)$$



Ganho reverso de potência em dB

Simulação Linear

Conceito de $S_{11}(dB)$ – coeficiente de reflexão de entrada



- Coeficientes de reflexão da porta 1



$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

- Associado à Z_1 impedância de entrada



$$S_{11} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

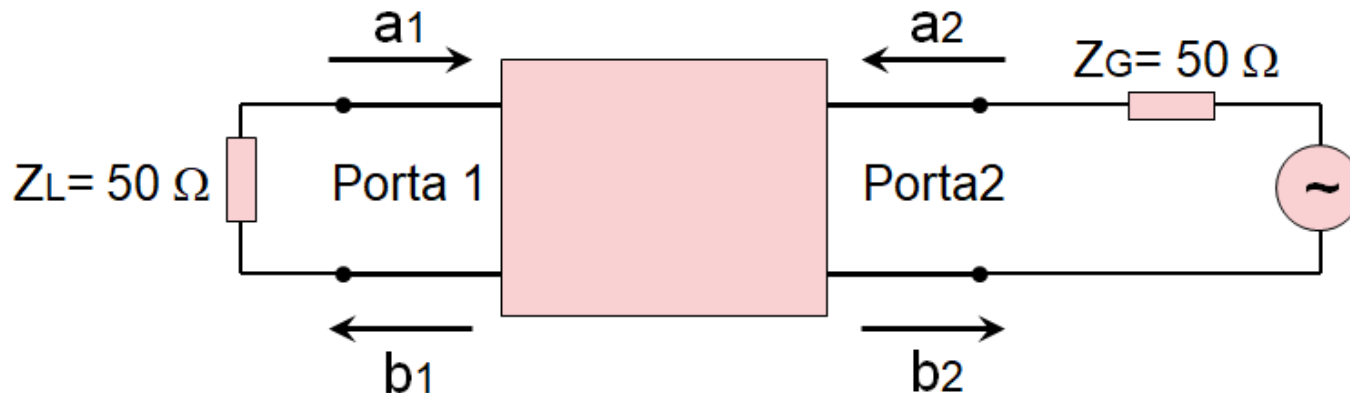
$$S_{11} (dB) = 20 \cdot \log(|S_{11}|)$$



Coeficiente de reflexão de de potência em dB

Simulação Linear

Conceito de S_{22} (dB) – coeficiente de reflexão de saída



- Coeficientes de reflexão da porta 2



$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

- Associado à Z_2 impedância de entrada



$$S_{22} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$S_{22} (dB) = 20 \cdot \log(|S_{22}|)$$

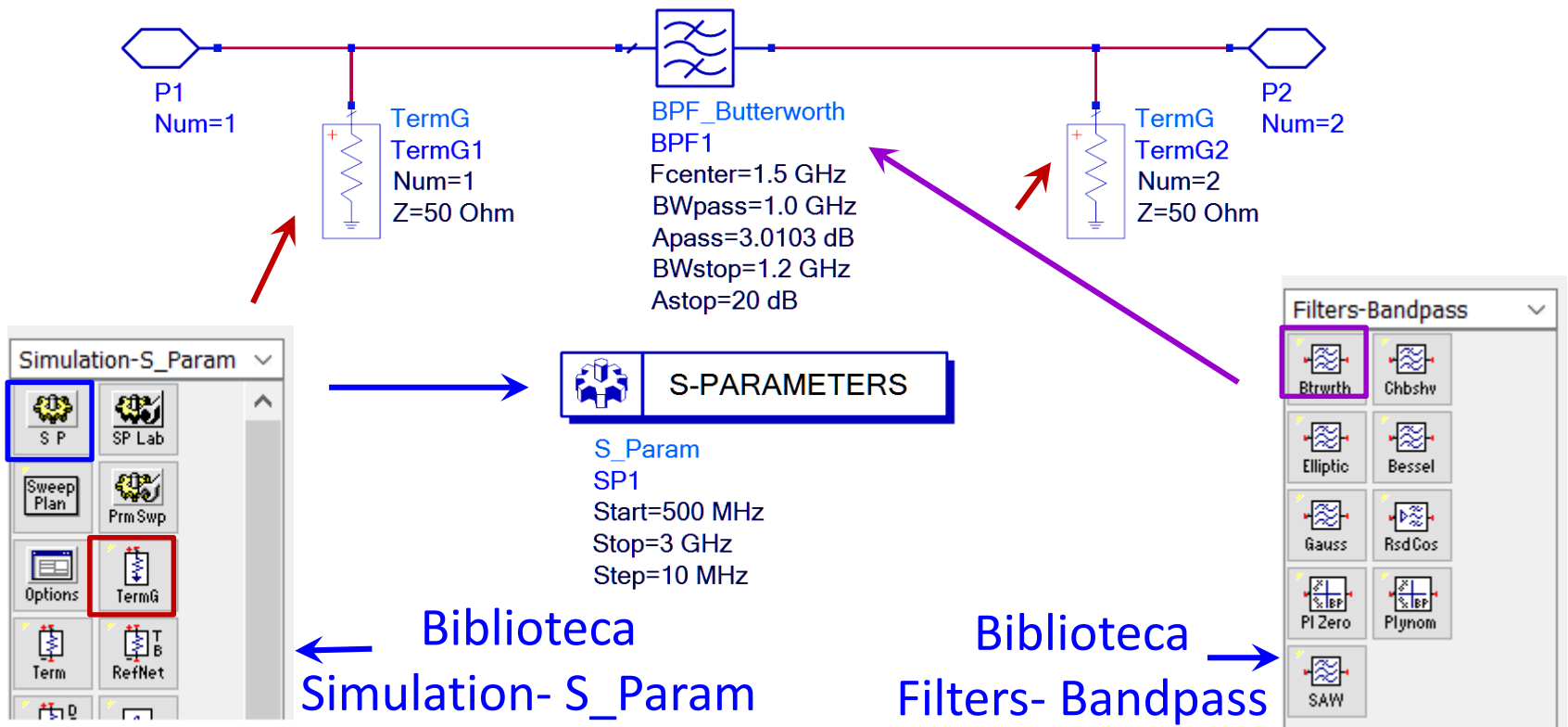


Coeficiente de reflexão de de potência em dB

Simulação Linear

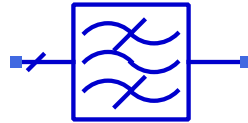
Filtros passa-faixa– Advanced Design System - ADS

- Filtro Butterworth
 - Máxima planicidade na faixa de passagem



Simulação de Parâmetros S

Filtros passa-faixa– Advanced Design System - ADS



BPF_Butterworth
BPF1

- Filtro Butterworth

Fcenter=1.5 GHz
BWpass=1.0 GHz
Apass=3.0103 dB
BWstop=1.2 GHz
Astop=20 dB

Parâmetros

Fcenter → Frequência central

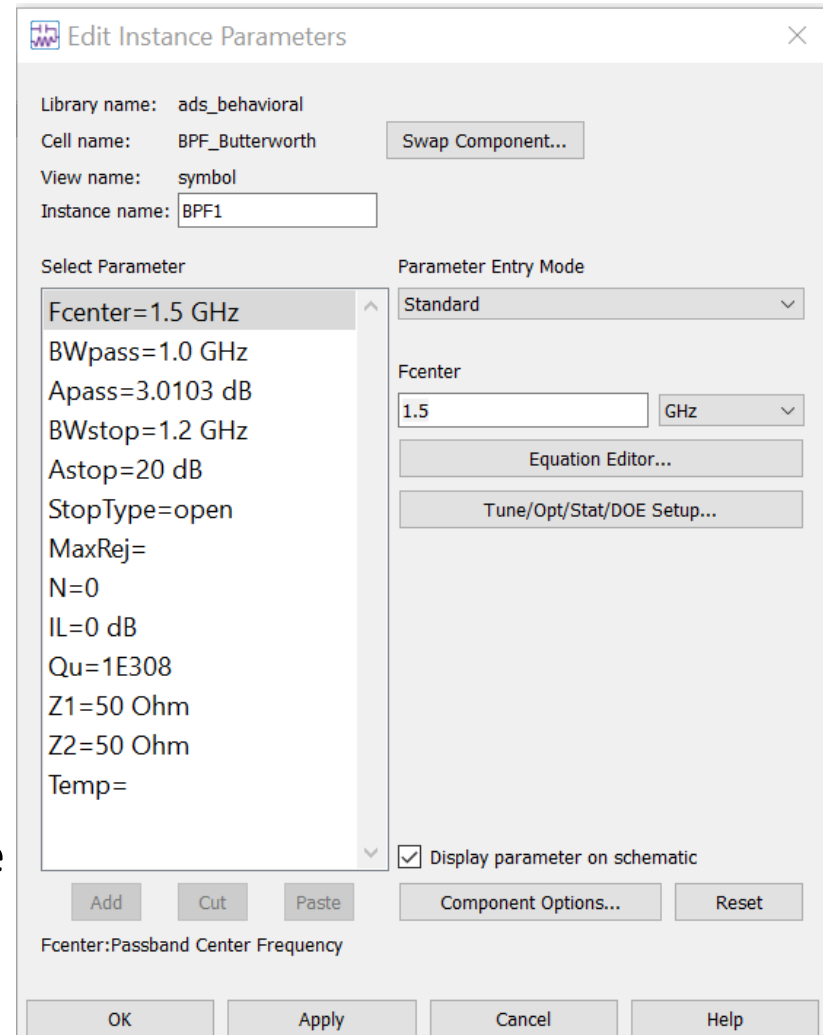
BWpass → Largura da banda de passagem

Apass → Atenuação nas bordas da banda de passagem

BWstop → Largura da banda de rejeição

Astop → Mínima atenuação nas bandas de rejeição

IL → Perda de inserção na banda de passagem



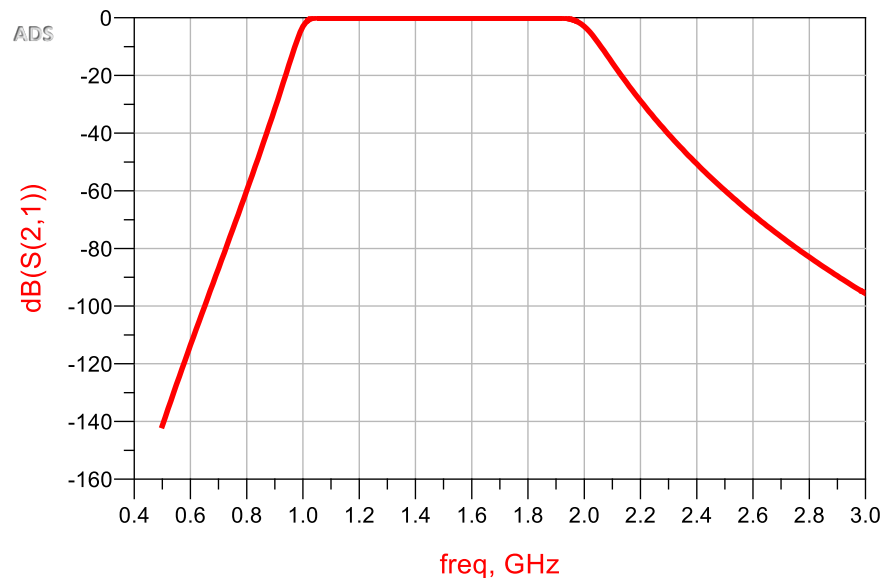
Simulação de Parâmetros S

Filtros passa-faixa– Simulação de Parâmetros S

- Filtro Butterworth – Curva de S21(dB) x frequência

S21(dB) → Transmissão de potência da entrada para a saída

→ Potência de saída / Potência de entrada



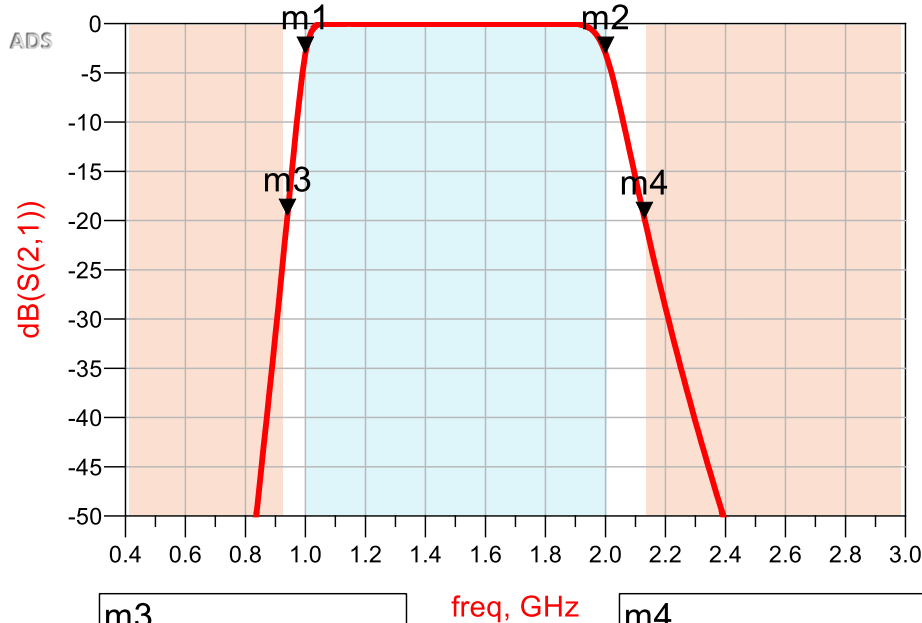
Simulação de Parâmetros S

Filtros passa-faixa– Simulação de Parâmetros S

- Filtro Butterworth – Análise da curva $S_{21}(\text{dB})$ x frequência

m1
freq=1.000GHz
dB(S(2,1))=-3.010

m2
freq=2.000GHz
dB(S(2,1))=-3.010



m3
freq=940.0MHz
dB(S(2,1))=-19.469

freq, GHz

m4
freq=2.130GHz
dB(S(2,1))=-19.786

Banda de passagem

- Entre m1 e m2
- De 1 GHz a 2 GHz \rightarrow BW = 1 GHz

Bandas de rejeição

- Abaixo m3 e acima de m4
- Atenuação ≥ 20 dB
- $f \leq 0,940$ GHz e $f \geq 2.130$ GHz
 \rightarrow BWstop $\approx 1,2$ GHz

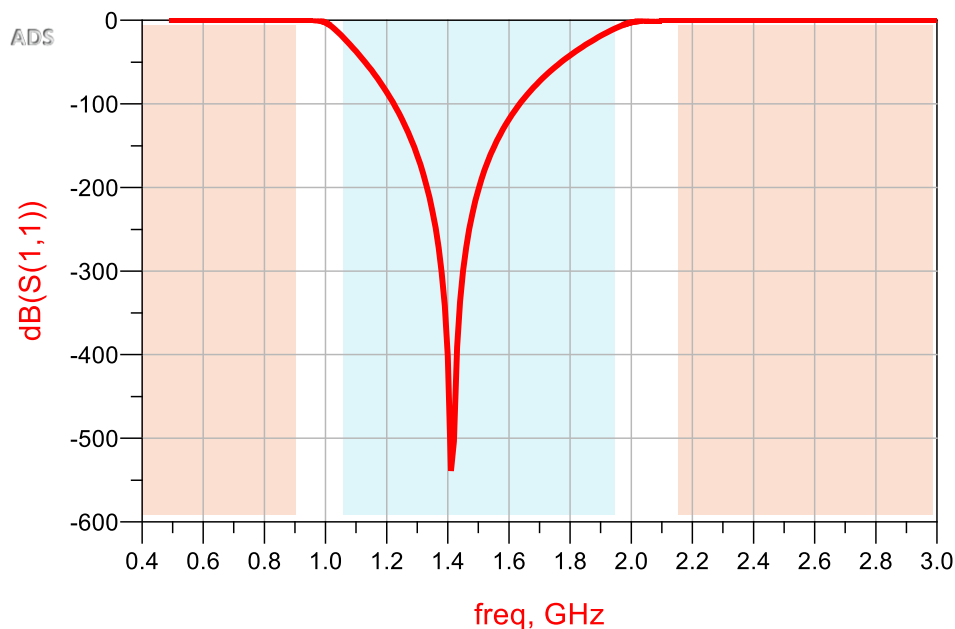
Simulação de Parâmetros S

Filtros passa-faixa– Simulação de Parâmetros S

- Filtro Butterworth – Curva de S_{11} (dB) x frequência

S_{11} (dB) → Reflexão de potência na entrada do filtro

S_{22} (dB) → Reflexão de potência na saída do filtro



Na banda de passagem
usualmente deseja-se:

$$S_{11}(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$$

$$S_{22}(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$$

$$S_{jj}(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$$

Potência refletida na
porta “j” seja menor
que 1/10 da potência
incidente

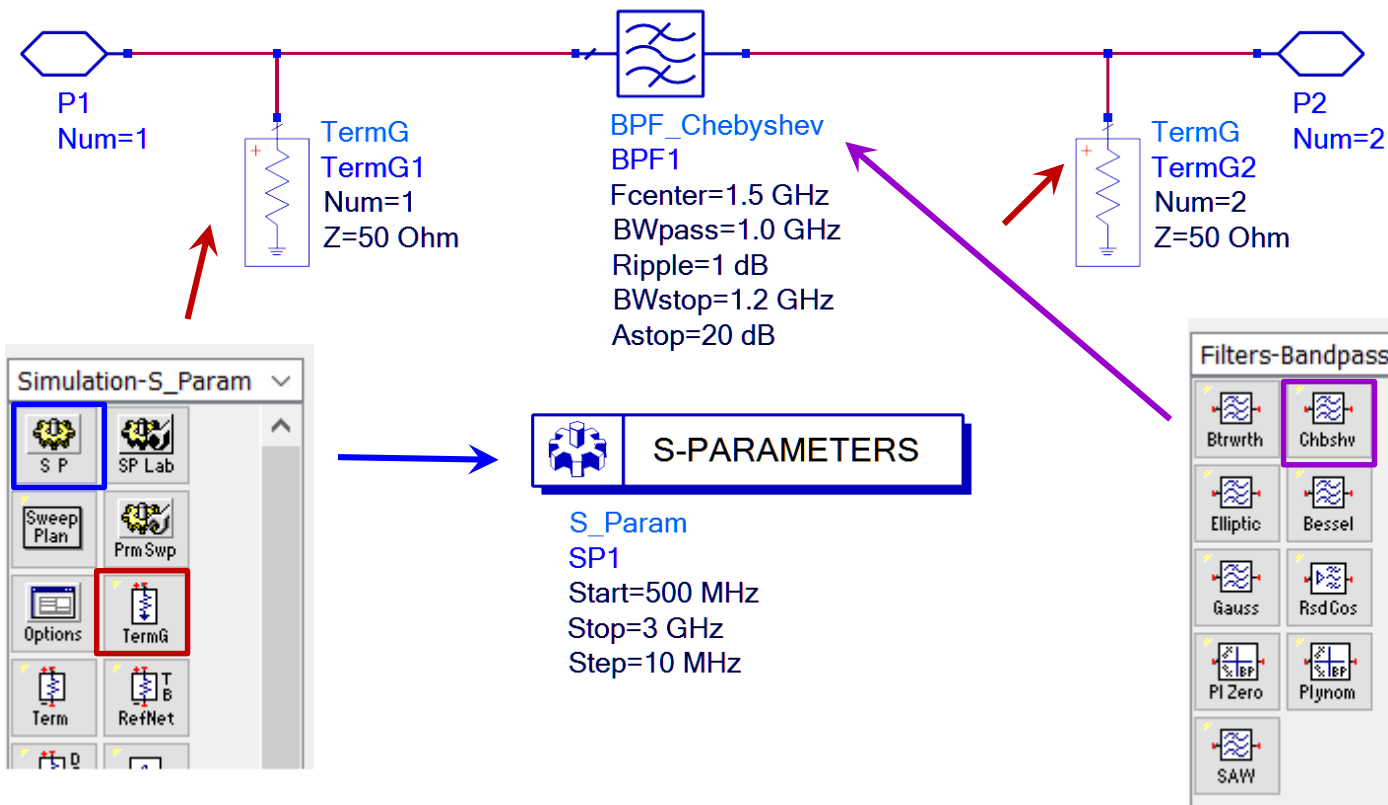
Banda de passagem

Banda de rejeição

Simulação de Parâmetros S

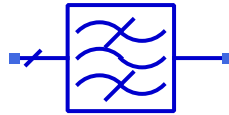
Filtros passa-faixa– Simulação de Parâmetros S

- Filtro Chebyshev
 - Ondulação constante na faixa de passagem



Simulação de Parâmetros S

Filtros passa-faixa– Simulação de Parâmetros S



BPF_Chebyshev
BPF1

Fcenter=1.5 GHz
BWpass=1.0 GHz
Ripple=1 dB
BWstop=1.2 GHz
Astop=20 dB

- Filtro Chebyshev

Parâmetros

Fcenter → frequência central

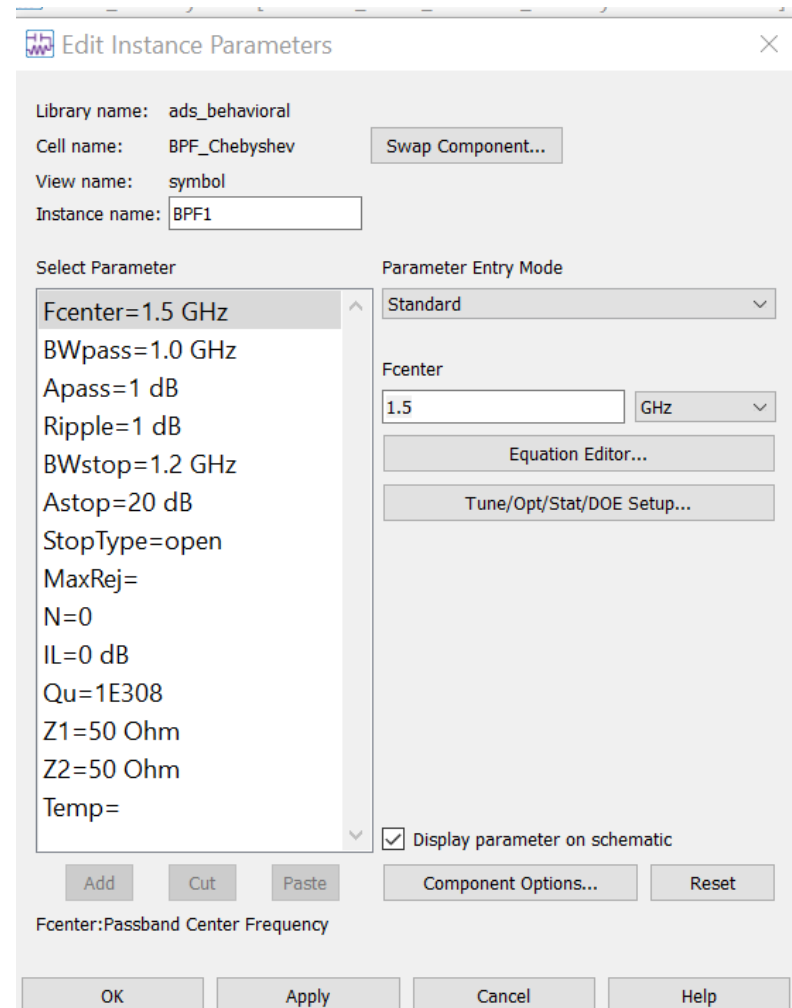
BWpass → Largura da banda de passagem

Ripple → ondulação na faixa de passagem

BWstop → Largura da banda de rejeição

Astop → Mínima atenuação nas bandas de rejeição

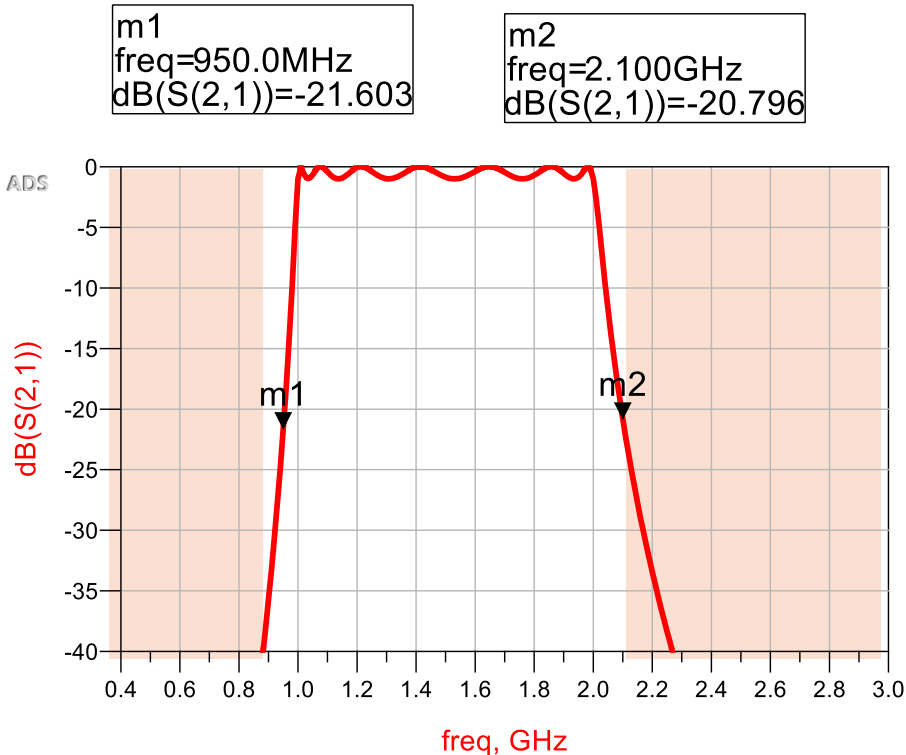
IL → Perda de inserção na banda de passagem



Simulação de Parâmetros S

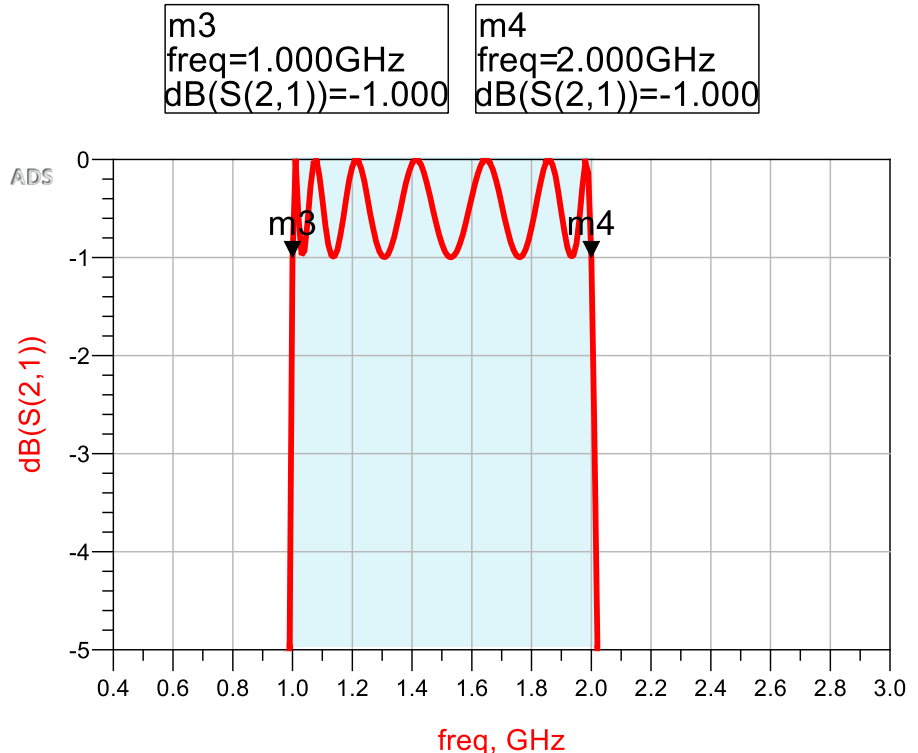
Filtros passa-faixa – Simulação de Parâmetros S

- Filtro Chebyshev – Análise da curva $S_{21}(\text{dB})$ x frequência



Bandas de rejeição

- $f \leq 0,950$ GHz e $f \geq 2.100$ GHz



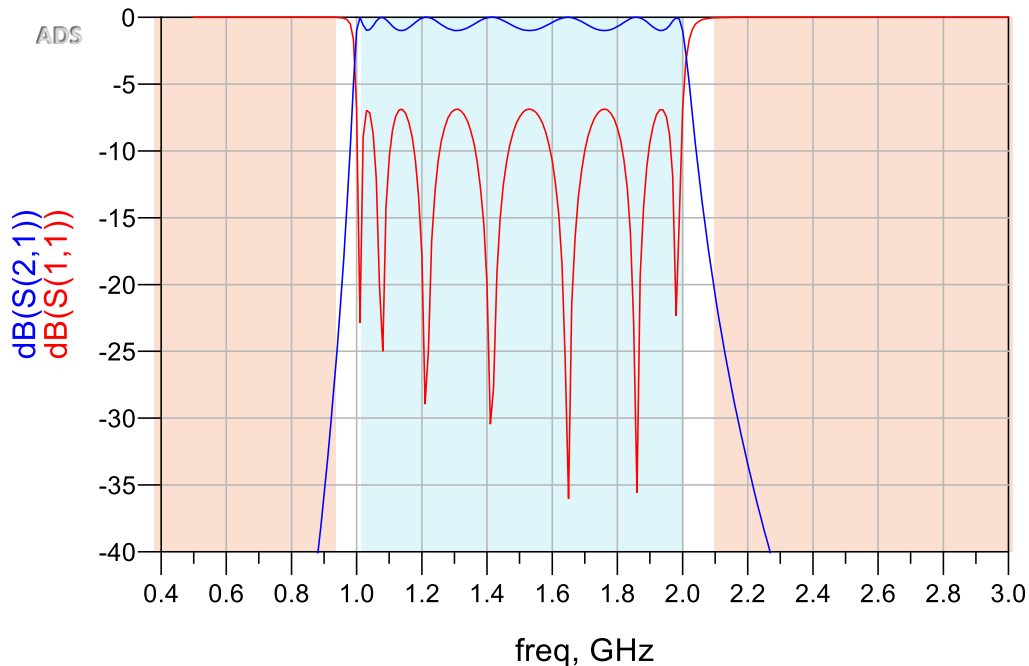
Banda de passagem

- De 1 GHz a 2 GHz \rightarrow BW = 1 GHz

Simulação de Parâmetros S

Filtros passa-faixa– Simulação de Parâmetros S

- Filtro Chebyshev – Curvas de S_{21} (dB) e S_{11} (dB) x frequência



Frequências com maior perda de inserção na banda de passagem
↓
Maior potência é refletida nas portas
↓
Maior valor de S_{11} (DB)

Banda de passagem

Banda de rejeição

Simulação Não-linear

Aplicação

- Simulação de componentes ativos
- Simulação de sistemas: receptor e transmissor

Simuladores não-lineares

- Simulação no domínio do tempo
 - Spice, Multisim, ADS, etc.
- Simulação de Balanceamento Harmônico
 - Simuladores de micro-ondas → ADS e outros

Permite simular

- Compressão de potência de saída e de ganho
- Sinais harmônicos e produtos de intermodulação

Simulação Não-linear

Compressão de ganho de amplificadores

- $P_{saída} \text{ (dBm)} \times P_{entrada} \text{ (dBm)}$
- $\text{Ganho (dB)} \times P_{entrada} \text{ (dBm)}$

IP3 - Produto de Intermodulação de 3ª ordem

- Espectro de frequência do sinal de saída do amplificador com dois tons na entrada

Conversor de frequência ou Mixer

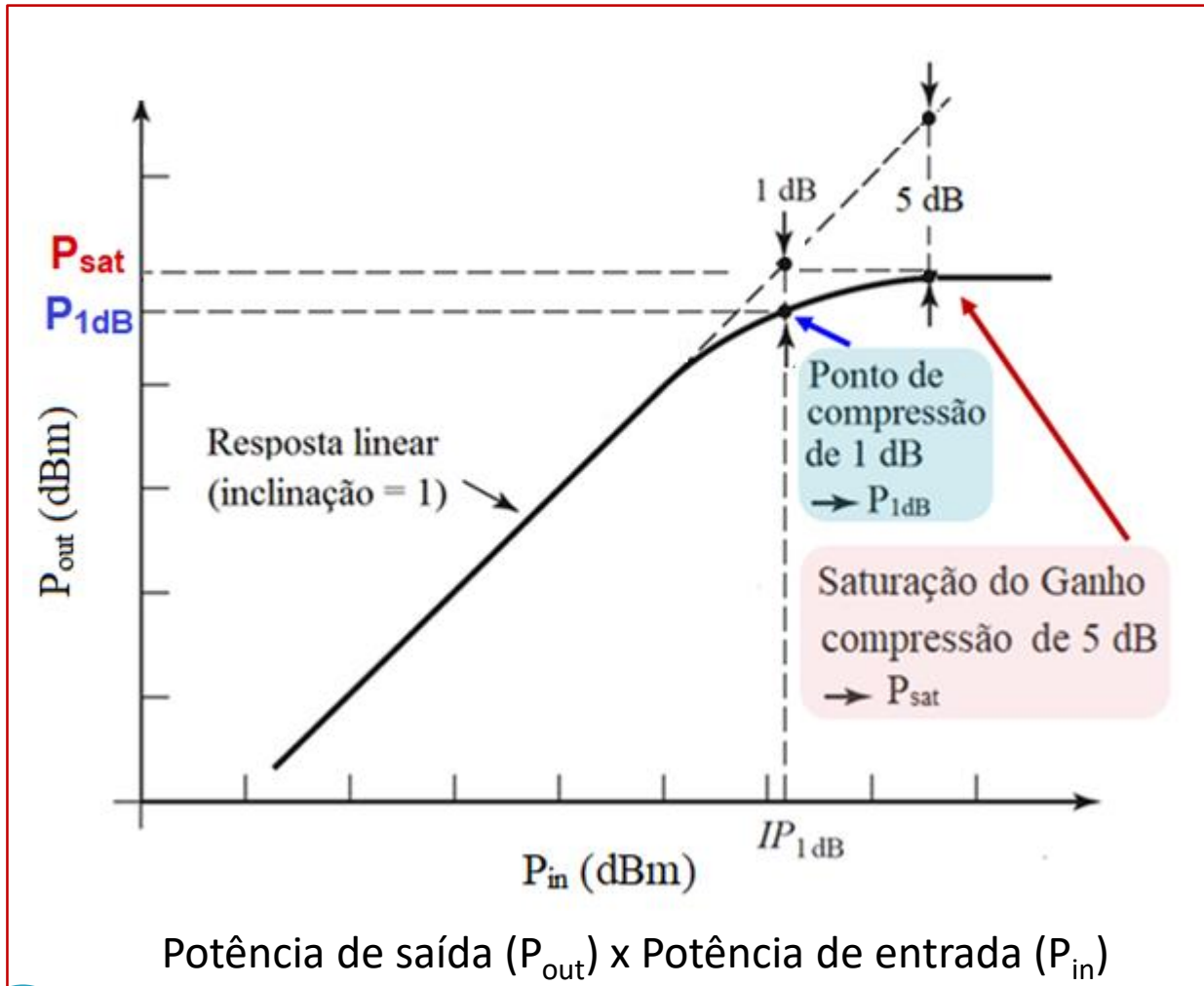
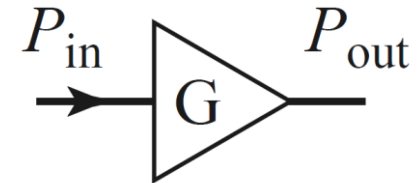
- Modelo comportamental do conversor de frequência
- Espectro de frequência do sinal de saída do conversor de frequência

Distorção linear do sistema

- Equação do IP3 de componentes em cascata
- Simulação do IP3 de amplificador de 3 estágios
- Simulação de transmissor heteródino

Compressão de ganho

Amplificador – compressão e saturação do ganho



Região linear

Ganho constante

Compressão de 1 dB

Ganho cai 1 dB

P_{1dB} - ponto de compressão de 1 dB do ganho

Saturação

Ganho cai de 5 dB

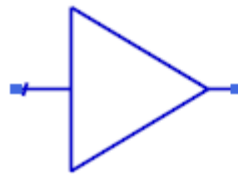
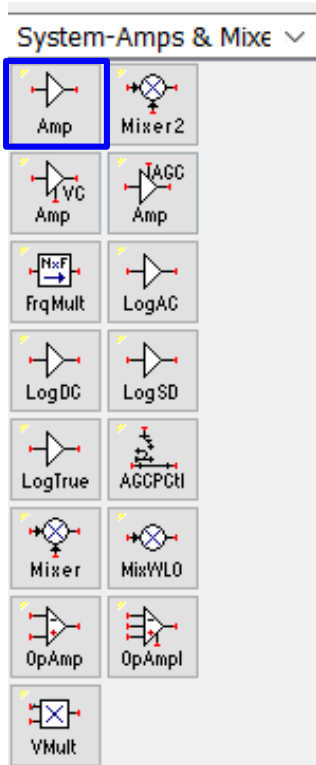
P_{sat} - de compressão de 5 dB do ganho

Compressão de ganho

Modelo comportamental do amplificador - ADS

Menu

Systems-Amps & Mix



Amplifier2
AMP1

$S_{21}=\text{dbpolar}(20,0)$
 $S_{11}=\text{polar}(0,0)$
 $S_{22}=\text{polar}(0,180)$
 $S_{12}=0$

$P_{\text{sat}}=12.5$
 $\text{GainCompSat}=5.0 \text{ dB}$

$\text{GainCompPower}=10$
 $\text{GainComp}=1.0 \text{ dB}$

Parâmetros do modelo - exemplo

Região linear

Parâmetros S

- S_{21} ganho direto
- S_{12} ganho reverso
- S_{11} coeficiente de reflexão de entrada
- S_{22} coeficiente de reflexão de saída

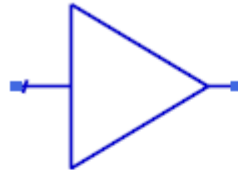
$S_{21}(\text{dB}) \rightarrow$ Ganho de pequenos sinais

Compressão de ganho

Modelo comportamental do amplificador - ADS

Menu

Systems-Amps & Mix



Amplifier2
AMP1

S21=dbpolar(20,0)
S11=polar(0,0)
S22=polar(0,180)
S12=0

Psat=12.5
GainCompSat=5.0 dB

GainCompPower=10
GainComp=1.0 dB

Parâmetros do modelo

Compressão de ganho (1 dB usualmente)

GainComp

- Redução do ganho na compressão
- Usualmente → 1 dB

GainCompPower

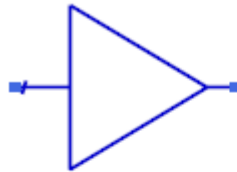
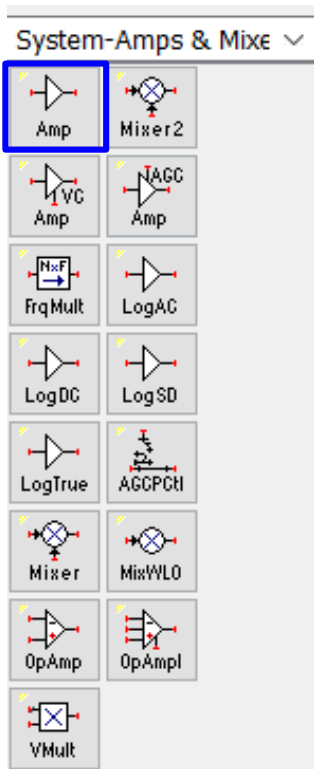
- Potência de saída para ganho comprimido de GainComp

Compressão de ganho

Modelo comportamental do amplificador - ADS

Menu

Systems-Amps & Mix



Amplifier2
AMP1

$S_{21}=\text{dbpolar}(20,0)$
 $S_{11}=\text{polar}(0,0)$
 $S_{22}=\text{polar}(0,180)$
 $S_{12}=0$

$P_{\text{sat}}=12.5$
 $\text{GainCompSat}=5.0 \text{ dB}$

$\text{GainCompPower}=10$
 $\text{GainComp}=1.0 \text{ dB}$

Parâmetros do modelo - exemplo

Saturação de ganho (5 dB usualmente)

GainCompSat

- Compressão de ganho na saturação
- Usualmente $\rightarrow 5 \text{ dB}$

P_{sat}

- Potência de saída para ganho comprimido de GainCompSat

Exemplo - parâmetros de amplificador de potência comercial

De 15 a 30 GHz
 $P_{sat} = +21$ dBm
 (GainCompSat = 5 dB)

Parâmetros de pequenos sinais
 (Região linear de operação)

S_{21} (dB) →
 S_{11} (dB) →
 S_{22} (dB) →
 S_{12} (dB) →

De 11 a 38 GHz
 $TOI = +19$ dBm (IP3)

De 11 a 38 GHz
 $P_{1dB} = +19$ dBm
 (GainCompSat = 1 dB)



3.5 Electrical Specifications⁷

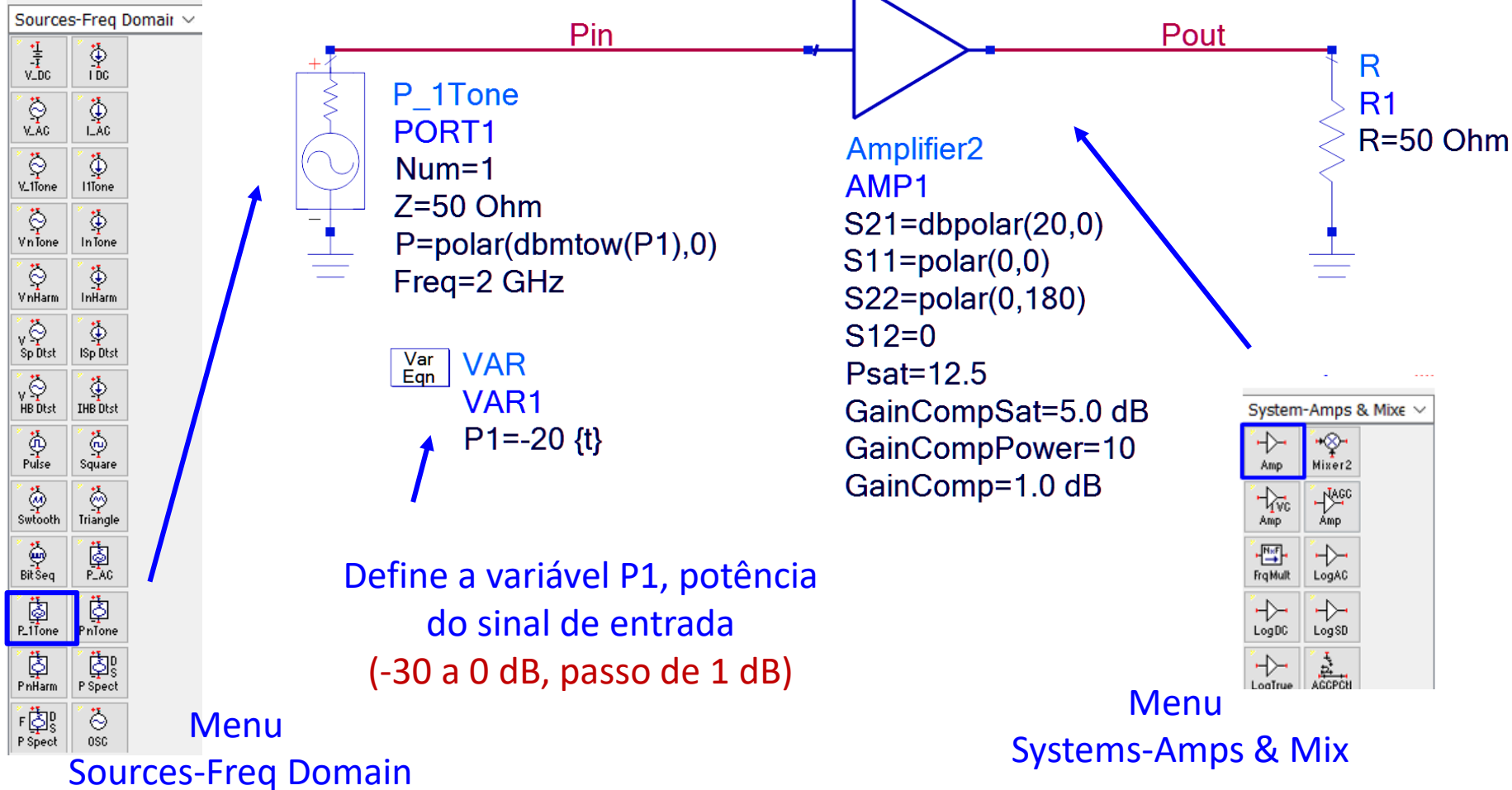
The electrical specifications apply at $T_A = +25^\circ\text{C}$ in a 50Ω system.

DFNs are 100% RF tested.

Parameter	Test Conditions	Frequency	Min	Typical	Units
Saturated Output Power ^a	3V/-0.5V bias	11 GHz – 15 GHz		+19	
		15 GHz – 30 GHz	+17	+21	dBm
		30 GHz – 38 GHz		+19	
Small Signal Gain	3V/-0.5V bias, -25 dBm Input Power	11 GHz – 15 GHz		20	dB
		15 GHz – 30 GHz	17	21	
		30 GHz – 38 GHz		17	
Input Return Loss		11 GHz – 38 GHz		16	
Output Return Loss		11 GHz – 38 GHz		13	
Reverse Isolation		11 GHz – 38 GHz		53	
Noise Figure	3V/-0.5V Bias	11 GHz – 38 GHz		5	
Drain Current ^a , Id	3V/-0.4V	-		230	mA
	3V/-0.5V	-		180	
	3V/-0.6V	-		130	
Input IP3 (IIP3)	3V/-0.5V bias, -20 dBm Input Power	11 GHz – 38 GHz		+11	dBm
Output IP3 (OIP3)		11 GHz – 38 GHz		+29	
Output P_{1dB}	3V/-0.5V bias	11 GHz – 38 GHz		+19	
Input Power for Saturation	3V/-0.5V bias	11 GHz – 38 GHz		+6	dBm

Simulação de Balanceamento Harmônico

Circuito a ser simulado



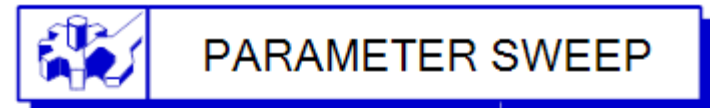
Esquemático: Amplificador_Compressão_de_Ganho

Simulação de Balanceamento Harmônico

Controles de simulação



HarmonicBalance
HB1
Freq[1]=2 GHz
Order[1]=5



ParamSweep
Pin
SweepVar="P1"
SimInstanceName[1]="HB1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=
Start=-30
Stop=0
Step=1



Menu
Simulation-HB

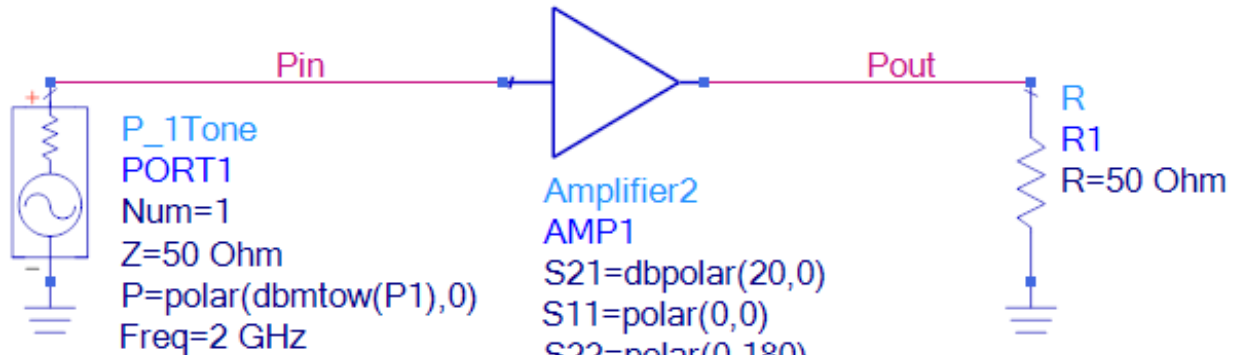
Define a simulação

- Frequência
- Número de harmônicas

Será usado para variar P1, a potência do sinal de entrada de -30 a 0 dBm

Simulação de Balanceamento Harmônico

Janela de esquemático da simulação



PARAMETER SWEEP

ParamSweep

Pin

SweepVar="P1" ←

SimInstanceName[1]="HB1" ←

SimInstanceName[2]=

SimInstanceName[3]=

SimInstanceName[4]=

SimInstanceName[5]=

SimInstanceName[6]=

→ Start=-30

→ Stop=0

→ Step=1

Var
Eqn
VAR
VAR1
P1=-20 {t}

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance

HB1

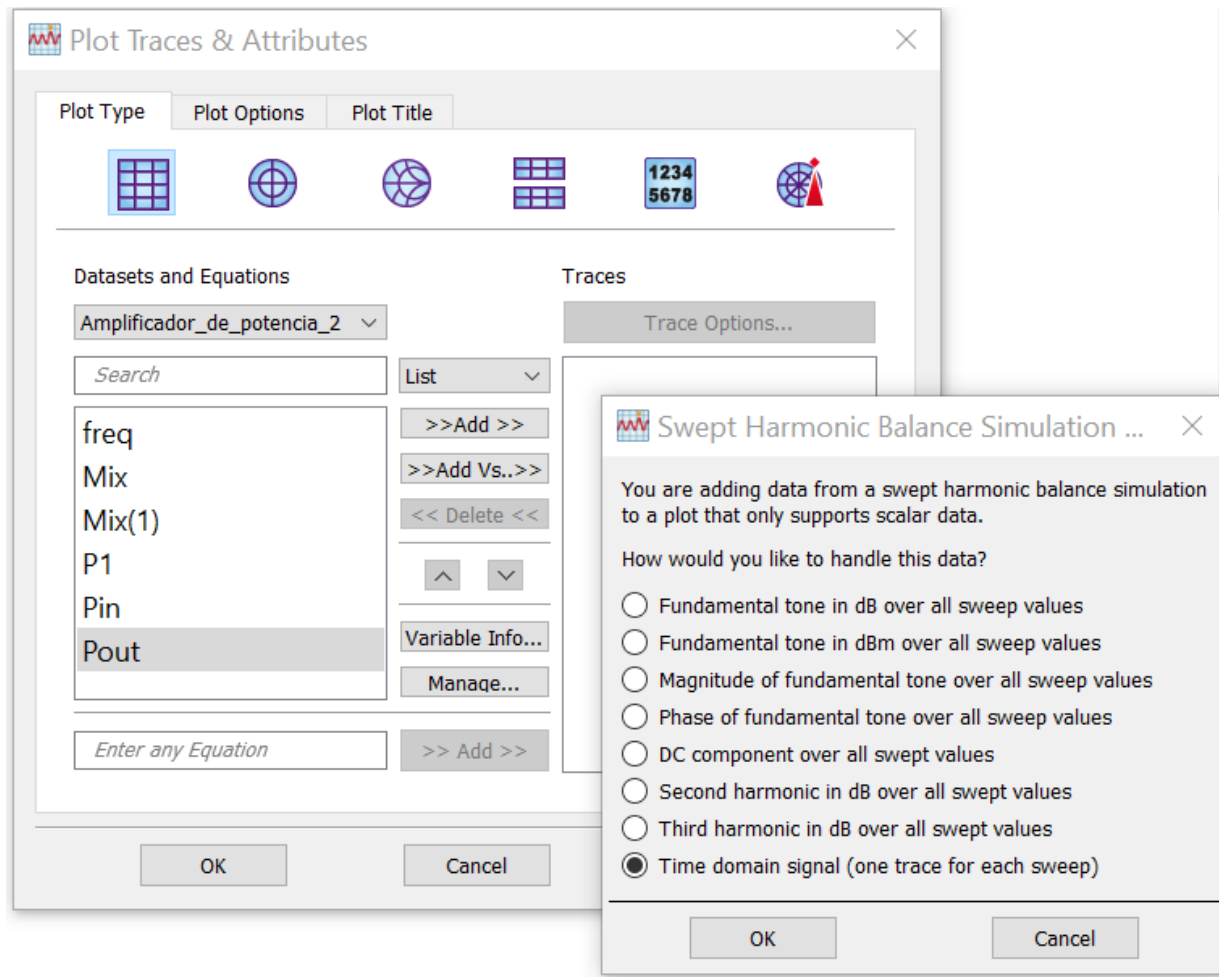
Freq[1]=2 GHz

Order[1]=5

Esquemático: Amplificador_Compressão_de_Ganho

Simulação de Balanceamento Harmônico

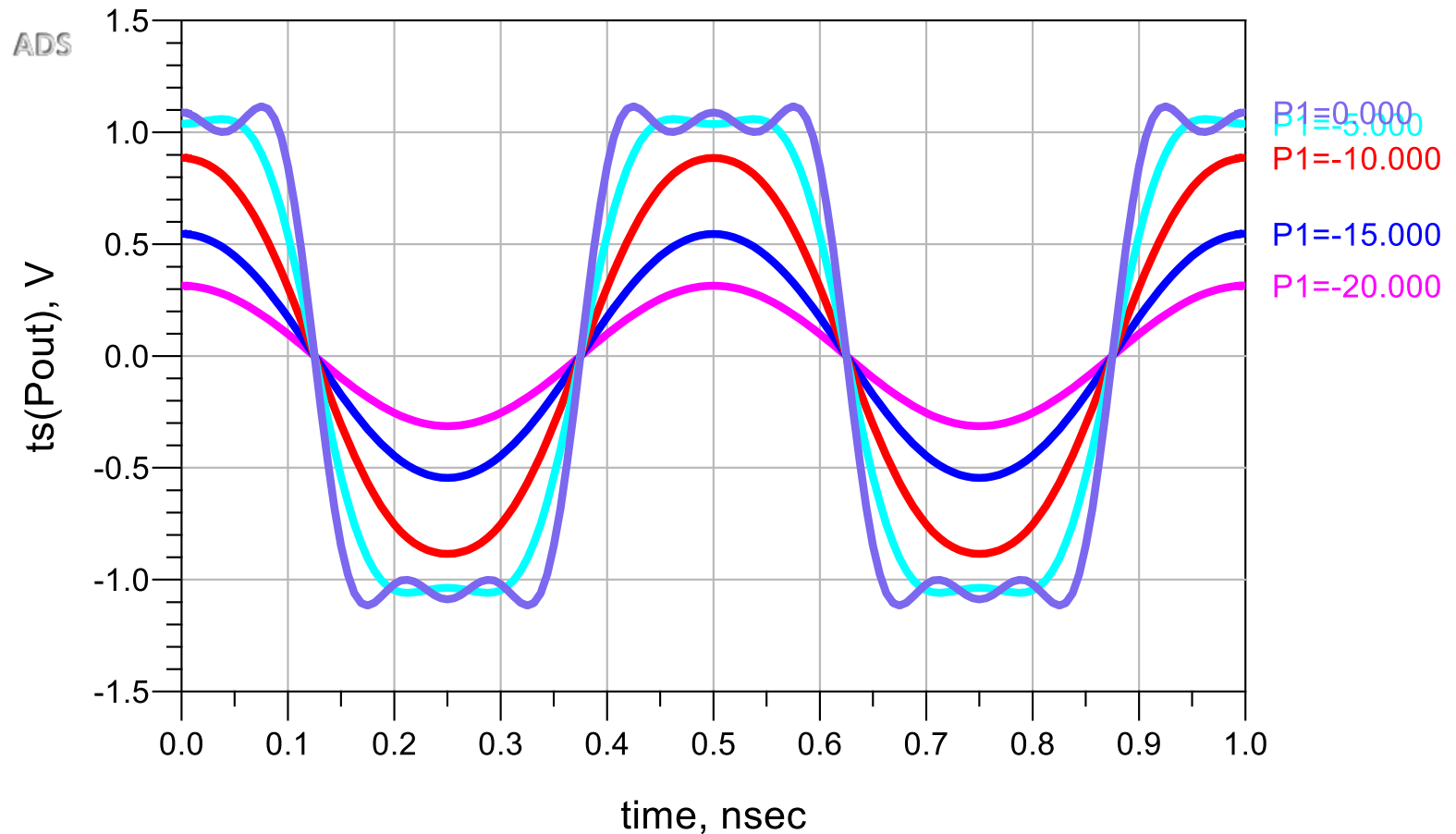
Resultado da simulação no domínio do tempo



Simulação de Balanceamento Harmônico

Sinal de saída no domínio do tempo

Potência de entrada: P1 = -20, -15, -10, -5 e 0 dBm

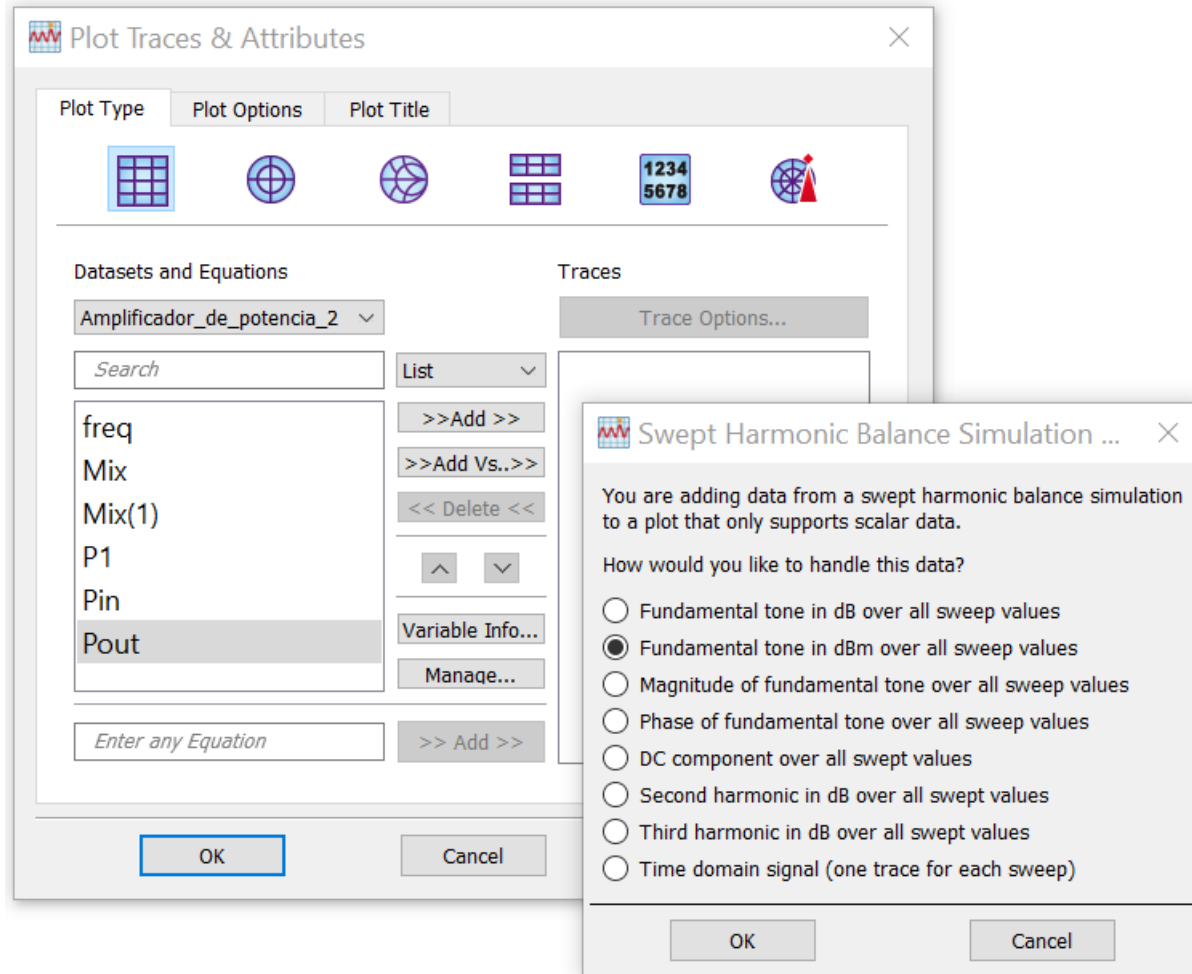


Simulação de Balanceamento Harmônico

Potência de saída x Potência de entrada

Potência de entrada: P1 = -30 a 0 dBm, com passo de 1 dB

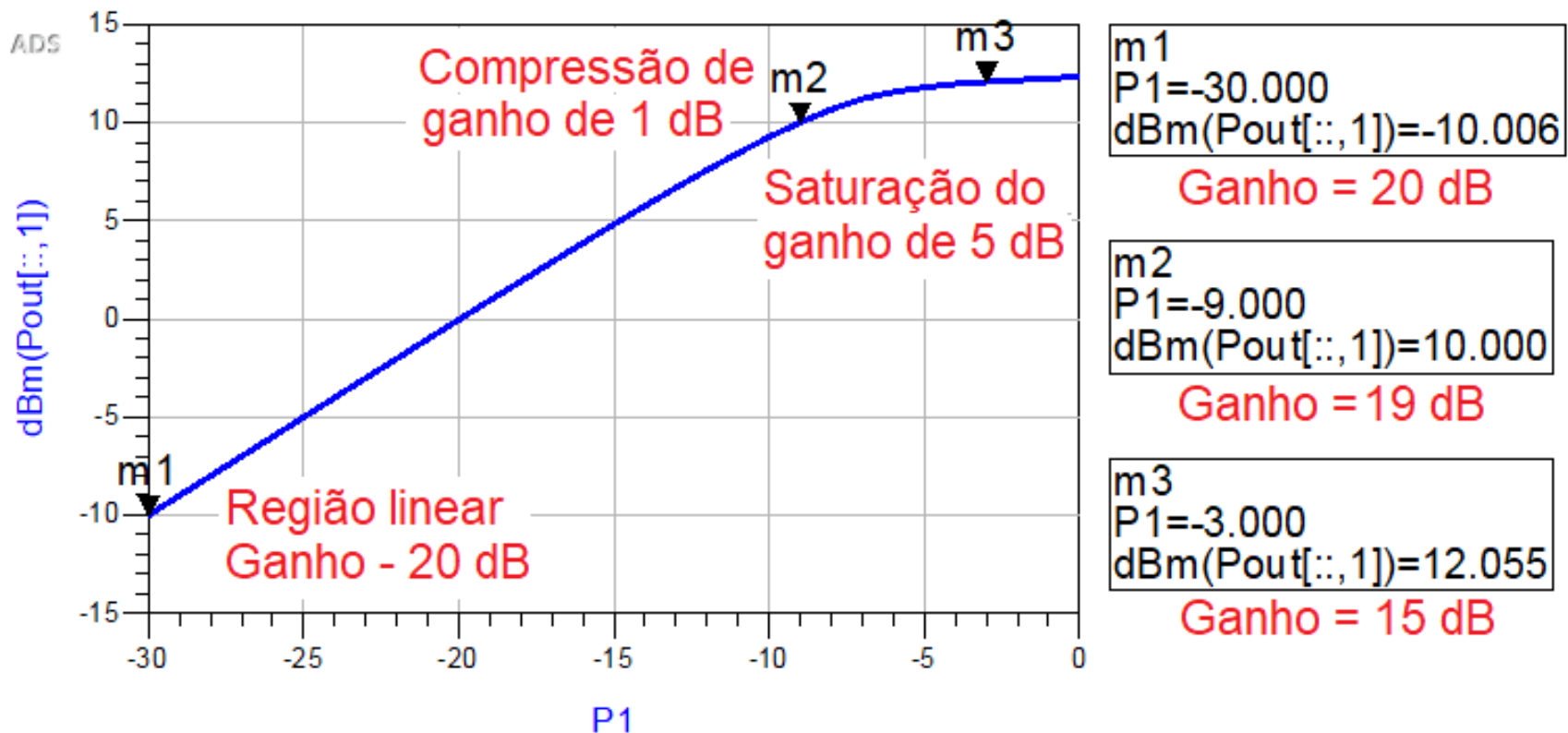
Pout
“Ad versus”
P1



Simulação de Balanceamento Harmônico

Potência de saída x Potência de entrada

Potência de entrada: $P_1 = -30$ a 0 dBm, com passo de 1 dB

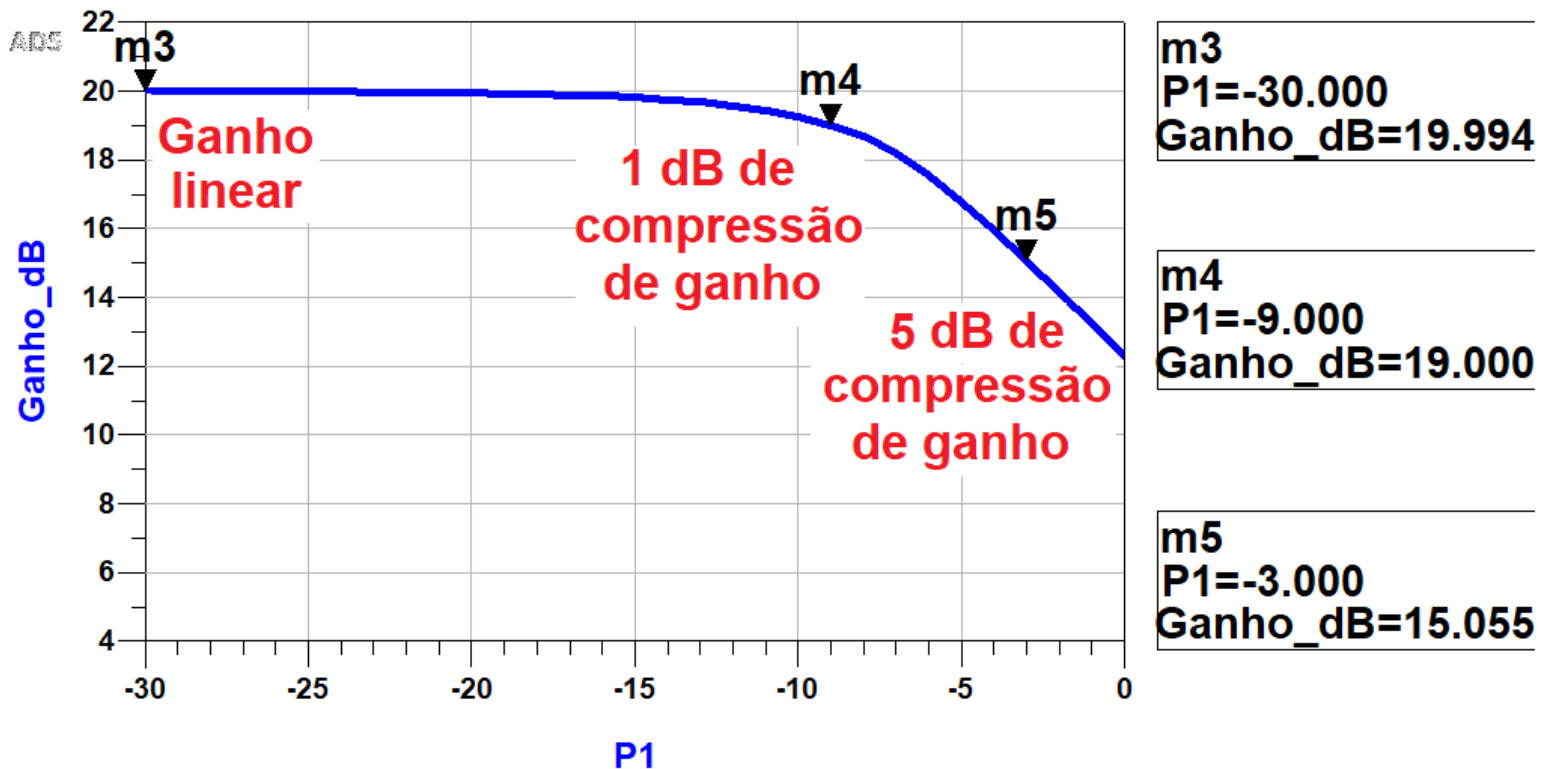


Simulação de Balanceamento Harmônico

Ganho x Potência de entrada

Potência de entrada: P1 = -30 a 0 dBm, com passo de 1 dB

Equação do ganho → $\text{Eqn } \text{Ganho_dB} = \text{dBm}(\text{Pout}[:,1]) - \text{P1}$

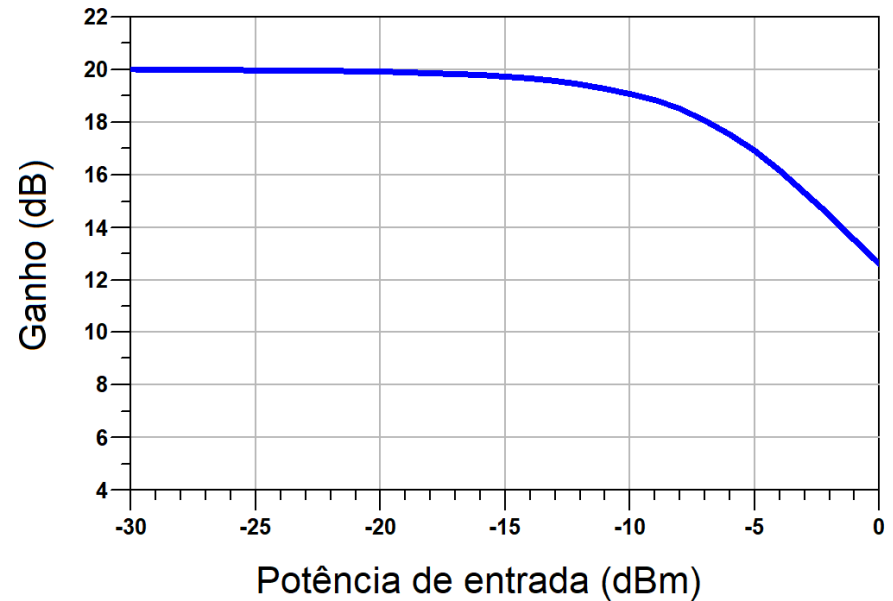
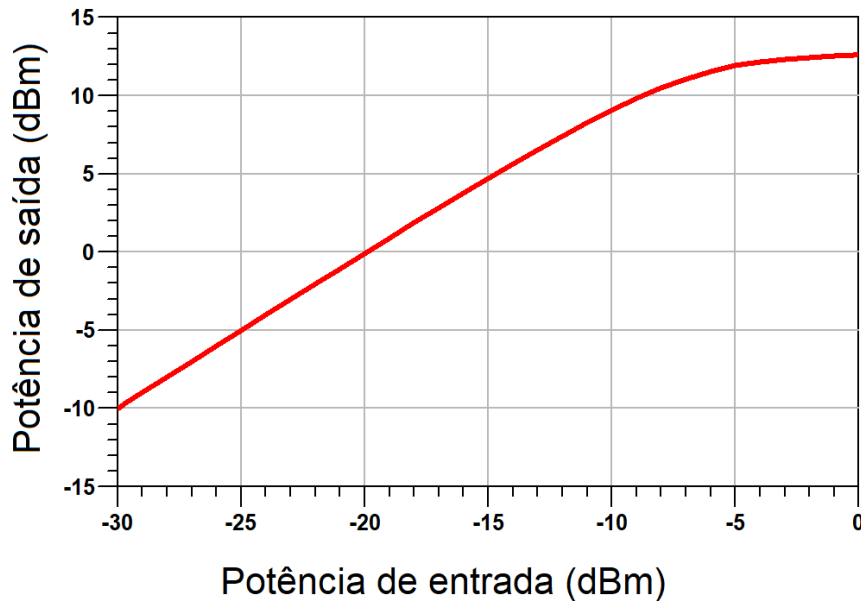


Simulação de Balanceamento Harmônico

Potência de saída x potência de entrada

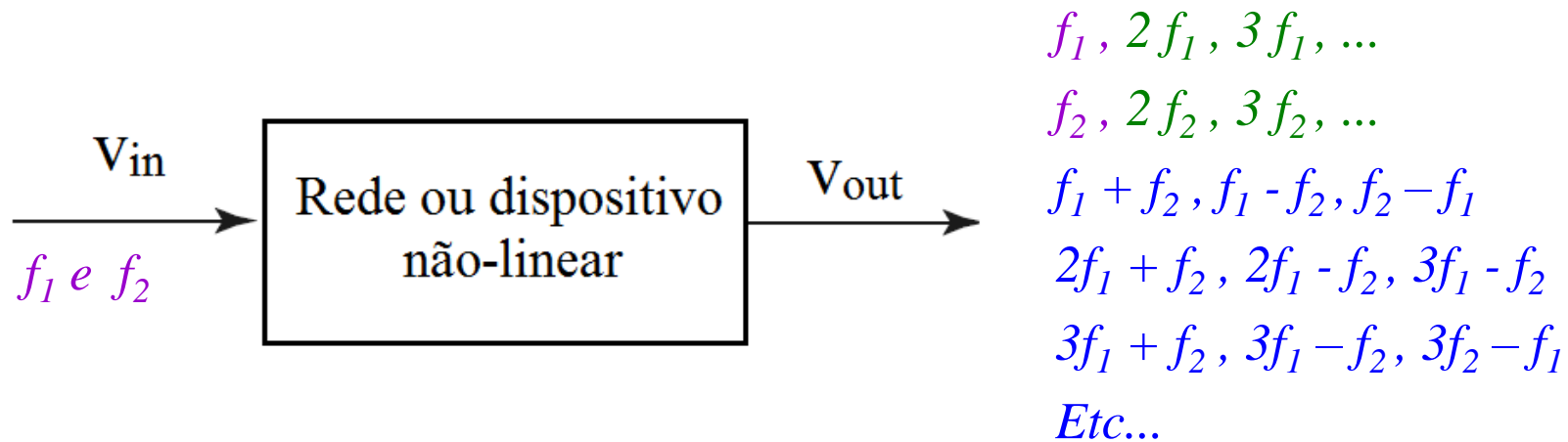
Ganho x Potência de entrada

Potência de entrada: $P_1 = -30$ a 0 dBm, com passo de 1 dB



Distorção não-linear

Rede ou dispositivo NÃO-LINEAR



Tensão de entrada

f_1 e f_2



Tensão de saída

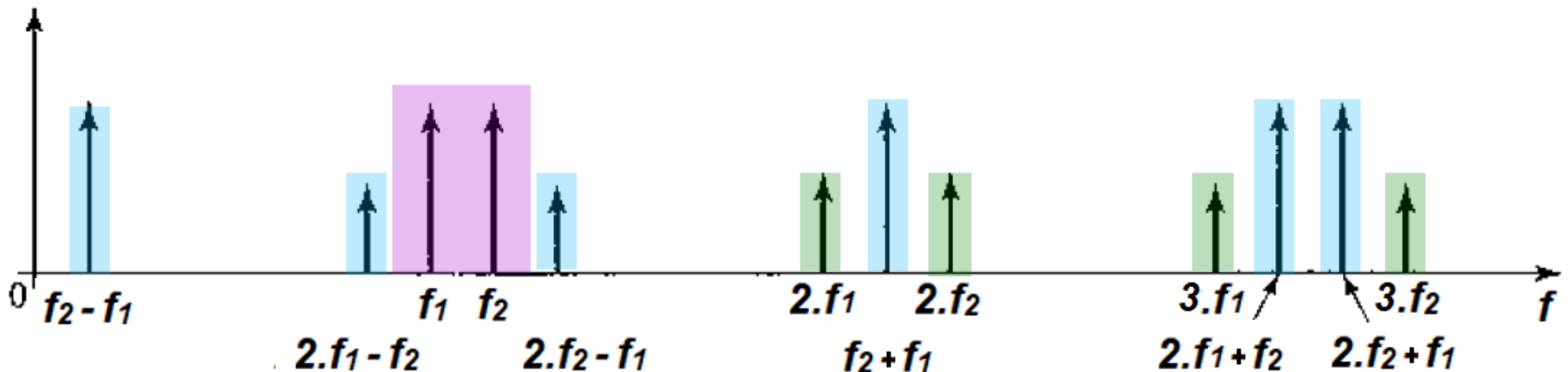
$m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2, \quad m, n = 0, 1, 2, 3 \dots$

- Espectro de frequências do sinal de saída
 - sinais de entrada
 - harmônicas dos 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 $\rightarrow |m| + |n|$

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

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

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

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

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

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

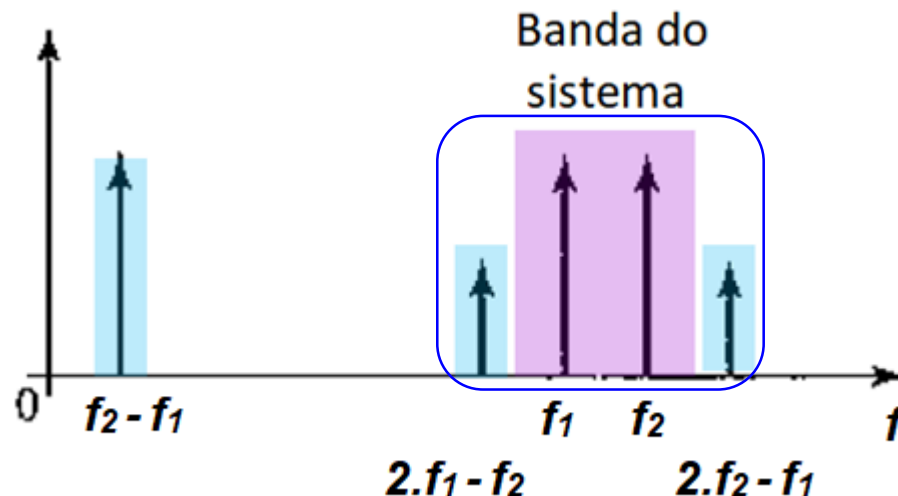
$$f_1 - f_2 \rightarrow m = 1 \text{ e } n = 1 \rightarrow \text{ordem } 2$$

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

Distorção não-linear

IP3 - Produto de Intermodulação de 3ª Ordem

- Caracteriza os produtos de intermodulação de 3ª ordem
 - Frequências de entrada f_1 e f_2 pertencem à banda de operação do sistema
 - Produtos de intermodulação de 3ª ordem $2.f_1 - 1.f_2$ e $2.f_2 - 1.f_1$ são frequências próximas às dos sinais de entrada
 - Difíceis de eliminar por filtragem, sem afetar a banda de operação
 - Amplitude deve ser baixa, atendendo a especificações do sistema



Distorção não-linear

Parâmetros de distorção não linear

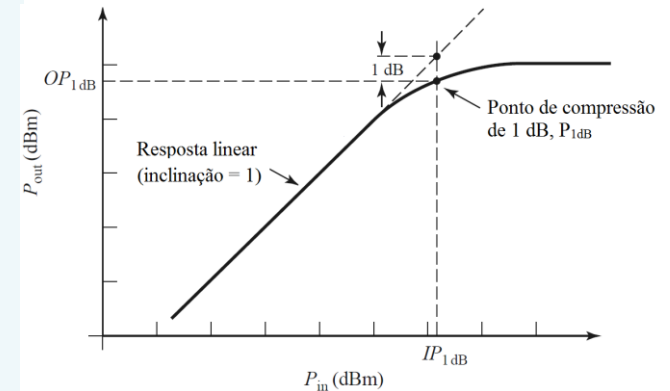
Compressão e saturação de ganho

P_{1dB} - Potência de compressão de ganho de 1 dB

- Nível de potência que faz o ganho cair de 1 dB

P_{sat} - Potência de saturação de ganho

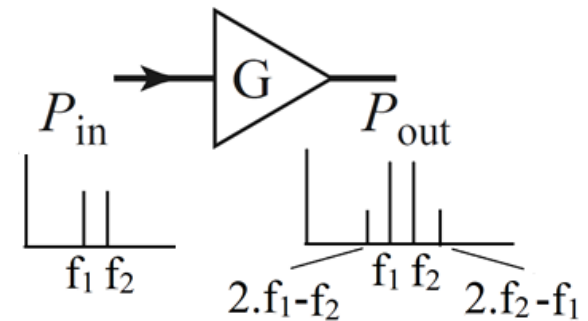
- Nível de potência que reduz fortemente o ganho, usualmente em 5 dB



Produtos de intermodulação

IP_3 – Ponto de intercepção de terceira ordem

- Cálculo de produtos de intermodulação de terceira ordem em função da potência de entrada

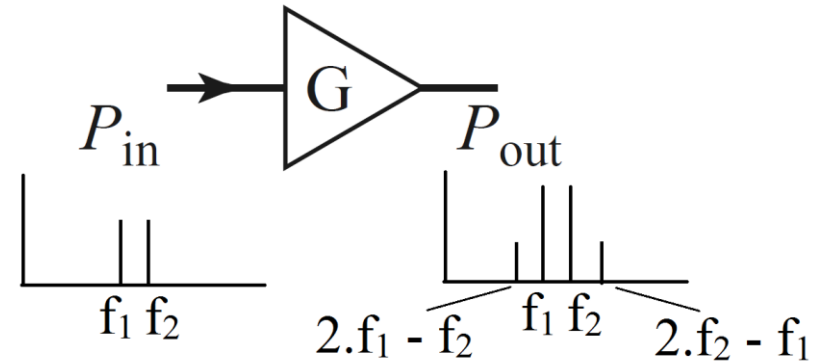


Distorção não-linear

Produto de intermodulação de 3ª. Ordem

IP3 – Ponto de intercepção de 3ª. ordem

- Determinação experimental do IP_3
 - Alimenta-se o dispositivo com
 - Dois tons próximos, f_1 e f_2
(Exemplo: 10,00 GHz e 10,01 GHz)
 - 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 $2.f_2 - f_1$
 - Em um mesmo gráfico traça-se as curvas $P_{out} \times P_{in}$ das
 - de f_1 e f_2
 - de $2.f_1 - f_2$ e $2.f_2 - f_1$



Distorção não-linear

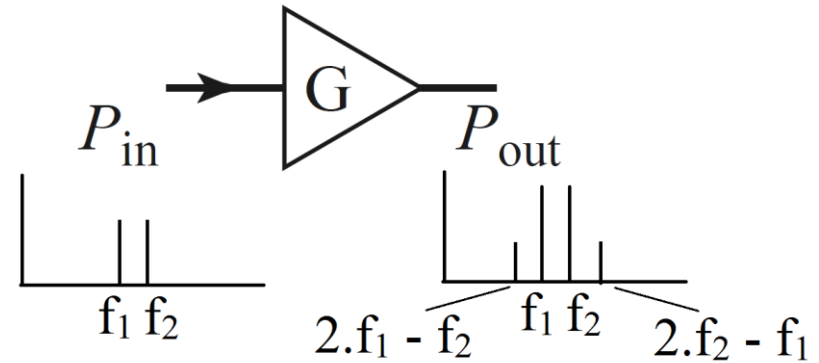
Produto de intermodulação de 3ª. Ordem

IP3 – Ponto de intercepção de 3ª. ordem

- Determinação experimental do IP_3

- Exemplo

$$\begin{array}{l} f_1 = 10,00 \text{ GHz} \\ f_2 = 10,01 \text{ GHz} \end{array} \quad \rightarrow \quad \begin{array}{l} 2.f_1 - f_2 = 9,99 \text{ GHz} \\ 2.f_2 - f_1 = 10,02 \text{ GHz} \end{array}$$



- Amplitude dos tons de entrada
 - De valores de pequenos sinais
 - Até compressão do ganho

- Mede-se na saída a amplitude de
 - f_1 e f_2
 - $2.f_1 - f_2$ e $2.f_2 - f_1$

- Na região linear traça-se as retas de potência de saída x potência de entrada
 - $(f_1$ e $f_2)$ → reta com inclinação **1**
 - $(2.f_1 - f_2$ e $2.f_2 - f_1)$ → reta com inclinação **3**

Simulação de Balanceamento Harmônico

Simulação não linear do amplificador usando P_{1dB} e I_{P3}

Validade do modelo: $IP_3 > P_{1dB} + 10,8$ (dBm)

Sources-Freq Domain

V_DC I_DC
 V_AC I_AC
 V_Tone I_Tone
 V_nTone In_Tone
 V_nHarm InHarm
 V_SpDtst I_SpDtst
 V_HB Dtst IHB Dtst
 Pulse Square
 Swooth Triangle
 BitSeq P_AC
P_nTone
 P_nHarm P_Spect
 F_D S P_Spect OSC

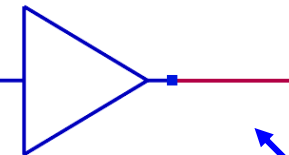
P_nTone
PORT1
 Num=1
 Z=50 Ohm
 Freq[1]=10 GHz
 Freq[2]=11 GHz
 P[1]=polar(dbmtow(P1),0)
 P[2]=polar(dbmtow(P1),0)

Defina

- Frequências de entrada
- Potências de entrada

Menu

Sources-Freq Domain



Amplifier2
AMP1
 S21=dbpolar(20,0)
 S11=polar(0,0)
 S22=polar(0,180)
 S12=0
 SOI=
 TOI=29 ← IP_3
 GainCompPower=18 ← P_{1dB}
 GainComp=1.0 dB

Menu

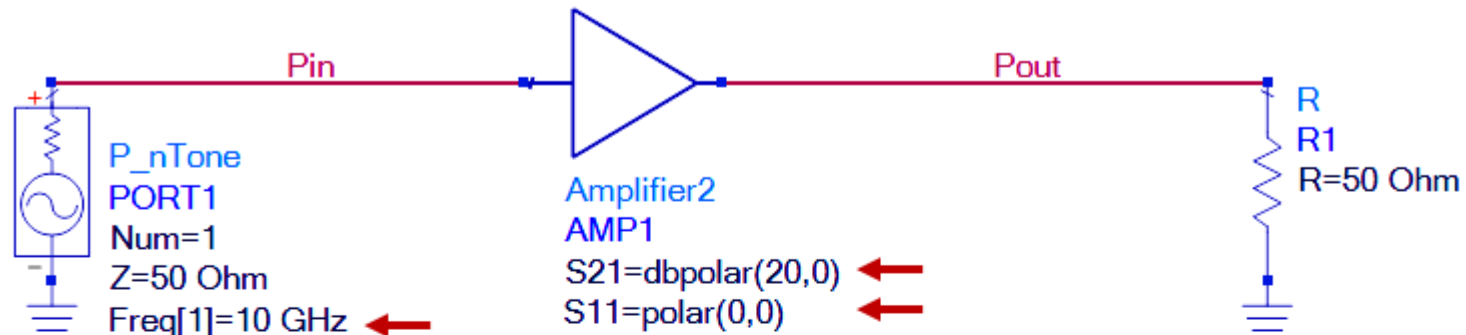
Systems-Amps & Mix

System-Amps & Mixe

Amp Mixer2
 VCA Amp
 NAGC
 Frq Mult LogAC
 LogDC LogSD
 Load True AGCPGH

Simulação de Balanceamento Harmônico

Simulação não linear do amplificador usando P_{1dB} e I_{P2}



HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
 HB1
 Freq[1]=10 GHz
 Freq[2]=11 GHz
 Order[1]=5
 Order[2]=5

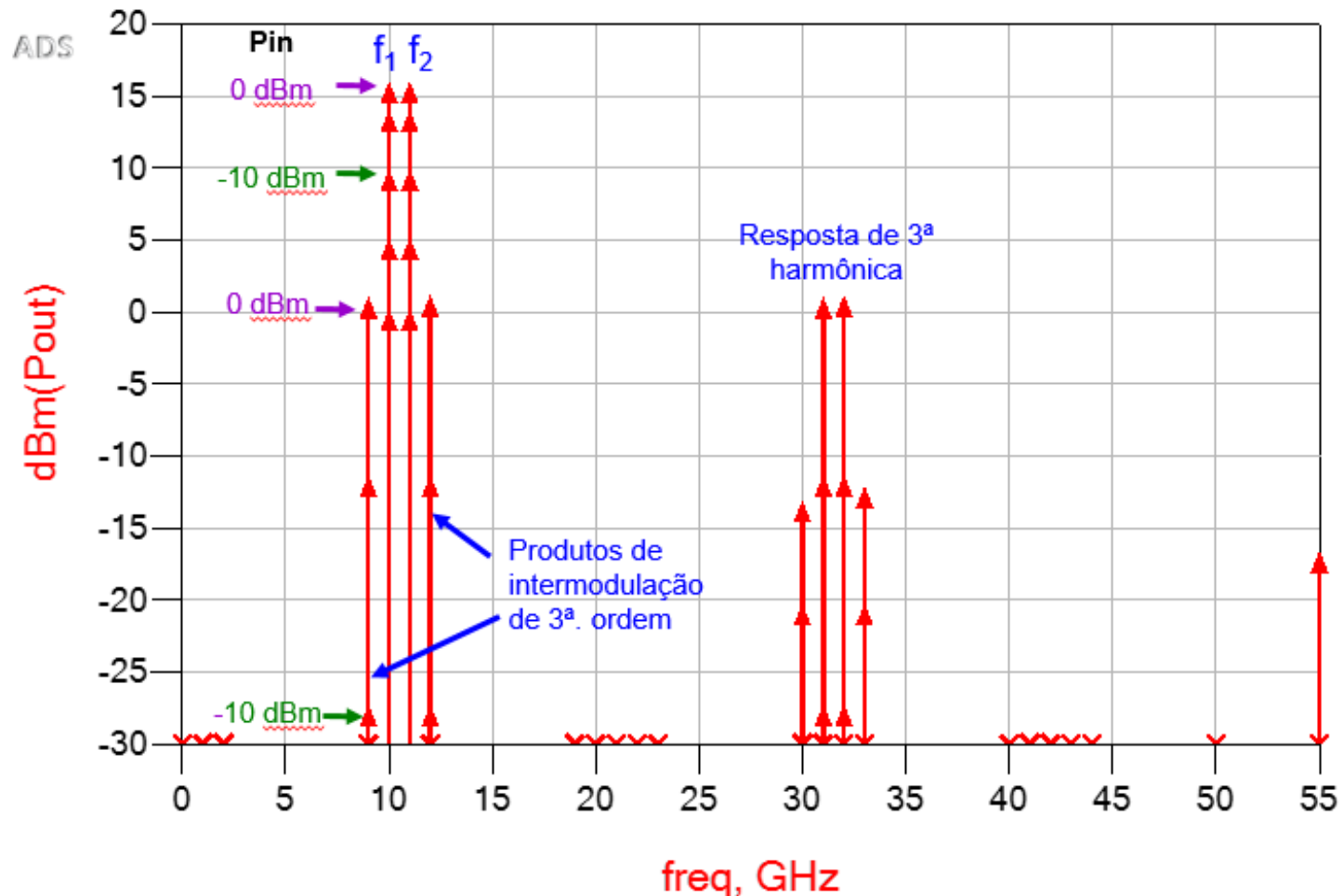
Var Eqn
 VAR
 VAR1
 P1=-20

PARAMETER SWEEP

ParamSweep
 Pin
 SweepVar="P1"
 SimInstanceName[1]="HB1"
 SimInstanceName[2]=
 SimInstanceName[3]=
 SimInstanceName[4]=
 SimInstanceName[5]=
 SimInstanceName[6]=
 Start=-20
 Stop=0
 Step=5

Simulação de Balanceamento Harmônico

Simulação não linear do amplificador usando P_{1dB} e I_{P3}



Distorção não-linear

Conversor de frequência – modelo comportamental

Denominações usuais

- Conversor de frequência
- Misturador de frequência
- *Frequency converter*
- *Frequency Mixer*

Símbolo do conversor de frequência



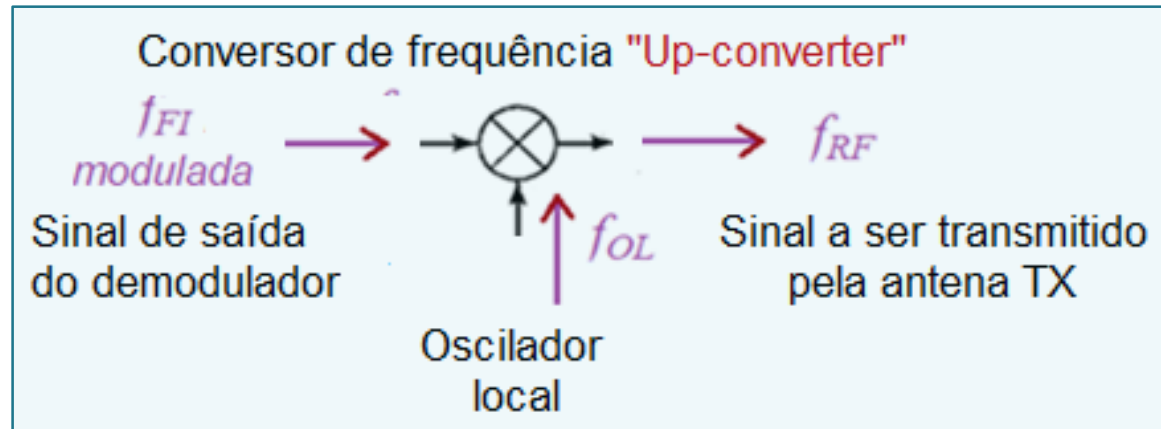
- Duas entradas
- Uma saída

Aplicação em sistemas de micro-ondas

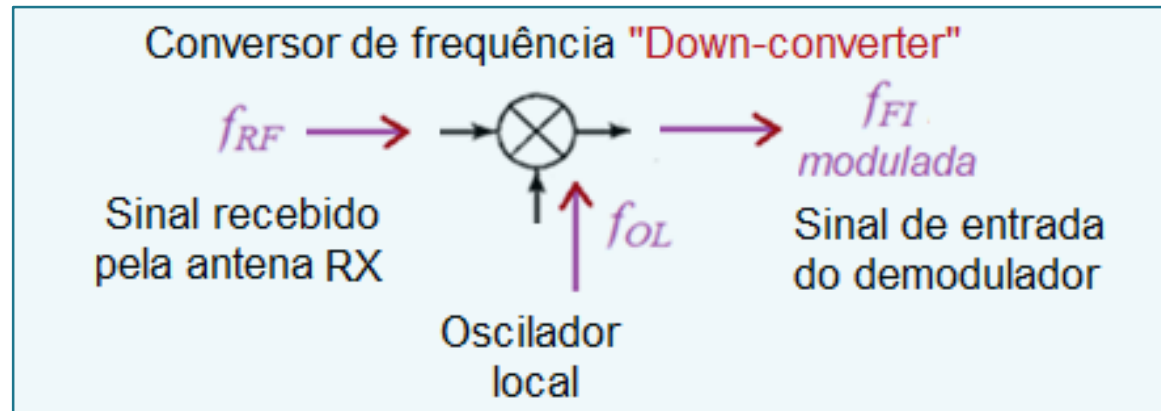
- No transmissor → MIX TX → “Up-converter”
- No receptor → MIX RX → “Down-converter”

Conversores de frequência

Conversor de frequência do TRANSMISSOR



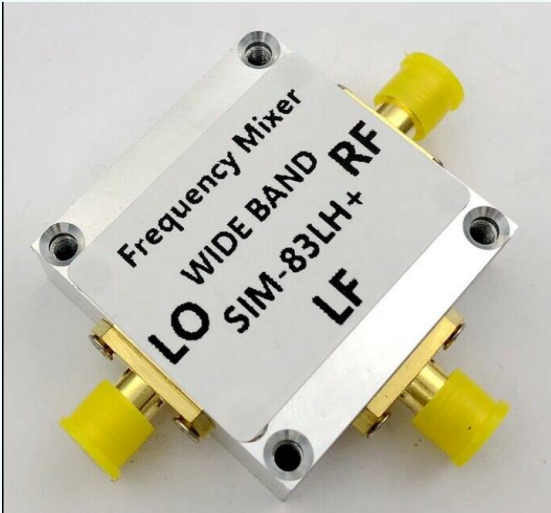
Conversor de frequência do RECEPTOR



- O conversor de frequência → “up” ou “down converter”
- Depende dos sinais conectados a suas entradas

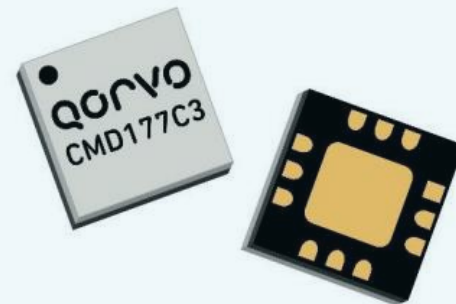
Conversores de frequência

Exemplos de conversores de frequência comerciais



- O conversor de frequência em caixa metálica, com conectores coaxiais

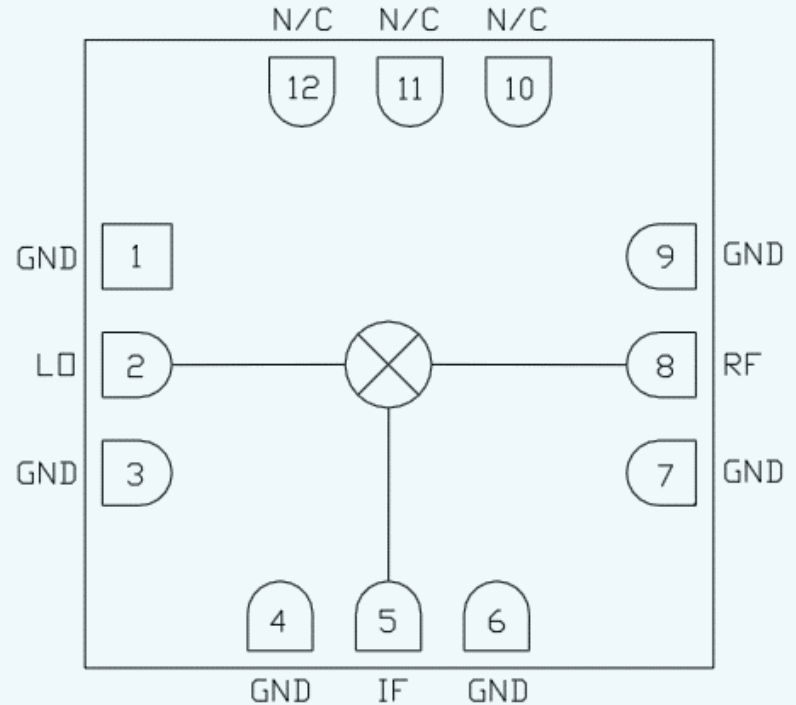
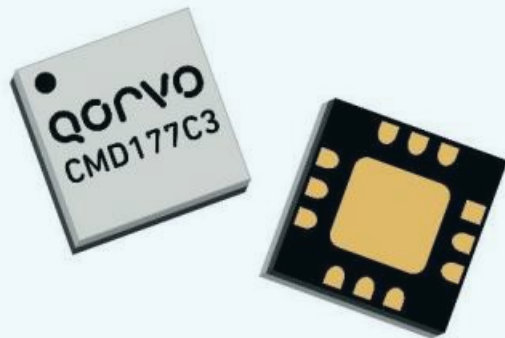
- O conversor de frequência para montagem SMD



Conversores de frequência

Exemplo de “data sheet” de conversores de frequência comerciais

Foto do empacotamento do conversor de frequência

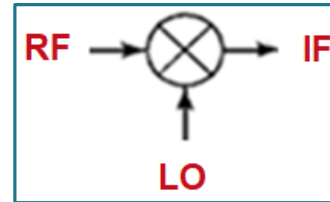


Indicação das portas de entrada e de saída do conversor de frequência

Conversores de frequência

Exemplo de “data sheet” de conversores de frequência comerciais

Especificações do conversor de frequência



Perda de conversão (dB)
 $P_{RF}(\text{dBm}) - P_{IF}(\text{dBm})$

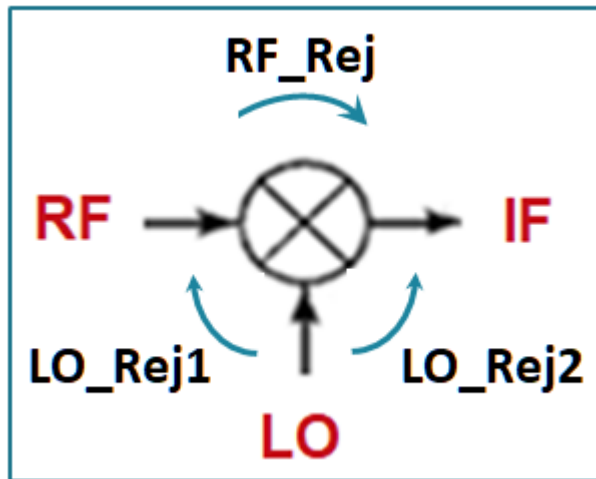
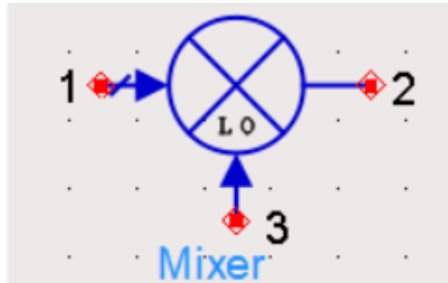
Parameter	Min	Typ	Max	Units
Frequency Range, RF & LO		6 - 14		GHz
Frequency Range, IF	DC		5	GHz
Conversion Loss		7	10	dB
Noise Figure (SSB)		7	10	dB
LO to RF Isolation	34	43		dB
LO to IF Isolation	28	37		dB
RF to IF Isolation	12	22		dB
Input P1dB		9.5		dBm
Input IP3		16		dBm

- Banda de LO e RF
- Banda de FI
- Perda de conversão
 $P_{in}(\text{dBm}) - P_{out}(\text{dBm})$
- Figura de ruído
- } Isolação entre portas
 Ideal → infinito
- } IIP1dB: $IP_{1\text{dB}}$ na entrada
- } IIP3: IP_3 na entrada

Conversores de frequência

Modelo comportamental do conversor de frequência no ADS

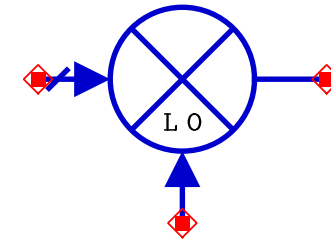
Símbolo



Modelo comportamental com dados do conversor de frequência do slide anterior

Ganho de conversão

$$P_{FI} - P_{RF}$$



Mixer
MIX1

SideBand=BOTH

ImageRej=

LO_Rej1=43 dB

LO_Rej2=37 dB

RF_Rej=22 dB

ConvGain=dbpolar(-7,0)

S11=polar(0,0)

S22=polar(0,180)

S33=0

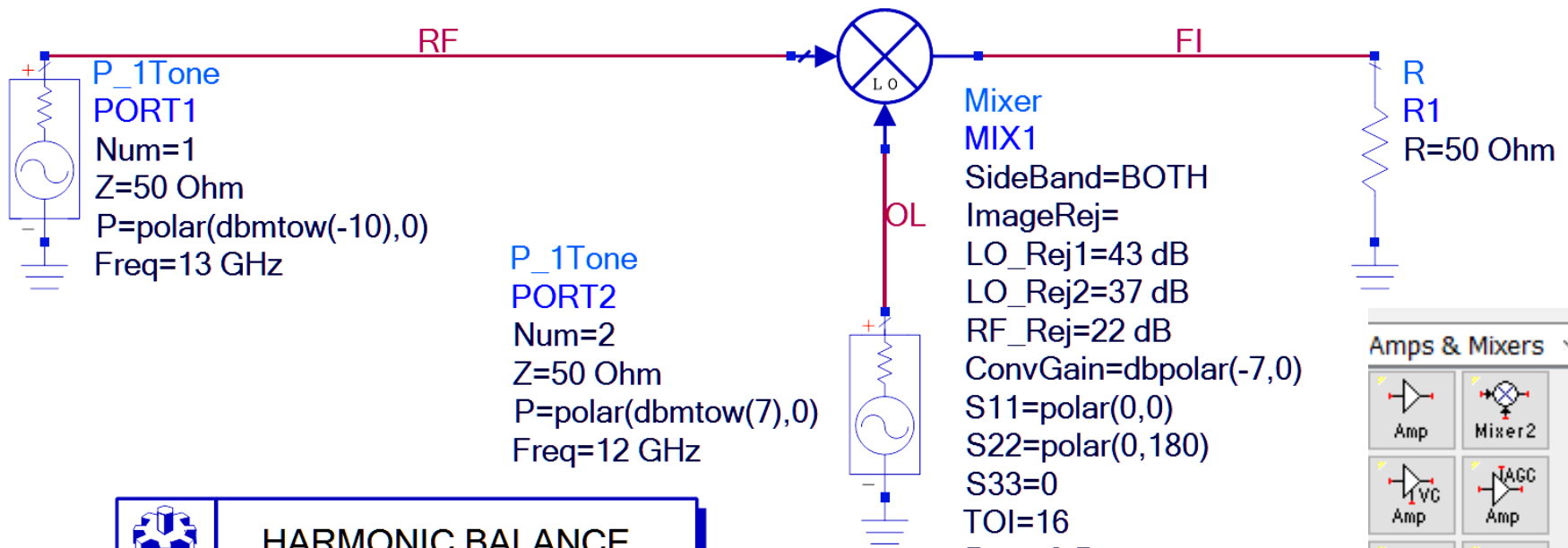
TOI=16

GainCompPower=9.5

GainComp=1.0 dB

Esquemático: Mixer_e_Filtro

Simulação do conversor de frequência no ADS



HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance

HB1

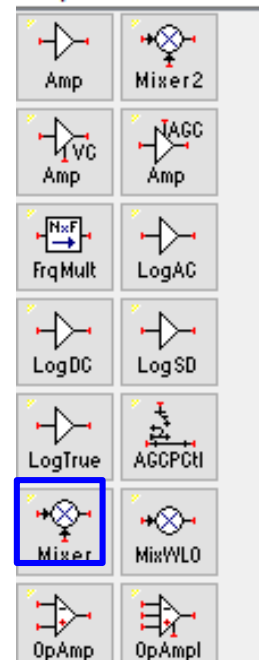
Freq[1]=12 GHz

Freq[2]=13 GHz

Order[1]=5

Order[2]=5

Amps & Mixers

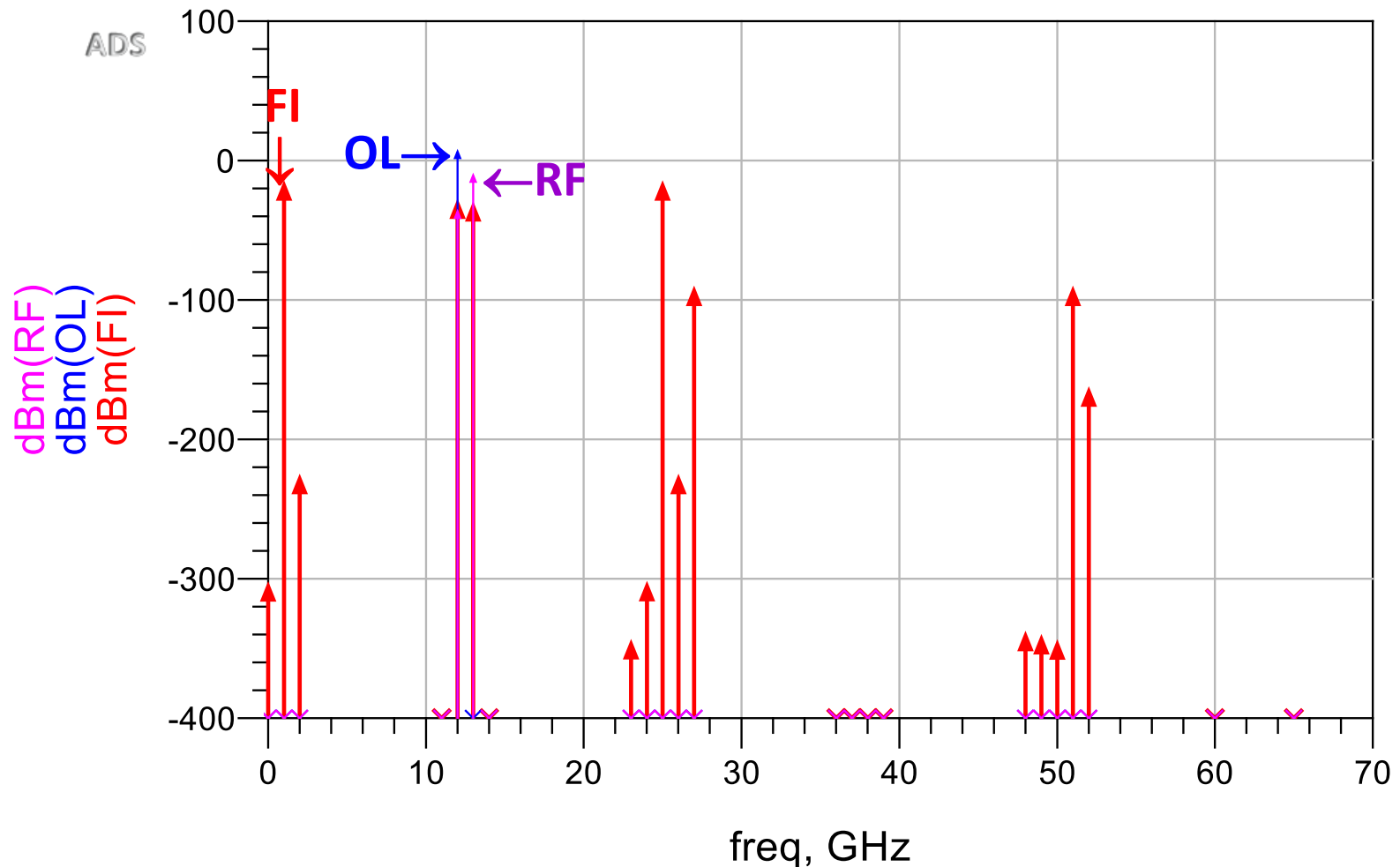


Menu

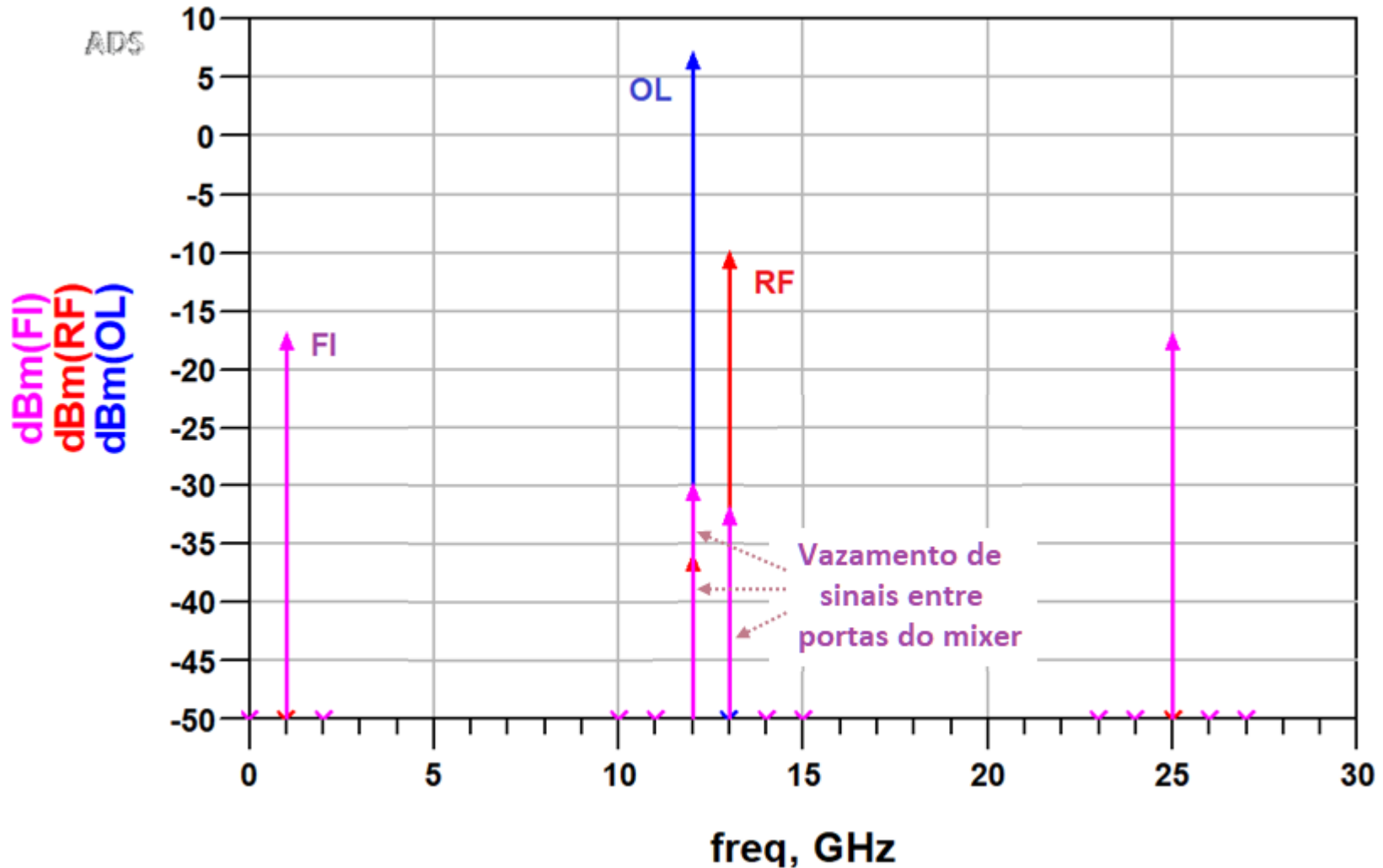
System-Amps & Mixers

Esquemático: Mixer_e_Filtro

Simulação do conversor de frequência no ADS

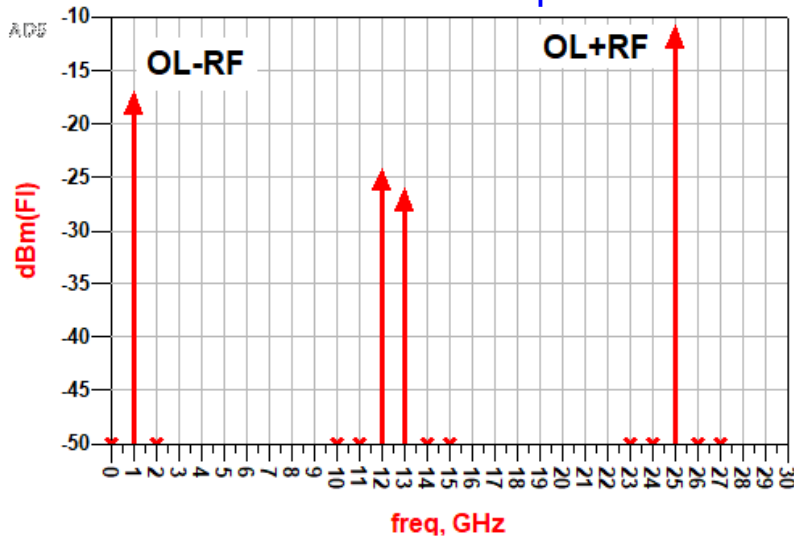


Simulação do conversor de frequência no ADS

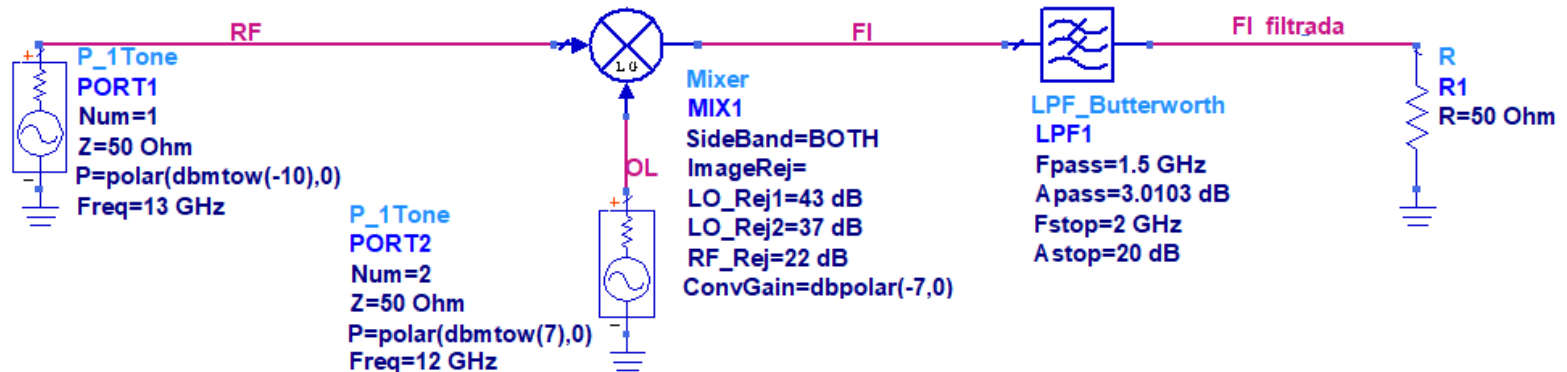
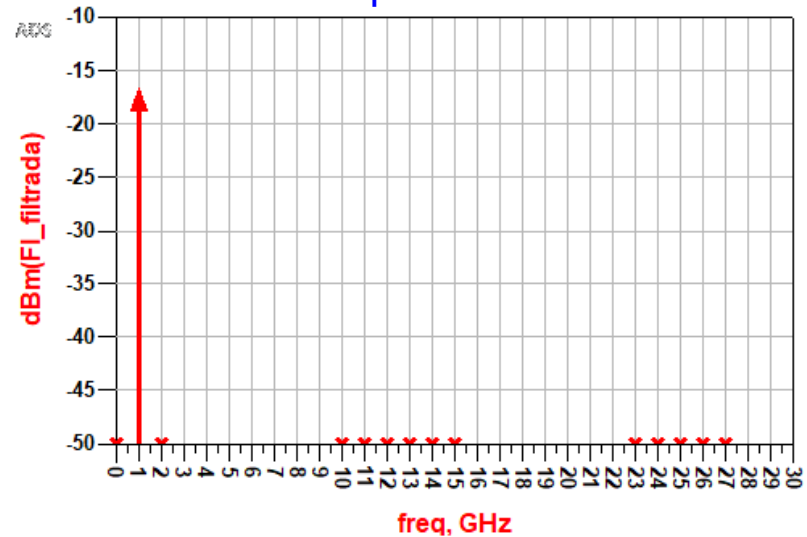


Simulação do conversor de frequência no ADS

Espectro de frequência na saída do conversor de frequência



Espectro de frequência na saída do filtro passa-baixa



Distorção não-linear

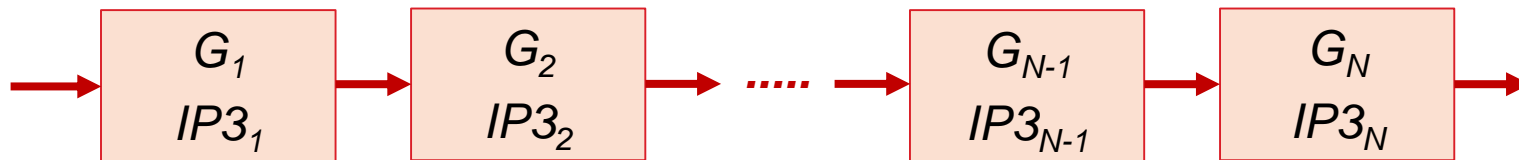
Análise de distorção não-linear do sistema

- Parâmetros fornecidos pelo fabricante dos circuitos ativos
 - G – ganho linear (sem saturação)
 - IP3 - Produto de intermodulação de 3ª ordem
 - P_{1dB} - Potência de compressão de ganho de 1 dB
 - P_{sat} - Potência de saturação de ganho
- Simulação computacional do sistema
 - Simulações não-lineares (Harmonic Balance e Budget)
 - Circuito esquemático do transmissor ou receptor
 - Modelos comportamentais dos componentes
 - Com as especificações dos fabricantes

Distorção não-linear

Análise de distorção não-linear do sistema

- Equações de ganho linear e IP3 de uma cascata de componentes
- Sem descasamento de impedância entre os blocos



$$G = G_1 \cdot G_2 \cdots G_{N-1} \cdot G_N$$

$$G(dB) = G_1(dB) + G_2(dB) \dots + G_{N-1}(dB) + G_N(dB)$$

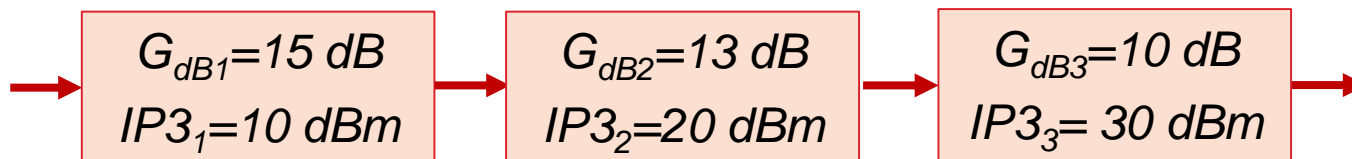
$$IP3 = \left(\frac{1}{IP3_N} + \frac{1}{IP3_{N-1} \cdot G_N} + \dots + \frac{1}{IP3_2 \cdot G_N \dots G_3} + \frac{1}{IP3_1 \cdot G_N G_{N-1} \dots G_2} \right)^{-1} \text{ em } mW$$

$$IP3(dBm) = 10 \log(IP3) \text{ em } dBm$$

Distorção não-linear

Exemplo de cálculo de IP_3 e ganho de amplificador de três estágios

- Usualmente: dados dos amplificadores em decibéis
 - Ganhos em dB
 - IP_3 em eBm

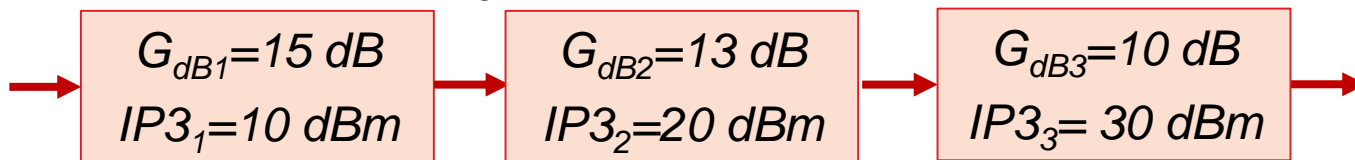


- Equação para cálculo do IP_3 da cascata de amplificadores
 - Ganho adimensional $\rightarrow G_1, G_2$ e G_3 adimensionais
 - IP_3 em mW $\rightarrow IP_{3_1}, IP_{3_2}$ e IP_{3_3} em mW

$$IP_3 = \left(\frac{1}{IP_{3_3}} + \frac{1}{IP_{3_2} \cdot G_3} + \frac{1}{IP_{3_1} \cdot G_3 \cdot G_2} \right)^{-1} \text{ em mW}$$

Distorção não-linear

Exemplo de cálculo de IP_3 e ganho de amplificador de três estágios

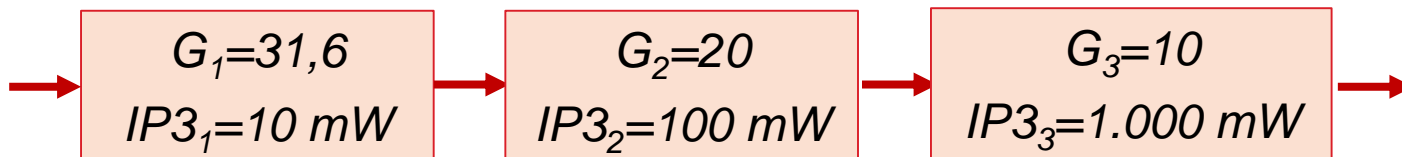


$$G_{dB} = 10 \cdot \log G$$

$$IP3(dBm) = 10 \cdot \log(IP3(mW)/1 mW)$$

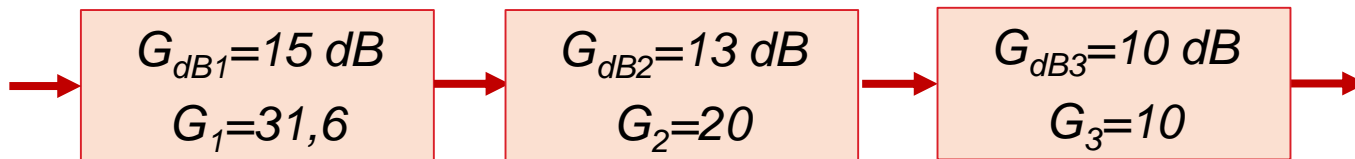
	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
G_{dB}	15 dB	13 dB	10 dB
$G=10^{G_{dB}/10}$	31,6	20	10

	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
IP3 (dBm)	10 dBm	20 dBm	30 dBm
$IP3=10^{IP3(dBm)/10}$	10 mW	100 mW	1.000 mW



Distorção não-linear

- Cálculo do ganho total em pequenos sinais (sem saturação)



- Ganho total em dB

$$G(dB) = G_{dB1} + G_{dB2} + G_{dB3} = 15 + 13 + 10 = 38\text{ dB}$$

- Ganho total linear

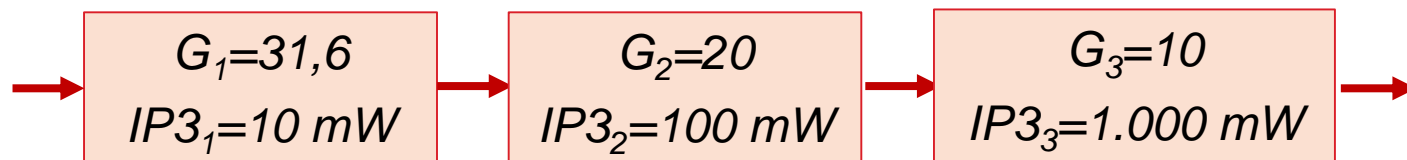
$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 31,6 \times 20 \times 10 = 6.320$$

- Conferindo...

$$G(dB) = 10 \cdot \log G = 10 \cdot \log 6.320 = 38\text{ dB}$$

Distorção não-linear

- Cálculo do IP3 de um amplificador de três estágios



- IP3 em mW
$$IP3 = \left(\frac{1}{IP3_3} + \frac{1}{IP3_2 \cdot G_3} + \frac{1}{IP3_1 \cdot G_2 \cdot G_3} \right)^{-1} =$$

$$IP3 = \left(\frac{1}{1.000} + \frac{1}{100 \times 10} + \frac{1}{10 \times 10 \times 20} \right)^{-1}$$

$$IP3 = (0,001 + \boxed{0,001} + 0,0005)^{-1}$$

$$IP3 = (0,0025)^{-1} = 400 \text{ mW}$$

O segundo estágio reduziu muito o IP3 total.
Deve ser trocado por um amplificador com IP3₂ maior

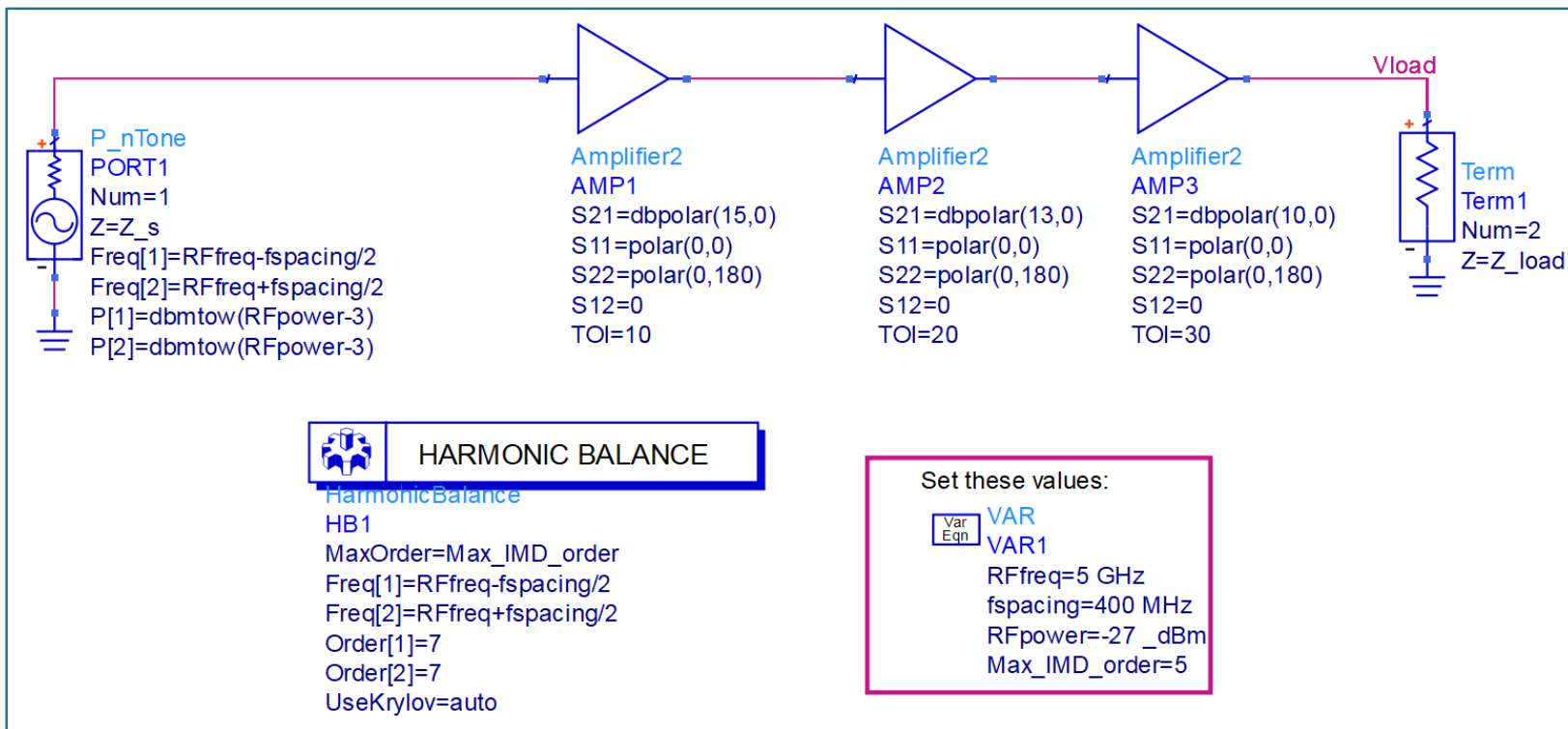
- IP3 em dBm

$$IP3(dBm) = 10 \log(IP3) = 26,02 \text{ dBm}$$

Distorção não-linear

Simulação não-linear de amplificador de três estágios no ADS

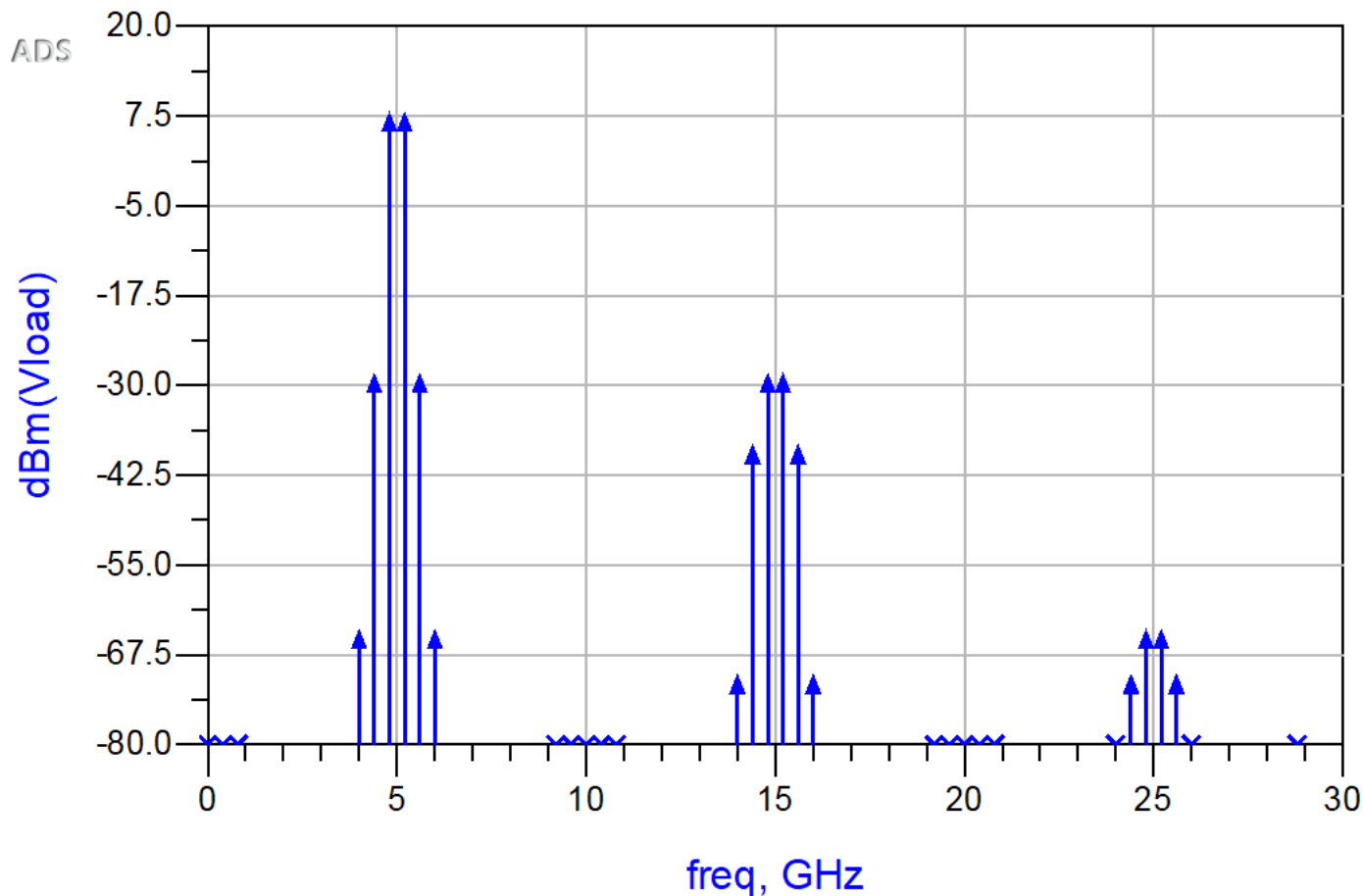
- Modelo comportamental do amplificador: Ganho \rightarrow S21(dB)
IP3 em dBm \rightarrow TOI
- Entrada: dois tons de 4,8 GHz e 5,2 GHz



Distorção não-linear

Simulação não-linear de amplificador de três estágios no ADS

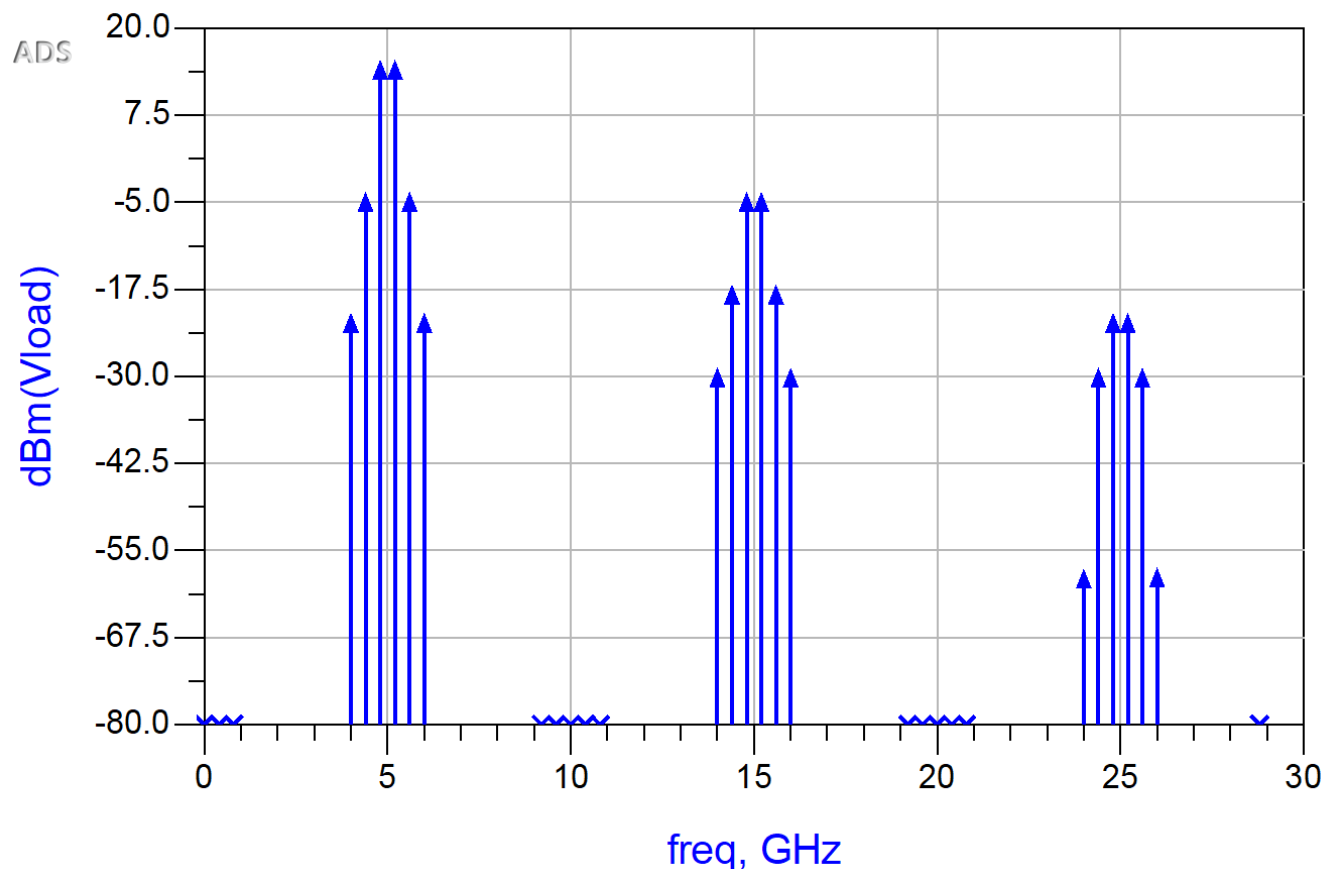
- Espectro do sinal de saída com tons de entrada com -30 dBm cada



Distorção não-linear

Simulação não-linear de amplificador de três estágios no ADS

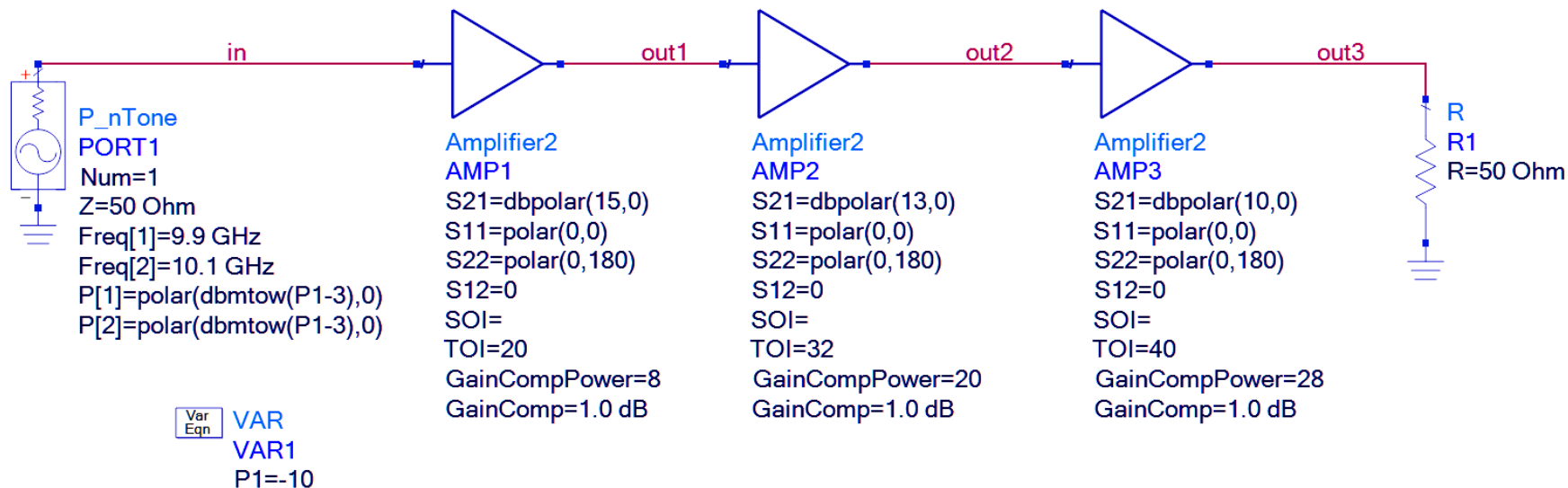
- Espectro do sinal de saída com tons de entrada com -20 dBm cada




Distorção não-linear

Simulação não-linear de amplificador de três estágios no ADS

- Modelo comportamental do amplificador: S21(dB) P1dB (dBm) IP3(dBm)
- Entrada: dois tons de (9.9 GHz, -13 dBm) e (10.1 GHz, -13 dBm)



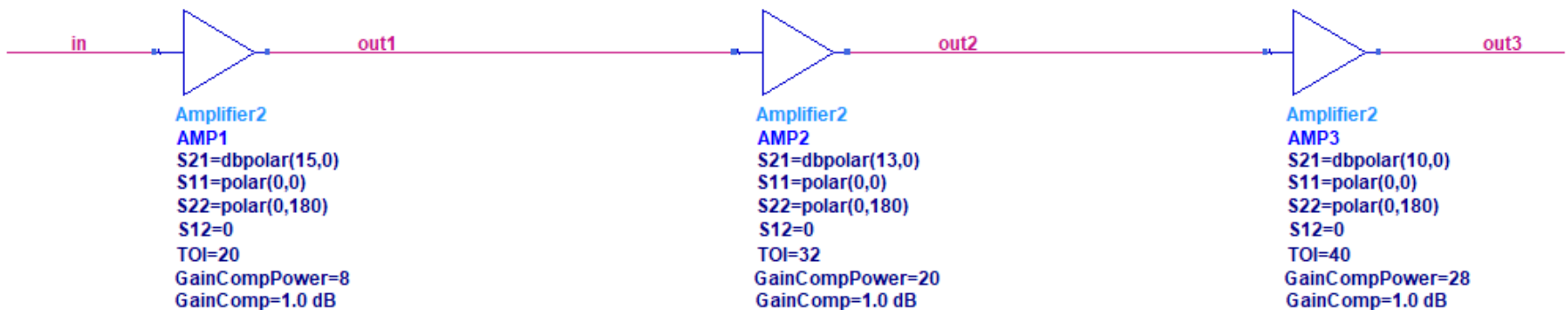
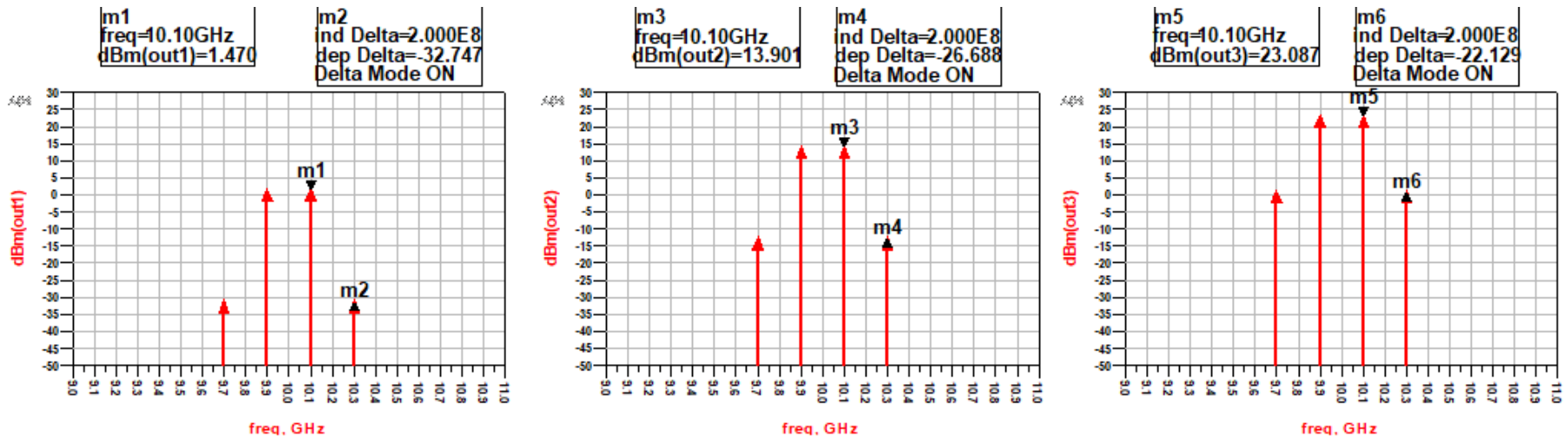
 **HARMONIC BALANCE**

HarmonicBalance
HB1
Freq[1]=9.9 GHz
Freq[2]=10.1 GHz
Order[1]=5
Order[2]=5

Distorção não-linear

Simulação não-linear de amplificador de três estágios no ADS

- Espectro do sinal de saída com tons de entrada com -13 dBm cada



Distorção não-linear

Simulação não-linear de amplificador de três estágios no ADS

- Espectro do sinal de saída com tons de entrada com -13 dBm cada

Saída	Potência dos sinais de saída	Produtos de intermodulação de 3ª ordem	
		Potência	Relativo aos sinais de saída
1º estágio	1,47 dBm	-31,2 dBm	-32,7 dB
2º estágio	13,90 dBm	-12,7 dBm	-26,6 dB
3º estágio	23,08 dBm	+0,98 dBm	-22,1 dB

O 2º e o 3º estágios do amplificador

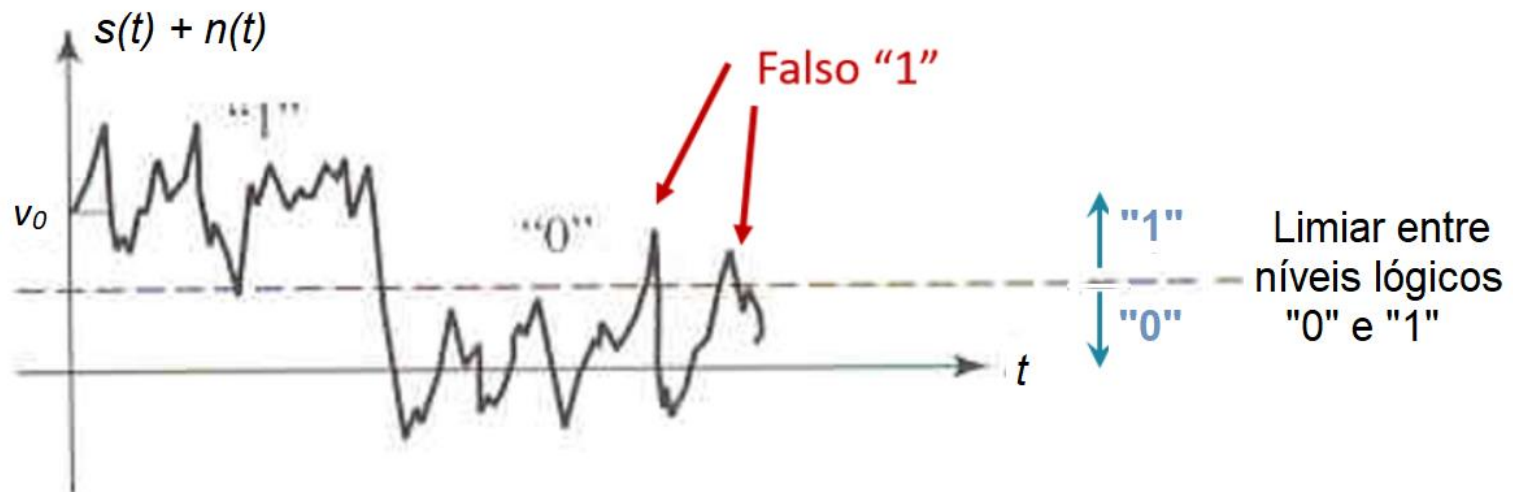
- Operaram de forma não-linear
- Provocaram aumento dos níveis de produto de intermodulação de 3ª. ordem (IP3)

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 que pode ser detectado com confiabilidade pelo receptor
- Exemplo: um sinal binário $s(t)$ com ruído $n(t)$



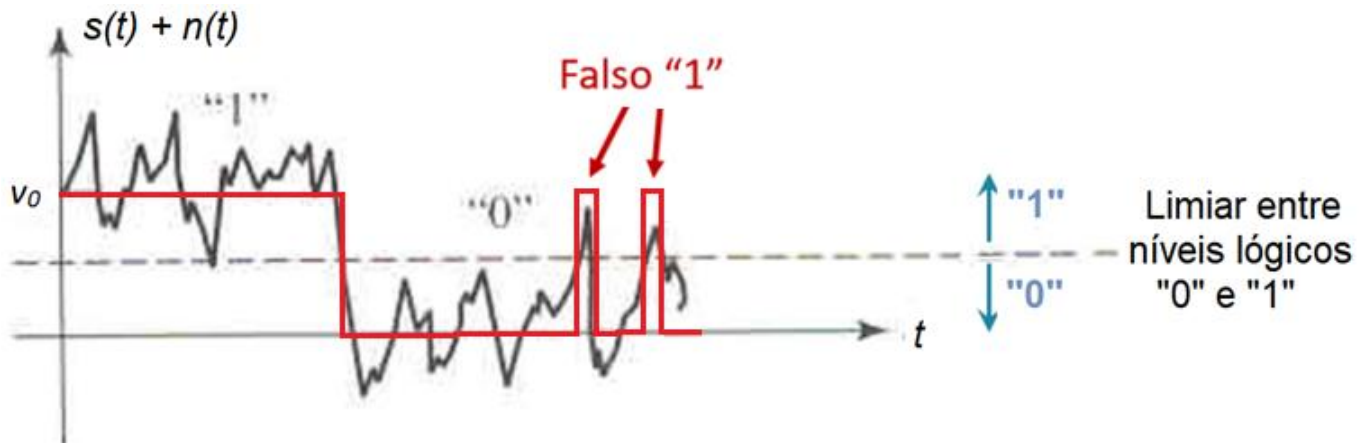
Ruído

- Efeito do ruído no desempenho do sistema

Sinal com ruído



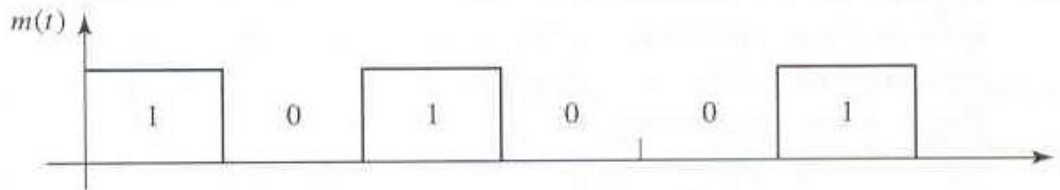
Sinal digital recuperado



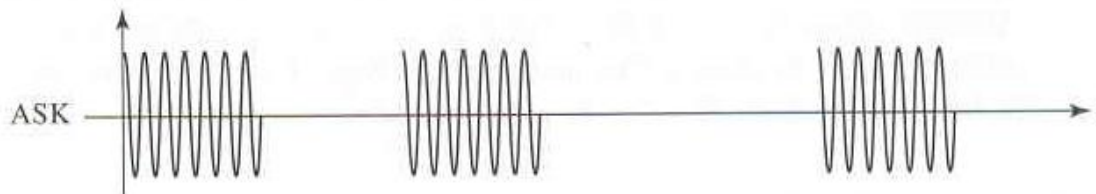
Ruído

- **Efeito do ruído no desempenho do sistema**

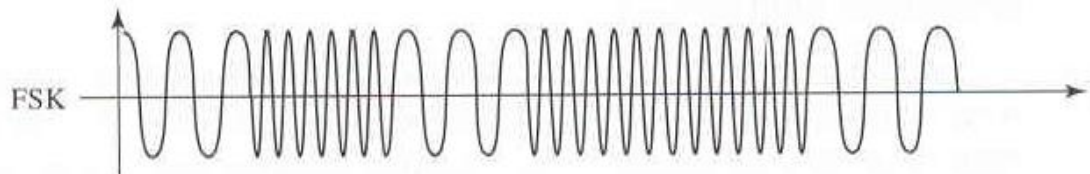
- Depende do tipo de modulação
- Exemplos de modulação digital
 - Dados da banda básica e sinais modulados em ASK, FSK e PSK



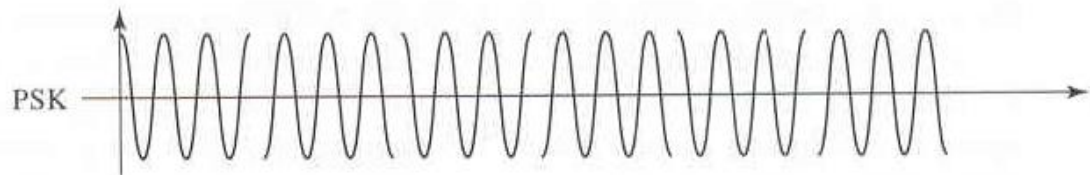
Banda básica →
→ Sinal digital



Modulação digital
da amplitude



Modulação digital
da frequência



Modulação digital
da fase

Ruído

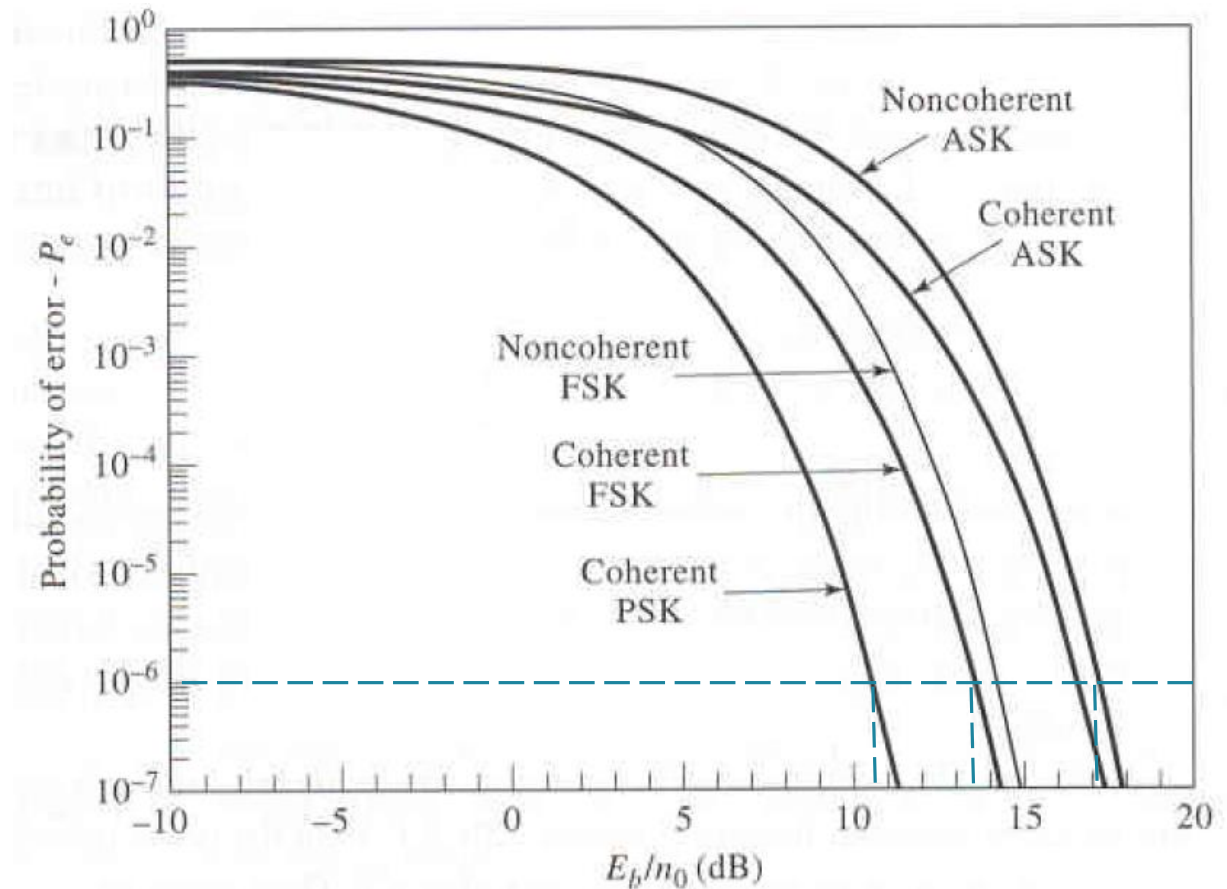
- **Relação sinal ruído requerida para o sistema**

- Depende da probabilidade do erro especificado para o sistema
- Função do tipo de modulação empregada

Probabilidade de erro

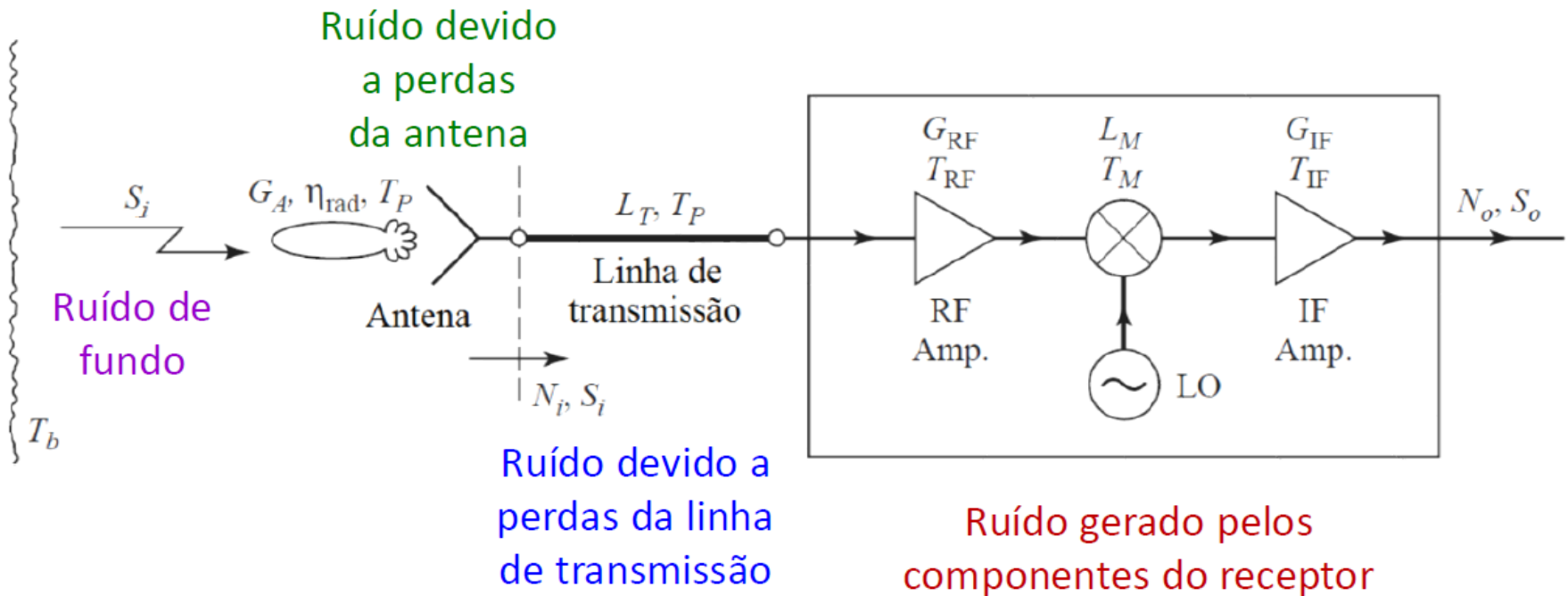
Exemplo: $P_e = 10^{-6}$

- 1 bit errado a cada 10^6 bits recebidos
- E_b/n_0
 - Entre 10,5 e 17 dB
 - Dependendo do tipo de modulação usado



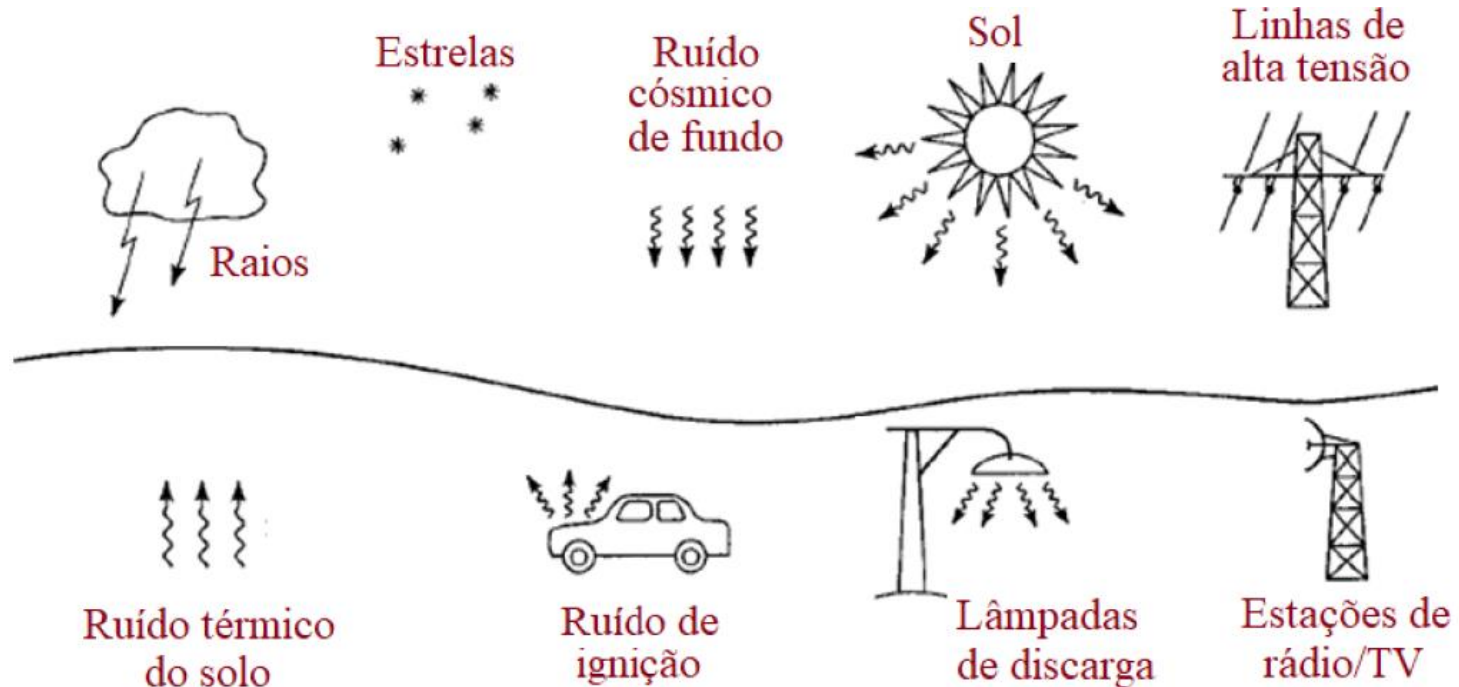
Ruído

- Fontes de ruído em sistemas sem fio
 - Ruídos externos → captados pela antena do sistema
 - Ruídos internos → gerados pelos componentes do sistema



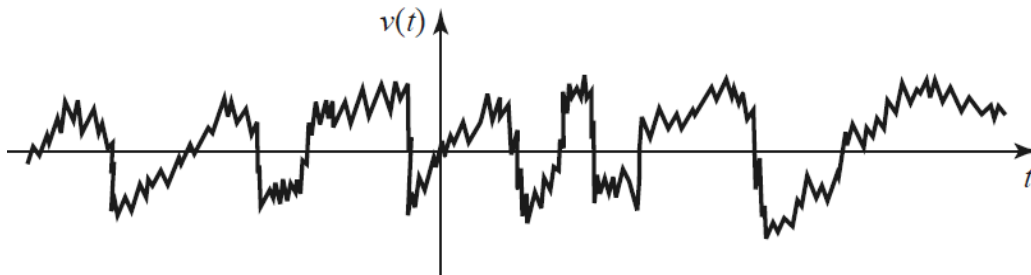
Ruído

- **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,...



Ruído

- Fontes de ruído em sistemas sem fio
 - Ruídos internos
 - Gerados pelos componentes do sistema
 - Originados por vários mecanismos físicos distintos
 - Aumenta com o aumento da temperatura do componente
 - Tensão de ruído $v(t)$
 - Efeito conjunto dos ruídos externos e internos
 - Sinal aleatório



- Valor médio = 0
- 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

$$T = T_0 = 290 \text{ K} \rightarrow 16,85 \text{ °C}$$

(IEEE Standard)

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

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

$$T_0 = 290 \text{ K}$$

Figura de Ruído

F - Figura de ruído

É expressa como a razão entre a relação sinal-ruído na entrada e na saída dos componentes do sistema

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

S_i – potência de sinal na entrada

N_i – potência de ruído na entrada

S_o – potência de sinal na saída

N_o – potência de ruído na saída

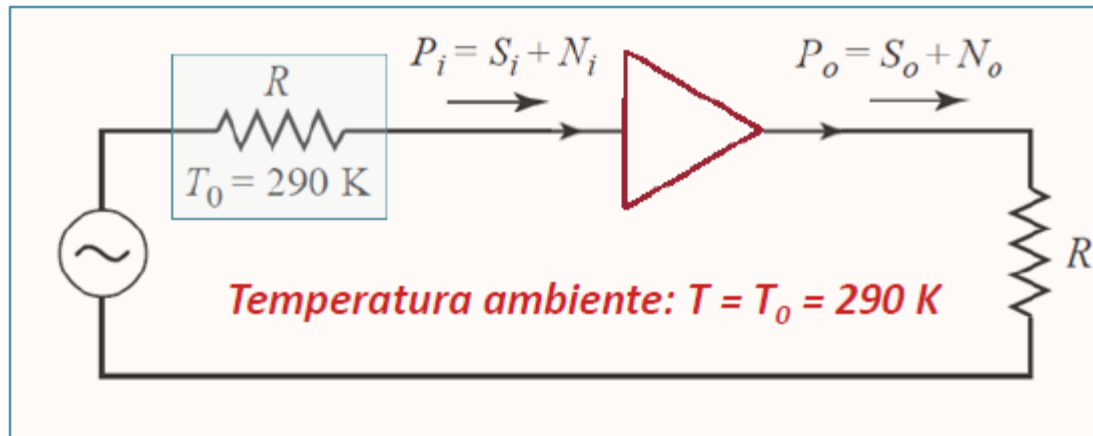


Figura de Ruído

Parâmetros de amplificadores de baixo ruído comerciais

Exemplo de amplificadores da empresa MSI – www.microwavesolutions.com

$$NF(dB) = 10 \cdot \log(F)$$

Product	Freq. (GHz)	Gain (dB)	N.F. (dB)	P1dB (dBm)	IP3 (dBm)
MSD-2251202	1.0 - 2.0	14	1.5	10	19
MSD-3641301	2.0 - 2.5	38	1.5	15	24
MSD-5411001	7.25 - 7.75	27	1	0	-
MSD-5422301	6.4 - 7.2	29	2.2	15	24
MSH-4311301	3.7 - 4.2	23	1.5	13	22
MSH-4421304-DI	5.3-5.9	30	1.5	13	-
MSH-6512301	9.0 - 9.9	36	2.2	15	25

Figura de Ruído

F - Figura de ruído

- Usada no projeto do receptor
- Assume todos os circuitos em temperatura ambiente $T = T_0 = 290\text{ K}$
- Permite avaliar o impacto de cada circuito do receptor na Figura de Ruído total

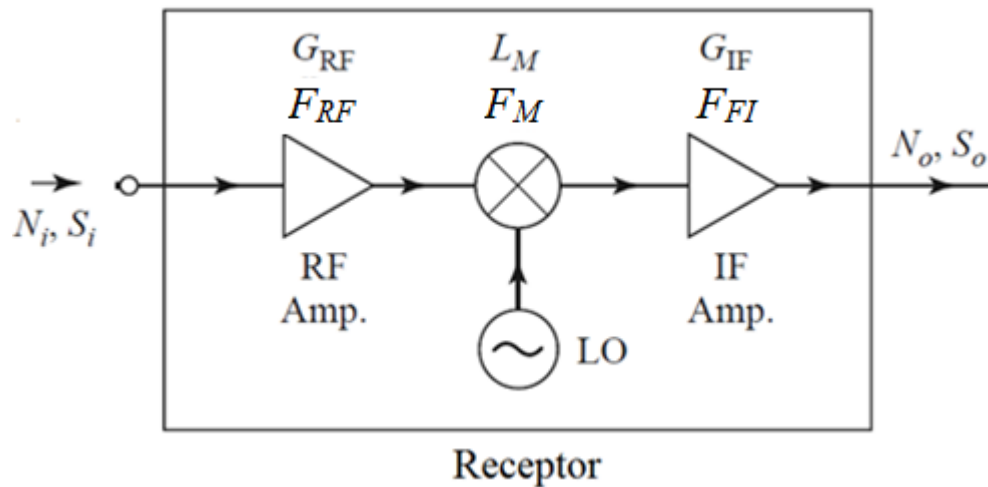
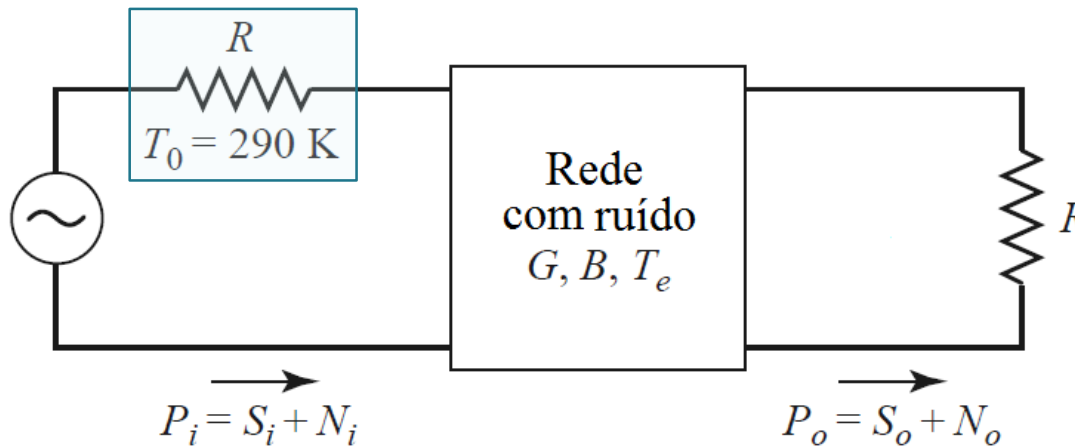


Figura de Ruído

- **Rede com ruído**

- 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



- **Sinais nos acessos da rede**

- S_i – potência de sinal na entrada
- N_i – potência de ruído na entrada
- S_o – potência de sinal na saída
- N_o – potência de ruído na saída

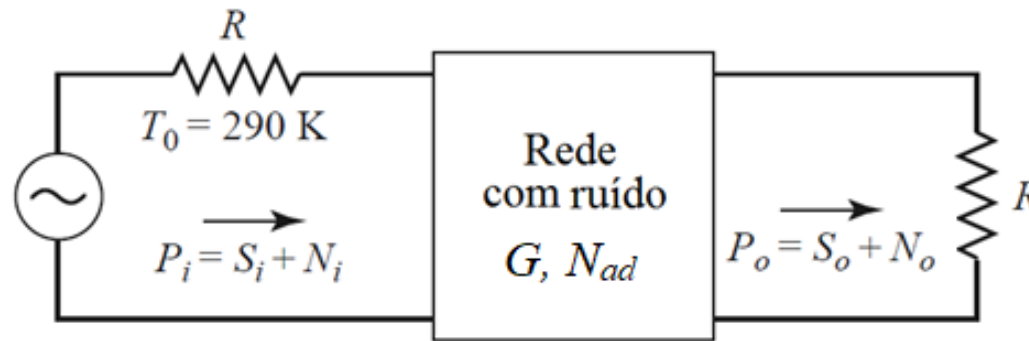
- **Relação sinal/ruído**

- S_i/N_i - relação sinal ruído de entrada
- S_o/N_o - relação sinal ruído de saída

Figura de Ruído

- F - Figura de Ruído**

- Quantifica a degradação da relação sinal/ruído devido ao ruído da rede em temperatura ambiente $T = T_0 = 290\text{ K}$



- Relação sinal/ruído na entrada da rede $\frac{S_i}{N_i}$

- Relação sinal/ruído na saída da rede $\frac{S_o}{N_o} = \frac{G \cdot S_i}{G \cdot N_i + N_{ad}}$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{S_i}{N_i} \\ \frac{S_o}{N_o} = \frac{G \cdot S_i}{G \cdot N_i + N_{ad}} \end{array} \right\} \frac{S_o}{N_o} < \frac{S_i}{N_i}$$

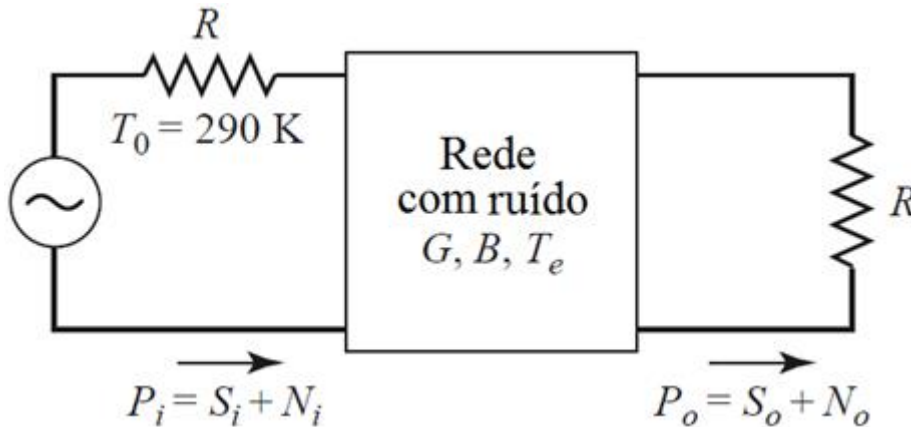
Sendo G - Ganho da rede N_{ad} - Ruído adicionado pela rede

Figura de Ruído

- F - Figura de Ruído**

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

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



S_i/N_i - relação sinal ruído de entrada

S_o/N_o - relação sinal ruído de saída

- Relação entre Figura de Ruído F e Temperatura de Ruído T_e**

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \text{ sendo } T_0 = 290 \text{ K}$$

Figura de Ruído

- Simulação de Figura da Ruído

- Exemplo 1: Amplificador, simulador S-PARAMETERS

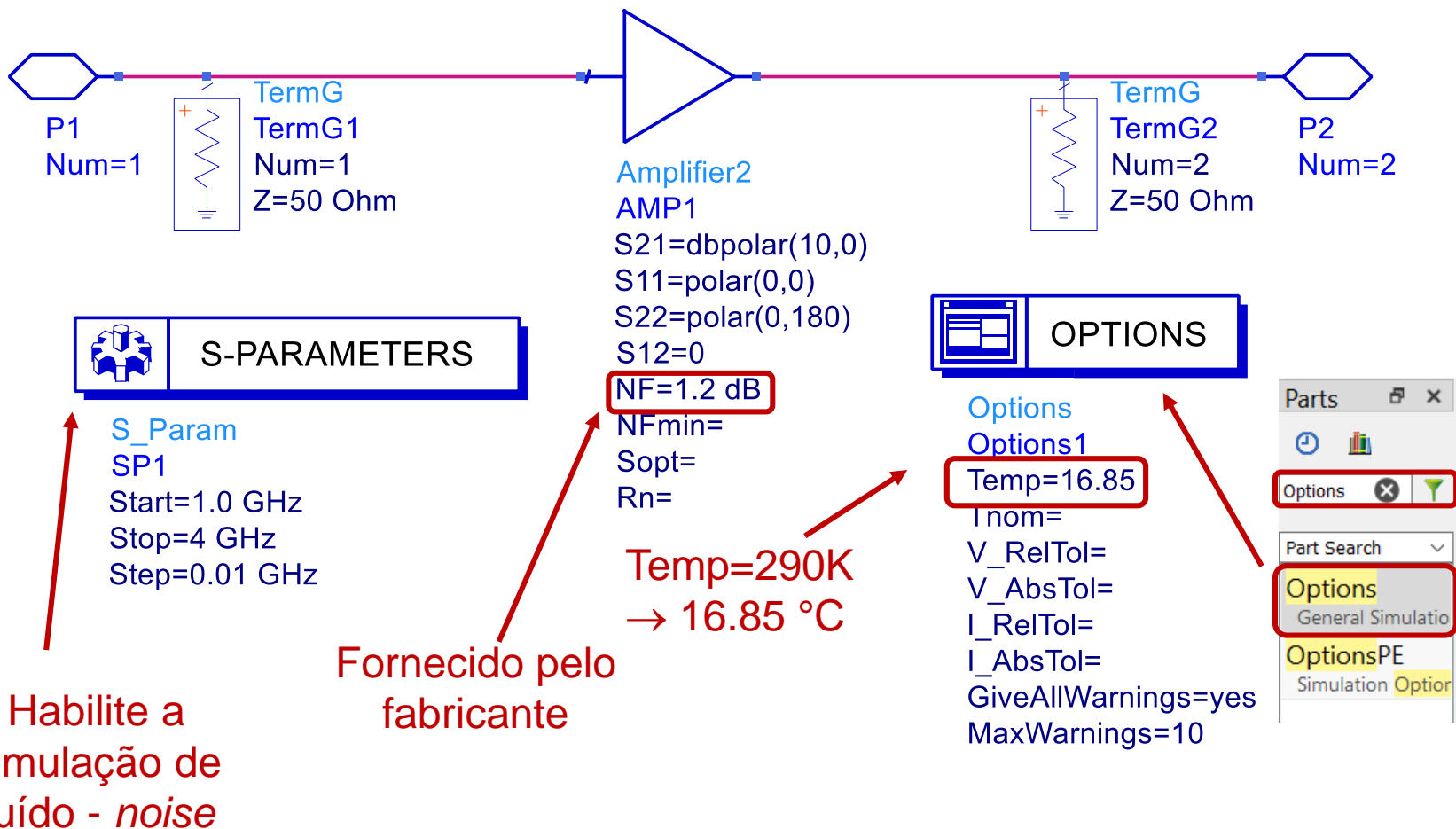


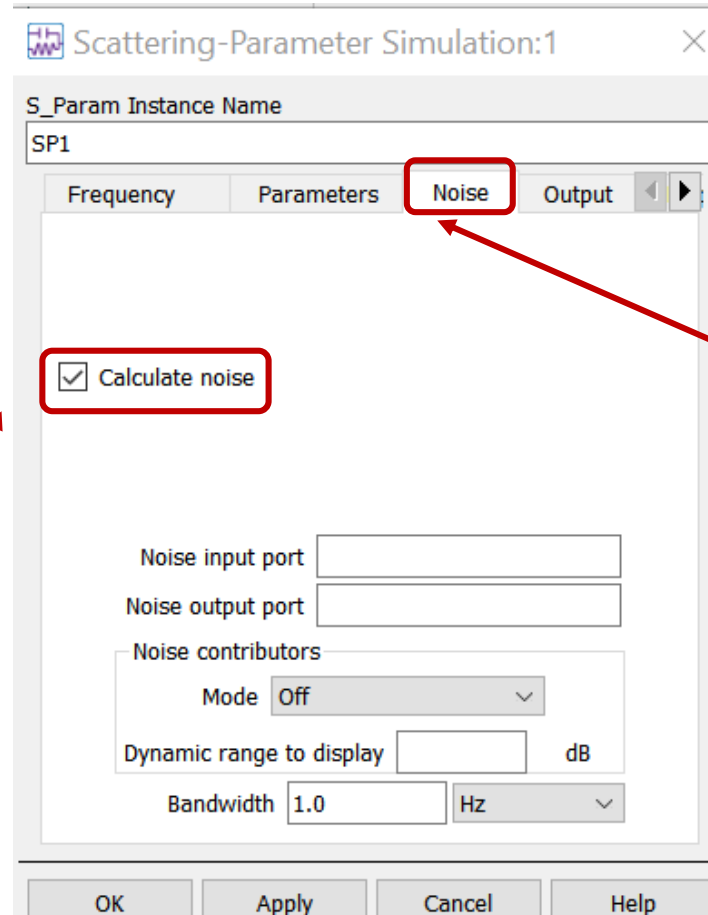
Figura de Ruído

- Simulação de Figura da Ruído de um amplificador
 - Habilite a simulação de Figura de Ruído



S_Param
SP1
Start=1.0 GHz
Stop=4 GHz
Step=0.01 GHz

Habilite
"Calculate noise"



Selecione a
aba "Noise"

Figura de Ruído

- Simulação de Figura da Ruído de um amplificador
 - Resultado da simulação

m1
freq=1.500GHz
nf(2)=1.200

Figura de Ruído (dB)

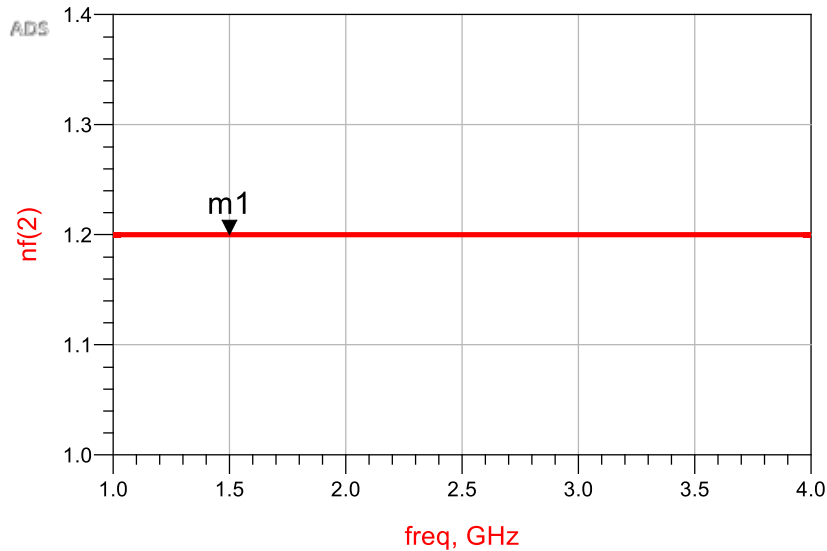
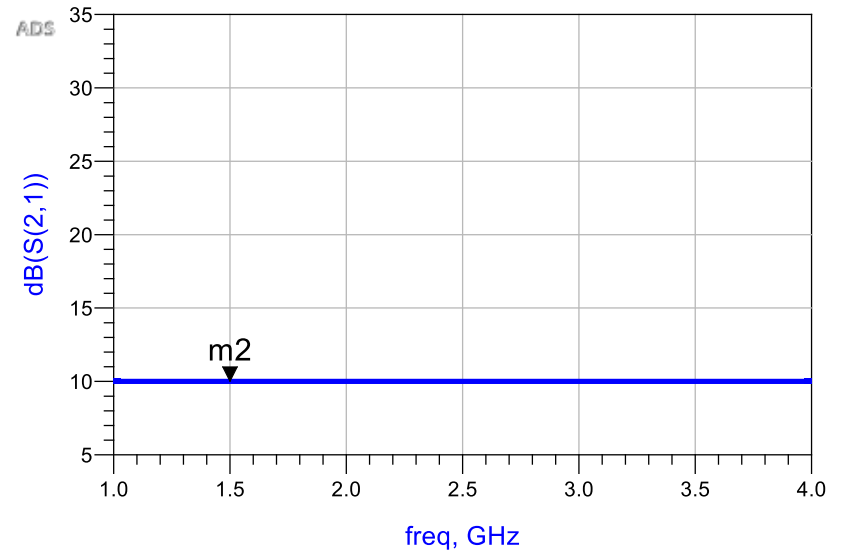


Figura de ruído (dB) x frequência

m2
freq=1.500GHz
dB(S(2,1))=10.000

Ganho (dB)

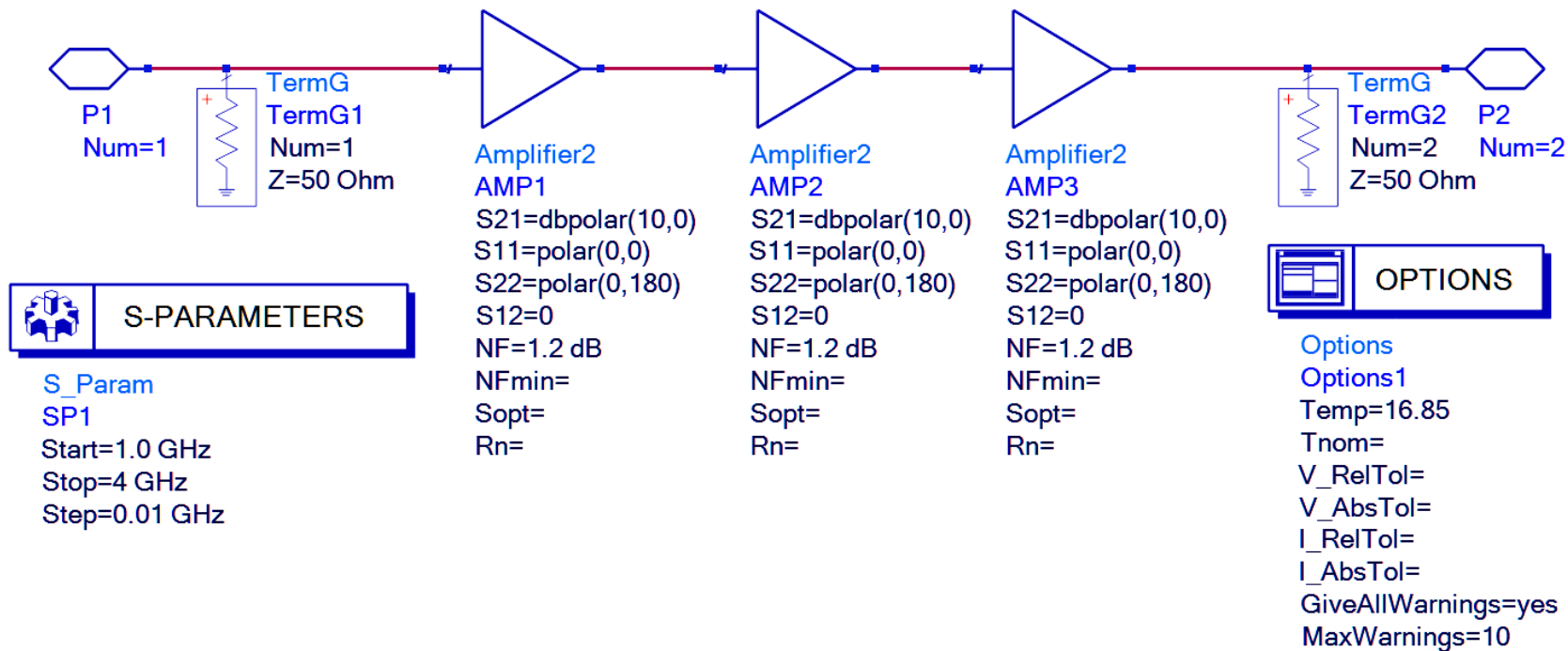


Ganho (dB) x frequência

Figura de Ruído

- Simulação de Figura da Ruído

- Exemplo 2: Amplificadores em cascata; simulador S-PARAMETERS



Qual o valor: **GANHO?** **Figura de Ruído?**



Equação de Friis de Figura de Ruído

Figura de Ruído

- Simulação de Figura da Ruído de um amplificador
 - Resultado da simulação

m1
freq=1.500GHz
nf(2)=1.314

Figura de Ruído (dB)

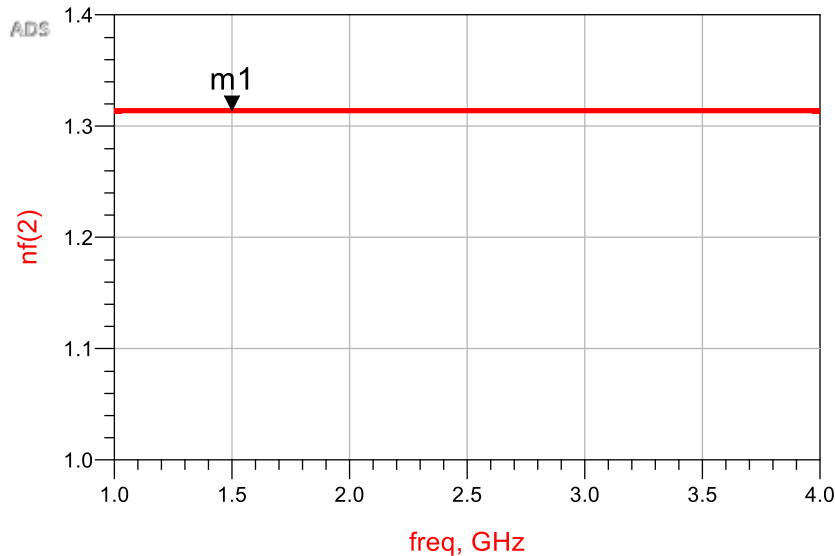
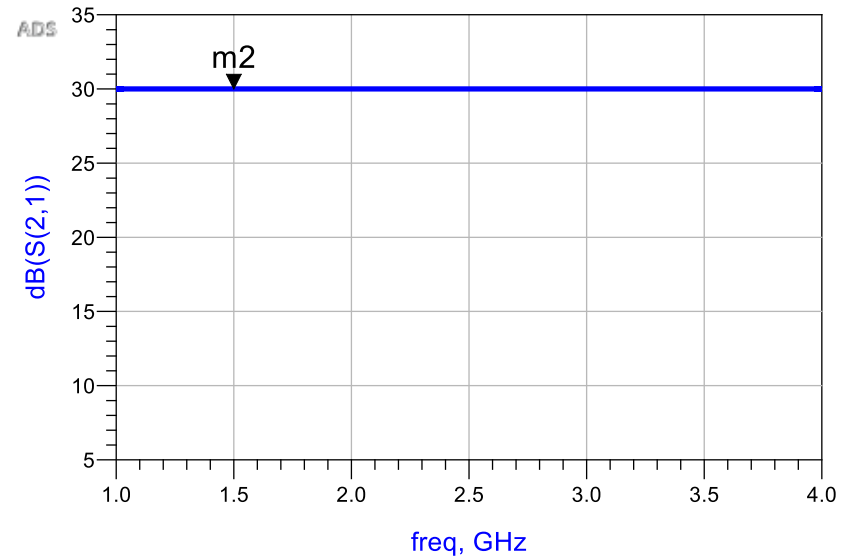


Figura de ruído (dB) x frequência

m2
freq=1.500GHz
dB(S(2,1))=30.000

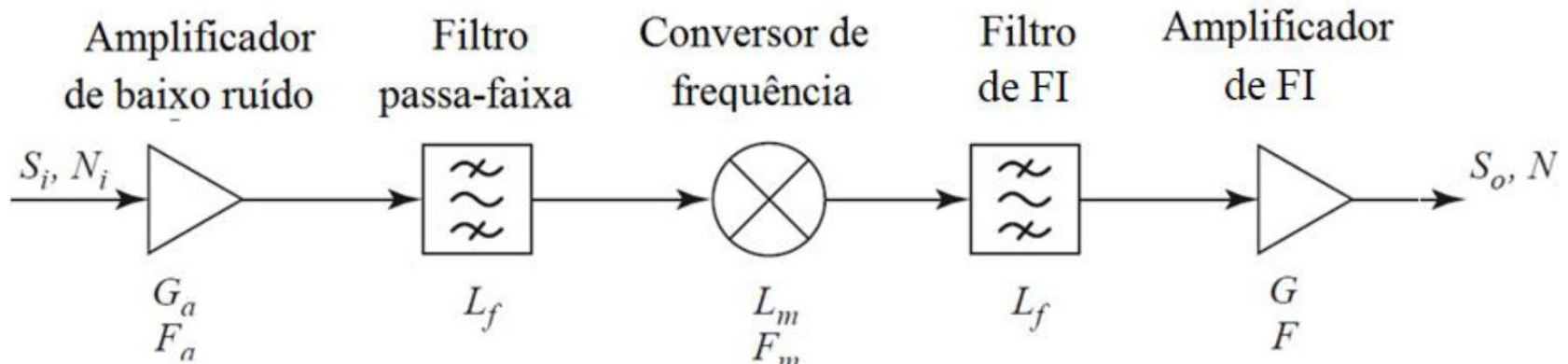
Ganho (dB)



Ganho (dB) x frequência

Figura de Ruído

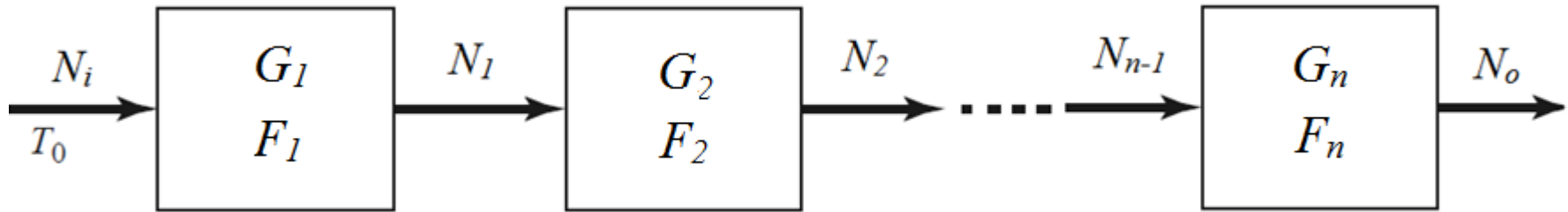
- **Figura de Ruído do receptor**
 - O receptor é formado por diversos circuitos em cascata
 - Exemplo de receptor



- A Figura de Ruído do receptor
 - É a razão entre as relações sinal-ruído na entrada e na saída do receptor
 - Depende do Ganho (ou perda) e da Figura de Ruído de cada circuito do receptor

Figura de Ruído

- Figura de Ruído de cascata de componentes

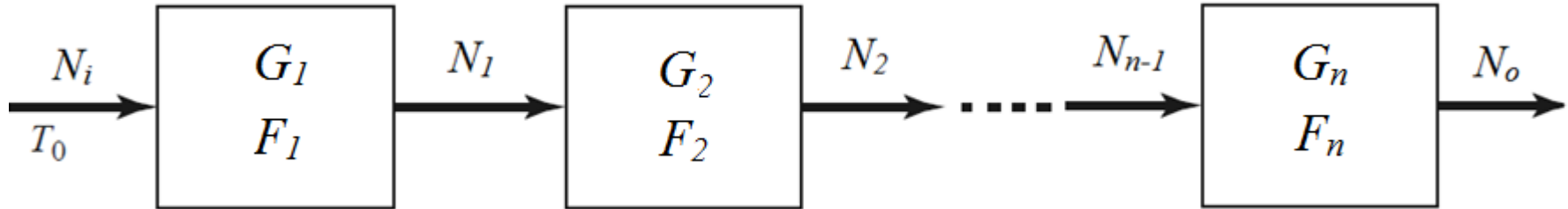


$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- Primeiro estágio do receptor → impacto direto na figura de ruído
- Habitualmente
 - Amplificador de Baixo Ruído – LNA com F_1 reduzida e G_1 elevado
 - ou
 - Filtro com baixas perdas de inserção seguido do LNA

Figura de Ruído

- Figura de Ruído de cascata de componentes



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

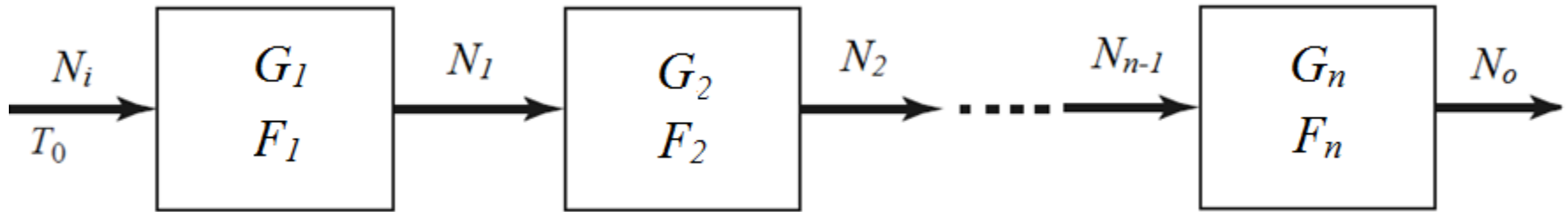
- IMPORTANTE
- Equação utiliza valores lineares de F_1, F_2, \dots, F_n e de G_1, G_2, \dots, G_n
- Caso os valores de F e G estejam em dB devem ser convertidos para linear, usando

$$F = 10^{F(\text{dB})/10}$$

$$G = 10^{G(\text{dB})/10}$$

Figura de Ruído

- **Figura de Ruído dos componentes do sistema**



- Elementos ativos
 - Amplificadores, conversores de frequência
 - Figura de ruído e ganho → fornecidos pelo fabricante
- Elementos passivos
 - Atenuadores, filtros, linhas de transmissão
 - Apresentam perda ($L - loss$) → fornecida pelo fabricante
 - Dada a perda $L(dB)$, em temperatura ambiente $T=290 K$ tem-se
 - Ganho → $G(dB) = -L(dB)$
 - Figura de Ruído → $F(dB) = L(dB)$

Figura de Ruído

- Figura de Ruído dos componentes do sistema

Elementos Ativos	Dados fornecidos pelo fabricante
Amplificadores	Ganho(dB) → $G(dB)$
	Figura de Ruído(dB) → $NF(dB)$
Conversores de frequência	Perda: $L(dB)$ → $G(dB) = -L(dB)$
	Figura de Ruído → $NF(dB)$

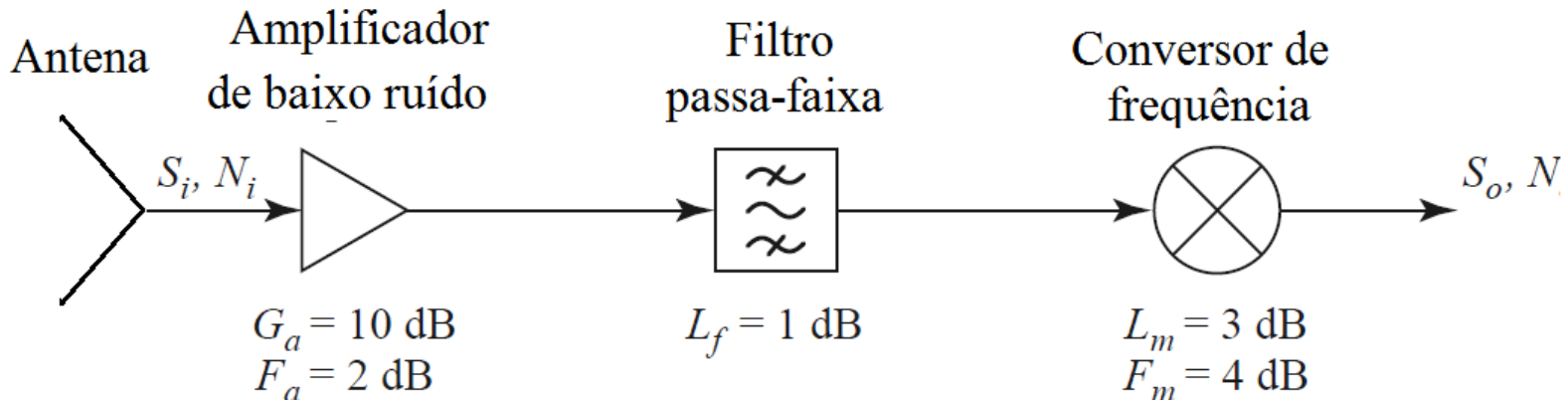
Elementos Passivos	Dados fornecidos pelo fabricante
Atenuadores	Perda em dB: $L(dB) > 0$
Filtros	Ganho → $G(dB) = -L(dB)$
Linhas de transmissão	Figura de ruído → $NF(dB) = L(dB)$

$$G = 10^{G(dB)/10}$$

$$F = 10^{NF(dB)/10}$$

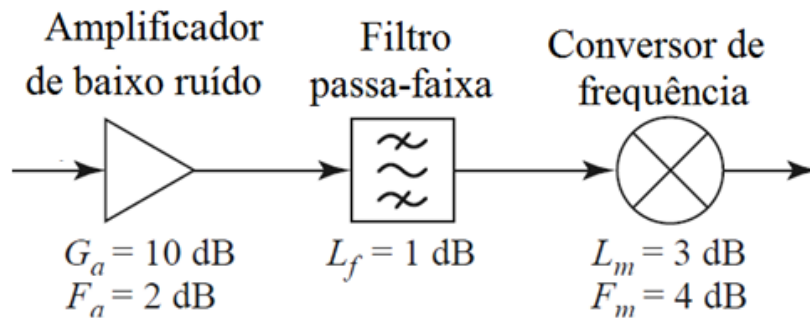
Figura de Ruído

• Exemplo



Parâmetros dos componentes fornecidos

- Amplificador de baixo ruído
 - Ganho 10 dB
 - Figura de Ruído 2 dB
- Filtro passa-faixa
 - Perda 1 dB
- Conversor de frequência
 - Perda 3 dB
 - Figura de ruído 4 dB



• Figura de Ruído

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2}$$

- Parâmetros dos componentes em dB

Componente	Perda	Ganho	Figura de Ruído
Amplificador de baixo ruído	----	$G_1 = 10 \text{ dB}$	$F_1 = 2 \text{ dB}$
Filtro	1 dB	$G_2 = -1 \text{ dB}$	$F_2 = 1 \text{ dB}$
Conversor de frequência	3 dB	$G_3 = -3 \text{ dB}$	$F_3 = 4 \text{ dB}$

- Parâmetros dos componentes “lineares”

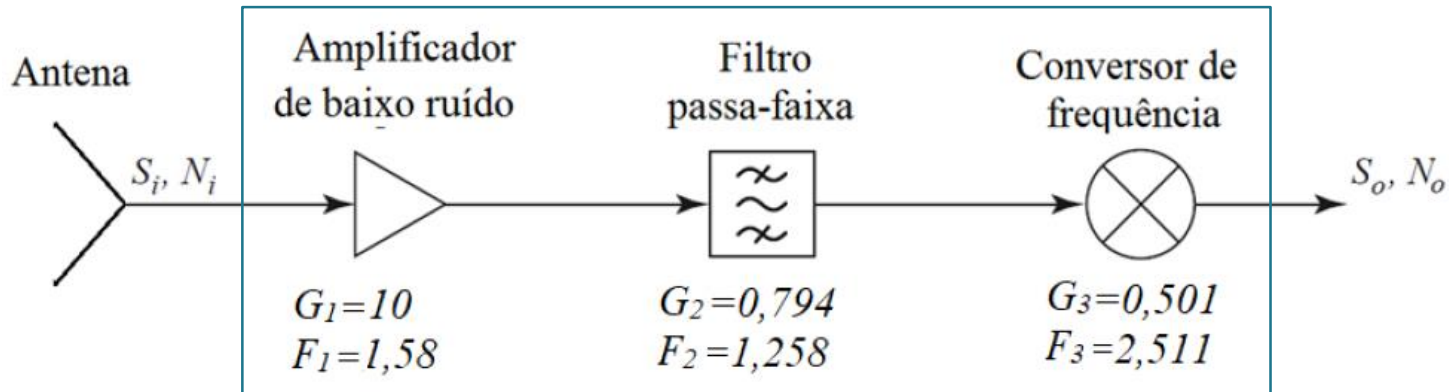
$$G = 10^{G(\text{dB})/10}$$

$$F = 10^{F(\text{dB})/10}$$

Componente	Ganho	Figura de Ruído
Amplificador	10	1,584
Filtro	0,794	1,258
Conversor de freq.	0,501	2,511

Figura de Ruído

- Receptor com valores lineares de ganho e figura de ruído



- Figura de ruído do receptor

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2}$$

$$F = 1,58 + \frac{1,25 - 1}{10} + \frac{2,511 - 1}{10 \times 0,794}$$

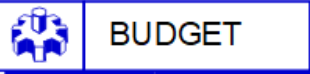
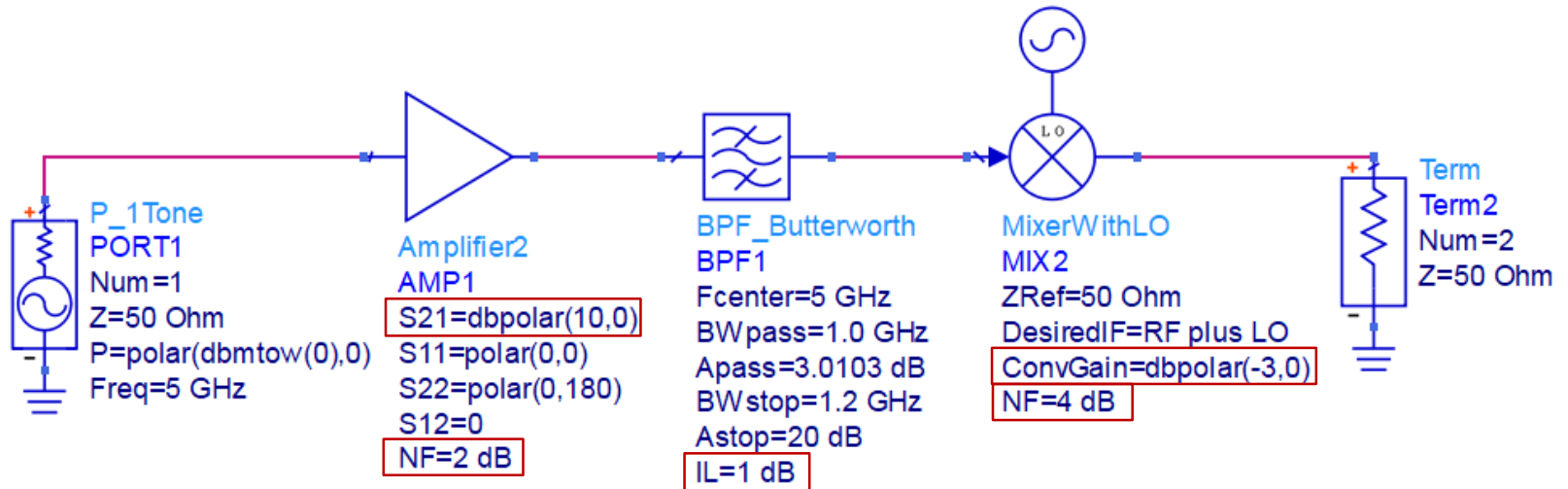
$$F = 1,58 + 0,026 + 0,190 \quad \longrightarrow \quad F = 1,80$$

$$NF(dB) = 10 \cdot \log(1,80) = 2,55 \quad \longrightarrow \quad NF = 2,55 \text{ dB}$$

Figura de Ruído

Simulação da Figura de Ruído de um receptor no ADS

Simulador não linear: BUDGET



Budget
Budget
MeasurementFrequencyUnit=Hz
Measurement[1]="Cmp_NF_dB"
Measurement[2]="Cmp_S21_dB"
Measurement[3]="OutPGain_dB"
Measurement[4]="NF_Refln_NoImage_dB"
Measurement[5]="NF_Refln_dB"
Measurement[6]="Cmp_Ctrb_SysNF_NoImage_dB"

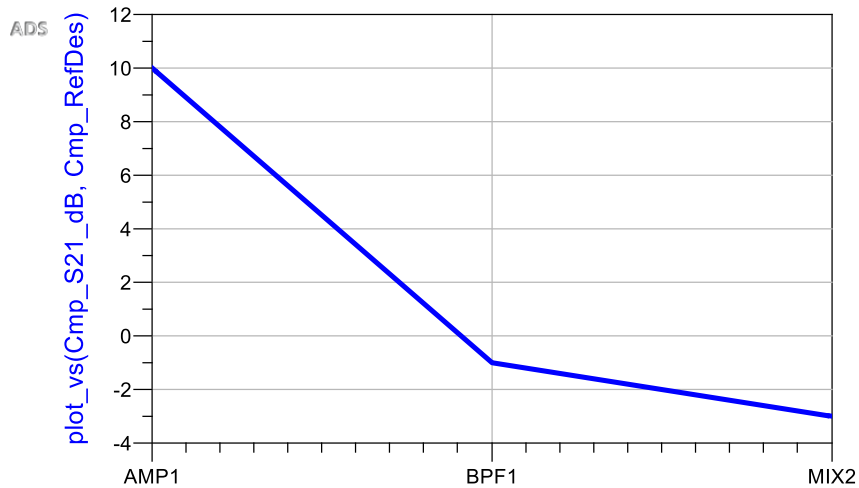
- Modelo comportamental dos circuitos
- Ganho do amplificador → $S_{21}(\text{dB})$
- Perda de inserção do filtro → $IL(\text{dB})$
- Ganho de conversão do mixer → ConvGain
- Figura de Ruído → $NF(\text{dB})$

Figura de Ruído

Simulação da Figura de Ruído de um receptor no ADS

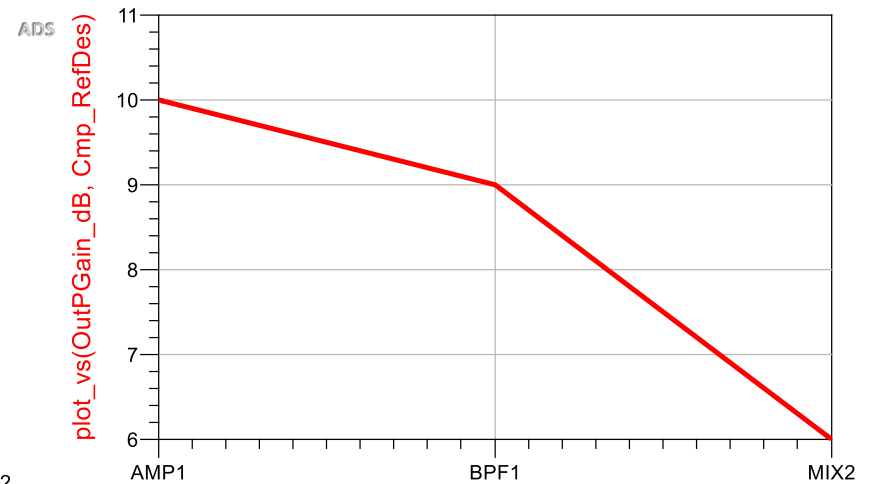
Ganho de cada componente

Comp_S21_dB

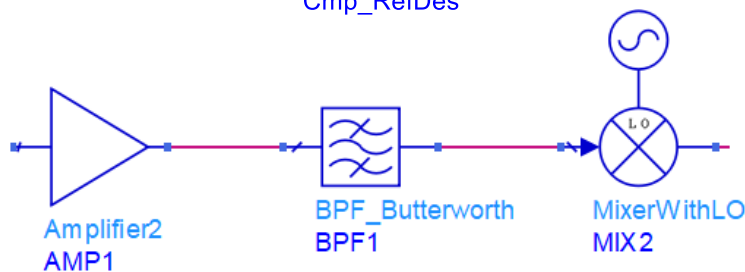


Ganho total da entrada do receptor até a saída de cada componente

OutPGain_dB



Cmp_RefDes



Cmp_RefDes

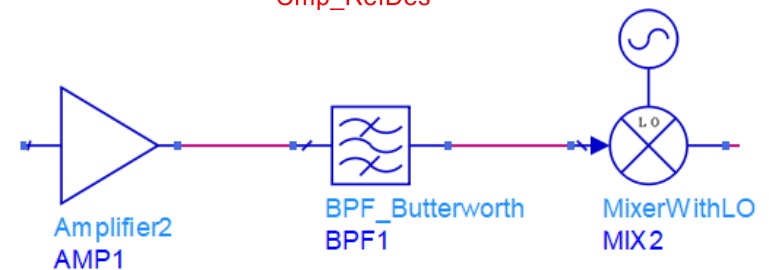
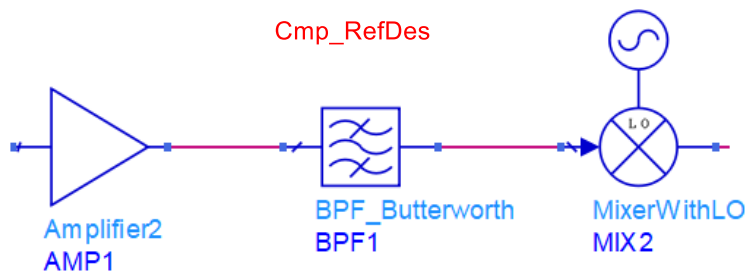
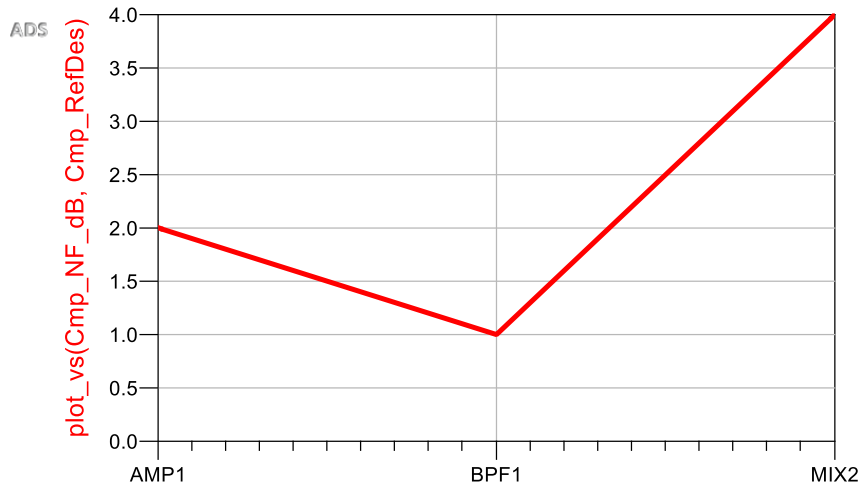


Figura de Ruído

Simulação da Figura de Ruído de um receptor no ADS

Figura de ruído de cada componente

Comp_NF_dB



Contribuição de cada componente par a figura de ruído do sistema

Comp_Ctrfb_SysNF

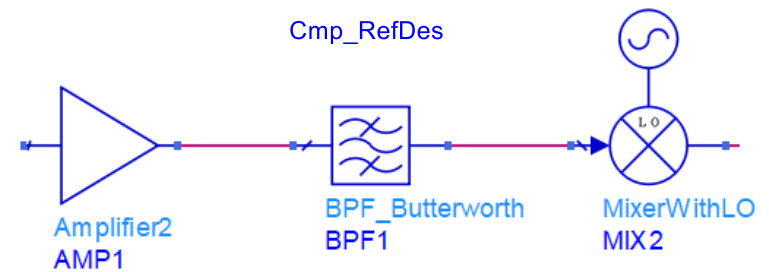
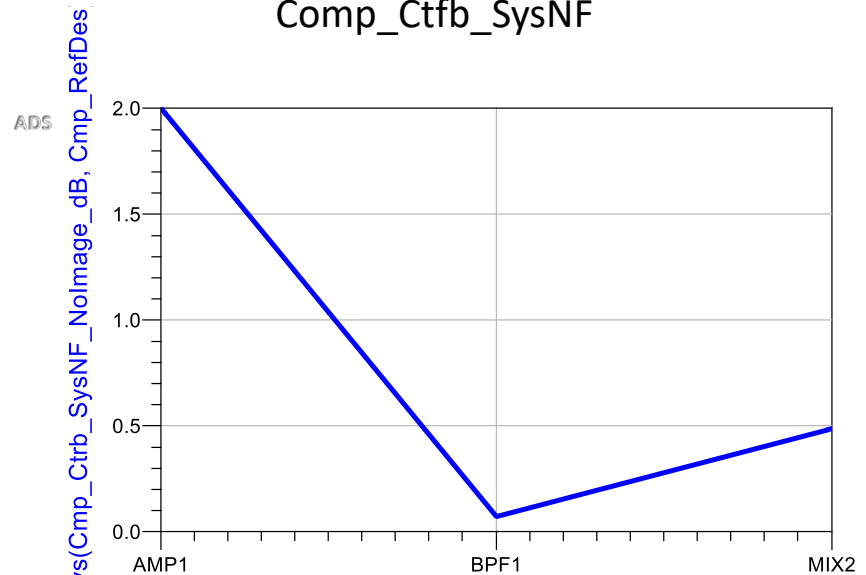


Figura de Ruído

Simulação da Figura de Ruído de um receptor no ADS

Figura de ruído da entrada do sistema até a saída de cada componente

$NF_RefIn_NoImage_dB$

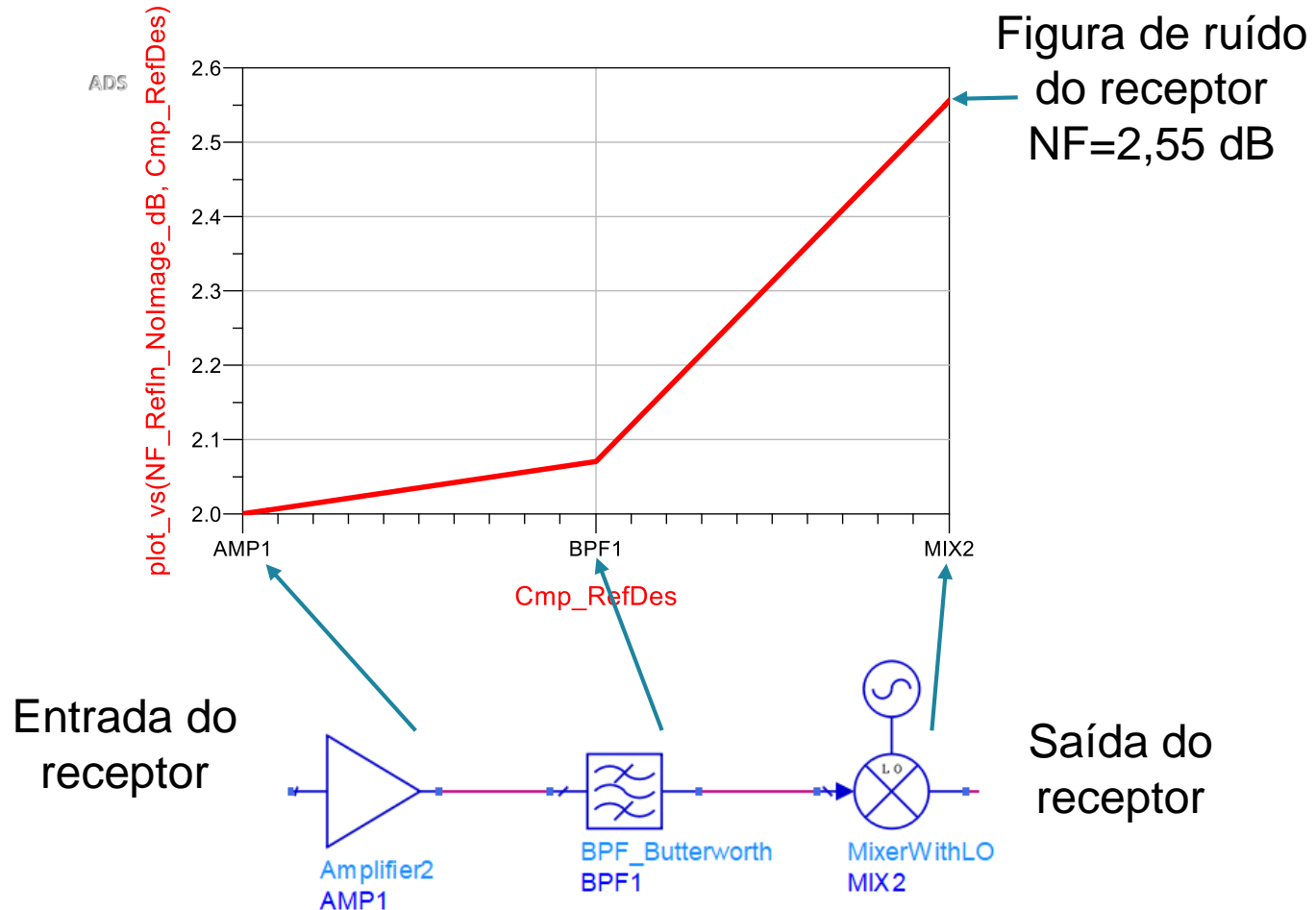
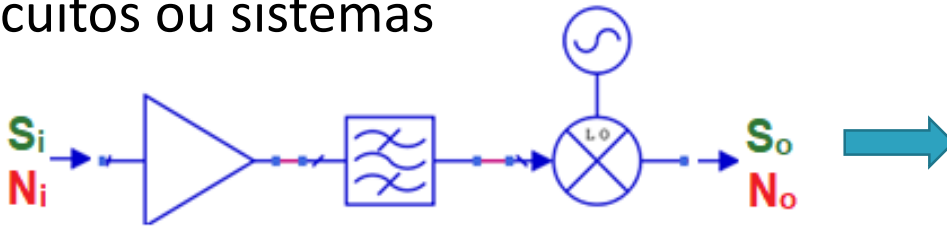


Figura de Ruído – relembrando...

- A Figura de Ruído “F”
- É uma forma de quantificar o ruído gerado por dispositivos, circuitos ou sistemas



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

$$F(dB) = 10\log(F)$$

- Depende da temperatura de operação
 - Temperatura $\uparrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$ Figura de Ruído \uparrow
- Por convenção, “F” é medida a temperatura ambiente de **T=290 k**
 - Permite comparar dispositivos/circuitos/componentes quanto ao ruído por eles gerado
- Usada para projetar o receptor, e selecionar seus componentes atendendo às especificações do receptor e o melhor compromisso

Custo X Desempenho de ruído

Figura de Ruído

- **Análise da Figura de Ruído de cascata de componentes**
 - N componentes em cascata
 - Todos à temperatura T=290 K

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

- Sendo

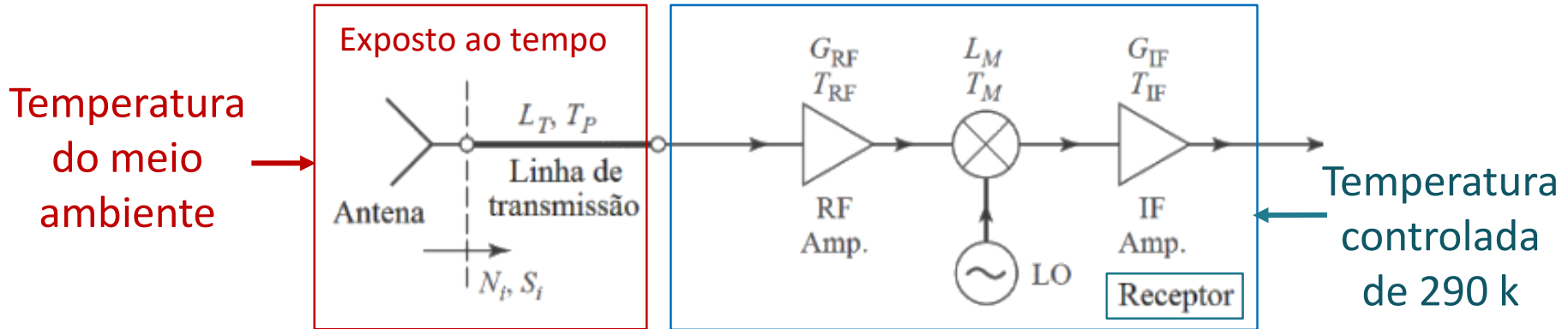
F_i – figura de ruído do i-ésimo componente

G_i – ganho do i-ésimo componente

- Aplicação da Figura de Ruído → projeto do receptor

Temperatura de Ruído

• Análise de ruído do receptor em operação



• Componentes expostos ao tempo

- Antena do receptor
- Linha de transmissão conectando a antena ao receptor
- Temperatura física T_p é a do meio ambiente externo $\rightarrow T_p \neq 290 \text{ K}$

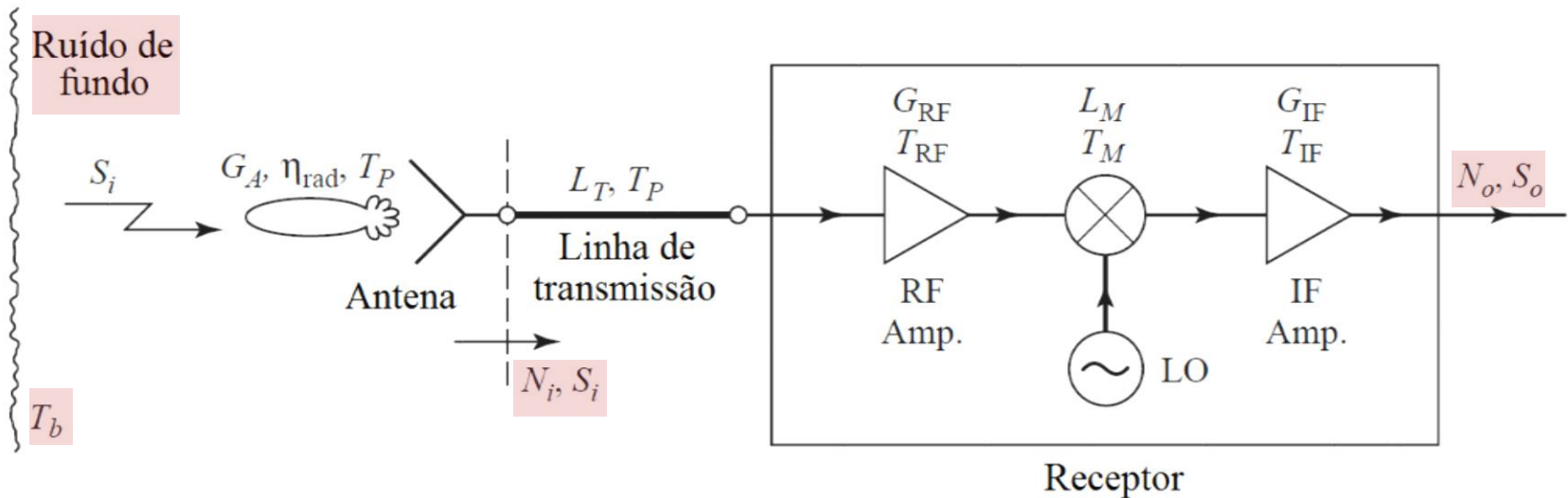
• Receptor

- Em unidade interna, com temperatura ambiente controlada $\rightarrow T=290 \text{ K}$
- Ou em ambiente externo, junto à antena $\rightarrow T \neq 290 \text{ K}$

Análise \rightarrow “Temperatura Equivalente de Ruído” (e não “Figura de Ruído”)

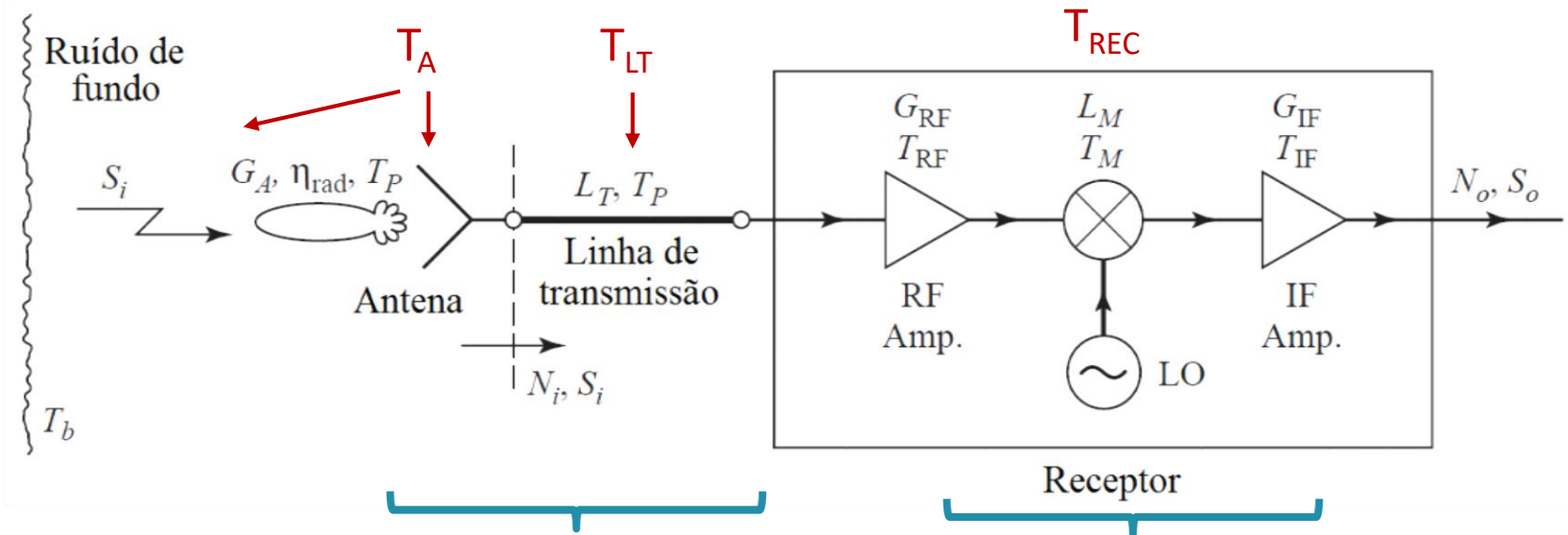
Temperatura de Ruído

- Usada para calcular a **relação sinal ruído na saída do receptor, S_o/N_o** , considerando:
 - Ruído de fundo captado pela antena
 - Ruído gerado pela antena
 - Ruído gerado pela linha de transmissão entre antena e receptor
 - Temperatura física da antena e da linha de transmissão $\rightarrow T=T_p$
 - Ruído gerado pelo receptor



Temperatura de Ruído

- Cálculo da relação sinal/ruído ao longo do sistema depende de
 - Temperatura de ruído da antena - T_A
 - Temperatura de ruído da linha de transmissão antena-receptor- T_{LT}
 - Temperatura de ruído do receptor - T_{REC}



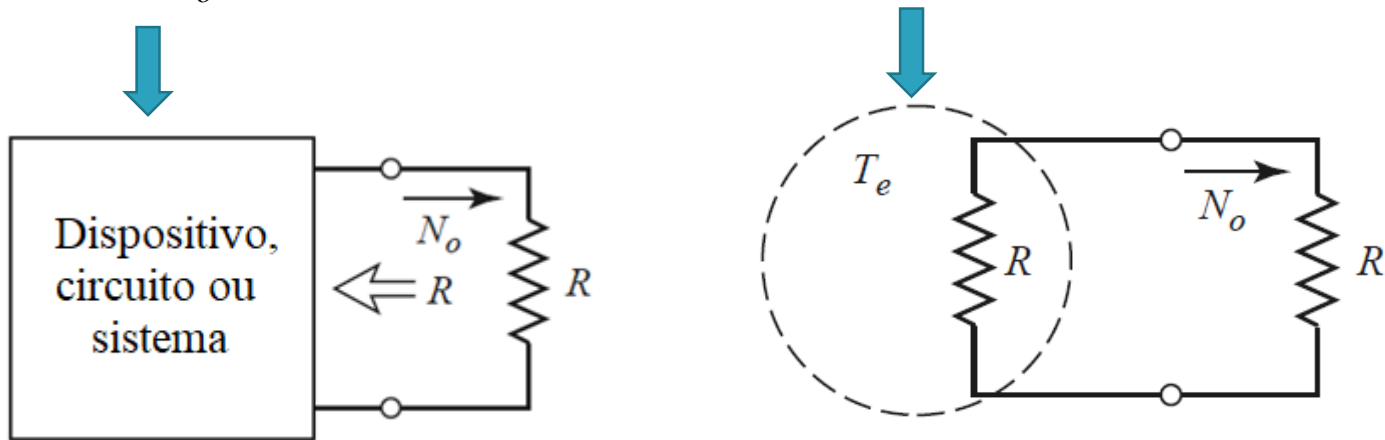
Temperatura física externa
 $T_p \neq 290$ K, usualmente

Temperatura do ambiente em
 que está instalado

Temperatura de Ruído

T_e – Conceito de “Temperatura Equivalente de Ruído”

- Seja R a resistência da porta em que se mede o ruído gerado por um dispositivo, circuito ou sistema
- Seja N_o a potência de ruído entregue a uma carga R



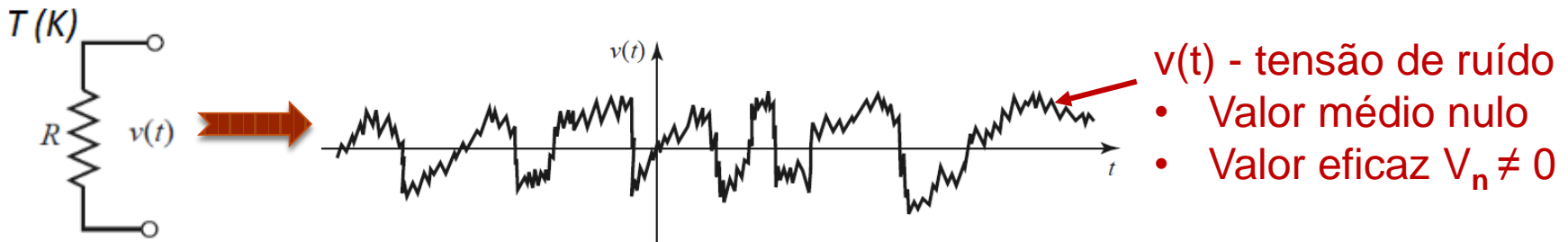
- T_e é a temperatura na qual um resistor R deveria estar para gerar a mesma potência de ruído que a gerada pelo dispositivo, circuito ou sistema

Mas qual é a potência de ruído gerada por um resistor?

Temperatura 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 – $6,626 \times 10^{-34}$ m²Kg/s

f frequência

B banda do sistema em Hz

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

T temperatura em Kelvin

Temperatura de Ruído

- Tensão eficaz de ruído do resistor em micro-ondas

- Tensão eficaz de ruído gerada por um resistor R em uma banda de frequências B

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

- Em frequências de micro-ondas

$$hf/kT < 0.05 \rightarrow e^{hf/kT} - 1 \approx \frac{hf}{kT}$$

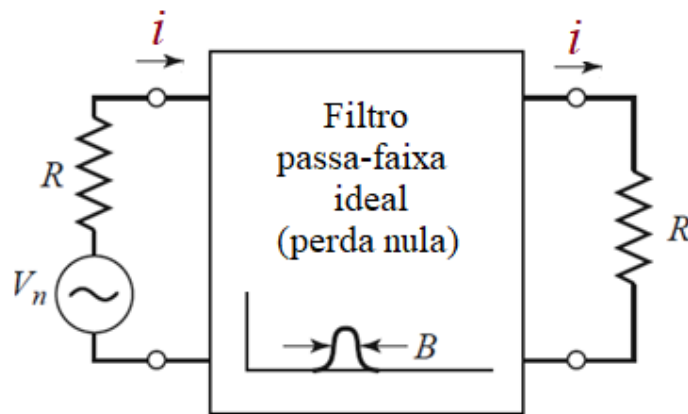
- Em frequências de micro-ondas vale a aproximação

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

Temperatura de Ruído

Potência de ruído em frequências de micro-ondas

- P_n - potência de ruído gerada pelo resistor R
 - Na temperatura T (K)
 - Entregue à carga resistiva R
 - Através de um filtro passa-faixa ideal com banda B



$$\left. \begin{aligned} P_n &= R \cdot i^2 \\ i &= \frac{V_n}{2R} \end{aligned} \right\} P_n = R \left(\frac{V_n}{2R} \right)^2$$

$$V_n = \sqrt{4kTBR} \rightarrow P_n = R \left(\frac{V_n}{2R} \right)^2 = R \frac{4kTBR}{4R^2} = kTB$$

Potência de ruído gerada pelo resistor R \rightarrow

$$P_n = kTB$$

Temperatura de Ruído

- **Potência de ruído gerada pelo resistor em micro-ondas**

- Aproximação de Rayleigh-Jeans



$$P_n = kTB$$

- Válida em frequências de micro-ondas
- Tipo de Ruído
 - **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

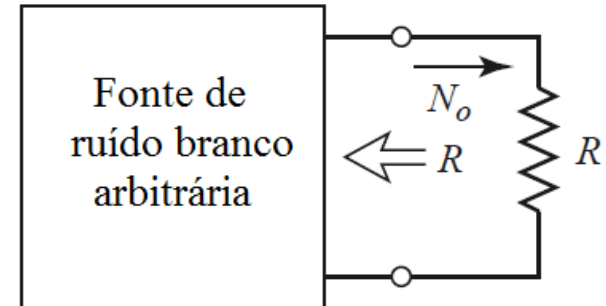
T: temperatura em K

B: banda do sistema em Hz

Temperatura de Ruído

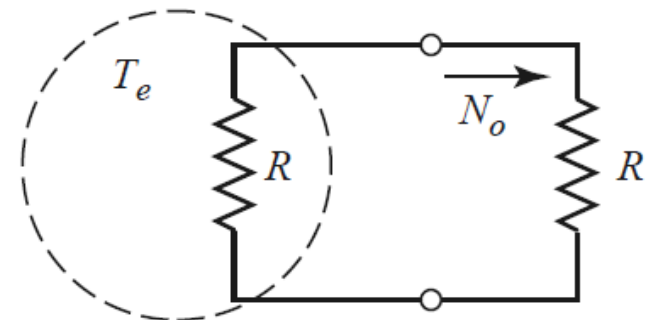
- **Fonte de ruído branco com resistência R**

- Considere uma fonte de ruído branco
 - Ruído gerado não depende da frequência
 - Acesso com resistência interna R
 - Alimentando uma carga com resistência R
 - Entregando potência de ruído $P_n = N_o$

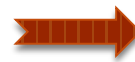


- Representação do ruído branco

- Uma resistência R , a uma temperatura T_e tal que gere a mesma potência de ruído N_o



$$N_o = kT_e B$$

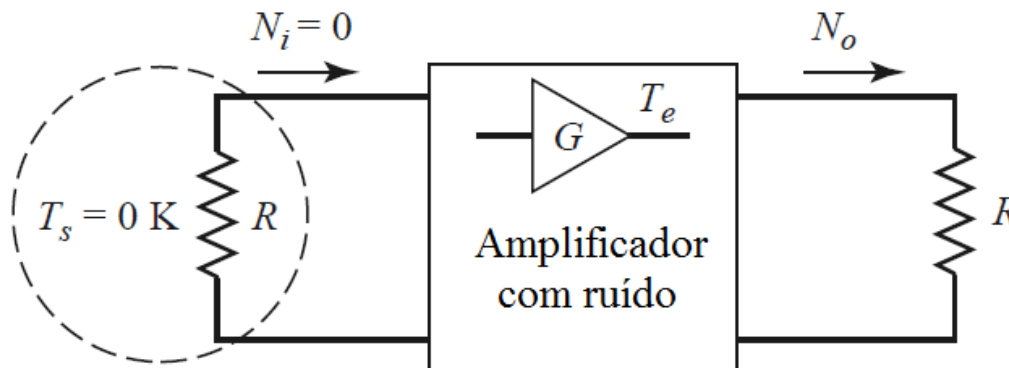


$$T_e = \frac{N_o}{kB}$$

Temperatura de Ruído

Temperatura de Ruído de Amplificadores

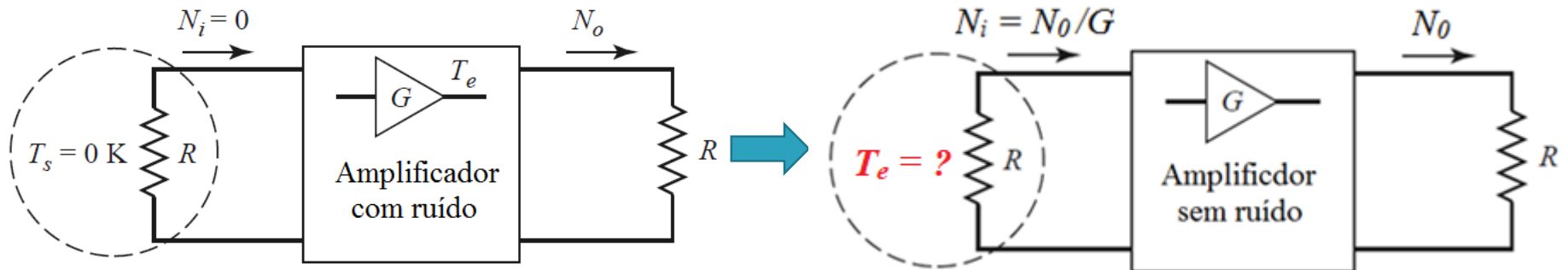
- Considere um amplificador com ruído
 - Ganho G
 - Alimentado na entrada por resistência casada R a $T_s = 0\text{ K}$ (*sem ruído*)
 - Entrega na saída potência de ruído N_o à carga casada R
- Logo N_o é a potência de ruído gerada pelo amplificador



Temperatura de Ruído

Temperatura de Ruído de Amplificadores

- Temperatura equivalente de ruído do amplificador com ganho G
- Temperatura T_e de uma resistência R casada
 - Conectada na entrada de um amplificador ideal sem ruído
 - Que gera uma potência de ruído $N_i = N_o/G$
 - Resultando na potência de ruído N_o na saída desse amplificador ideal



Tem-se

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

Logo

- A temperatura de ruído do amplificador é

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

Temperatura de Ruído

Temperatura de Ruído de Componentes Passivos

- Componentes passivos reais \rightarrow perdas
 - Atenuadores
 - Filtros
 - Linhas de transmissão
 - Guias de ondas
- Relação entre perda e ganho
 - Redes passivas com perdas $\rightarrow L > 1$ ou $L(dB) > 0$
 - O ganho é definido como $\rightarrow G = 1/L$ ou $G(dB) = -L(dB)$
- Efeito da perda no desempenho do sistema
 - Adiciona potência de ruído $\rightarrow N_{add}$

Temperatura de Ruído

Temperatura de Ruído de Componentes Passivos

- Temperatura de ruído

- Componente com perda L

- Com temperatura física T



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

- Figura de Ruído

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



$$F = 1 + (L - 1) \frac{T}{T_0}$$

$$T_0 = 290 \text{ K}$$

- Quando a temperatura da rede é $T = T_0 = 290 \text{ K} \rightarrow$

$$F = L$$

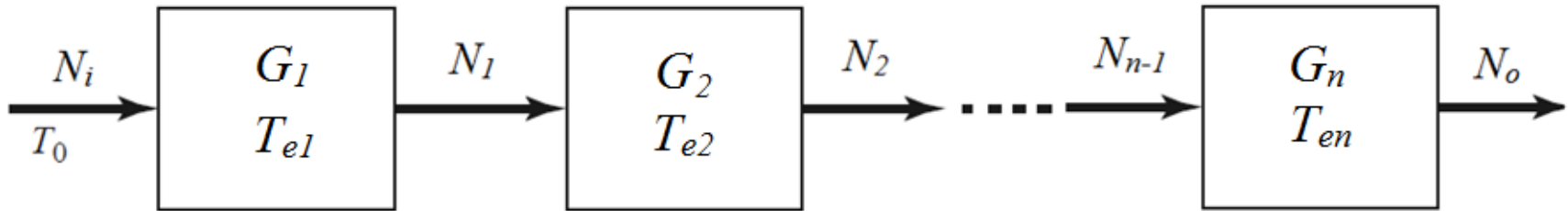
- Exemplos: na temperatura $T_0 = 290 \text{ K}$

- Atenuador de 6 dB $\rightarrow F = 6 \text{ dB}$

- Filtro com perda de inserção de 0,5 dB $\rightarrow F = 0,5 \text{ dB}$

Temperatura de Ruído

- Temperatura de Ruído de uma rede em cascata

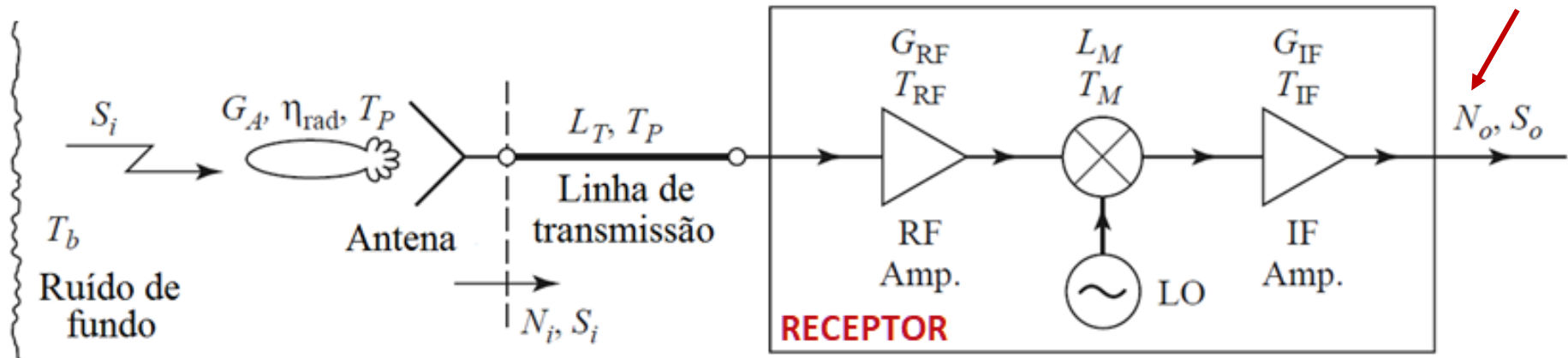


$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

- Relação sinal-ruído de saída S_o/N_o do conjunto antena/receptor
 - A temperatura física da antena é usualmente $T_A \neq 290 \text{ K}$
(Não se utiliza Figura de Ruído, definida para componentes em $T=290 \text{ K}$)
 - Utiliza-se a Temperatura de Ruído para cálculo da potência de ruído de saída $\rightarrow N_o$
 - A potência de sinal na saída é $S_o = G.S_i$, sendo G o ganho total do sistema

Temperatura de Ruído

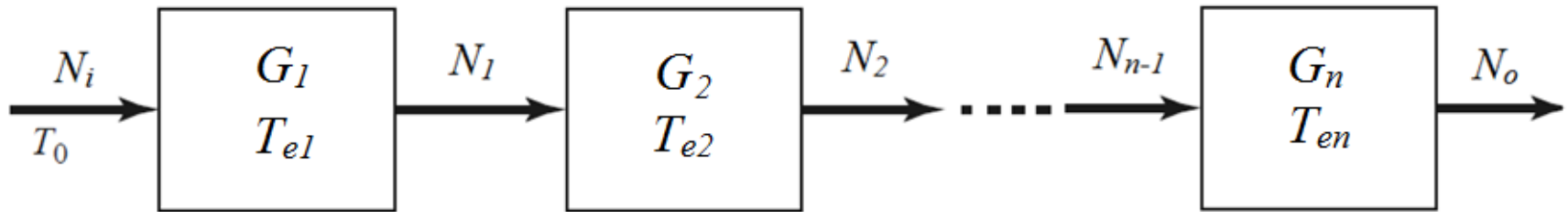
- Temperatura de Ruído de uma rede em cascata



- Potência de ruído na saída do sistema N_o do conjunto antena/receptor
 - Depende do ruído na entrada do sistema N_i
 - Função de T_A , temperatura de ruído da antena
 - Contribuição do ruído gerado ao longo do sistema
 - Função de T_{LT} , temperatura de ruído da linha de transmissão entre a antena e o receptor
 - Função de T_{REC} , temperatura de ruído do receptor

Temperatura de Ruído

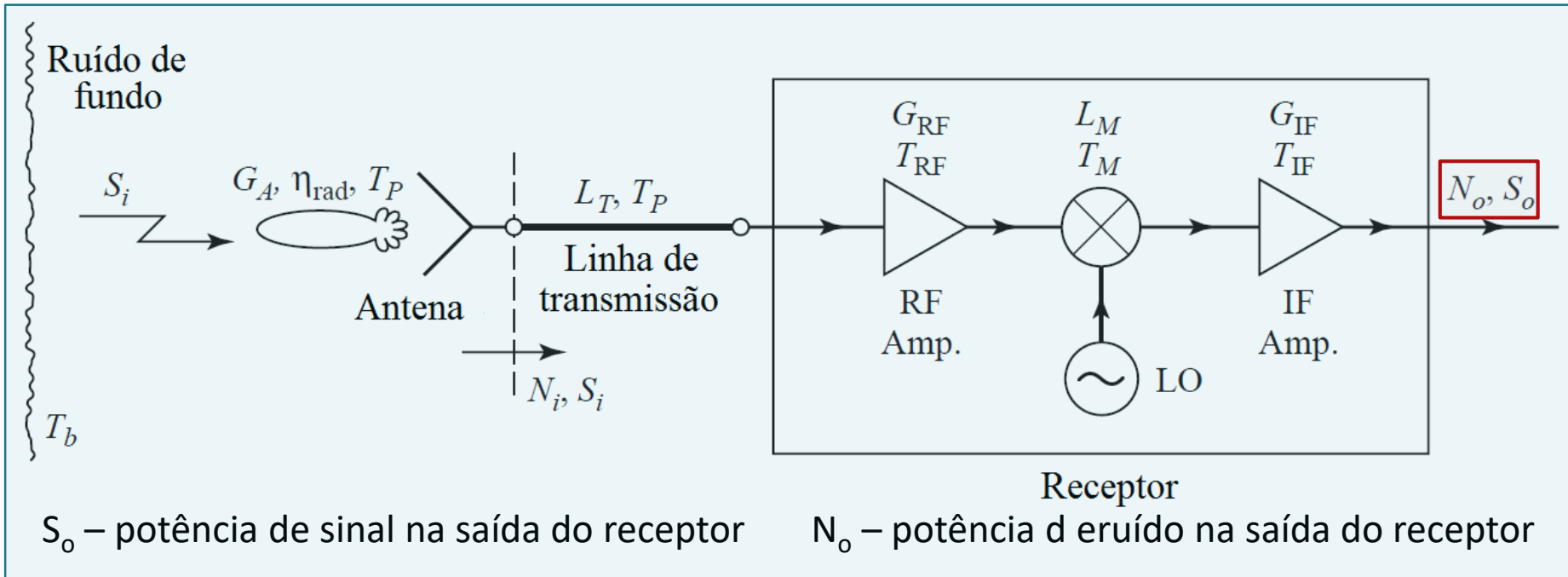
- Temperatura de Ruído de uma rede em cascata



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

- A linha de transmissão e os elementos do receptor estão em cascata
- A temperatura desse conjunto depende, T_{LT+REC}
 - Da perda e da temperatura de ruído da linha de transmissão
 - Do ganho e da temperatura de ruído do receptor
 - Calculada pela equação acima

Relação sinal-ruído na saída do receptor



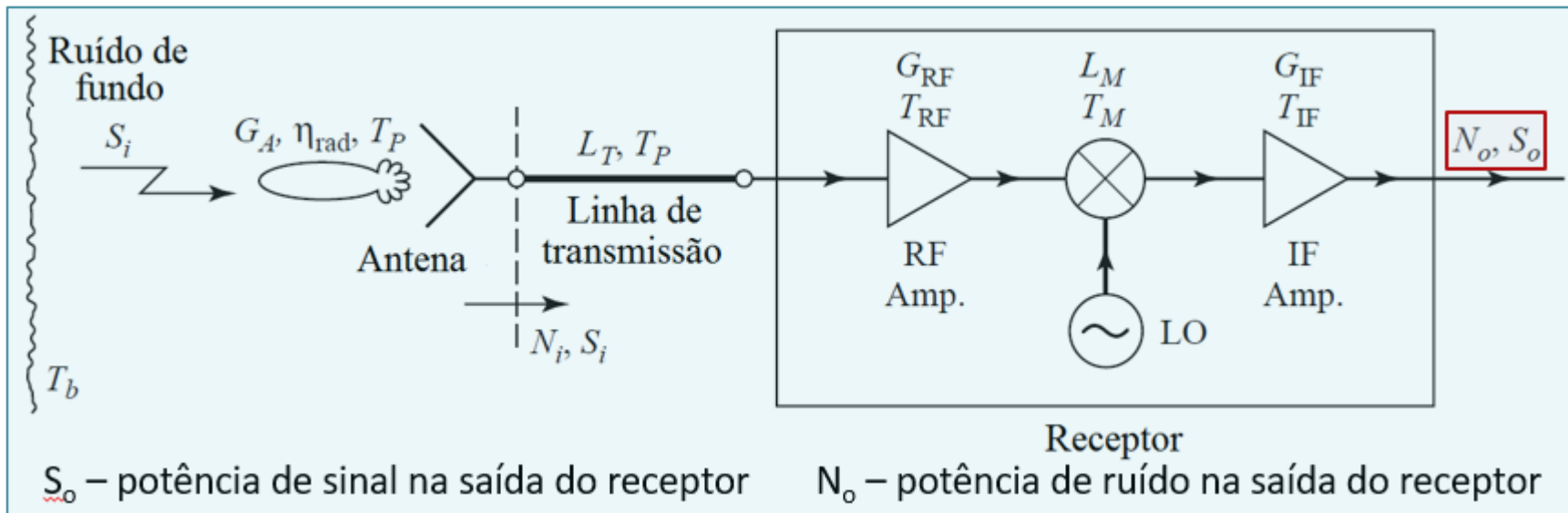
- **S_o/N_o - especificação do sistema**

- Taxa de erro de bits desejada
- Tipo de modulação usada
- Corretor de erro

} ➔ Valor mínimo de $\frac{S_o}{N_o}$

Por exemplo: $S_o/N_o > 1.000$ ou 30 dB

Relação sinal-ruído na saída do receptor

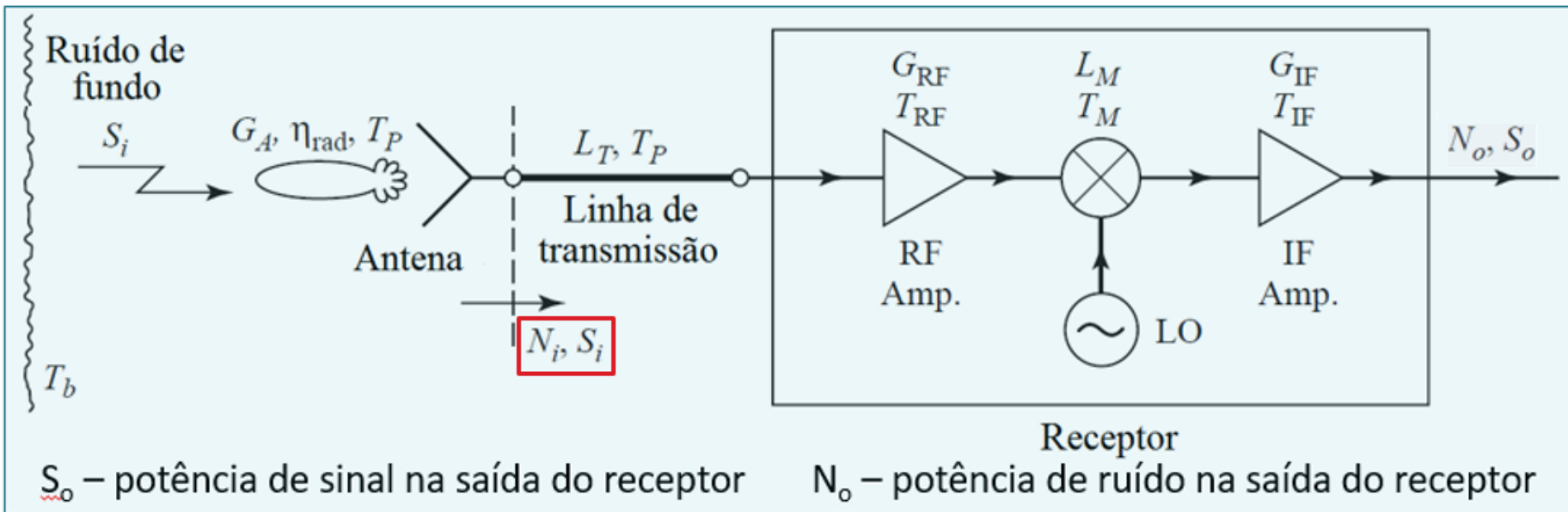


- **S_o – potência de sinal na saída do receptor**

- S_i – Potência de entrada entregue pela antena
($S_i = P_r \rightarrow$ Equação de propagação de Friis)
 - L_T – perda da linha de transmissão
 - G_{REC} – ganho do receptor
- } \rightarrow Valor de S_o

$$S_o(dBm) = S_i(dBm) - L_T(dB) + G_{REC}(dB)$$

Relação sinal-ruído na saída do receptor



- N_i – potência de ruído na entrada do receptor

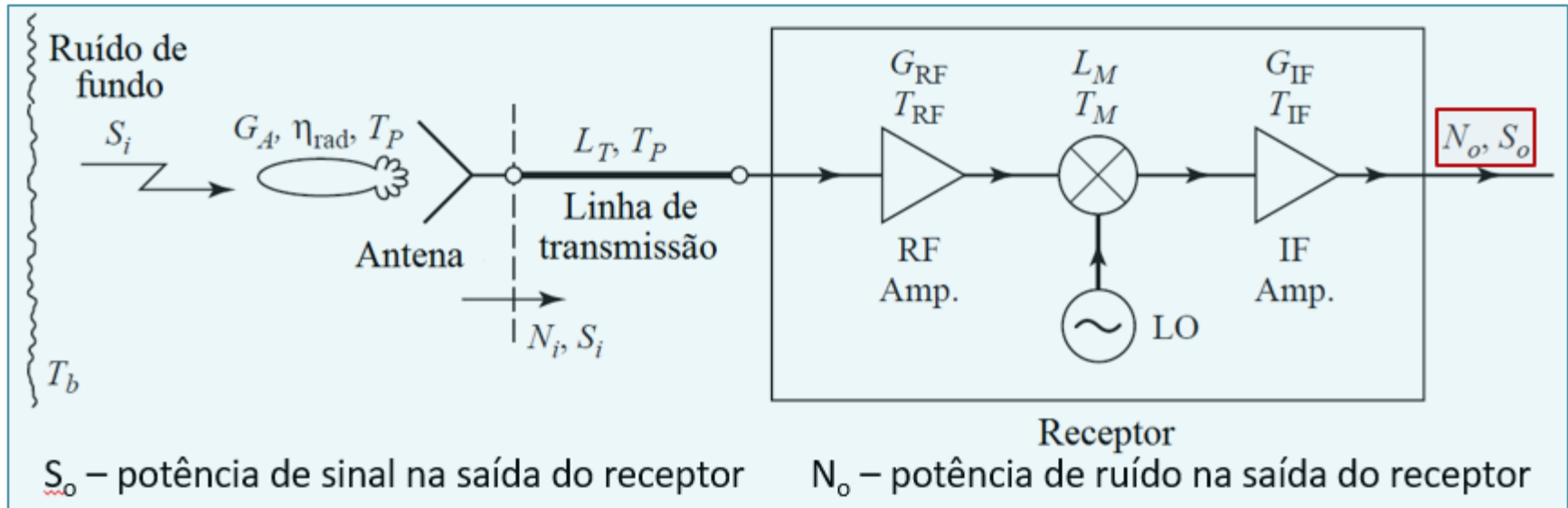
- Ruído de fundo captado pela antena
 - Ruído devido a perdas da antena
- } → Temperatura equivalente de ruído da antena T_A

$$N_i = k \cdot T_A \cdot B$$

B – banda de frequência do receptor

k – Constante de Boltzmann

Relação sinal-ruído na saída do receptor



- **N_o – potência de ruído na saída do receptor**

- **N_i** – potência de ruído entregue pela antena
- **L e T_{TL}** – Perda e temperatura de ruído da linha de transmissão
- **G_{REC} e T_{REC}** – Ganho e temperatura de ruído receptor

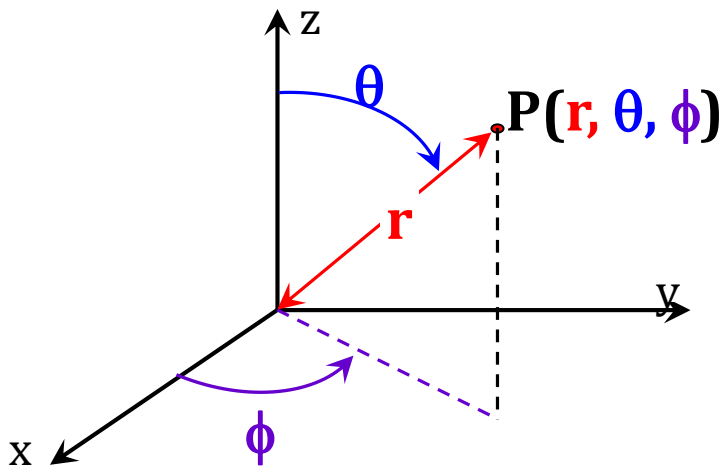
T_{LT} – temperatura de ruído da linha de transmissão

T_{REC} – temperatura de ruído do receptor

Temperatura de Ruído

Temperatura Equivalente de Ruído da Antena - T_A

- Contribuição de dois fatores
 - Ruído captado pela antena da área por ela iluminada
 - Ruído gerado pela antena, devido a perdas em sua estrutura
- **Ruído captado pela antena – T_b**
 - Depende do ganho da antena $G(\theta, \phi)$, função da dos ângulos de elevação (θ) e azimute (ϕ)
 - Depende da distribuição espacial da temperatura de ruído $T_b(\theta, \phi)$



Coordenadas esféricas do ponto P

θ - ângulo de elevação

ϕ - ângulo de azimute

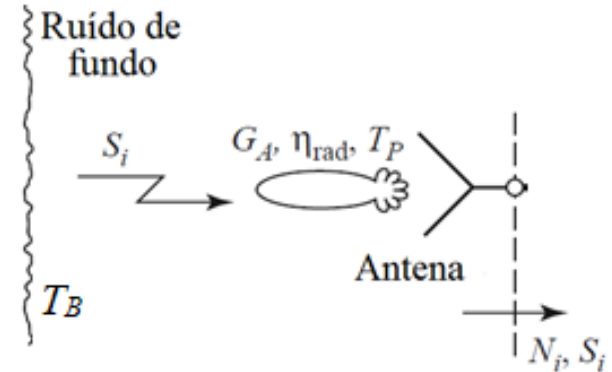
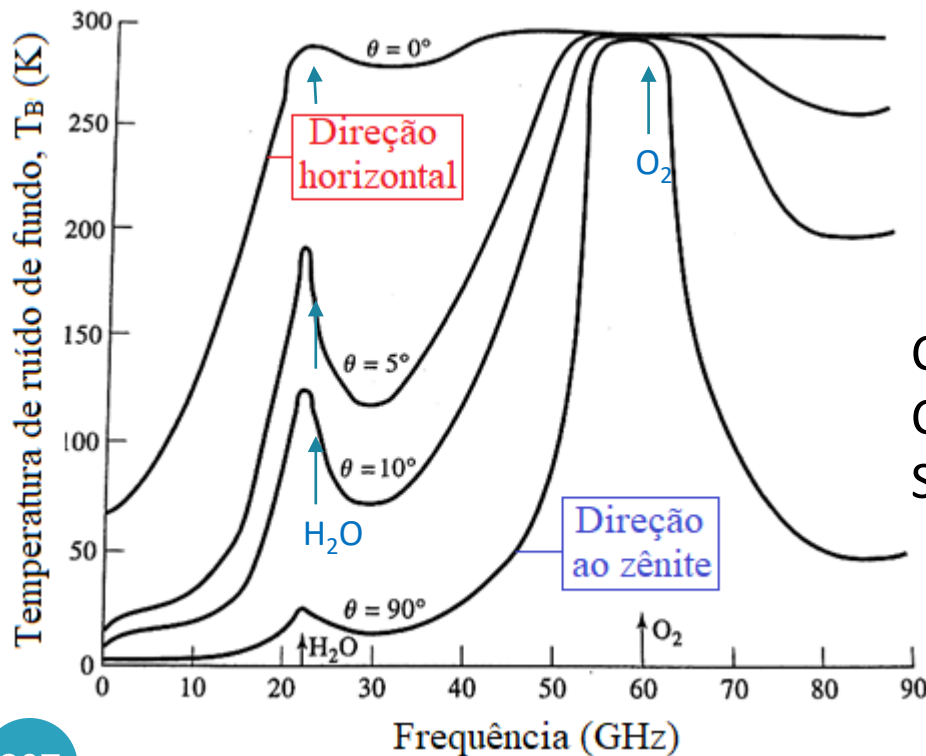
r – distância ao centro das coordenadas

Temperatura de Ruído

Temperatura Equivalente de Ruído da Antena - T_A

Temperatura de ruído de fundo captado pela antena da área por ela iluminada

T_B - Temperatura de ruído de fundo do céu versus ângulo de elevação θ medido a partir do horizonte



Valores típicos de T_B

na faixa inferior de micro-ondas

Céu direção ao zênite $\rightarrow T_B$ de 3 a 5 K

Céu direção horizontal $\rightarrow T_B$ de 50 a 100 K

Solo $\rightarrow T_B$ de 290 a 300 K

Efeitos de ressonância molecular

22 GHz – moléculas de H_2O

60 GHz – moléculas de O_2

Temperatura de Ruído

Temperatura Equivalente de Ruído da Antena - T_A

- T_b – Temperatura de brilho vista pela antena

$$T_b = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta, \phi) \cdot T_B(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi}$$

- Para antenas de feixe estreito, o ruído de fundo pode ser considerado uniforme $T_B(\theta, \phi) = T_B$, resultando

$$T_b = T_B$$

- Temperatura de ruído da antena - T_A

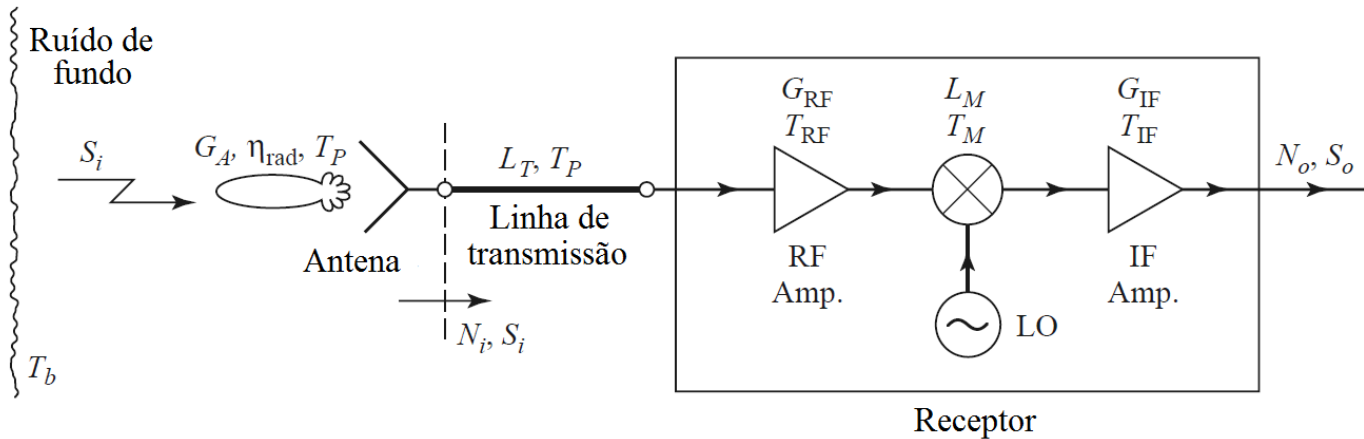
$$T_A = \eta_{\text{rad}} T_b + (1 - \eta_{\text{rad}}) T_P$$

↑
Ruído captado
pela antena

↑
Ruído gerado
pela antena

- η_{rad} eficiência de radiação da antena associada às perdas da antena
- T_b temperatura de brilho
- T_P temperatura física da antena em K

Relação sinal ruído na entrada e saída do receptor



- **Potência de ruído entregue ao receptor pela antena – N_i**

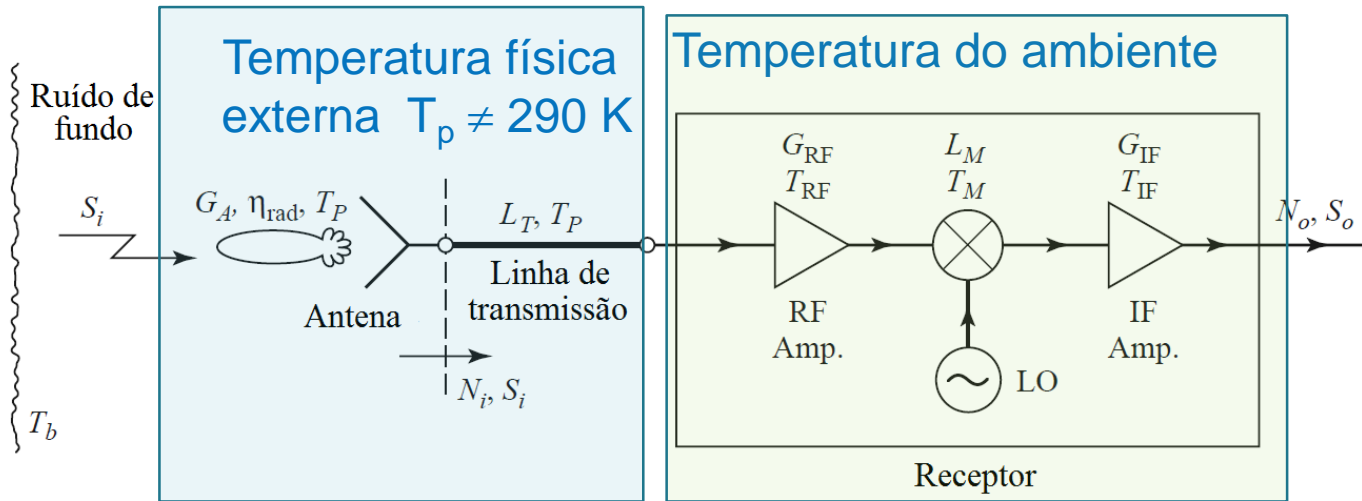
$$N_i = kBT_A = kB[\eta_{rad}T_b + (1 - \eta_{rad})T_p] \quad (W, K)$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, constante de Boltzmann

- **Potência de sinal na entrada do receptor: S_i**
 - Calculada pela equação de transmissão de Friis

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

• Temperatura de ruído do receptor



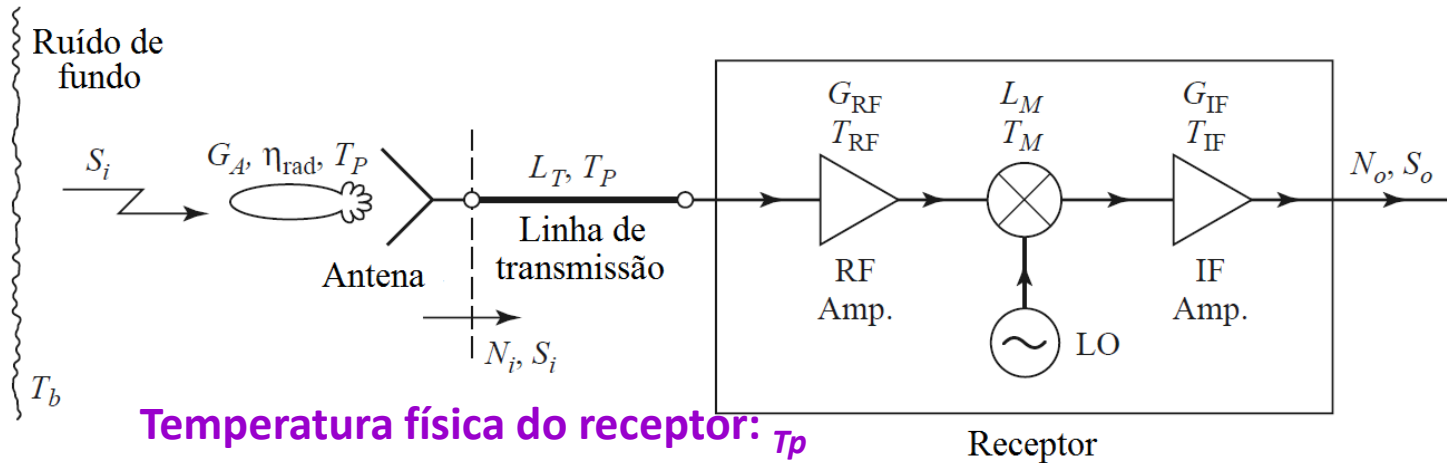
• **Temperatura de ruído** $\rightarrow T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$

• Receptor $\rightarrow T_{REC} = T_{RF} + \frac{T_M}{G_{RF}} + \frac{T_{IF} L_M}{G_{RF}}$

• Linha de transmissão $\rightarrow T_{TL} = (L_T - 1)T_p$

• Linha de transmissão + receptor $\rightarrow T_{TL+REC} = T_{TL} + L_T T_{REC} = (L_T - 1)T_p + L_T T_{REC}$

• Características de ruído do receptor completo

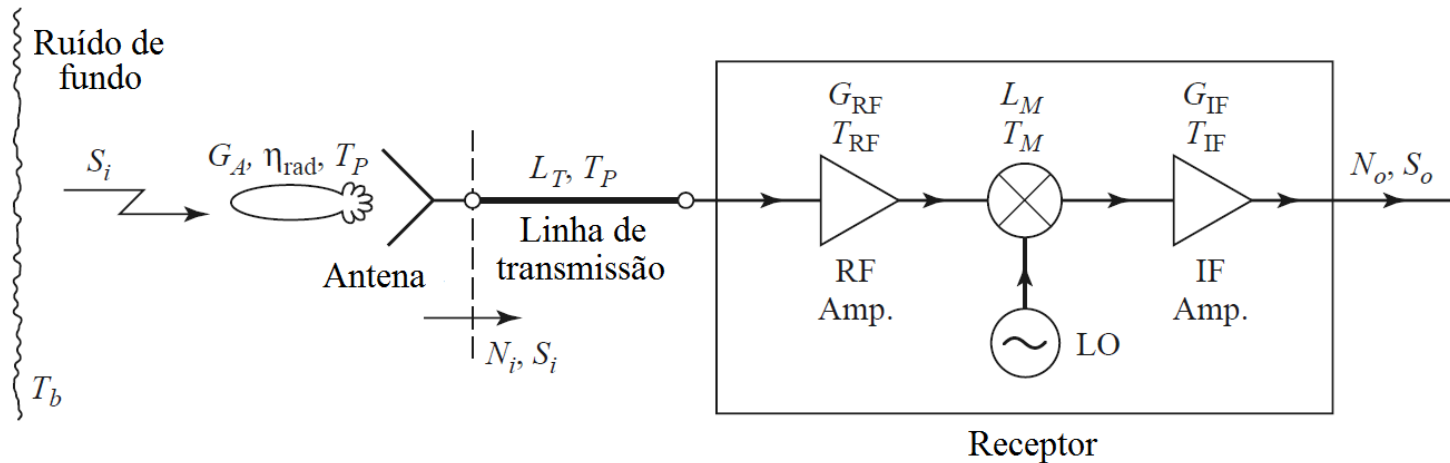


- **Ganho do sistema**
$$G_{SYS} = \frac{1}{L_T} \cdot G_{RF} \cdot \frac{1}{L_M} \cdot G_{IF} = \frac{G_{RF} \cdot G_{IF}}{L_T \cdot L_M}$$
- **Potência de ruído na saída do receptor**

$$N_o = \underbrace{(N_i)}_{\text{Ruído entregue pela antena}} + \underbrace{kBT_{TL+REC}}_{\text{Ruído da LT e do receptor}} \underbrace{G_{SYS}}_{\text{Ganho do sistema}}$$

$$N_o = kB(T_A + T_{TL+REC})G_{SYS} \quad \longrightarrow \quad N_o = kB T_{SYS} G_{SYS}$$

- Características de ruído do receptor completo



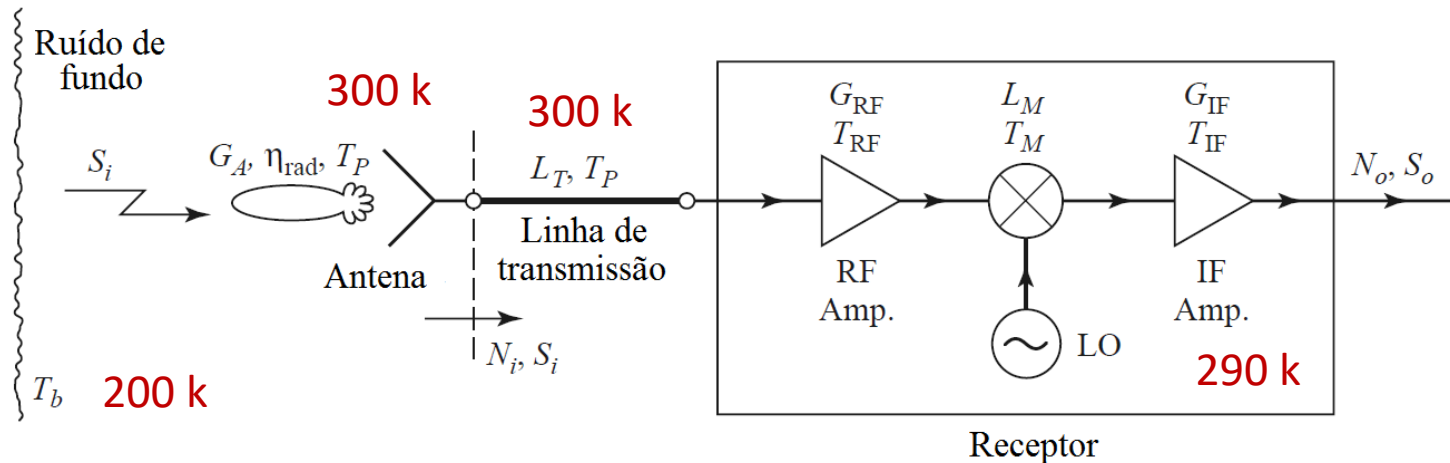
- Potência de sinal na saída do receptor

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

- Relação sinal-ruído na saída do receptor

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{kBT_{SYS}} = \frac{S_i}{kB[T_A + (L_T - 1)T_P + L_T T_{REC}]}$$

Características de ruído do receptor completo



- Sistema $f = 4.0 \text{ GHz},$
 $B = 1 \text{ MHz},$
 $S_i = -80 \text{ dBm},$

- Antena $G_A = 26 \text{ dB},$
 $\eta_{\text{rad}} = 0.90,$
 $T_p = 300 \text{ K},$
 $T_b = 200 \text{ K},$

- Linha de transmissão $L_T = 1.5 \text{ dB}$
- Amplificador de RF $G_{\text{RF}} = 20 \text{ dB},$
 $F_{\text{RF}} = 3.0 \text{ dB},$
- Conversor de frequência $L_M = 6.0 \text{ dB},$
 $F_M = 7.0 \text{ dB},$
- Amplificador de FI $G_{\text{IF}} = 30 \text{ dB},$
 $F_{\text{IF}} = 1.1 \text{ dB}.$

Características de ruído do receptor completo

Temperatura equivalente de ruído da antena $\rightarrow T_A$ (K)

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

T_p – temperatura física da antena em Kelvin

η_{rad} – eficiência de radiação da antena

T_b – temperatura de ruído fundo captado pela antena

- Antena

$$G_A = 26 \text{ dB,}$$

$$\eta_{\text{rad}} = 0.90,$$

$$T_p = 300 \text{ K,}$$

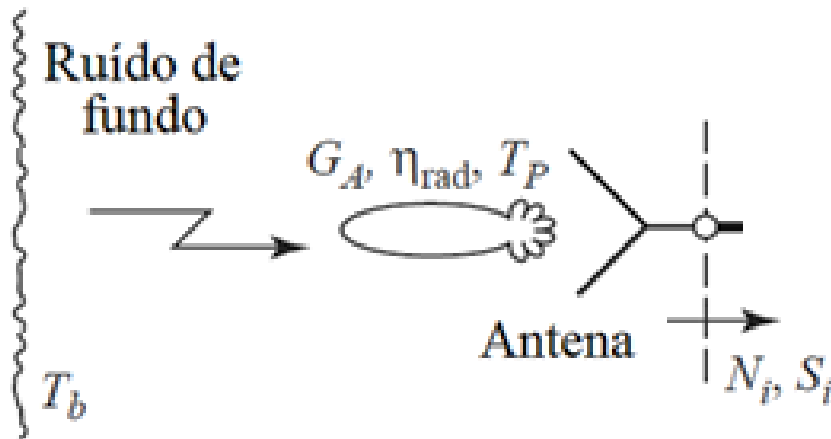
$$T_b = 200 \text{ K,}$$

$$T_A = 0,9 \cdot 200 + (1 - 0,9) \cdot 300 = 210 \text{ K}$$

$$T_A = 210 \text{ K}$$

Características de ruído do receptor completo

Potência de ruído entregue pela antena ao receptor – N_i



T_A – permite calcular N_i

$$N_i = kBT_A \text{ (W, K)}$$

k – Constante de Boltzmann

B – banda d receptor (em Hz)

- Sistema

$$f = 4.0 \text{ GHz,}$$

$$B = 1 \text{ MHz,}$$

$$S_i = -80 \text{ dBm,}$$

$$N_i = 1,38 \times 10^{-23} \cdot 210 \cdot 10^6 = 2,9 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

$$N_i = 2,9 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

Características de ruído do receptor completo

Temperatura equivalente de circuitos passivos

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

T_p – temperatura física da antena em Kelvin

L – perda do elemento passivo (adimensional)

- Linha de transmissão entre antena e receptor

Perda: L_T (dB) = 1.5 dB

Temperatura física $T_p = 300$ k

$$L_T = 10^{1,5/10} = 1,4125$$

$$T_{LT} = (1,4125 - 1)300$$

$$T_{LT} = 123 \text{ k}$$

Características de ruído do receptor completo

Temperatura equivalente dos elementos do receptor

$$T_e = (F - 1)T_0$$

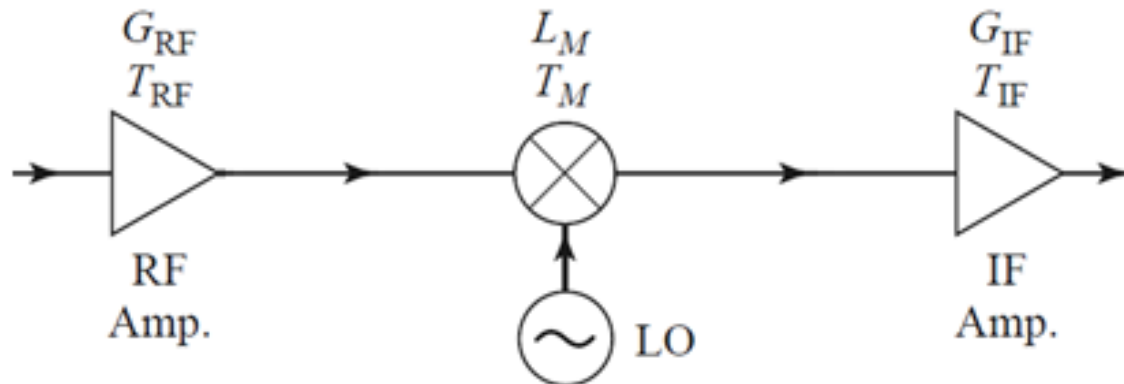
T_0 – temperatura de referência → 290 Kelvin

F – figura de ruído (adimensional)

- Receptor

$$\begin{array}{lll} G_{\text{RF}} = 20 \text{ dB}, & L_M = 6.0 \text{ dB}, & G_{\text{IF}} = 30 \text{ dB}, \\ F_{\text{RF}} = 3.0 \text{ dB}, & F_M = 7.0 \text{ dB}, & F_{\text{IF}} = 1.1 \text{ dB}. \end{array}$$

Operando
a $T_0 = 290 \text{ k}$



Características de ruído do receptor completo

Temperatura equivalente dos elementos do receptor

Dados em
decibéis

$$G_{RF} = 20 \text{ dB}, \quad L_M = 6.0 \text{ dB}, \quad G_{IF} = 30 \text{ dB},$$

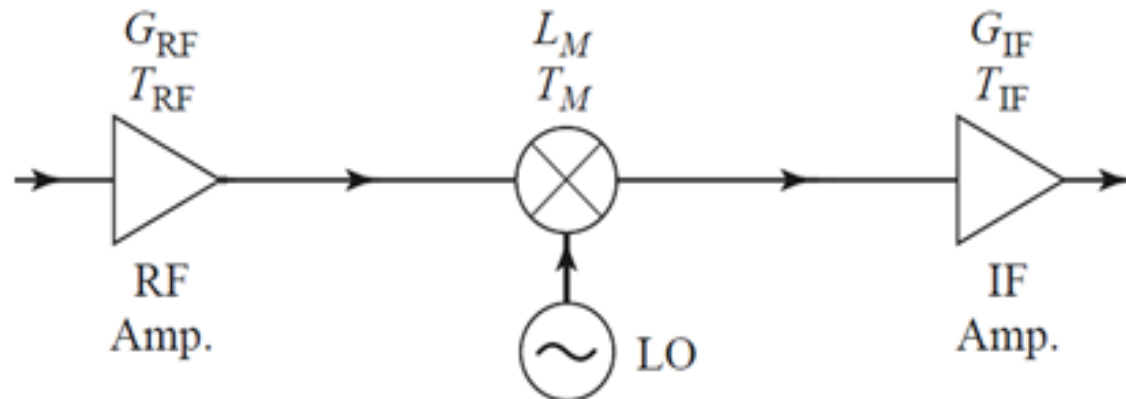
$$F_{RF} = 3.0 \text{ dB}, \quad F_M = 7.0 \text{ dB}, \quad F_{IF} = 1.1 \text{ dB}.$$

$$G = 10^{G_{dB}/10} \quad \Rightarrow \quad G_{RF} = 100 \quad L_M = 4 \quad G_{IF} = 1.000$$

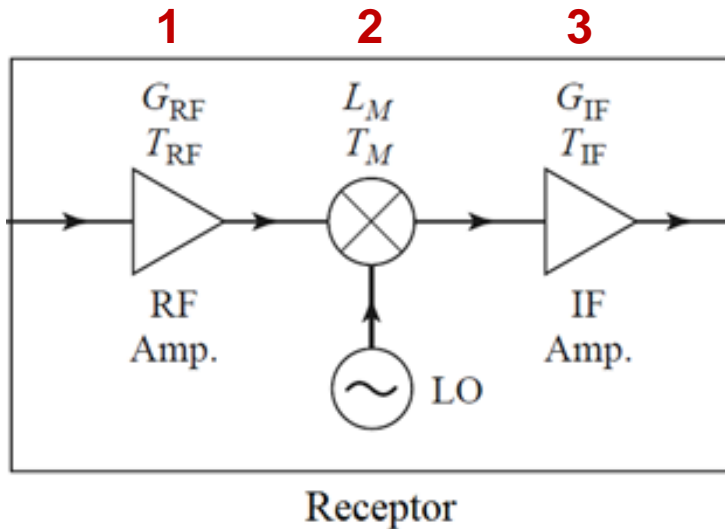
$$F = 10^{F_{dB}/10} \quad \Rightarrow \quad F_{RF} = 1,99 \quad F_M = 5,01 \quad F_{IF} = 1,29$$

$$T_{RF} = 289 \text{ k} \quad T_M = 1.163 \text{ k} \quad T_{IF} = 84 \text{ k}$$

$$T_e = (F - 1)T_0$$



• Temperatura de Ruído do Receptor

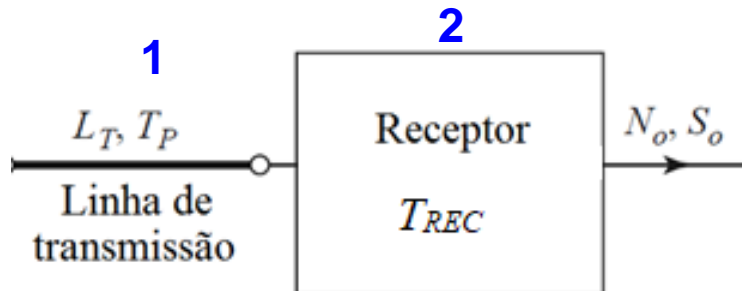


$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 \cdot G_2}$$

$$T_{REC} = T_{RF} + \frac{T_M}{G_{RF}} + \frac{T_{IF} \cdot L_M}{G_{RF}}$$

$$T_{REC} = 304 \text{ K}$$

• Temperatura de Ruído da Linha de Transmissão + Receptor

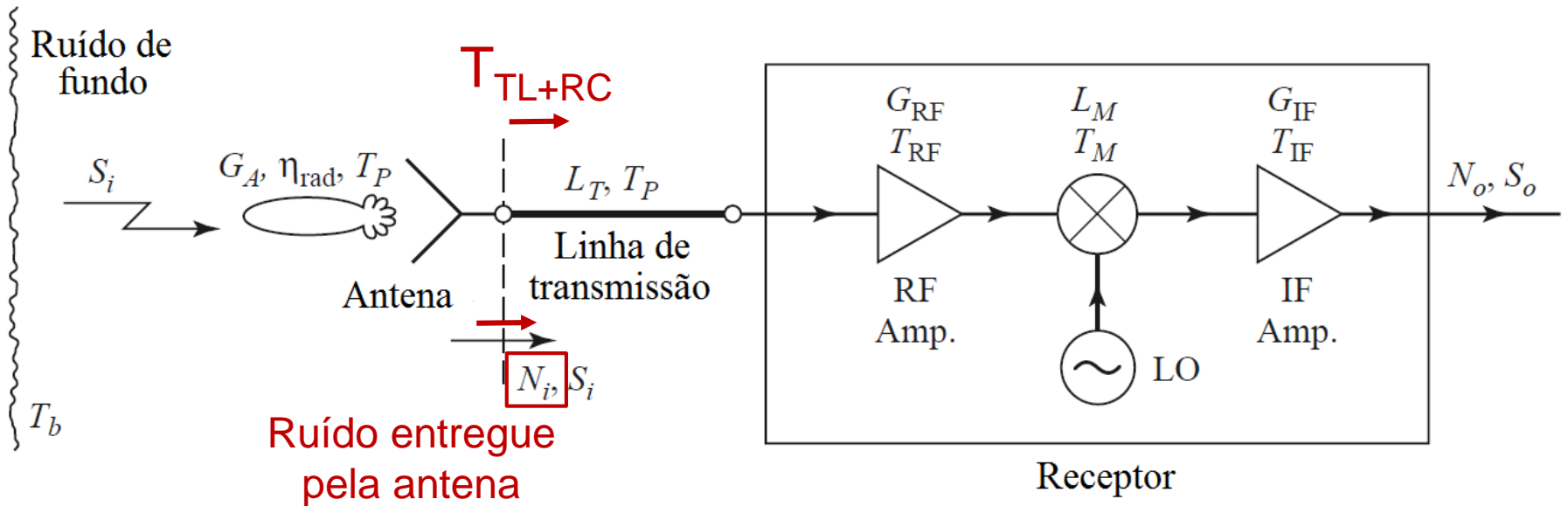


$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1}$$

$$T_{TL+REC} = T_{TL} + L_T \cdot T_{REC}$$

$$T_{TL+REC} = 123 + 1,41 \cdot 304 = 552 \text{ K}$$

• Relação Sinal Ruído na saída do Receptor



Ganho do sistema
Linha de transmissão e Receptor

$$G_{SYS} = \frac{G_{RF} \cdot G_{FI}}{L_T \cdot L_M}$$

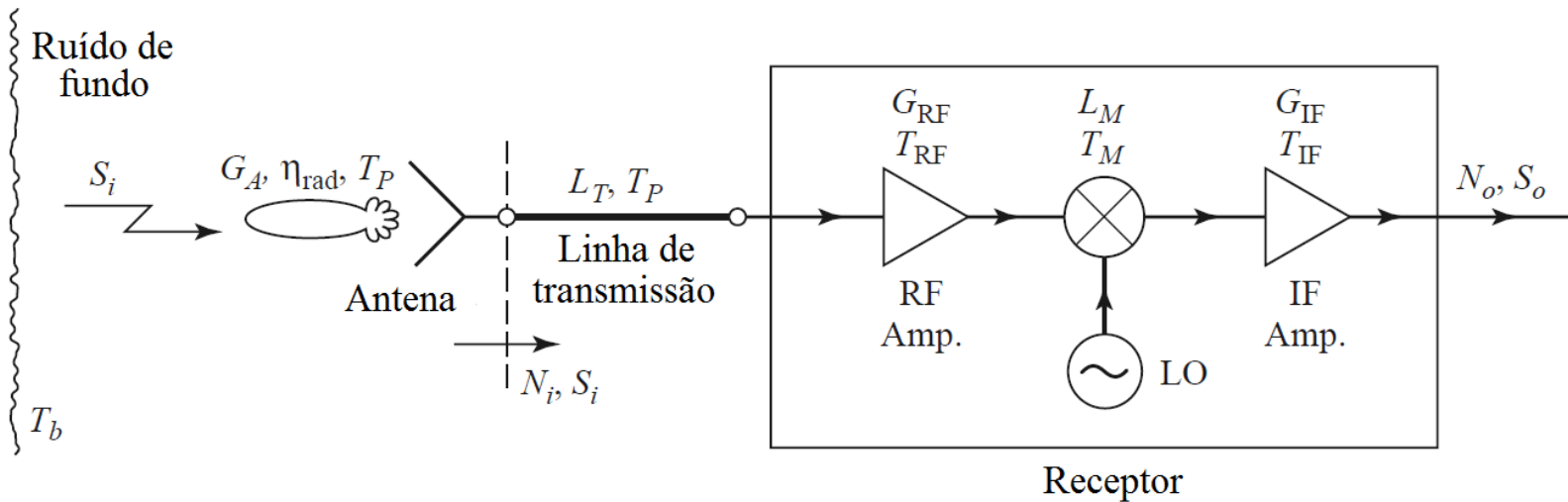
Potência de sinal na
saída do sistema

$$S_o = G_{SYS} \cdot S_i$$

Potência de ruído na
saída do sistema

$$N_o = (N_i + k \cdot T_{TL+REC} \cdot B) \cdot G_{SYS}$$

• Relação Sinal Ruído na saída do Receptor

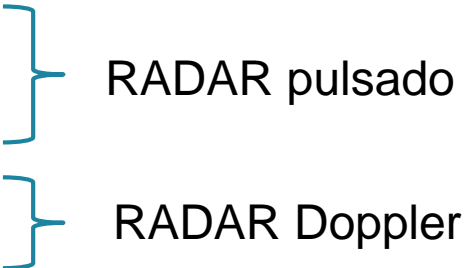


$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{S_i \cdot G_{SYS}}{(N_i + k \cdot T_{TL+REC} \cdot B) \cdot G_{SYS}} = \frac{S_i}{(N_i + k \cdot T_{TL+REC} \cdot B)}$$

$$\frac{S_0}{N_0} = 1.000 \text{ ou } 30 \text{ dB}$$

SISTEMAS RADAR

RADAR

- **RA**dio **D**etction **A**nd **R**anging
 - Opera em frequências RF ou 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

Exemplos de aplicações do Radar

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

RADAR

- Radar em radome no bico de um jato militar



RADAR

- Radares de aeroportos – 118 a 136 MHz



- Antena móvel
- Rotação de 360° em azimute



- Torre de controle usando antena com **radome**
- Aeroporto de Guarulhos

RADOME

- Radome ou “Radar Dome”
 - Provê proteção à antena – vento, chuva, neve
- Material do Radome
 - Mecanicamente resistente
 - Suportar intempéries
 - Transparente a micro-ondas
 - O sinal de micro-ondas atravessa o radome com baixas perdas



RADOME

- Radomes de antenas de sistemas de telecomunicações



Antennas for Communications (AFC) Radomes and Radome Product Capabilities

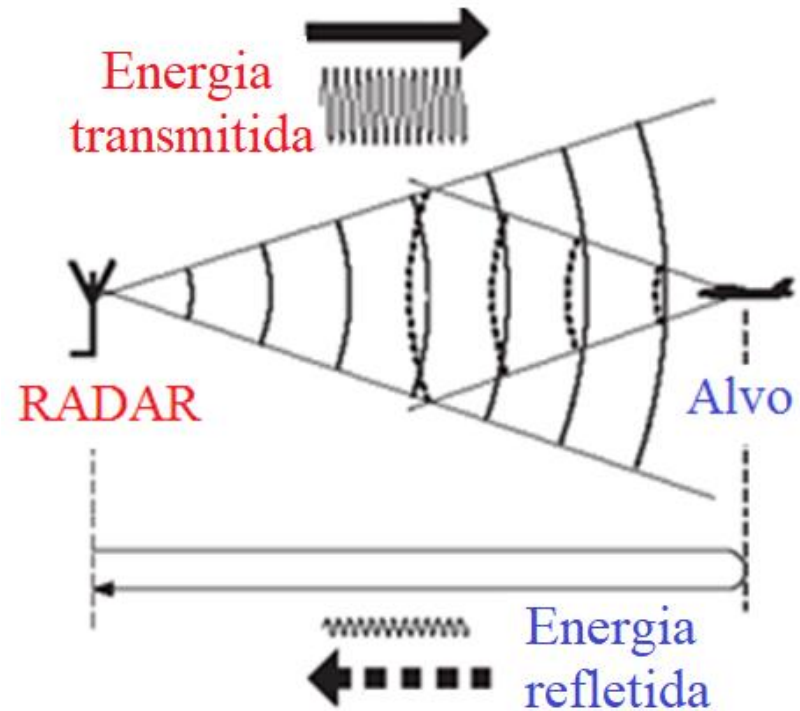
- Montagem de Radome ao redor de antena de grandes dimensões



Vincent Fournier's Past Forward (trendland.com)

RADAR

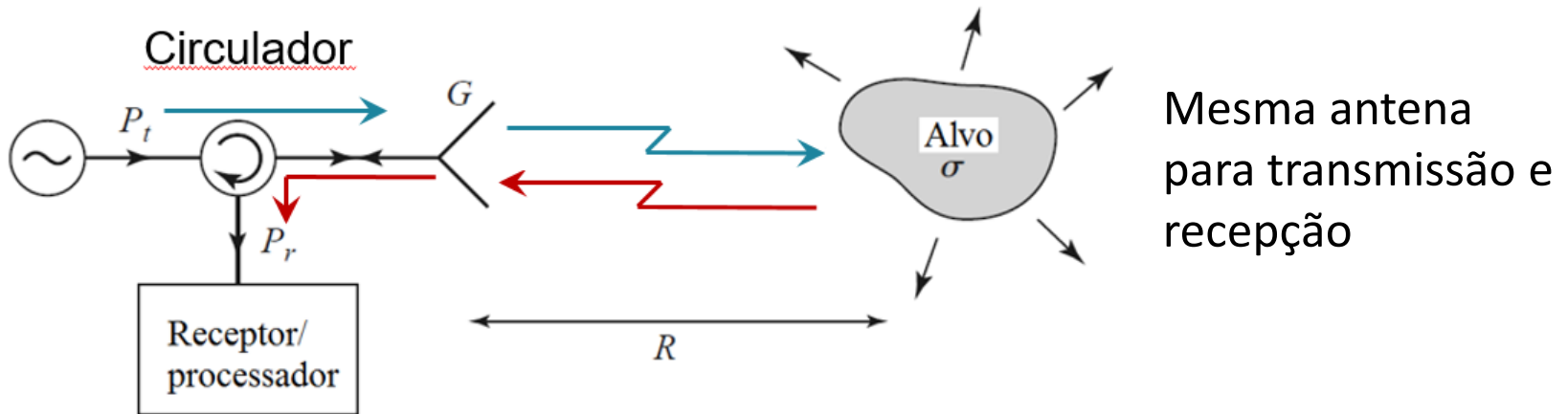
- **Princípio de operação**
- Radar gera um sinal de UHF ou de micro-ondas
- O sinal é transmitido pela antena do radar
- Alvos no caminho do sinal transmitido refletem o sinal de volta para o radar
- A **distância** ou **velocidade do alvo** são obtidas comparando os sinais transmitido e recebido pelo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



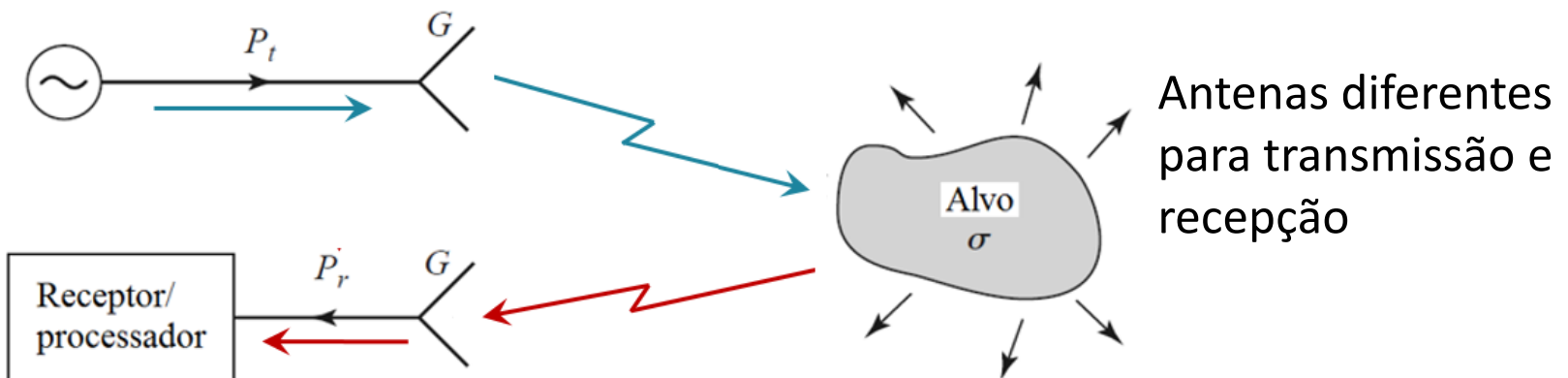
- Medida de distância → Δt entre sinais transmitido e recebido
- Medida de velocidade → Δf entre sinais transmitido e recebido

Tipos de RADAR

- **RADAR monoestático**



- **RADAR biestático**



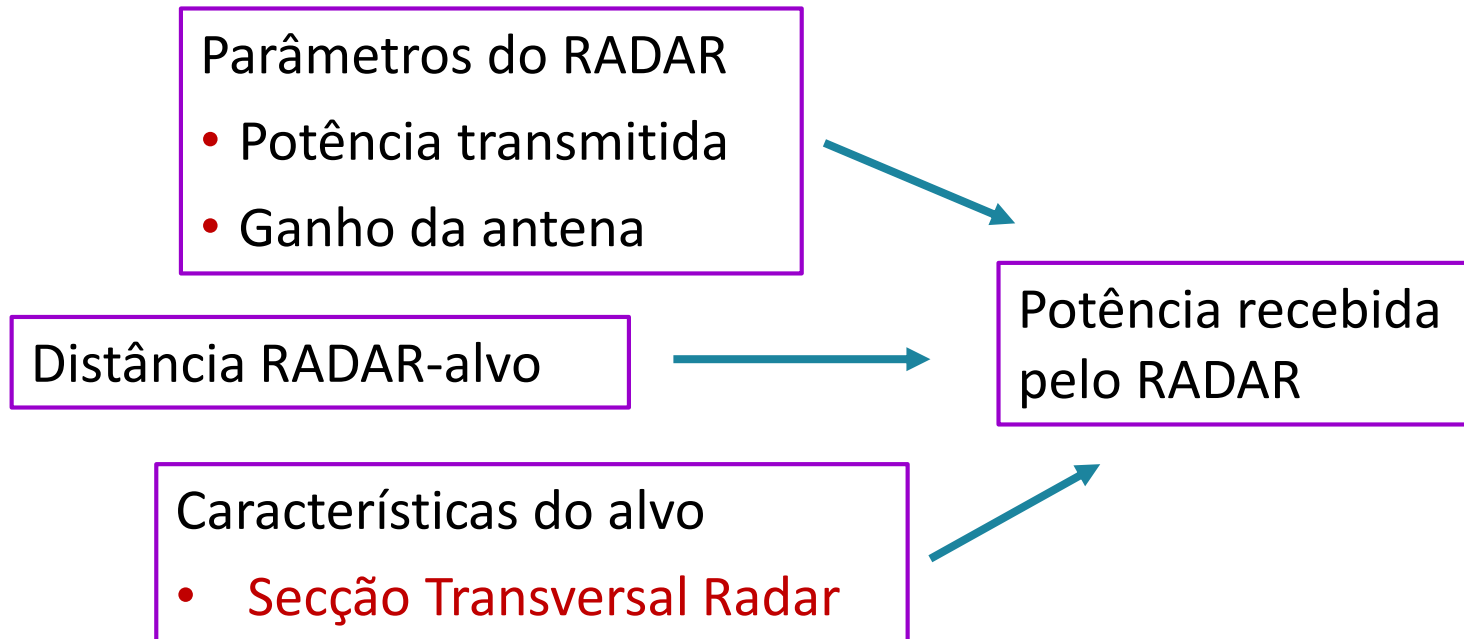
Sistemas RADAR

Tipos de RADAR

- **RADAR monoestático**
 - Tipo de RADAR usado na maioria das aplicações
- **RADAR biestático**
 - Tipo de radar usado em aplicações que exigem alta isolamento entre o sinal transmitido e recebido
 - Exemplo: controle de disparo de mísseis
 - Uso de antenas diferentes para transmissão e recepção provê elevada isolamento entre transmissor e receptor

Equação do RADAR

- Equação básica para o projeto do RADAR
- Permite calcular
 - A potência recebida pelo RADAR
 - O alcance do RADAR



Equação do RADAR

Secção Transversal Radar - σ

OU

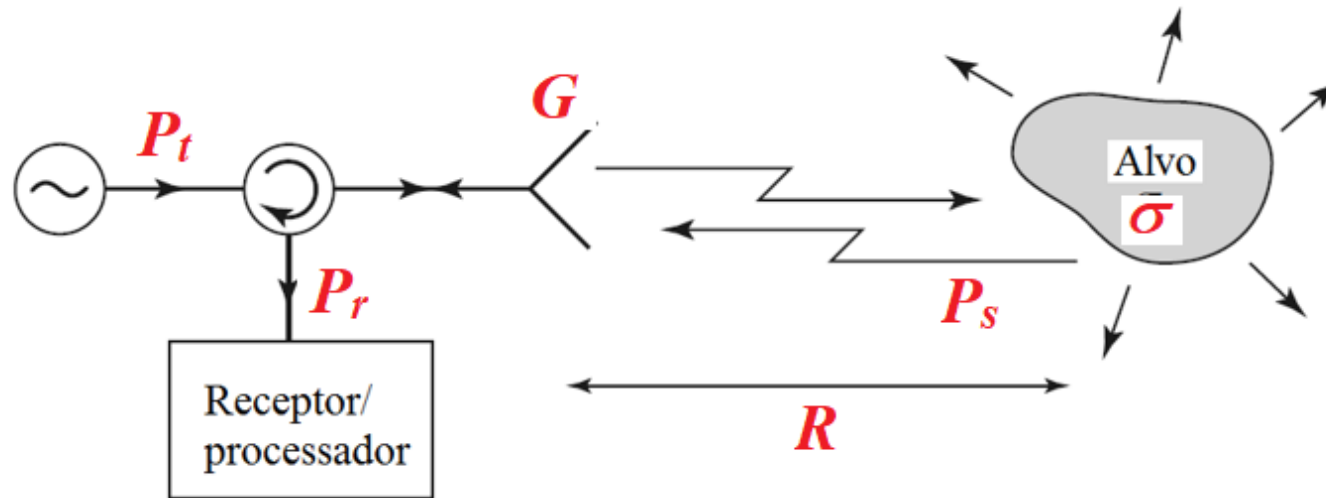
Radar Cross Section - RCS

“Habilidade de um alvo refletir sinal em direção ao receptor do radar”

- Quanto maior a Secção Transversal Radar mais fácil o alvo ser detectado pelo radar
- Secção transversal radar é um dos parâmetros usados para se obter a “assinatura radar” característica de um alvo, e que permite sua identificação.

Equação do RADAR

- Equação do Radar Monoestático



P_t Potência do transmissor do radar

G Ganho da antena do radar

R Distância entre o radar e o alvo

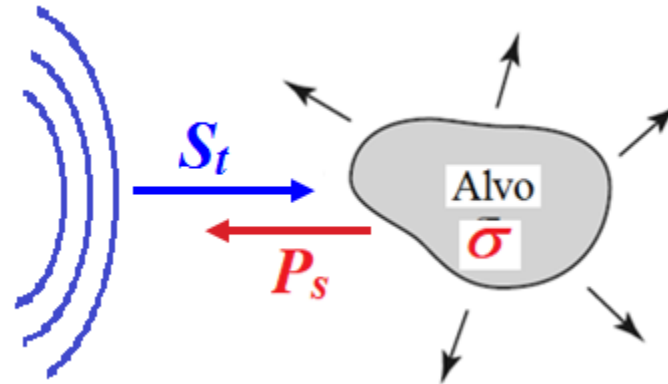
P_s Potência espalhada pelo alvo

σ Secção Transversal Radar do alvo

P_r Potência recebida pelo radar

Equação do RADAR

Secção Transversal Radar - σ



- O sinal emitido pelo radar gera uma densidade de potência S_t que incide no alvo
- O alvo reflete esse sinal, atuando como uma fonte que emite uma potência P_s na direção do Radar
- A secção transversal radar do alvo é definida como

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

Equação do RADAR

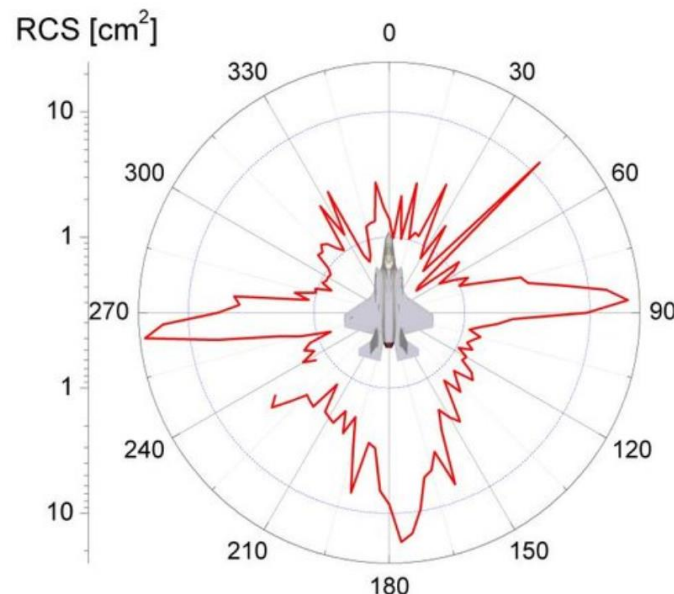
Secção Transversal Radar - σ

- Relacionada com a área da seção transversal do alvo que espalha o sinal emitido pelo radar
- Depende do material do alvo
- Função da frequência e polarização do sinal incidente no alvo
- Depende do ângulo de incidência e reflexão do sinal no alvo

Exemplo

Diagrama polar de RCS (σ)
de avião de combate

https://www.researchgate.net/publication/224186083_Terahertz_radar_cross_section_measurements/figures?lo=1



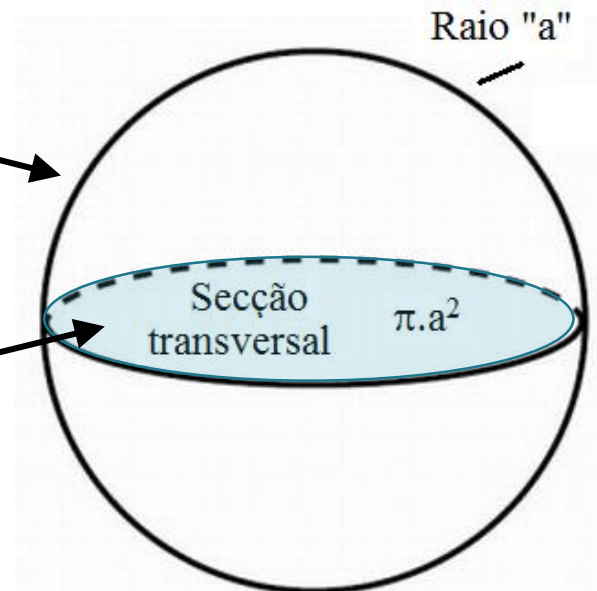
Equação do RADAR

Secção Transversal Radar - σ

Exemplo: Secção transversal radar de uma esfera condutiva

Esfera condutiva de raio **a**

- Secção transversal física
 - Plano passando pelo centro da esfera
 - Área $\rightarrow \pi \cdot a^2$
 - Independentemente do ângulo

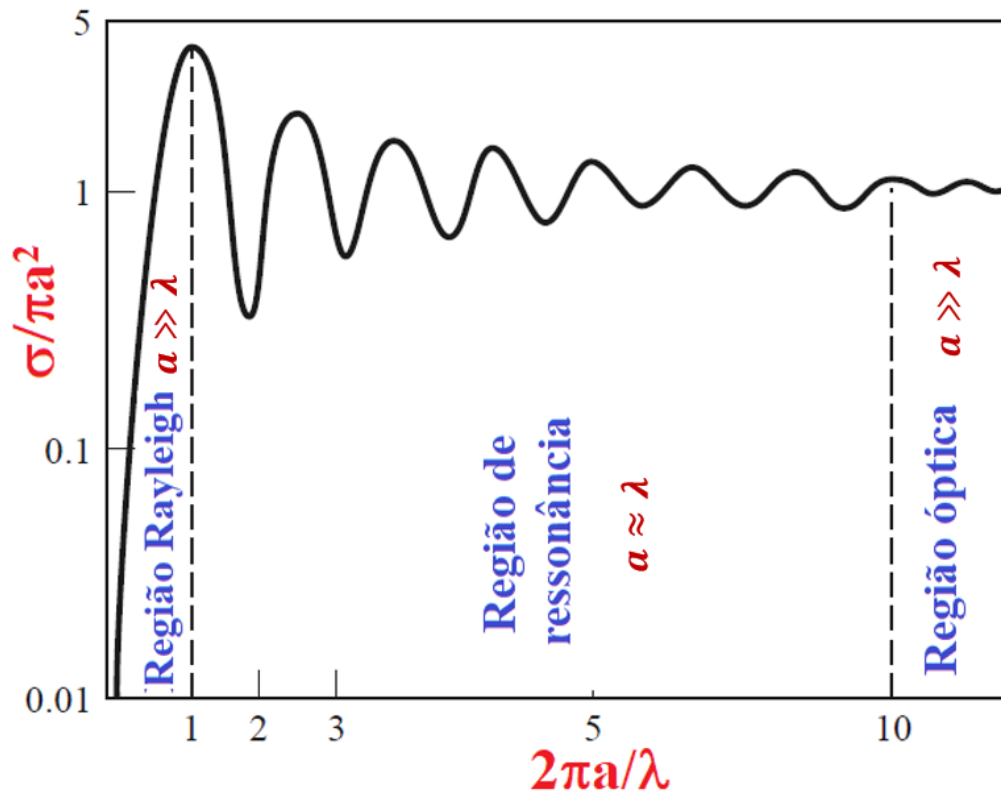


- Qual a secção transversal radar σ ?

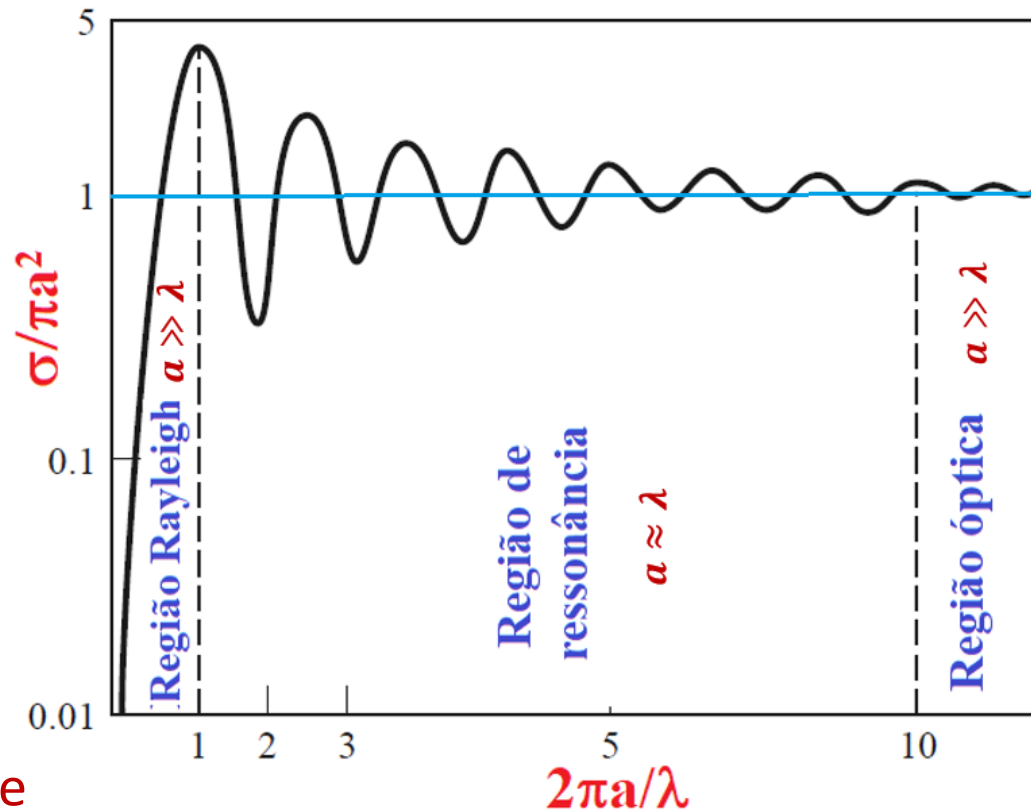
Equação do RADAR

Secção transversal radar de uma esfera condutiva

- Esfera condutiva de raio $a \rightarrow$ secção transversal física: $\pi \cdot a^2$
- Secção transversal radar σ varia com a relação entre perímetro da esfera e o comprimento de onda λ da frequência de operação ($\lambda = c/f$)



Secção transversal radar de uma esfera condutiva



Região de Rayleigh $a \ll \lambda$

- Esfera eletricamente pequena
- σ varia com $(a/\lambda)^4$

Região de ressonância $a \approx \lambda$

- σ oscila com a frequência

Região óptica $a \gg \lambda$

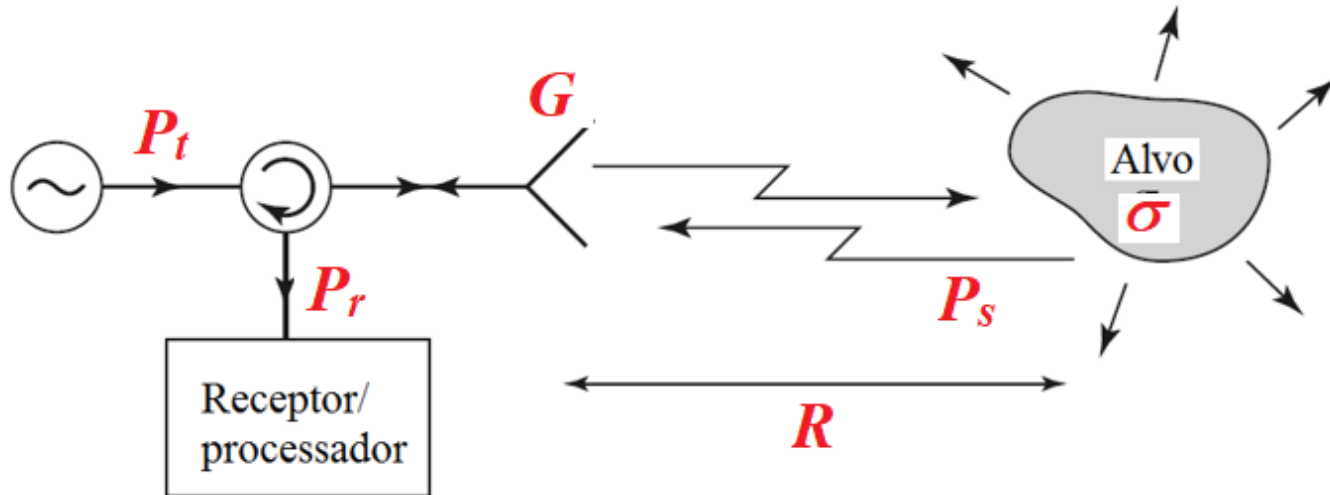
- Esfera eletricamente grande
- $\sigma \rightarrow \pi \cdot a^2$

Equação do RADAR

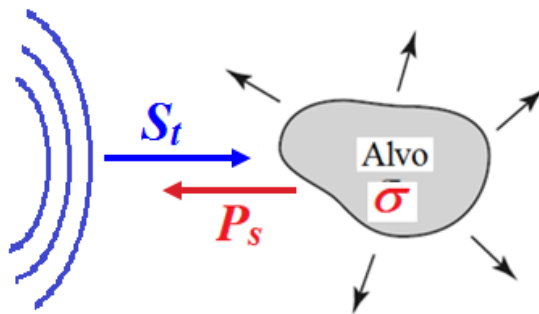
- **Valores típicos de secção transversal radar - σ**

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



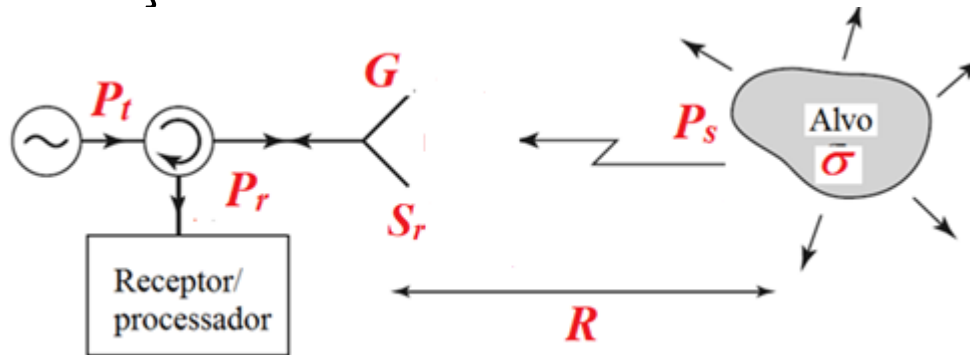
- Densidade de potência que atinge o alvo - S_t



$$S_t = \frac{P_t \cdot G}{4\pi R^2} \text{ (mW/m}^2\text{)}$$

Equação do RADAR

- Densidade de potência espalhada pelo alvo - P_S
 - S_t – densidade de potência que atinge o alvo
 - σ – secção transversal RADAR

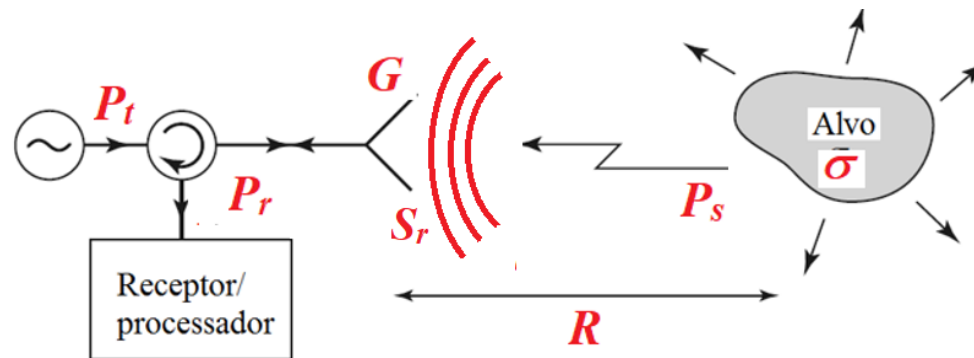


- Seção transversal radar
 - “Área” do alvo que reflete o sinal de volta para antena do radar

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

Equação do RADAR

- A potência espalhada pelo alvo - P_s
 - Propaga-se em direção do radar
 - Percorre a distância R – radar-alvo
 - Chega na antena do radar com densidade de potência S_r



- Densidade de potência espalhada pelo o alvo no plano da antena do radar - S_r

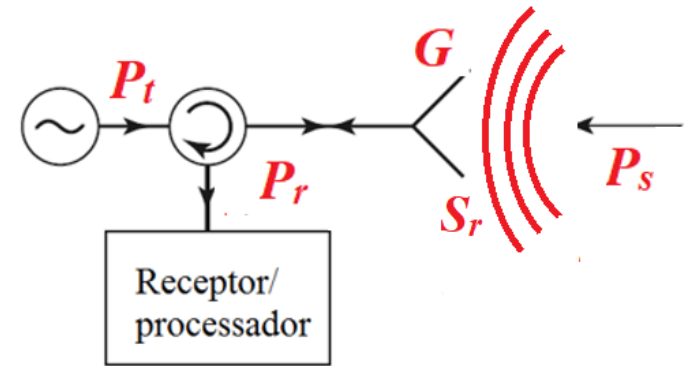
$$S_r = \frac{P_s}{4\pi R^2}, \text{ sendo } P_s = \sigma \cdot \frac{P_t \cdot G}{4\pi R^2} \quad \longrightarrow \quad S_r = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma}{(4\pi R^2)^2}$$

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

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

- 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

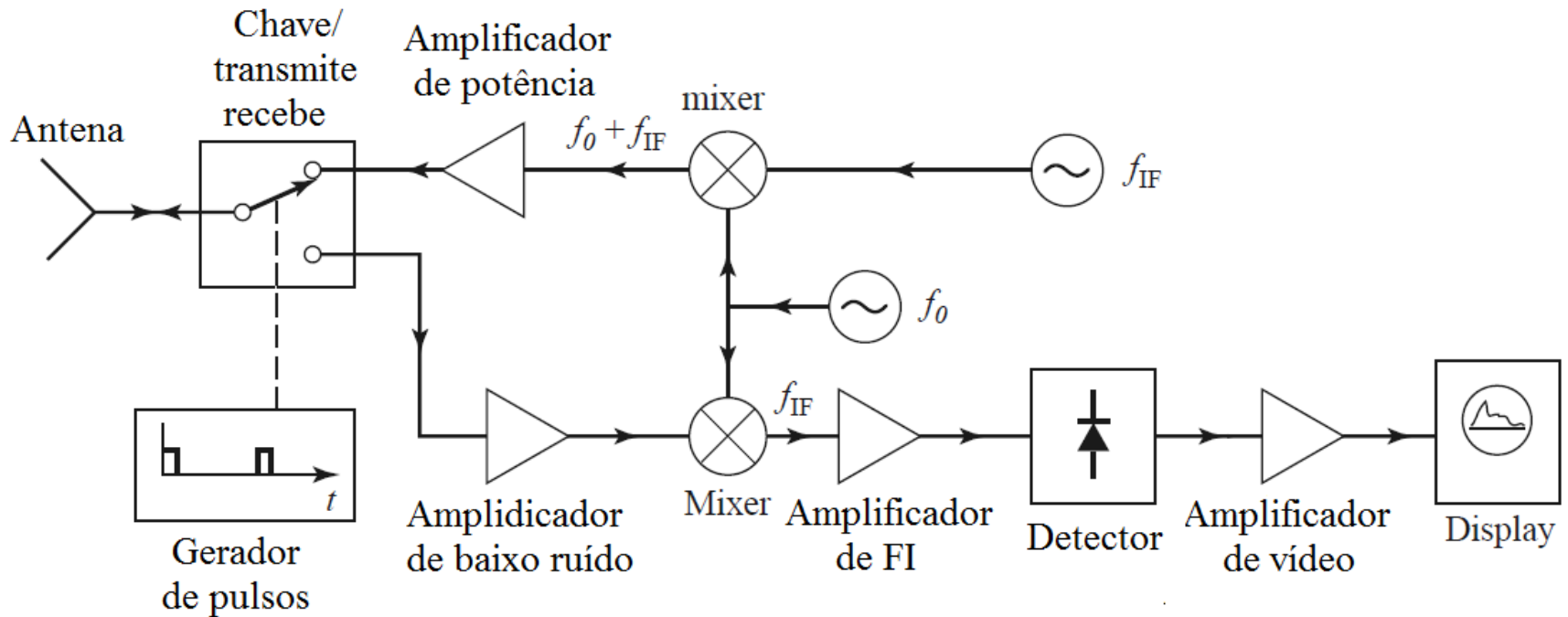
$$R_{\max} = \left[\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{\min}} \right]^{1/4} = \left[\frac{(2 \cdot 10^3) \cdot (631)^2 \cdot (0,03)^2 \cdot 12}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot (10^{-12})} \right]^{1/4} = 8.114 \text{ m}$$

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

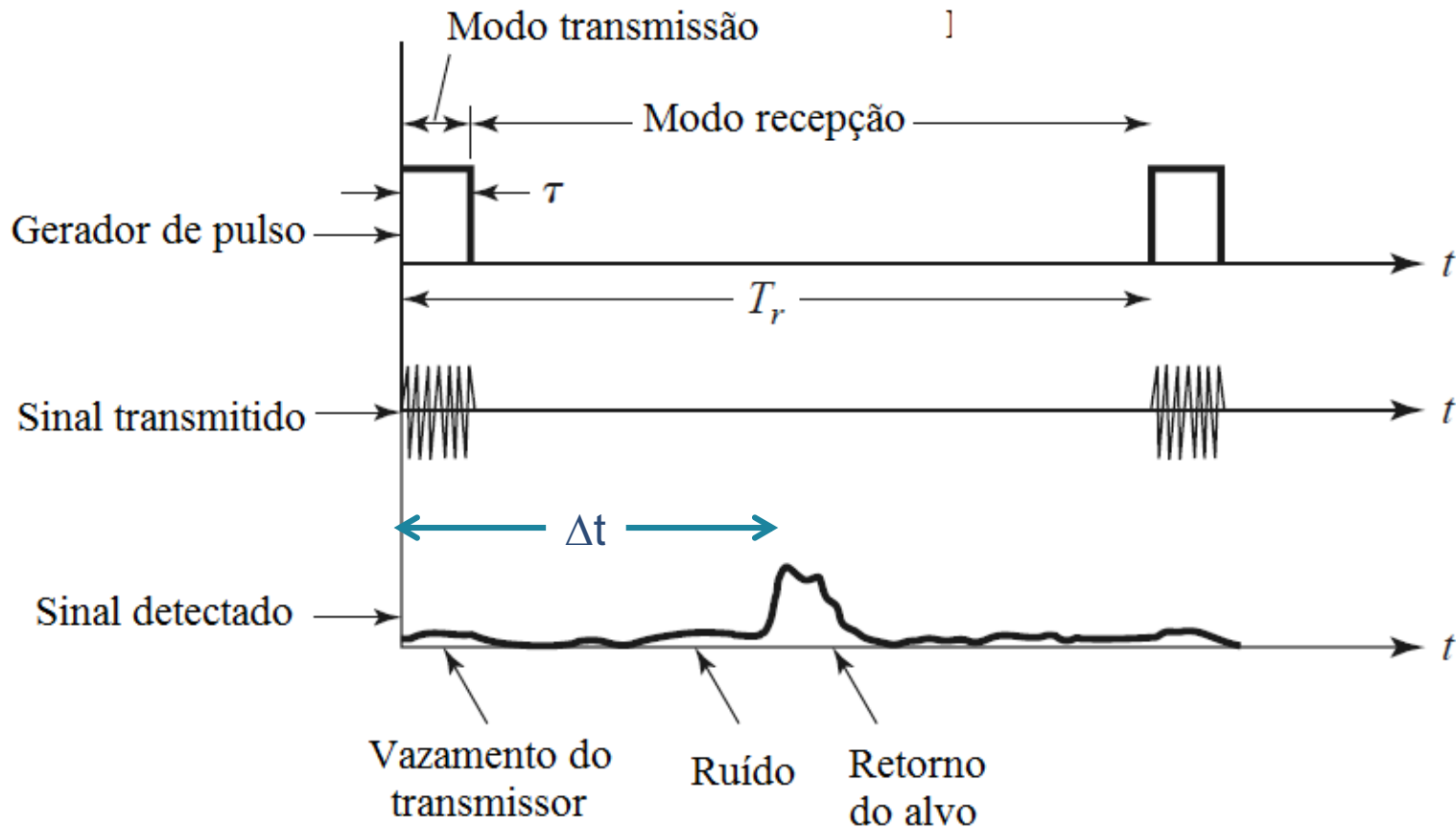
- Diagrama de blocos



- Chave transmite/recebe com alta isolamento 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
 - Usando 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_r
 - $f_r = f_0 + f_d \rightarrow$ se o alvo aproxima-se do Radar Doppler
 - $f_r = f_0 - f_d \rightarrow$ se o alvo afasta-se do Radar Doppler
- Atenção com unidades no cálculo da Frequência Doppler

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

Velocidades v e $c \rightarrow$ mesma unidade

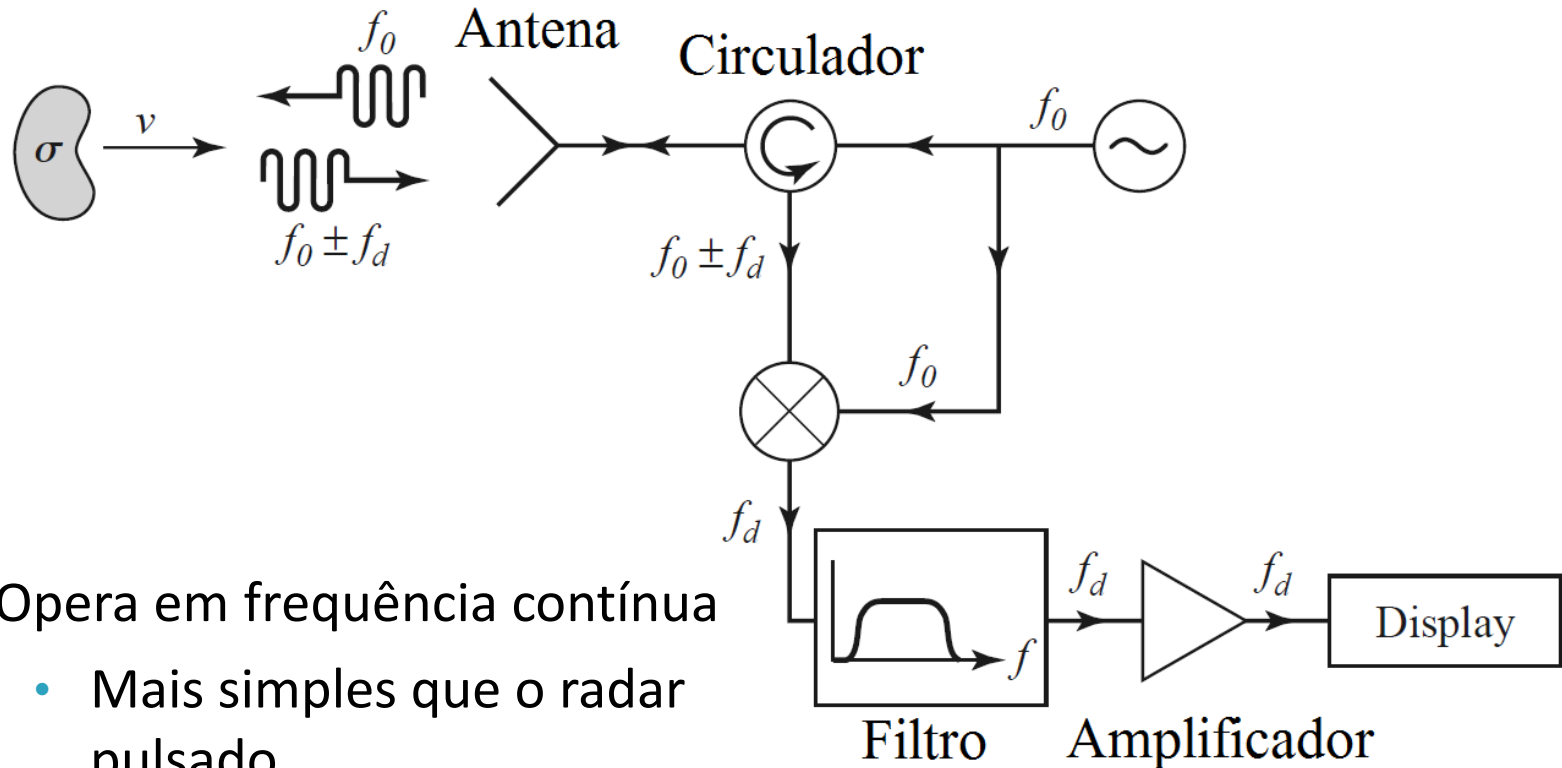
- Exemplo: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \rightarrow v$ em m/s

Frequências f_0 e $f_d \rightarrow$ mesma unidade

Exemplo: $f_0 = 8 \cdot 10^9 \text{ Hz} \rightarrow f_d$ em Hz

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 $\rightarrow f_0 + f_d$ ou $f_0 - f_d$
 - 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
 - **Circulador** – alta isolamento, par minimizar vazamento de sinal
- $f_d = 0 \rightarrow$ *sinal de saída DC*

Radar Doppler

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

Câmara fotográfica
acoplada ao radar



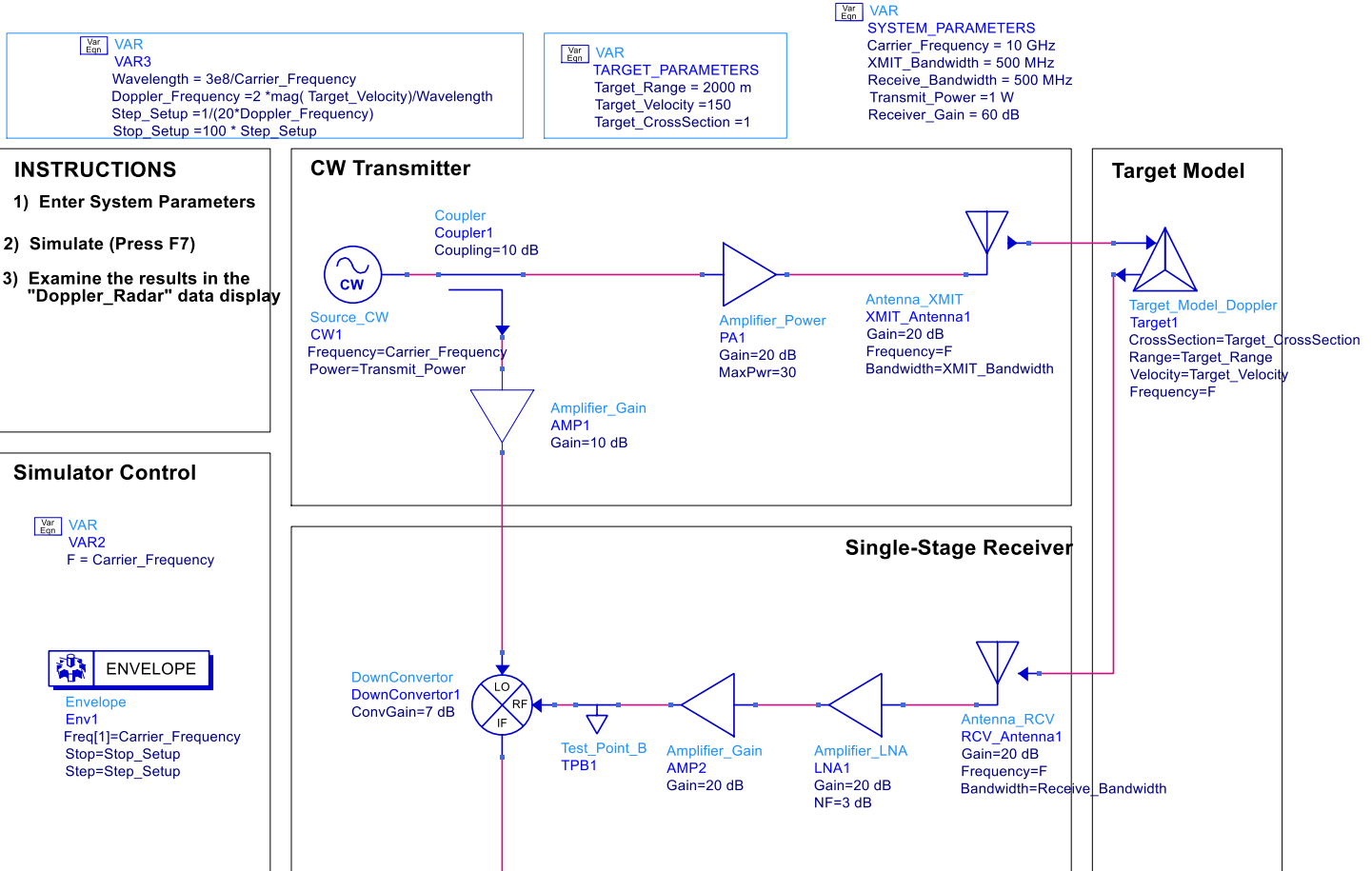
Antena com radome

Alvo móvel



Simulação de Radar Doppler no ADS

Janela de esquemático → DesignGuide → Radar Applications → FM-CW Radar Simulation



INSTRUCTIONS

- 1) Enter System Parameters
- 2) Simulate (Press F7)
- 3) Examine the results in the "Doppler_Radar" data display

Simulator Control

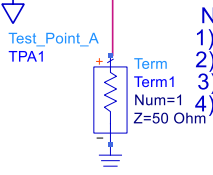
VAR
VAR2
F = Carrier_Frequency

ENVELOPE

Envelope
Env1
Freq[1]=Carrier_Frequency
Stop=Stop_Setup
Step=Step_Setup

Doppler Radar System

Parameters CrossSection: Radar Cross Section of Target
 Range: Initial Range to the Target
 Velocity: Velocity of Target Toward the Antenna
 Frequency: Carrier Frequency



- Notes:**
- 1) wavelength corresponds to the wave Frequency.
 - 2) doppler is the magnitude of the Doppler shift due to target motion.
 - 3) doppler_sign is the sign of the Doppler shift.
 - 4) gain accounts for the target cross section and the two-way range los

Simulação de Radar Doppler no ADS

Radar Applications → FM-CW Radar Simulation

Dados da simulação

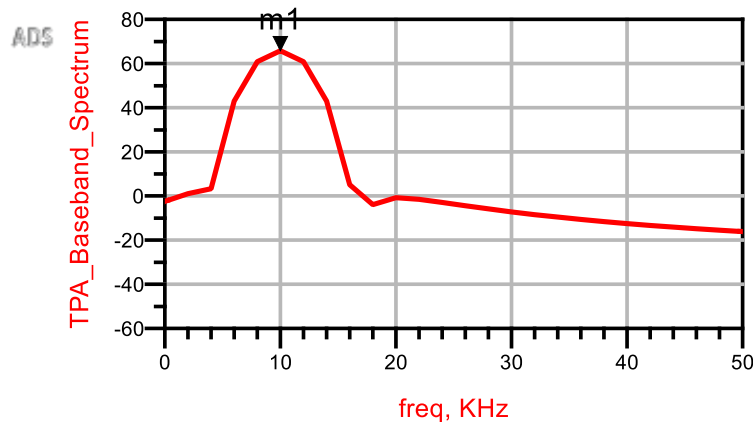
Frequência do Radar → $f_0 = 10 \text{ GHz}$

Velocidade do alvo → $v = 150 \text{ m/s}$

Frequência Doppler

$$f_d = \frac{2 \cdot v \cdot f_0}{c} = 10^4 \text{ Hz} = 10 \text{ kHz}$$

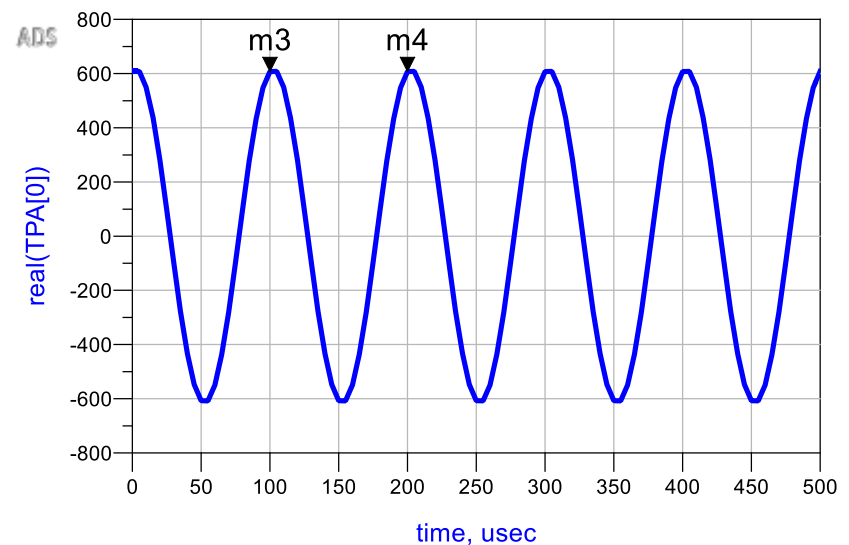
Frequência Doppler detectada



m1
freq=10.000 kHz
TPA_Baseband_Spectrum=65.783

m3
time=100.0 usec
real(TPA[0])=607.550

m4
time=200.0 usec
real(TPA[0])=607.550



Radiômetros

- Radar → técnica ativa de sensoriamento
 - Emite sinais em direção ao alvo a ser detectado
 - Recebe e analisa os sinais refletidos pelo alvo
- Radiômetros → técnica passiva de sensoriamento
 - Não transmite sinais
 - Detecta parte da radiação de corpo negro (ruído) em frequências de micro-ondas
- Radiação detectada pelo radiômetro
 - Emitida pelo alvo, ou
 - Radiação de corpos próximos ao alvo, ou
 - Radiação de corpos próximos refletidas pelo alvo

Radiômetros

- Potência de ruído emitido por um corpo negro

$$P = k \cdot T \cdot B$$

K constante de Boltzmann

B Banda de frequência em que opera o radiômetro

T temperatura do corpo negro (na escala Kelvin)

- Radiômetros medem a potência de ruído em frequências de micro-ondas emitida por alvos reais monitorados

$$P = k \cdot T_B \cdot B$$

T_B é a temperatura de brilho do alvo monitorado

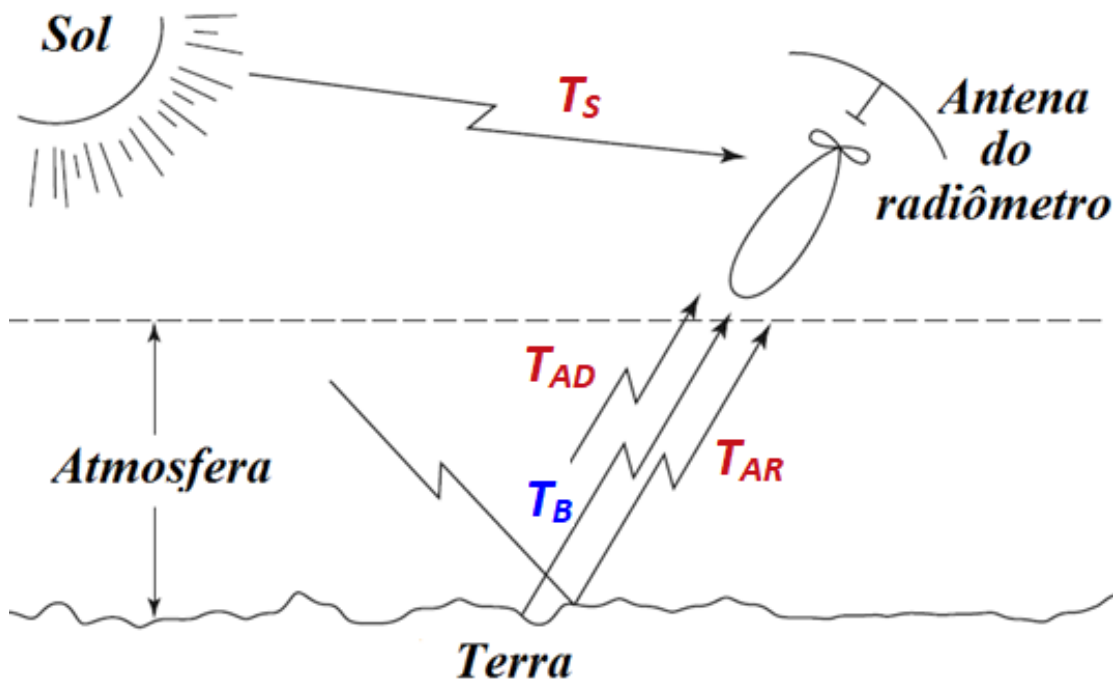
$$T_B = e \cdot T \quad \text{com} \quad 0 \leq e \leq 1$$

e eficiência de radiação de corpo negro

T temperatura corpo negro (na escala Kelvin)

Radiômetros

- A potência de ruído captada pelo radiômetro depende do cenário ao redor do alvo
- Aplicação típica: fontes de potência de ruído envolvidas na medida da radiação do solo



Parâmetro a medir

- T_B → Temperatura de brilho do solo

Outras fontes de ruído captadas na medida

- T_S → Sol
- T_{AR} → aquecimento da atmosfera
- T_{AD} → ruídos adicionais

Radiômetros - Aplicações

Meio ambiente

- Medida de umidade do solo
- Mapeamento de enchentes, cobertura por neve/gelo
- Velocidade do vento sobre o oceano
- Perfis de temperatura e de umidade da atmosfera

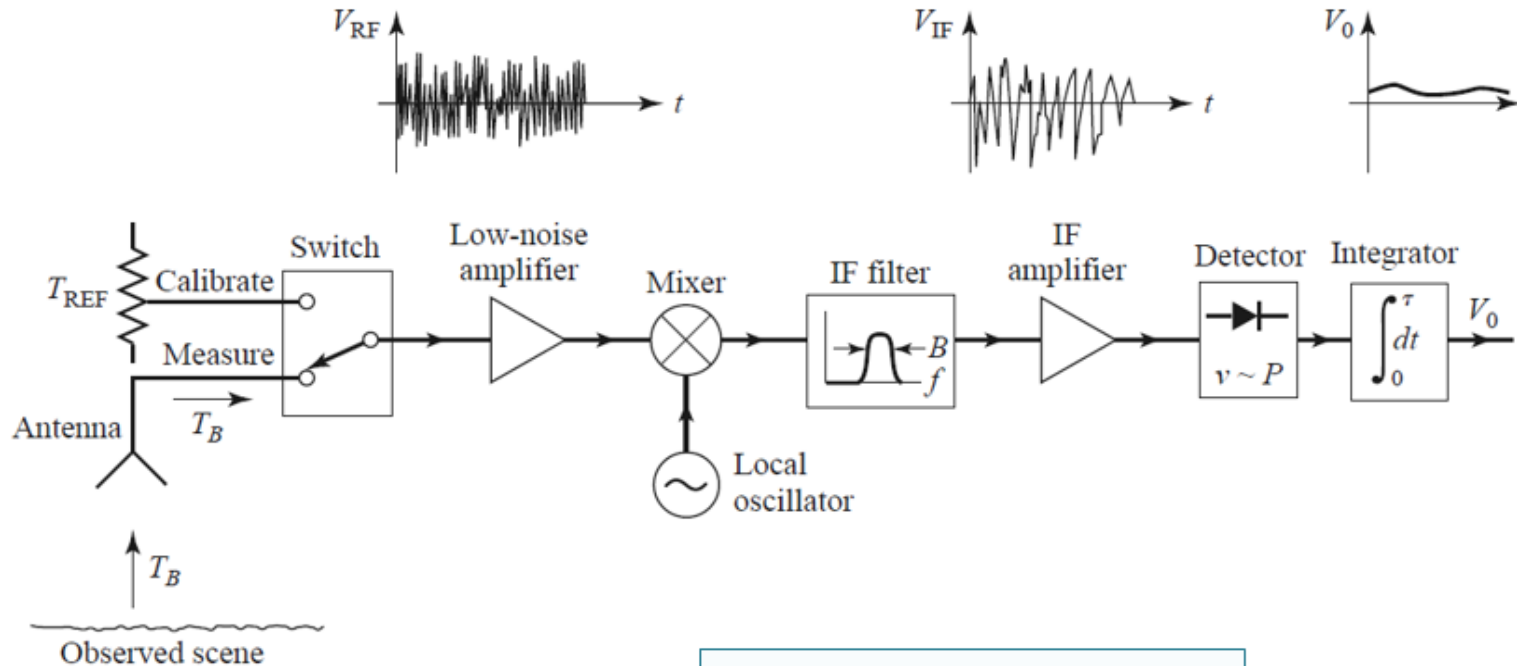
Militares

- Detecção de alvos
- Reconhecimento de alvos
- Vigilância
- Mapeamento

Astronomia

- Radiotelescópios
- Mapeamento planetário e
- Mapeamento de emissões solares
- Mapeamento de objetos galácticos

Radiômetro de potência total



$$P = kTB \rightarrow V_o = G(T_B + T_R)kB$$

T_B - temperatura de brilho captada pela antena

T_R - contribuição do ruído dos componentes do radiômetro

G - ganho do radiômetro (potência \rightarrow tensão DC)

B - banda do filtro de FI

Radiômetro de potência total

- Calibração do radiômetro – quais os valores de G e T_R ?
- Mede-se V_0 de duas carga com temperatura de ruído conhecida
 - T_{REF1} e T_{REF2}
- Determina-se G e T_R através do sistema de equações

$$\left. \begin{aligned} V_{01} &= G(T_{REF1} + T_R)kB \\ V_{02} &= G(T_{REF2} + T_R)kB \end{aligned} \right\} \rightarrow G \text{ e } T_R$$

- Determinação de T_B , temperatura de brilho captada pelo radiômetro
- V_0 - tensão DC medida na saída do radiômetro
- Conhecidas as características do radiômetro
 - G e T_R – obtidos na calibração
 - B – banda do filtro de FI usado

$$V_0 = G(T_B + T_R)kB$$



$$T_B = \frac{V_0}{GkB} - T_R$$

Radiômetro de potência total

Limitação de uso do radiômetro de potência total

- Erro devido à ruído adicionado à temperatura de brilho captada pelo radiômetro

$$T'_B = T_B + \Delta T_N$$

- Esse erro é reduzido integrando-se o sinal de saída V_o em um intervalo de tempo τ
- Erro associado à calibração do radiômetro de total potência
 - O valor ganho do sistema G , varia ΔG ao longo do tempo
 - Erro na medida da temperatura de brilho medido $\rightarrow \Delta T_G$

$$\Delta T_G = (T_B + T_R) \frac{\Delta G}{G}$$

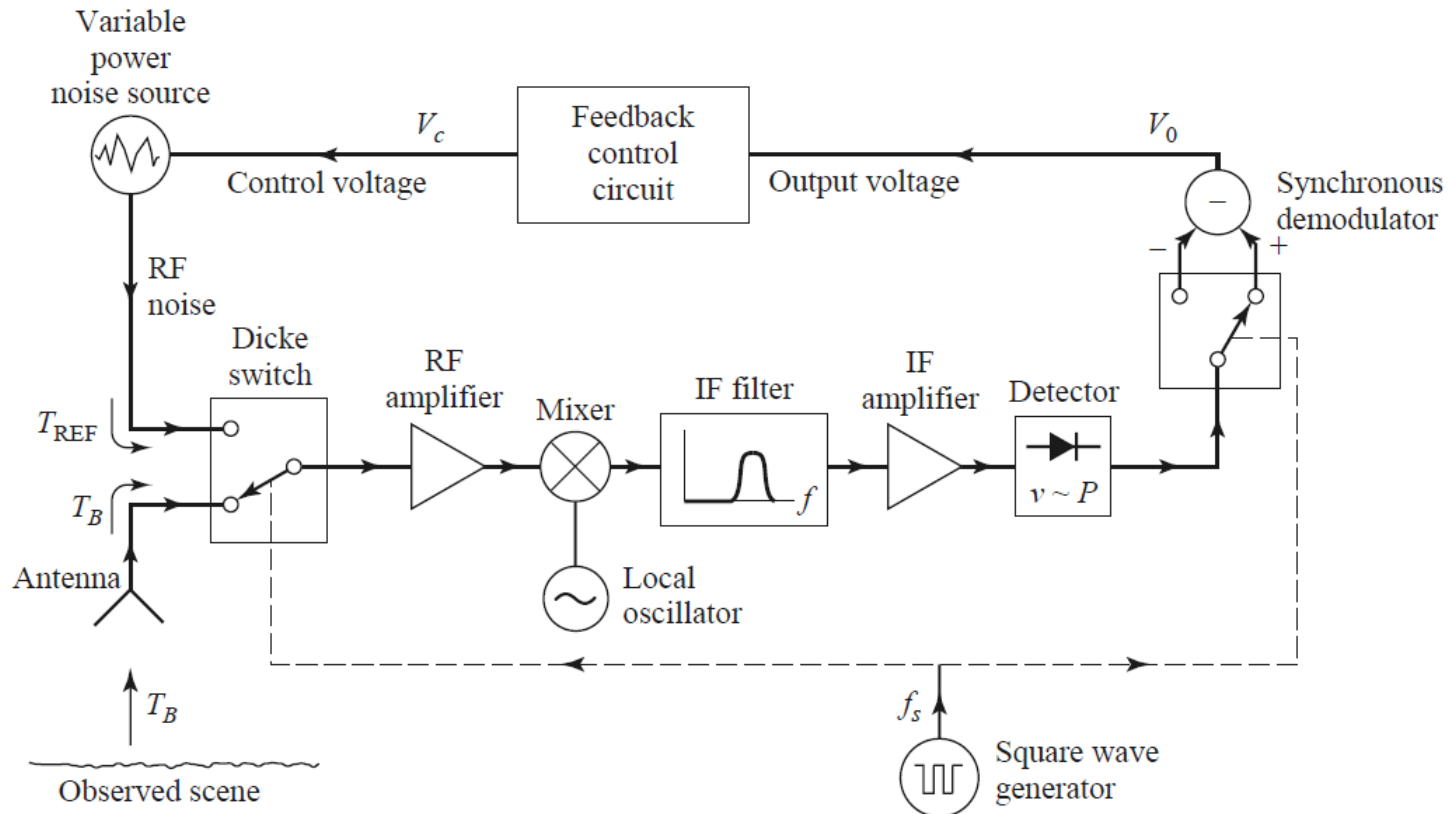
- Solução do problema de calibração \rightarrow Radiômetro de Dicke
 - A entrada do radiômetro é periodicamente chaveada entre o sinal a ser medido e uma fonte controlada de ruído.

Radiômetros

Radiômetro de Dicke

- A fonte de ruído é ajustada para a temperatura de modo a obter

$$V_0 = G(T_{REF})kB - G(T_B)kB = 0, \quad \text{obtendo } T_B = T_{REF}$$



Revisão – Sistemas de Comunicação

Densidade média de potência

- S_{av} - Densidade média de potência causada pelo sinal de um transmissor em função da distância

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

- Sendo
 - P_t potência do transmissor
 - G ganho da antena transmissora
 - R distância até a antena de transmissão
- Aplicações de S_{av}
 - Utilizada para calcular a potência recebida no sistema
 - Permite avaliar se o nível de radiação é seguro para a saúde

Equação de Propagação de Friis

- Calcula a potência recebida pelo sistema em condições ideais de propagação

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

- Sendo
 - P_t potência de saída do transmissor
 - P_r potência entregue ao receptor
 - G_t ganho da antena do transmissor
 - G_r ganho da antena do receptor
 - λ comprimento de onda do sinal transmitido

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- c velocidade da luz no vácuo
- f frequência

Equação de Propagação de Friis

- Usando decibéis

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

- Sendo

$$G_r(dB) = 10 \cdot \log(G_r)$$

$$G_t(dB) = 10 \cdot \log(G_t)$$

$$P_r(dBm) = 10 \cdot \log \frac{P_r(mW)}{1 mW}$$

$$P_t(dBm) = 10 \cdot \log \frac{P_t(mW)}{1 mW}$$

Equação de Propagação de Friis

- Considerando atenuação do sinal
 - Chuva, neve
 - Paredes, tetos, objetos, etc...

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

- Sendo

$P_{FRIIS}(dBm)$ Potência recebida em condições ideais de propagação

$P_{Atn1}, P_{Atn2}, \dots, P_{AtnN}$ Atenuações em dB sofridas pelo sinal que se propaga entre o transmissor e o receptor

Equação de Propagação de Friis

- Considerando descasamento de impedância entre
 - Transmissor e antena de transmissão
 - Receptor e antena de recepção

$$P_r (mW) = P_{FRIIS} (mW) \cdot e_{imp}$$

- Sendo

$$e_{imp} = (1 - |\Gamma_t|^2) \cdot (1 - |\Gamma_r|^2) \leq 1$$

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

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

- Z_G Impedância do transmissor
- Z_{At} Impedância da antena de transmissão
- Z_L Impedância do receptor
- Z_{Ar} Impedância da antena de recepção

Equação de Propagação de Friis

- EIRP, usado em comunicações via satélite

$$EIRP = G_t \cdot P_t \text{ (W)}$$

- Sendo
 - G_t Ganho da antena de transmissão do satélite
 - P_t Potência de saída do transmissor do satélite

- Potência recebida em Watts

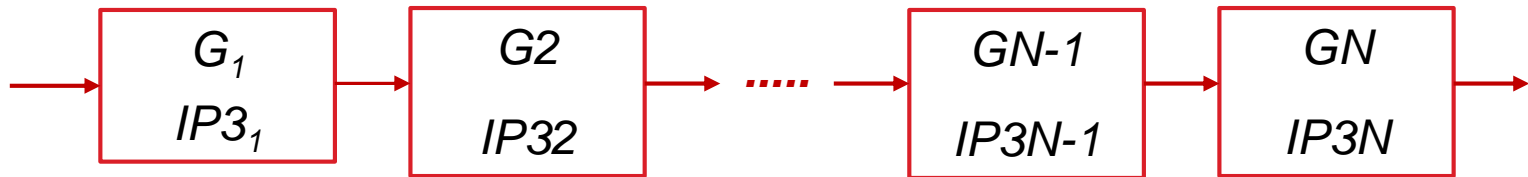
$$P_r = \frac{G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot EIRP \text{ (W)}$$

- Potência recebida em dBW

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

$IP3$ - Ponto de Intercepção de 3ª. ordem

- Caracteriza a não-linearidade do transmissor
- Deve ser elevado para que se tenha baixa distorção do sinal transmitido
- Ganho e $IP3$ de uma cascata de N circuitos



$$G = G_1 \cdot G_2 \cdots G_{N-1} \cdot G_N$$

$$G(dB) = G_1(dB) + G_2(dB) \dots + G_{N-1}(dB) + G_N(dB)$$

$$IP3 = \left(\frac{1}{IP3_N} + \frac{1}{IP3_{N-1} \cdot G_N} + \dots + \frac{1}{IP3_2 \cdot G_N \cdots G_3} + \frac{1}{IP3_1 \cdot G_N G_{N-1} \cdots G_2} \right)^{-1} \text{ em } mW$$

$$IP3(dBm) = 10 \log(IP3) \text{ em } dBm$$

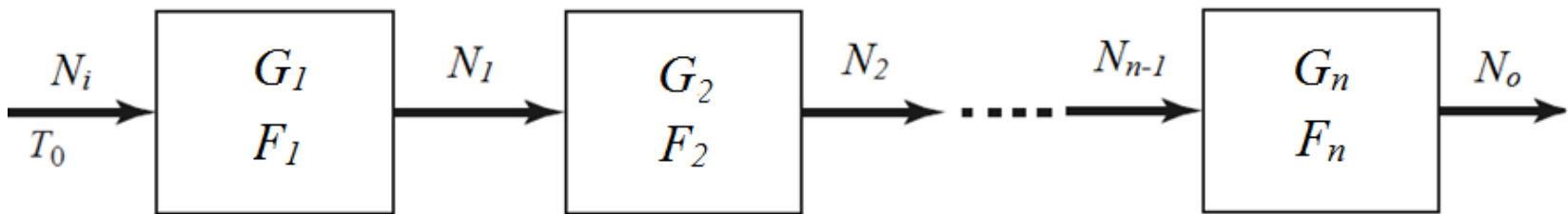
F – Figura de Ruído

- Razão entre as relações sinal/ruído de entrada e de saída de um componente, circuito ou sistema (medida a $T=290$ K)
- Caracteriza o receptor e deve ser baixa para evitar que o ruído gerado no receptor cause erros na recuperação da informação

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

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

- Ganho e Figura de Ruído de uma cascata de N circuitos



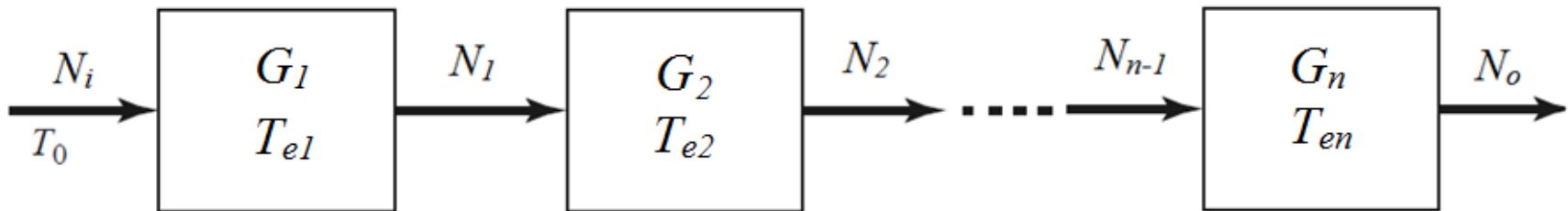
$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

T_e – Temperatura Equivalente de Ruído

- Permite calcular a potência de ruído recebida pela antena ou gerada por componentes do receptor

$$P_n = kTB$$

- P_n Potencia de ruído
- T Temperatura equivalente de Ruído
- K Constante de Boltzmann
- B Banda de frequência
- Temperatura de ruído de uma cascata de circuitos



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

T_e – Temperatura Equivalente de Ruído

- T_A - Temperatura de ruído da antena

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

↑
Ruído captado
pela antena

↑
Ruído gerado
pela antena

- η_{rad} eficiência de radiação da antena associada às perdas da antena
- T_b temperatura de brilho
- T_p temperatura física da antena em K

- N_i – Potência de ruído entregue pela antena na entrada do receptor

$$N_i = kBT_A \quad (W, K)$$

- S_i – Potência de sinal na entrada do receptor
 - Calculada pela equação de transmissão de Friis

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