

Ruído

SEL 369 Micro-ondas/SEL5900 Circuitos de Alta
Frequência

Amílcar Careli César
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

Atenção!



- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação em engenharia elétrica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

Ruído em sistemas de telecomunicações

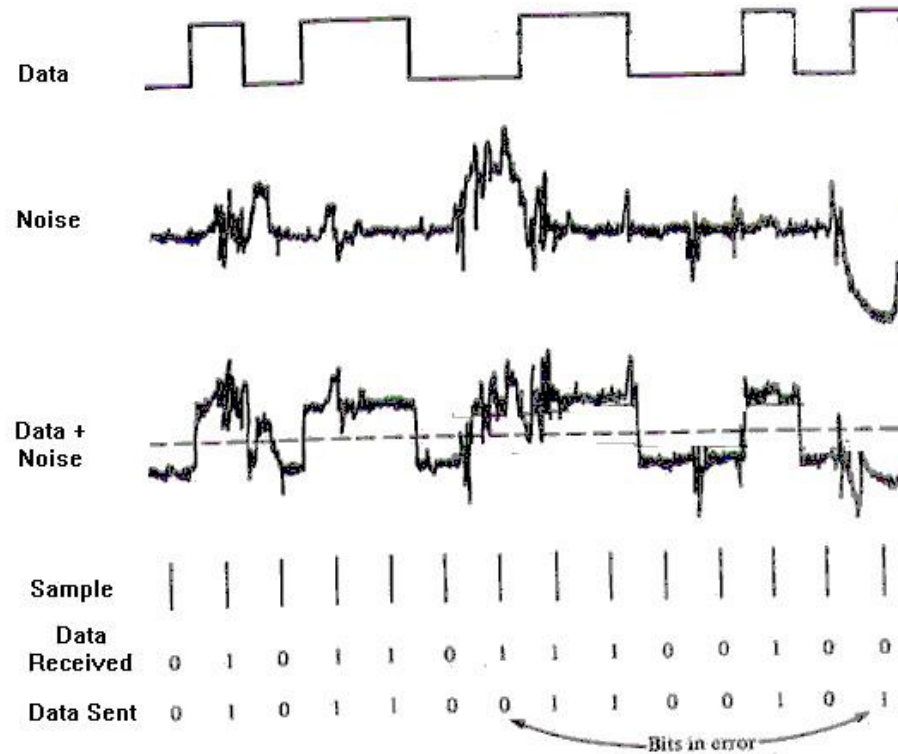
✓ Efeito

- Limita o desempenho dos sistemas; distorce e degrada informação recebida

✓ Fontes

- Interna: ruído gerado pelos componentes
- Externa: ruído cósmico de fundo, ruído das estrelas (incluindo o Sol), eletricidade estática, raios, ignição de motores

Efeitos do ruído



<http://davidwills.net/cmit265/Images/noise.jpg>

Si Wang, Ting-Zhu Huang, Xi-le Zhao, and Jun Liu, "An Alternating Direction Method for Mixed Gaussian Plus Impulse Noise Removal"
Abstract and Applied Analysis
v.2013 (2013), Article ID 850360,
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/850360>

Tipos de ruído

✓ Ruído térmico

- Gerado por agitação térmica de elétrons em condutor

✓ Ruído shot

- Gerado quando há barreira de potencial; junção PN; semicondutores. Em geral, semicondutores produzem ruído shot e ruído térmico

✓ Ruído flicker (tremulação, lampejo)

- Associado à defeitos superficiais em semicondutores; produzido em dispositivos a vácuo (revestimento óxido de cátodo); fenômeno natural como radiação nuclear
- Inversamente proporcional à frequência ($1/f$)

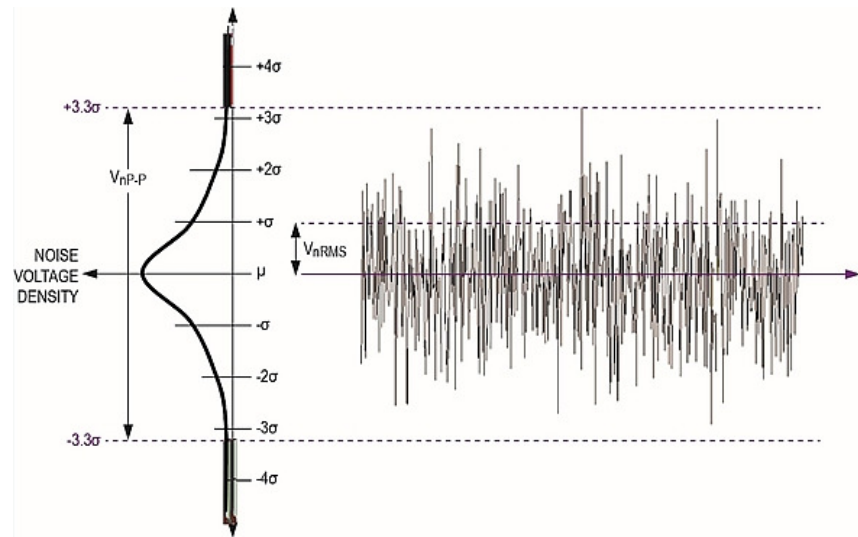
Ruído gaussiano

função densidade de probabilidade

$$p_G(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

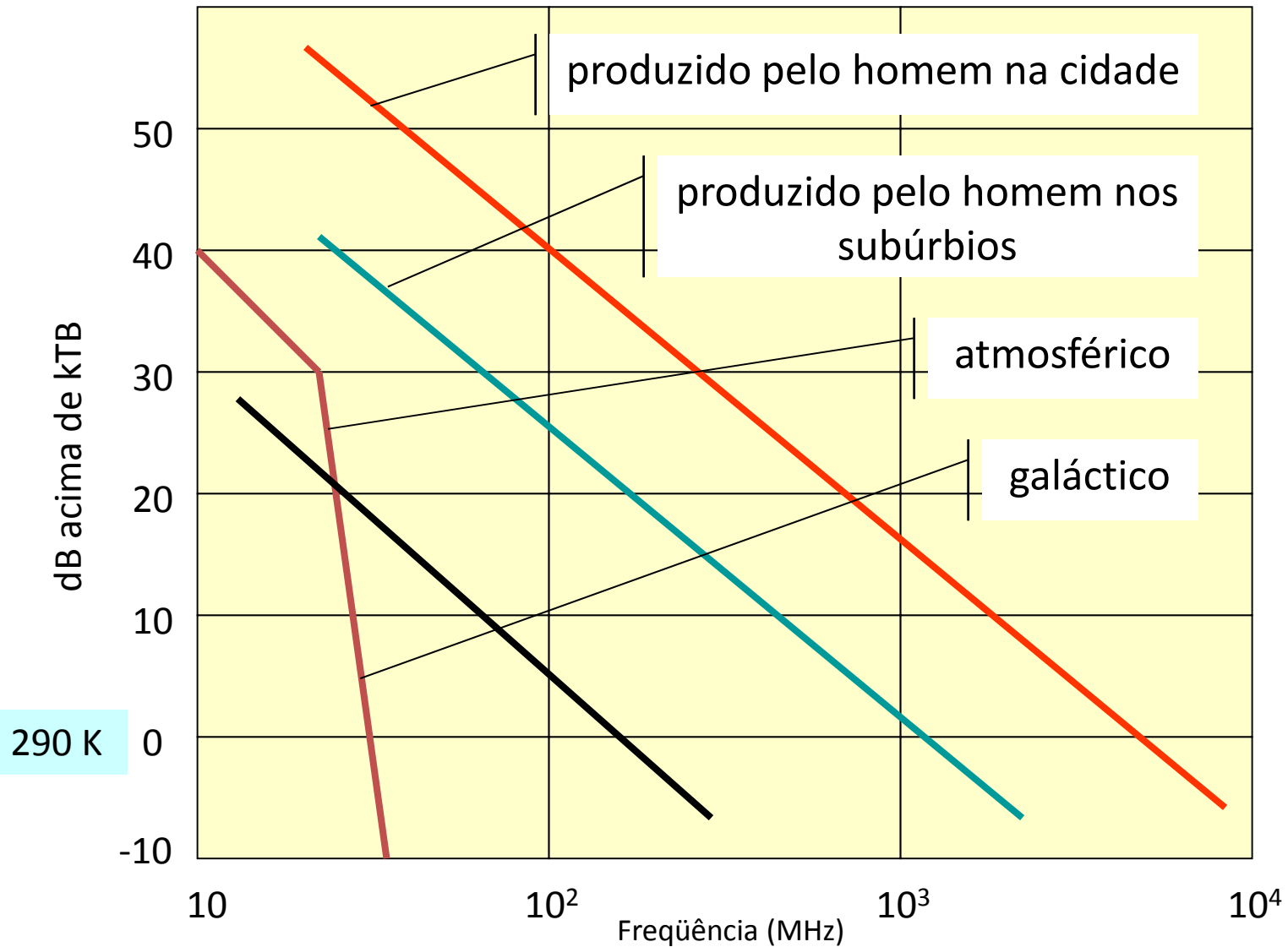
μ : média; σ^2 : variância; σ : desvio padrão

$\mu = 0$; $\sigma = 1$: distribuição normal padrão

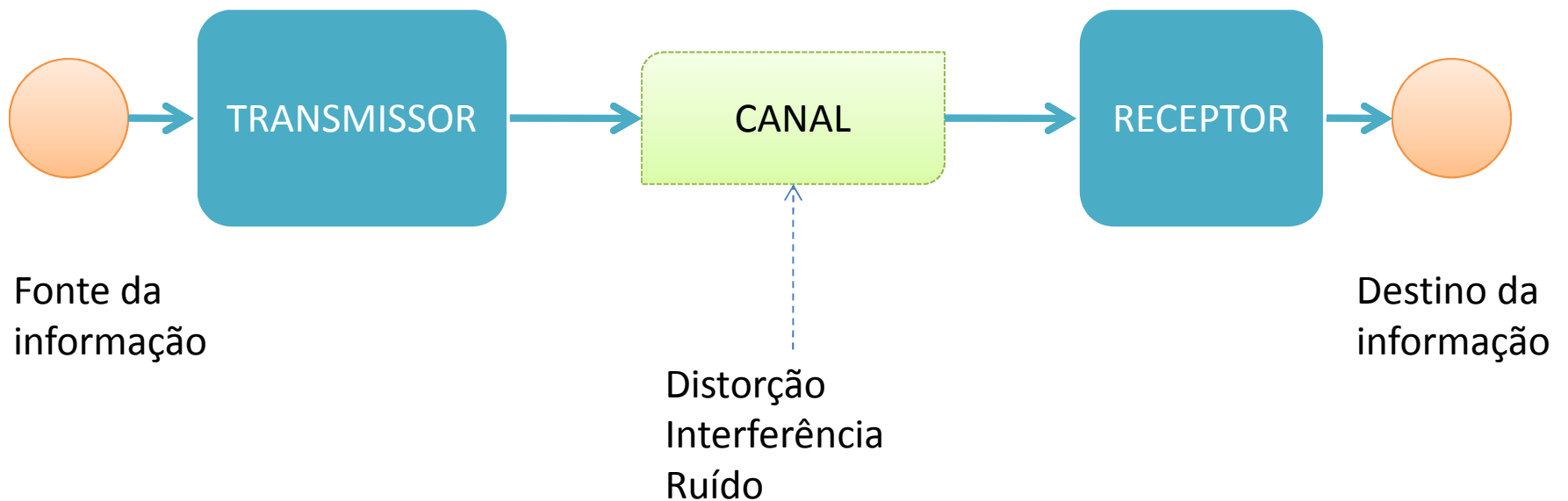


Ref.: www.edn.com/design/analog/4422645/Managing-noise-in-the-signal-chain--Part-1--Annoying-semiconductor-noise--preventable-or-inescapable--

Potência média de ruído vs. frequência



Ruído adicionado ao canal de comunicação



Ruído térmico-1

- ✓ Movimento aleatório de elétrons livres em condutores causado por agitação térmica
- ✓ Nos terminais do condutor há tensão em circuito aberto
- ✓ A resistência do condutor comporta-se como um gerador de ruído
- ✓ O gerador de ruído pode ser representado pelo circuito equivalente de Thèvenin
- ✓ O espectro de ruído de faixa larga é conhecido como ruído Johnson (1928)

Ruído térmico-2

Valor médio quadrático para $\forall f$

$$v_n^2 = \frac{4hfBR}{\exp(hf / kT) - 1} \text{ volt}^2$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; constante de Boltzmann

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; constante de Plack

T : temperatura do resistor, K

R : resistência, Ω

f : frequência, Hz

B : largura de faixa, Hz

Ruído térmico-3

Para $f = 100$ GHz; $T = 100$ K

$$hf = 6,626 \times 10^{-34} \times 100 \times 10^9 = 6,626 \times 10^{-23}$$

$$kT = 1,38 \times 10^{-23} \times 100 = 1,38 \times 10^{-21}$$

Portanto, $hf \ll kT$

Ruído térmico-4

$$v_n^2 = \frac{4hfBR}{\exp(hf / kT) - 1}$$

Expansão em série de Taylor da exponencial

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

$$\exp(x) - 1 \simeq 1 + x - 1 = \frac{hf}{kT}$$

$$v_n^2 = \frac{4hfBR}{hf / kT}$$

$$v_n^2 = 4kTBR \text{ volt}^2$$

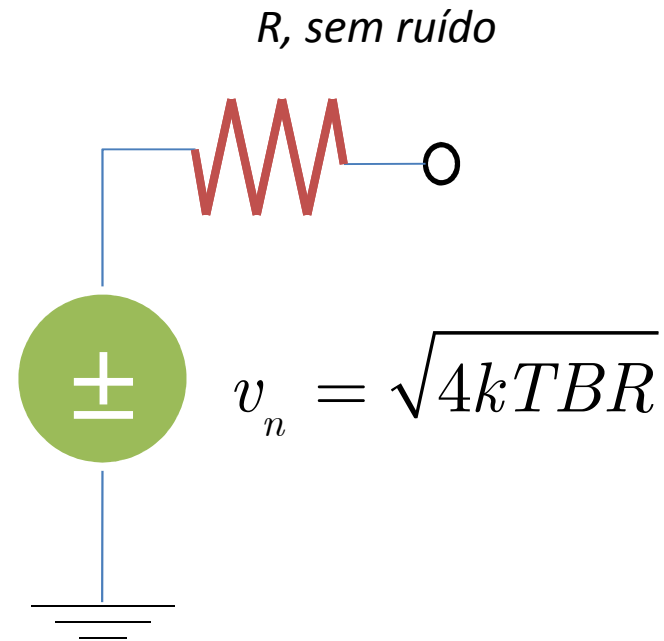
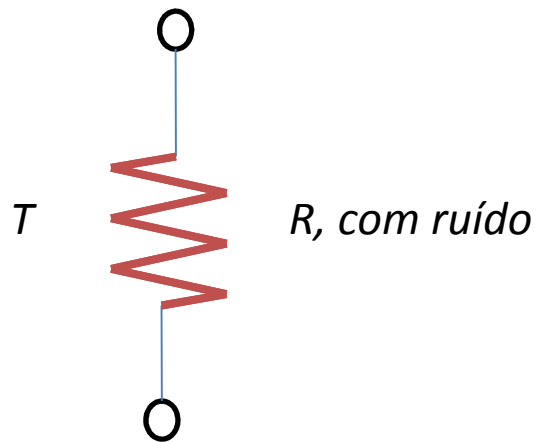
Ruído térmico-5

Valor médio quadrático

$$v_n^2 = 4kTRB \quad \text{volt}^2 \text{ rms}$$

- ✓ k : constante de Boltzmann, = $1,38 \cdot 10^{-23}$, J/K
- ✓ T : temperatura do resistor, K
- ✓ R : resistência, Ω
- ✓ B : largura de faixa, Hz

Ruído térmico-6

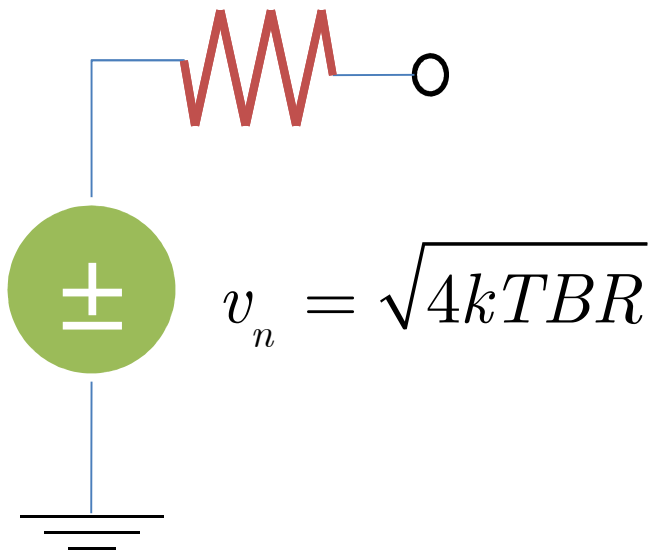


$$v_n^2 = 4kTRB \quad \text{volt}^2 \text{ rms}$$

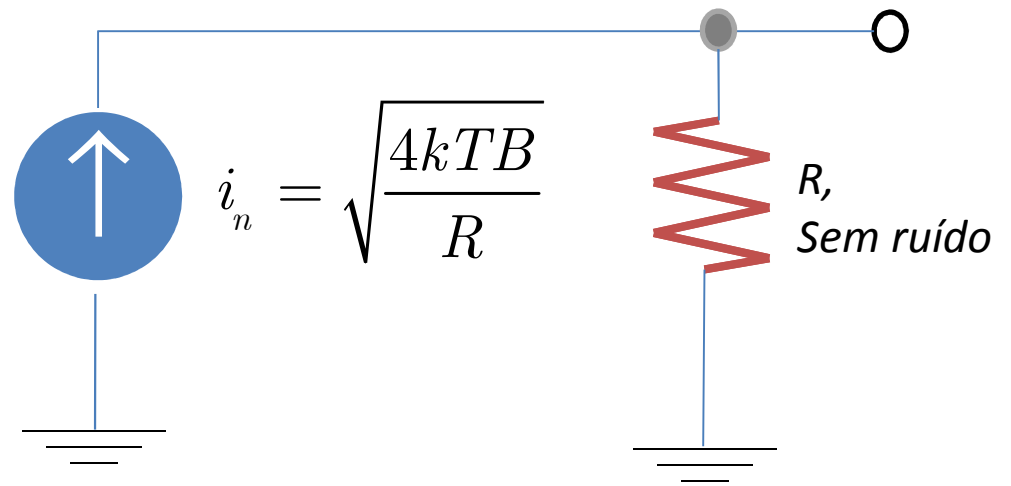
Fonte de tensão
de ruído

Ruído térmico-7

R, sem ruído



Fonte de tensão
de ruído



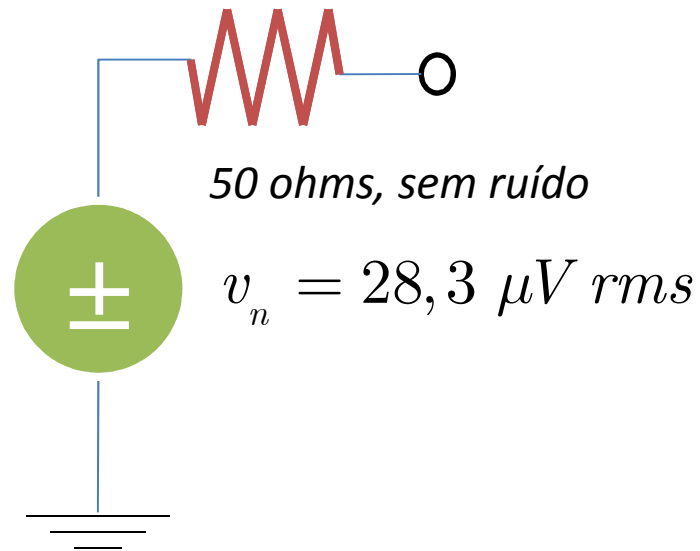
Fonte de corrente
de ruído

Exemplo

Exemplo: $R=50$ ohms; $T=290$ K; $B=1$ GHz

$$v_n = \sqrt{(4)(1,38 \times 10^{-23})(290)(1 \times 10^9)}$$

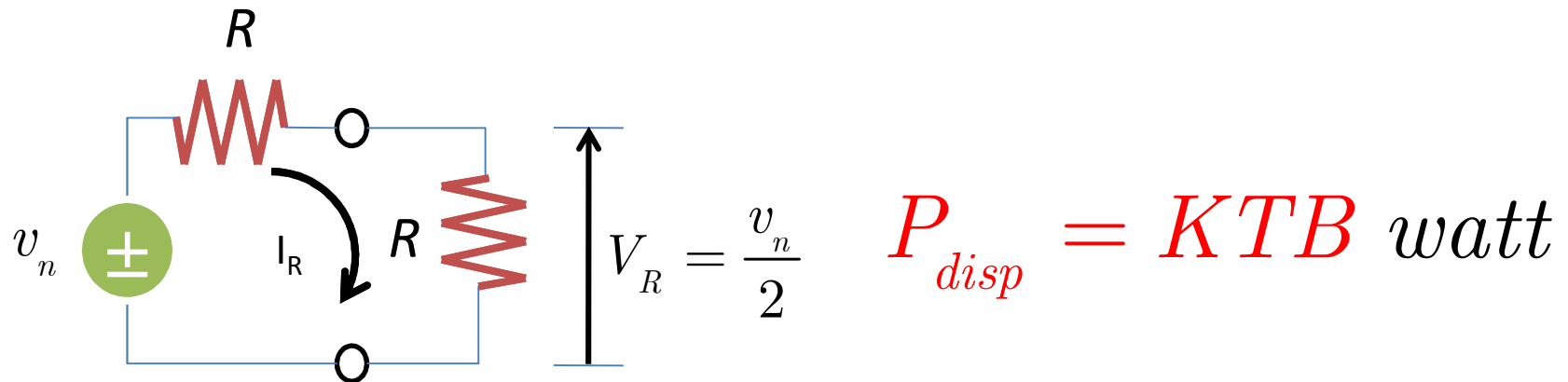
$$v_n = 28,3 \mu V \text{ rms}$$



Potência disponível de ruído

Máxima potência que uma fonte de ruído transfere para uma carga resistiva.
Esta carga é igual à resistência interna do gerador

$$P_{disp} = V_R I_R = \left(\frac{v_n}{2}\right) \left(\frac{v_n}{2R}\right) = \frac{v_n^2}{4R} = \frac{4KTBR}{4R}$$



Temperatura ambiente

$$T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_N = KTB$$

$$= \left(1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K} \right) \left(293 \text{ K} \right) \left(1 \text{ Hz} \right)$$

$$= 4,057 \times 10^{-21} \left(\text{J} \cdot \text{Hz} \right)$$

$$= 4,057 \times 10^{-21} \left(\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \right)$$

$$= 4,057 \times 10^{-21} \text{ W}$$

Equivalente a

$$P_N = 10 \log \left(\frac{4,057 \times 10^{-21} \text{ W}}{10^{-3} \text{ W}} \right) = -174 \text{ dBm}$$

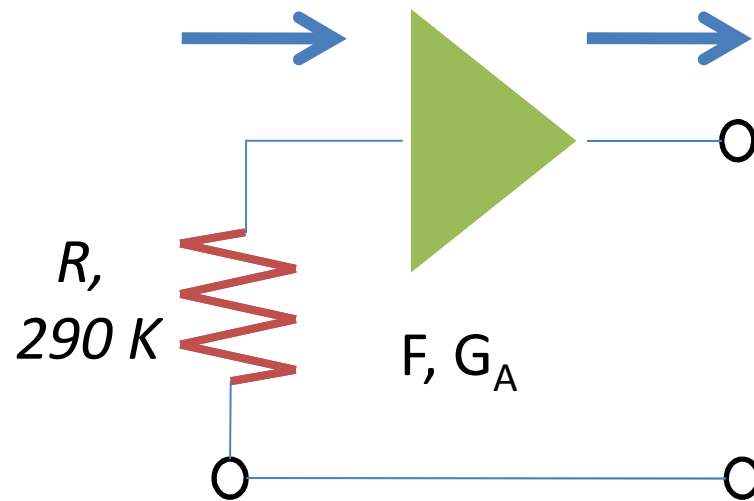
Largura de faixa e potência de ruído

Largura de faixa (Hz)	Potência de Ruído Térmico (dBm)
1	-174
10	-164
100	-154
1 k	-144
10 k	-134
100 k	-124
180 k	-121,45
200 k	-120,98
1 M	-114
2 M	-111
6 M	-106
20 M	-101

Ruído nas portas de amplificador

$$N_i = KTB \text{ watt}$$

$$N_o = G_A N_i + N_{o,int} \text{ watt}$$



N_i : ruído gerado na entrada pelo resistor R em temperatura ambiente T

N_o : ruído na saída do amplificador

$N_{o,int}$: ruído gerado internamente

G_A : ganho de potência disponível

Figura de ruído-1

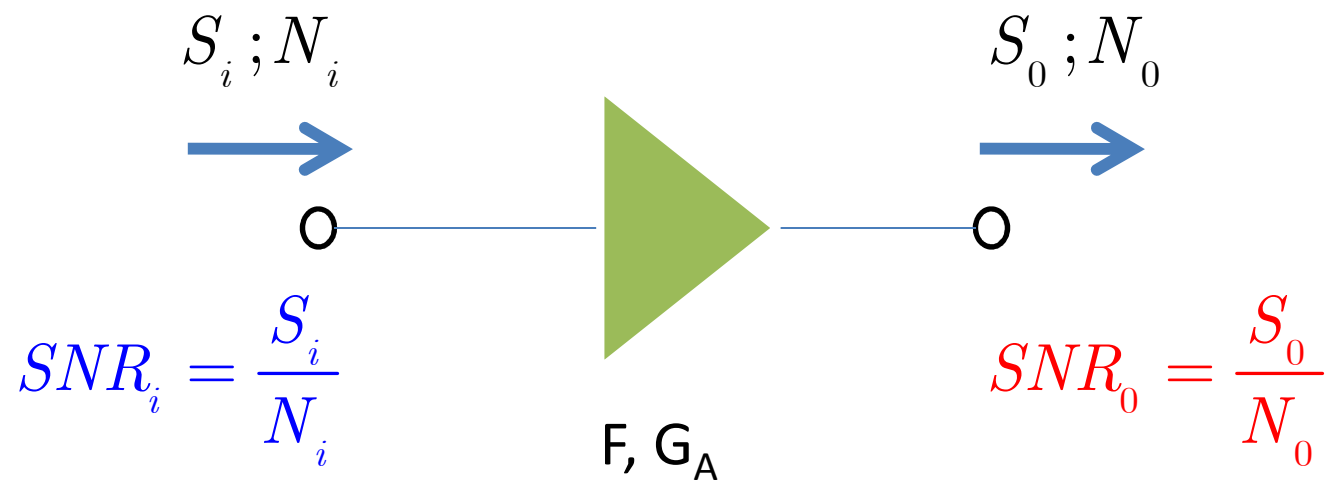


Figura de ruído-2

$SNR_i = \frac{S_i}{N_i}$: relação sinal-ruído na entrada

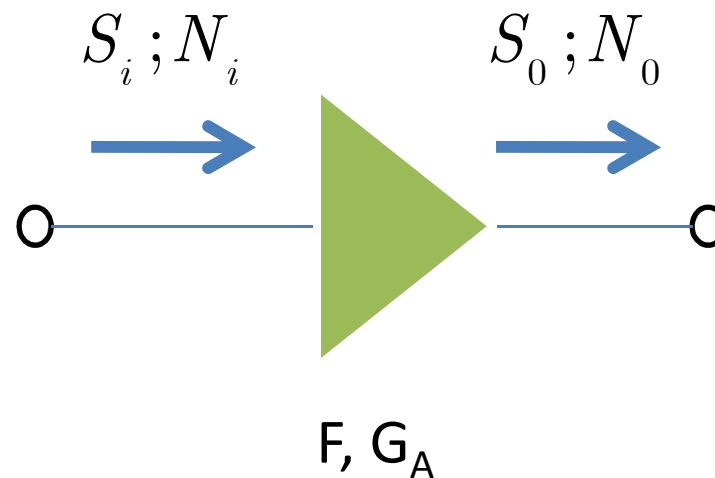
$SNR_0 = \frac{S_0}{N_0}$: relação sinal-ruído na saída

$$F(dB) = 10 \log \left(\frac{SNR_i}{SNR_0} \right)$$

Se $SNR_i = SNR_0$; $\frac{SNR_i}{SNR_0} = 1$ e $F = 0 \text{ dB}$

Na prática, $SNR_0 < SNR_i$ e $F > 0 \text{ dB}$

Fator de ruído de amplificador

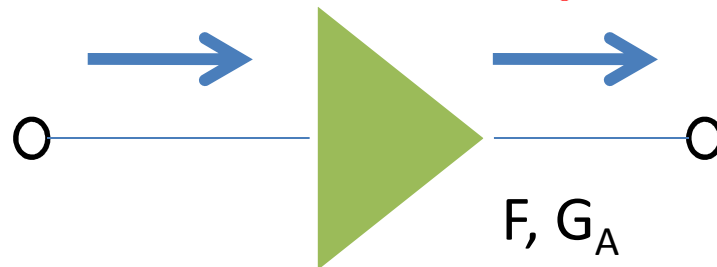


$$F = \frac{SNR_i}{SNR_0} = \frac{S_i/N_i}{S_0/N_0} = \frac{S_i N_0}{S_0 N_i} = \frac{N_0}{N_i} \frac{1}{S_0/S_i} = \frac{N_0}{G_A N_i}$$

G_A : ganho de potência disponível

Fator de ruído de amplificador

$$N_i = KTB \text{ watt}$$

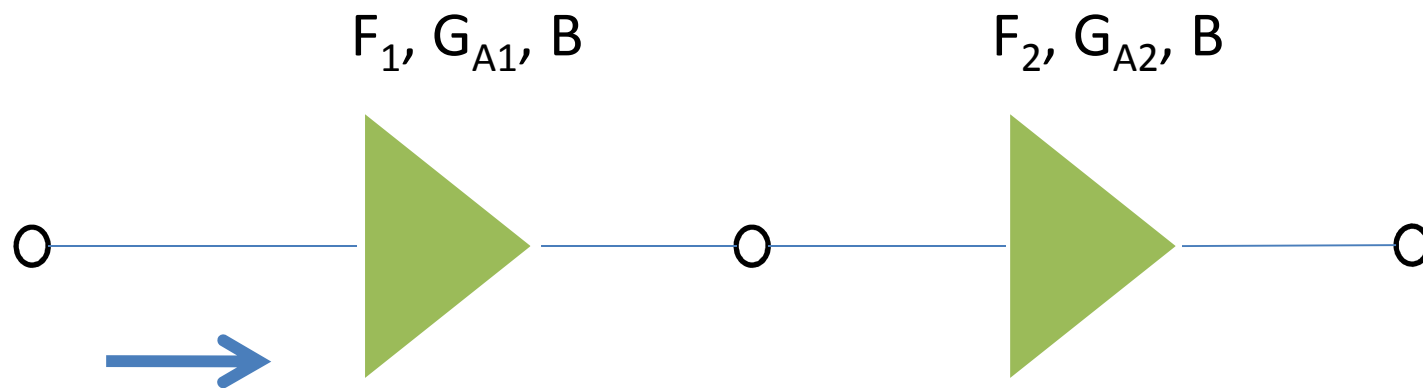


$$N_0 = G_A N_i + N_{0,int} \text{ watt}$$

$$F = \frac{N_0}{G_A N_i} = \frac{G_A N_i + N_{0,int}}{G_A N_i} = 1 + \frac{N_{0,int}}{G_A N_i}$$

$$F = 1 + \frac{N_{0,int}}{G_A N_i} \quad \text{Relação entre potências de ruído}$$

Amplificadores em cascata-1

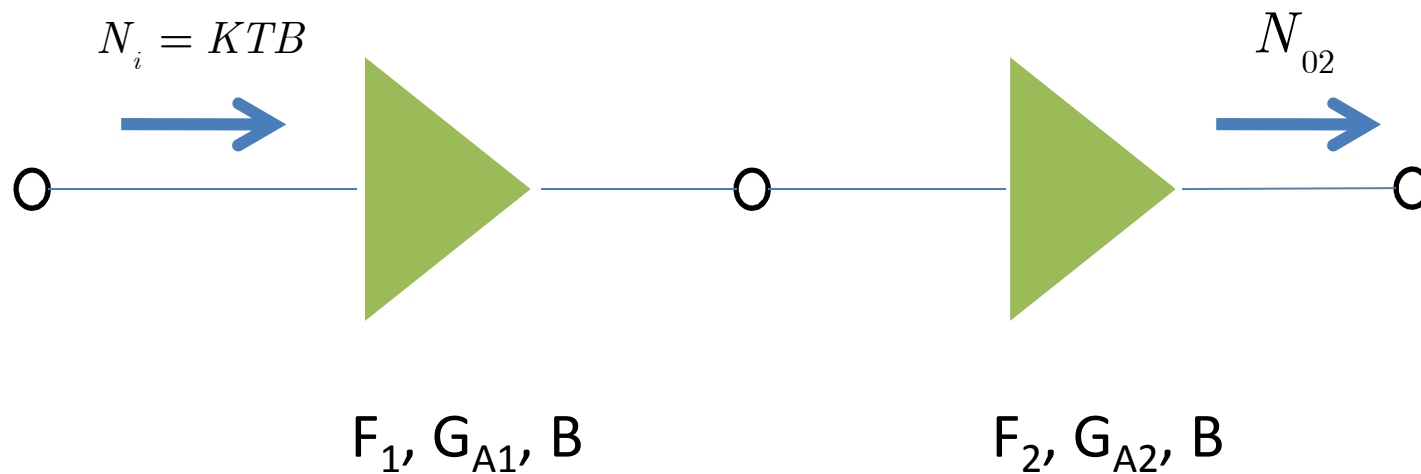


$$N_i = KTB$$

$$N_{01} = G_{A1}N_i + N_{01,int}$$

$$N_{02} = G_{A2}G_{A1}N_i + G_{A2}N_{01,int} + N_{02,int}$$

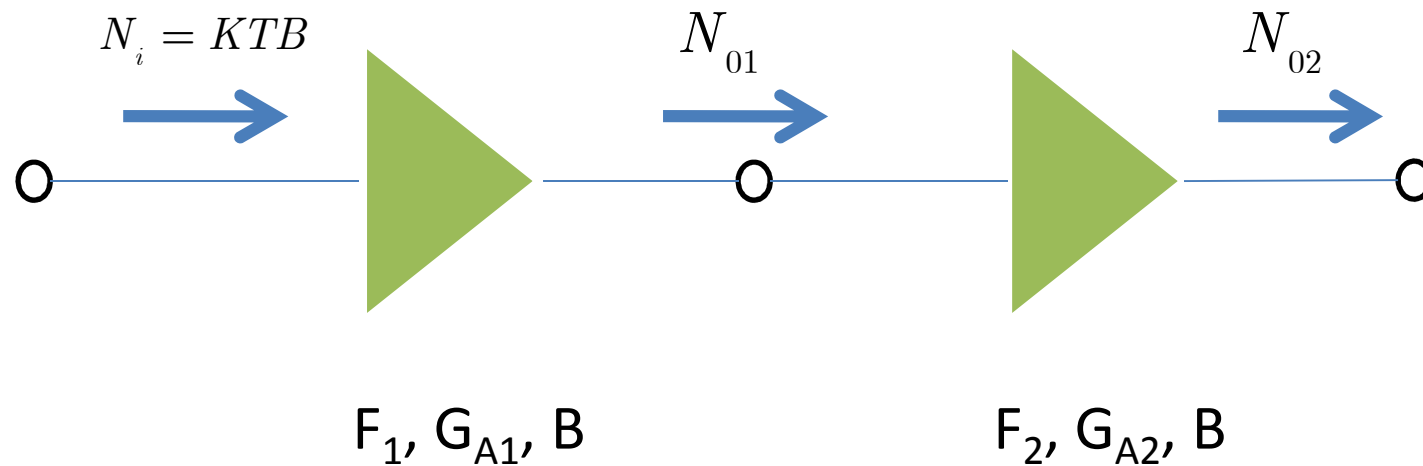
Amplificadores em cascata-2



$$F_1 = 1 + \frac{N_{01,int}}{G_{A1} N_i}$$

$$F_2 = 1 + \frac{N_{02,int}}{G_{A2} N_i}$$

Amplificadores em cascata-3



$$N_{01,\text{int}} = (F_1 - 1)G_{A1}N_i \quad N_{02,\text{int}} = (F_2 - 1)G_{A2}N_i$$

Amplificadores em cascata-4

$$N_{01,int} = (F_1 - 1)G_{A1}N_i \quad N_{02,int} = (F_2 - 1)G_{A2}N_i$$

$$N_{02} = G_{A2}G_{A1}N_i + G_{A2}N_{01,int} + N_{02,int}$$

$$N_{02} = G_{A2}G_{A1}N_i + (F_1 - 1)G_{A2}G_{A1}N_i + (F_2 - 1)G_{A2}N_i$$

Dividindo por $G_{A2}G_{A1}N_i$

$$\frac{N_{02}}{G_{A2}G_{A1}N_i} = 1 + (F_1 - 1) + \frac{(F_2 - 1)}{G_{A1}}$$

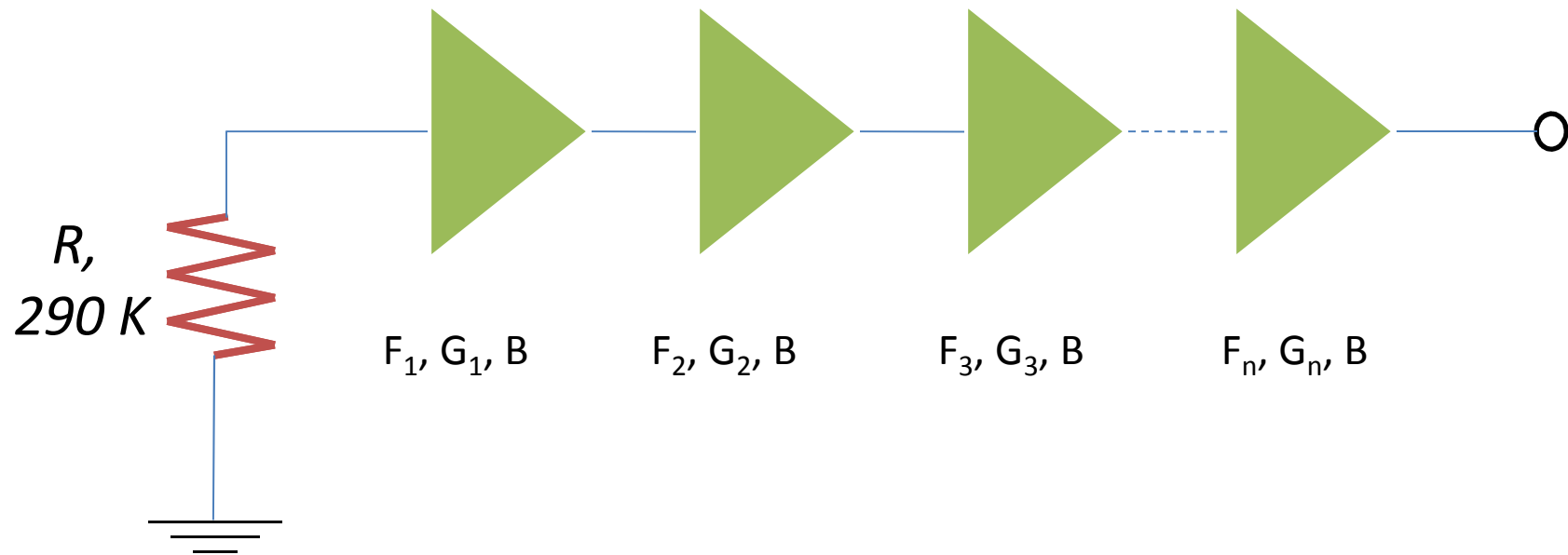
Amplificadores em cascata-5

$$\frac{N_{02}}{G_{A2} G_{A1} N_i} = 1 + (F_1 - 1) + \frac{(F_2 - 1)}{G_{A1}}$$

$$\frac{N_{02}}{G_{A2} G_{A1} N_i} \equiv F_A \quad \text{Fator de ruído da associação dos 2 amplificadores}$$

$$F_A = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}}$$

Amplificadores ruidosos em cascata-6



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

$F_{1,n}$: fator de ruído global (relação entre potências); F_n : fator de ruído do n -ésimo estágio; G_n : ganho do n -ésimo estágio (relação entre potências); B : largura de faixa dos estágios amplificadores

Figura de ruído de 3 amplificadores em cascata

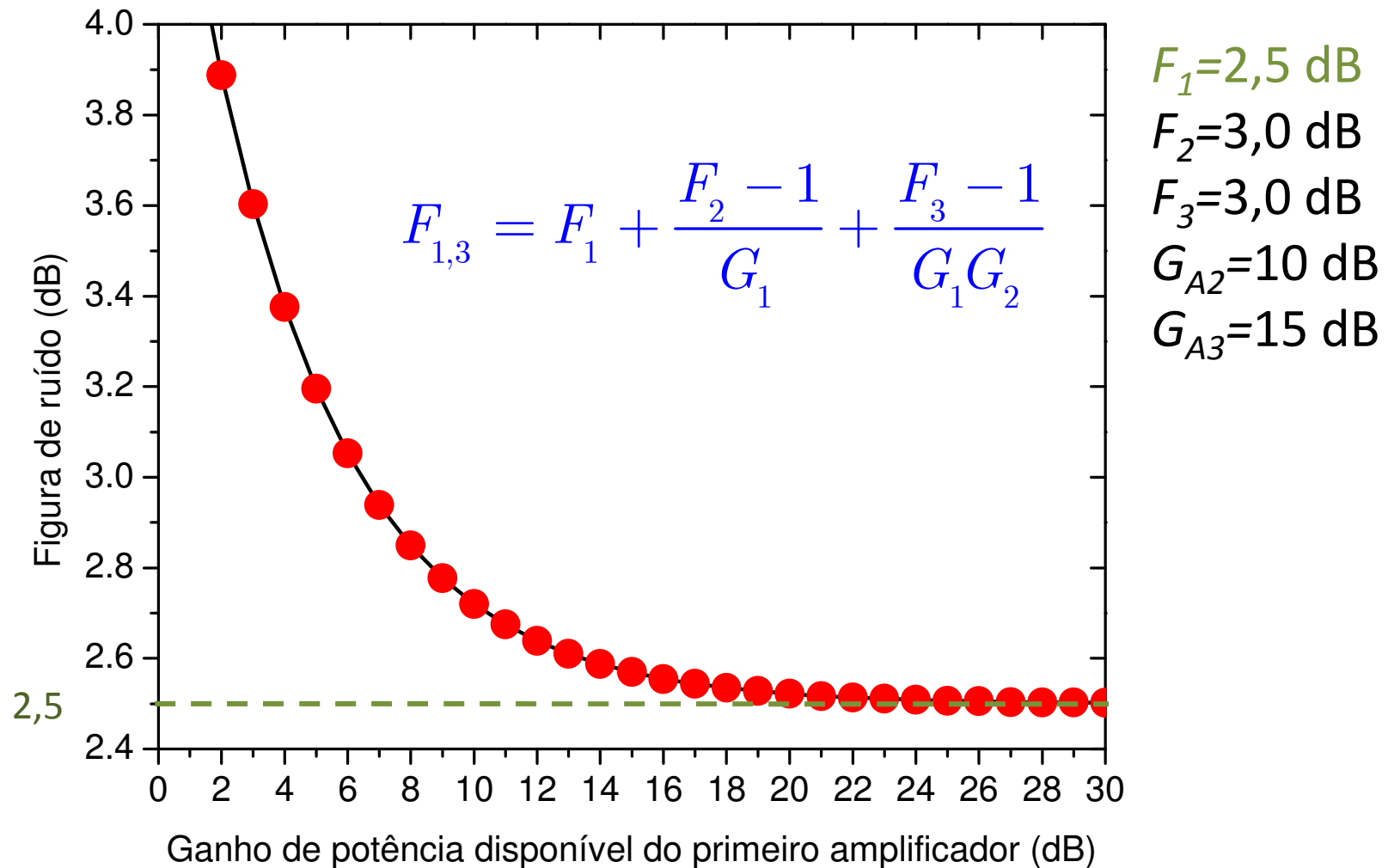
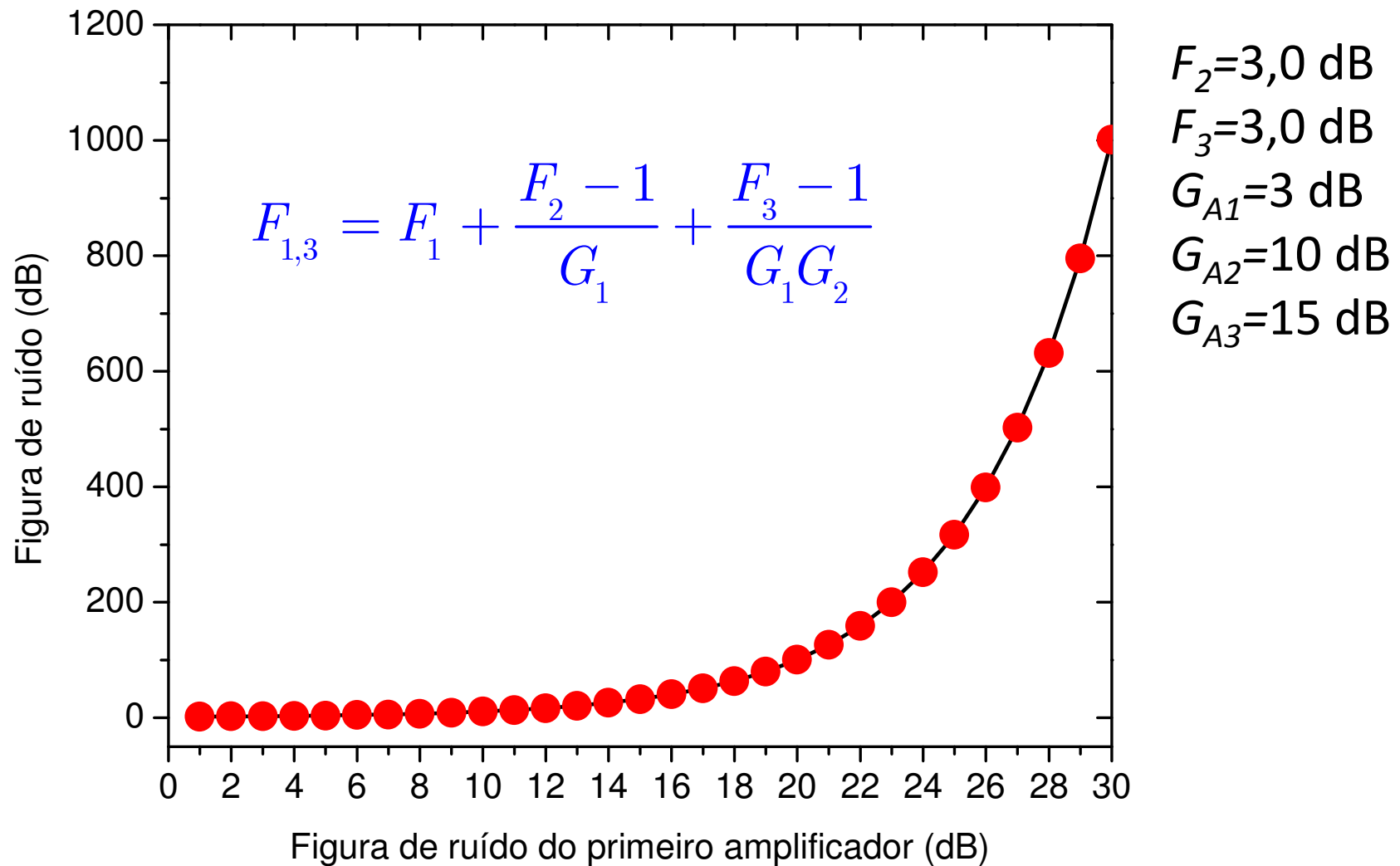


Figura de ruído de 3 amplificadores em cascata



Temperatura equivalente de ruído

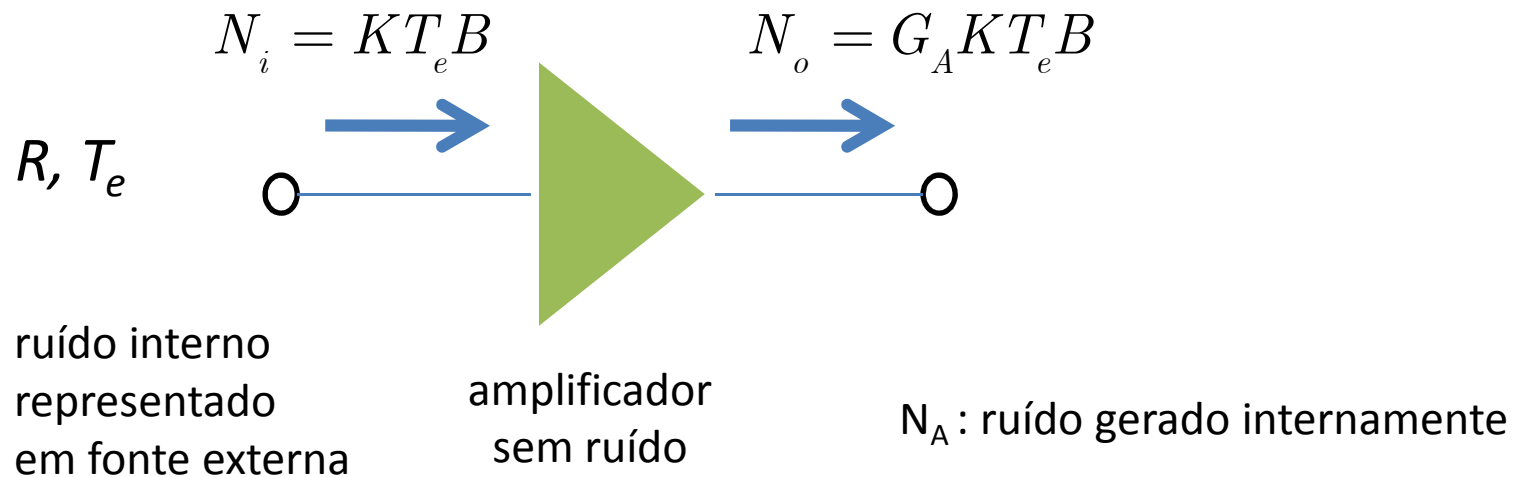
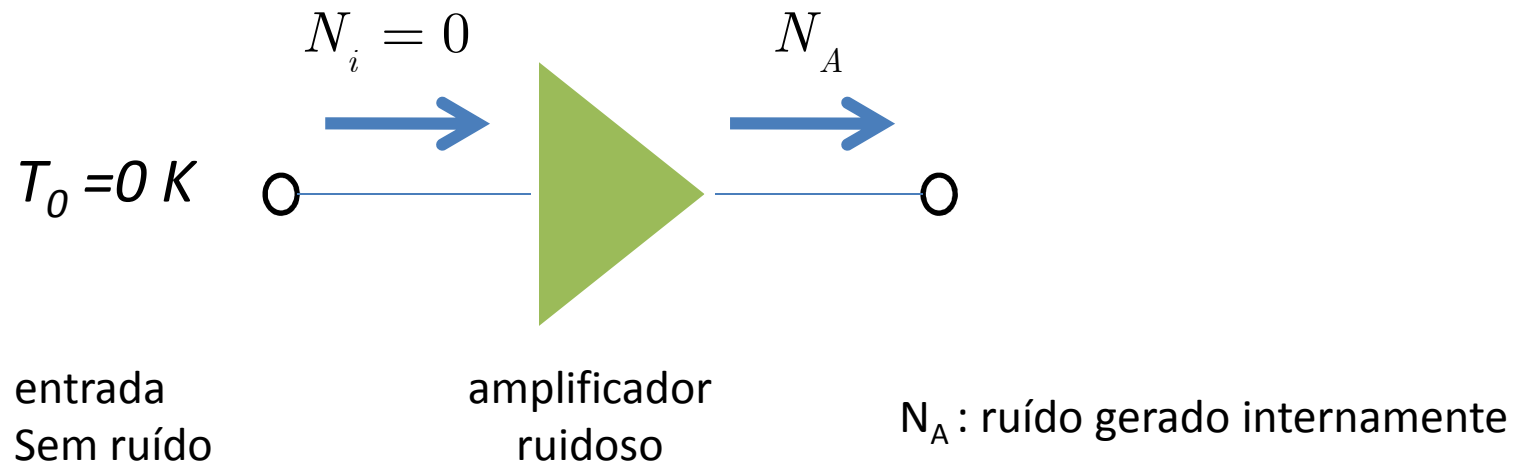
- ✓ Os ruídos são gerados por fontes distintas.
- ✓ A potência de ruído resultante é expressa como se o ruído fosse gerado por fonte de ruído térmico.
- ✓ Esta fonte está em temperatura hipotética, a *temperatura equivalente de ruído*, T_N .

Exemplo: em um determinado local a potência de ruído medida em $T=290$ K; $B=1$ MHz é $P_N=10^{-12}$ W. Determinar a temperatura equivalente de ruído.

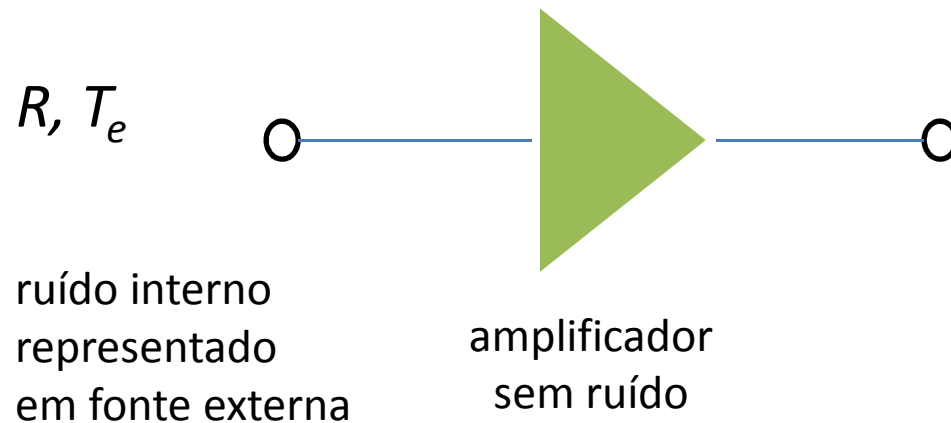
Solução: a potência de ruído térmico em $T=290$ K; $B=1$ MHz é $P_{N,term}=4,11 \times 10^{-3} \times 10^{-12}$ W. Como $P_N > P_{N,term}$ há outras fontes de ruído. Se P_N fosse gerada por ruído térmico, $KT_N B = 10^{-12}$ W e

$$T_N = \frac{10^{-12}}{1,38 \times 10^{-23} \times 10^6} = 72.207 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura de ruído de amplificador-1



Temperatura de ruído de amplificador-2



$$T_e = \frac{N_A}{G_A K B}$$

N_A : ruído gerado internamente

Temperatura e figura de ruído-1



$$SNR_i = \frac{S_i}{N_i} = \frac{S_i}{KT_o B} \qquad SNR_o = \frac{S_o}{N_o} = \frac{S_o}{G_A K (T_o + T_e) B}$$

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{S_i}{KT_o B} \frac{G_A K (T_o + T_e) B}{T_o S_o} = \frac{G_A (T_o + T_e)}{T_o (S_o/S_i)} = \frac{G_A (T_o + T_e)}{T_o G_A} = \frac{(T_o + T_e)}{T_o}$$

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

Temperatura e figura de ruído-2

Exemplo:

Um sistema downlink de comunicação via satélite operando na faixa 3,7 a 4,2 GHz utiliza um LNA (low noise amplifier), cuja temperatura de ruído é $T_e=30$ K. Calcular A figura de ruído em dB.

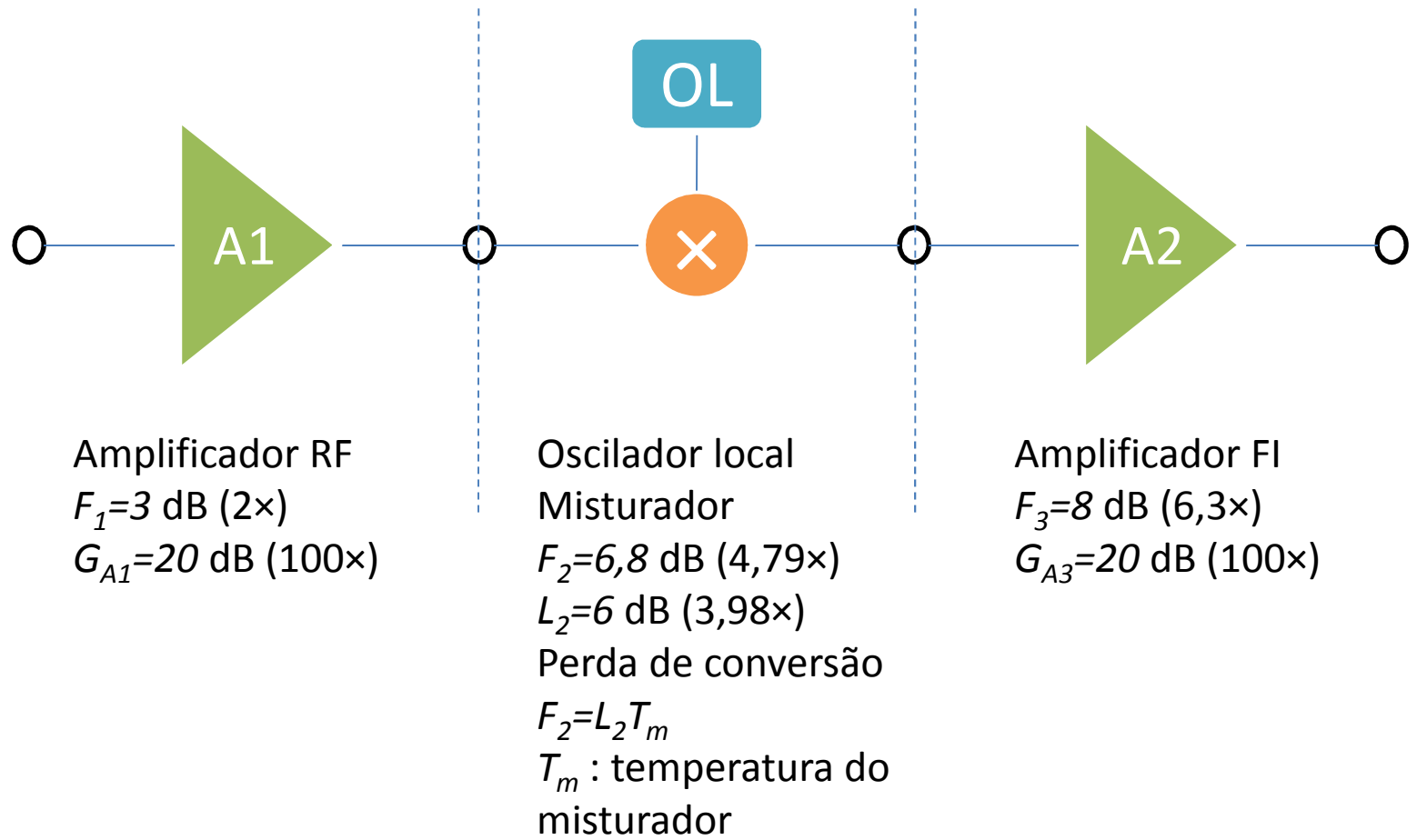
Solução:

$$F_1 = 1 + \frac{T_e}{T_0} = 1 + \frac{30}{290} = 1,103 \text{ ou } 0,43 \text{ dB}$$

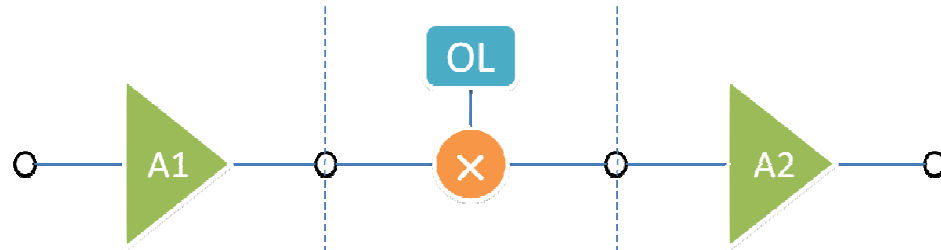
Outro LNA com temperatura de ruído $T_e=10$ K exibe figura de ruído $F_2=1,034$ ou $0,147$ dB.

Os valores de F não são muito apropriados para distinguir tal especificação. O uso de temperatura de ruído é mais conveniente.

Exemplo-1



Exemplo-2



$F_1=3 \text{ dB (2}\times\text{)}$
 $G_{A1}=20 \text{ dB (100}\times\text{)}$

$F_2=6,8 \text{ dB (4,79}\times\text{)}$
 $L_2=6 \text{ dB (3,98}\times\text{)}$

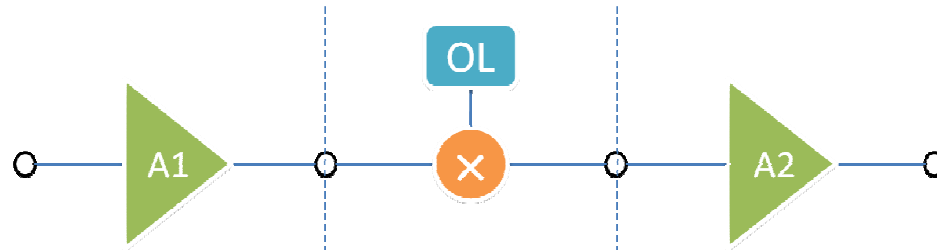
$F_3=8 \text{ dB (6,3}\times\text{)}$
 $G_{A3}=20 \text{ dB (100}\times\text{)}$

$$F_{1,3} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}} + \frac{F_3 - 1}{G_{A2} G_{A1}}$$

$$F_1 = 2; F_2 = 4,79; F_3 = 6,3$$

$$G_{A1} = 100; G_{A2} = \frac{1}{L_2} = \frac{1}{3,98}; G_{A3} = 100$$

Exemplo-3



$$F_1 = 3 \text{ dB (2x)}$$

$$G_{A1} = 20 \text{ dB (100x)}$$

$$F_2 = 6,8 \text{ dB (4,79x)}$$

$$L_2 = 6 \text{ dB (3,98x)}$$

$$F_3 = 8 \text{ dB (6,3x)}$$

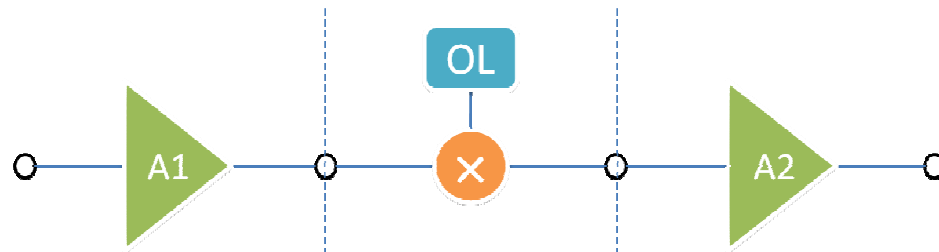
$$G_{A3} = 20 \text{ dB (100x)}$$

$$F_1 = 2; F_2 = 4,79; F_3 = 6,3$$

$$G_{A1} = 100; G_{A2} = \frac{1}{L_2} = \frac{1}{3,98}; G_{A3} = 100$$

$$F_{1,3} = 2 + \frac{4,79 - 1}{100} + \frac{6,3 - 1}{\frac{1}{3,98} \times 100} \quad F_{1,3} = 2,25 \text{ ou } 3,52 \text{ dB}$$

Exemplo-4



$$F_1 = 3 \text{ dB (2}\times\text{)}$$

$$G_{A1} = 13 \text{ dB (20}\times\text{)}$$

$$F_2 = 6,8 \text{ dB (4,79}\times\text{)}$$

$$L_2 = 6 \text{ dB (3,98}\times\text{)}$$

$$F_3 = 8 \text{ dB (6,3}\times\text{)}$$

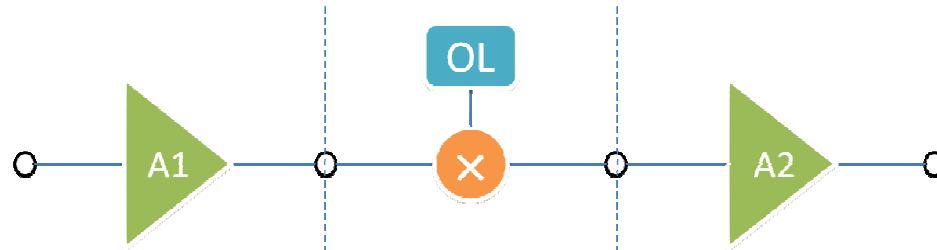
$$G_{A3} = 20 \text{ dB (100}\times\text{)}$$

$$F_1 = 2; F_2 = 4,79; F_3 = 6,3$$

$$G_{A1} = 20; G_{A2} = \frac{1}{L_2} = \frac{1}{3,98}; G_{A3} = 100$$

$$F_{1,3} = 2 + \frac{4,79_2 - 1}{20} + \frac{6,3 - 1}{\frac{1}{3,98} \times 20} \quad F_{1,3} = 3,29 \text{ ou } 5,17 \text{ dB}$$

Exemplo-5



$F_1 = 3 \text{ dB (2\times)}$
 $G_{A1} = 20 \text{ dB (100\times)}$
 $G_{A1} = 13 \text{ dB (20\times)}$

$F_2 = 6,8 \text{ dB (4,79\times)}$
 $L_2 = 6 \text{ dB (3,98\times)}$

$F_3 = 8 \text{ dB (6,3\times)}$
 $G_{A3} = 20 \text{ dB (100\times)}$

$$F_{1,3} = 2,25 \text{ ou } 3,52 \text{ dB}$$

$$F_{1,3} = 3,29 \text{ ou } 5,17 \text{ dB}$$