

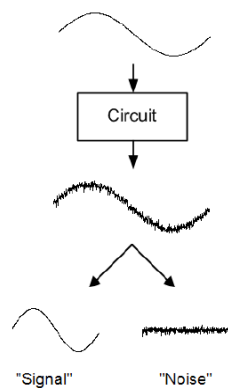
Ruído em Sistemas Eletrônicos

Conceitos Básicos

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Definição

- Ruído é um sinal interferente de natureza aleatória que provoca a degradação de sinal durante seu processamento.
 - Este sinal pode ter diferentes origens
 - Gerados pelo homem
 - Intrínseco ou relacionado aos dispositivos eletrônicos
- O Ruído é quantificado através de sua potência
 - A métrica de desempenho comumente utilizada é a RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR – *signal to noise ratio*)



$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \propto \frac{V_{signal}^2}{V_{noise}^2}$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Tipos de Ruído

- Gerados pelo homem ou ruído interferente
 - Acoplamento de sinal
 - Acoplamento pelo substrato
 - Rejeição do ruído da fonte de alimentação (PSRR) finito
 - Possíveis soluções
 - Blindagem e aterramento no caso de sistemas
 - Circuitos diferenciais completos (CMR)
 - Entradas diferenciais
 - Saídas diferenciais
 - Técnicas de leiaute
- Ruído eletrônico ou de dispositivo
 - Fundamental – ruído branco
 - Ruído térmico causado pelo movimento randômico dos portadores
 - Relacionado com a tecnologia do dispositivo
 - Ruído flicker causado por defeitos no material e rugosidades de interface

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Fontes de Ruído

- Circuitos Digitais
- Fontes Chaveadas
- Descarga Eletrostática – ESD
- Motores, relés e contactoras
- Interferência Eletromagnética de transceptores de rádio – EMI
- Ruído Intrínseco.

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Impacto do Ruído em Sistemas Eletrônicos

- A fidelidade de reprodução de sinais por um sistema é medida pelo seu **SNR**
 - Sistemas de áudio e imagem
 - Transceptores sem fio e com fio
- Ruído eletrônico é um jogo de compromisso com potência e velocidade
 - Maior amplitude de sinais implica em maior potência
 - Maior velocidade implica em uma resposta em frequência mais ampla
- O efeito de ruído fica cada vez mais importante em tecnologias
 - Menor fonte de alimentação implica em menor excursão de sinal
 - $SNR \sim V_{\text{signal}}^2/V_{\text{noise}}^2 \sim (\alpha V_{DD})^2/V_{\text{noise}}^2$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

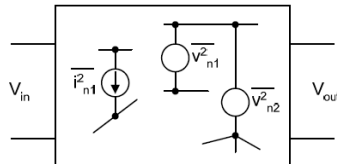
Questões

- Como modelar o ruído nos dispositivos
- Como realizar simulações de ruído em sistemas

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído em Sistemas Eletrônicos

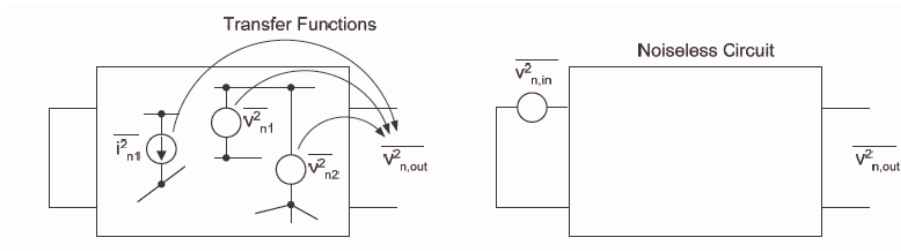
- Os circuitos tem muitas podem ter muitas fontes internas relevantes de ruído



- Normalmente, quantifica-se o efeito líquido do ruído de todas as fontes em ponto de referência
 - Estes pontos de referência são a entrada ou saída.

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído em Sistemas Eletrônicos

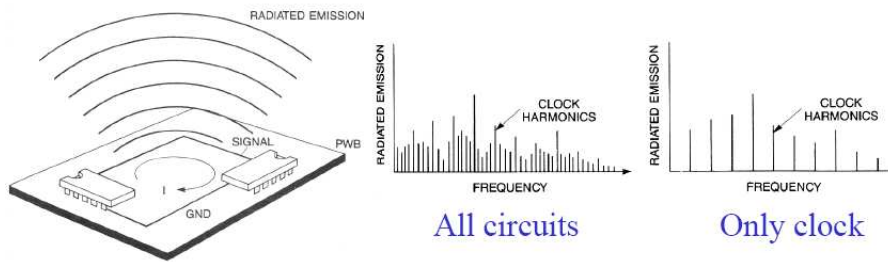


- Referenciado a Saída**
 - Computa-se a influência de cada fonte interna até a saída.
 - É exatamente como se mede em laboratório
- Referenciado à Entrada**
 - Representa-se o ruído total através de uma fonte fictícia de entrada.
 - É útil principalmente para componentes de propósito geral.
 - O ruído de saída depende de como o componente é utilizado.

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído de Acoplamento

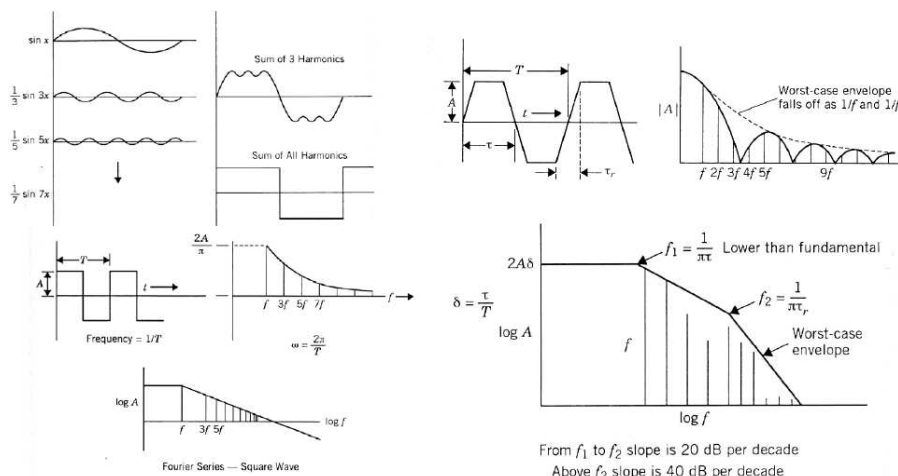
- Ruído da lógica digital



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído de Acoplamento

- Formas de onda de sistemas digital



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído de Acoplamento

- Relação tempo de subida / descida e BW

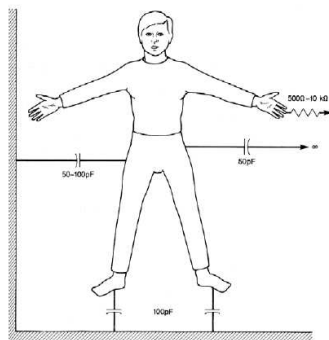
Table 10-1 Rise/Fall Time and Bandwidth of Various Logic Families

Logic Family	Rise/Fall Time (ns)	Bandwidth (MHz)
CMOS	50	6.3
TTL	10	32
HCMOS	9	32
LSTTL	5	64
ALS	4	80
ACL	3	106
FAST	3	106
AS	2	159
ECL(10K)	2	159
ECL(100K)	1	318

$$BW = \frac{1}{\pi \cdot t_r}$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído de Acoplamento



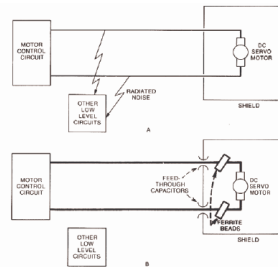
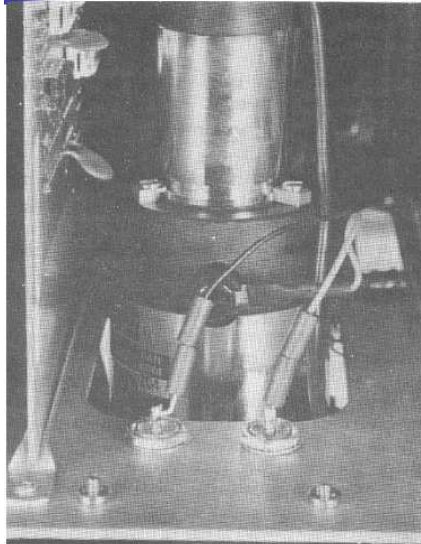
Human body model

Means of Static Generation	Electrostatic Voltage	
	10 to 20% Relative Humidity	65 to 90% Relative Humidity
Walking across carpet	35,000	1500
Walking on vinyl floor	12,000	250
Worker moving at bench	6000	100
Opening a vinyl envelope	7000	600
Picking up common polyethylene bag	20,000	1200
Sitting on chair padded with polyurethane foam	18,000	1500

An ESD event can deliver amperes of current and a voltage of kilovolts in pico seconds of time. the shear magnitude of the resulting di/dt, dv/dt and associated electromagnetic fields can easily disrupt the circuit operation and even cause physical damage to circuit components

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

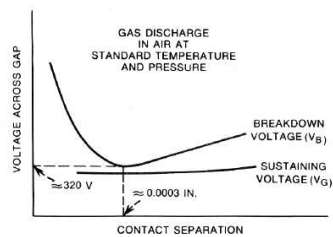
Ruído de Acoplamento – Motores e Relés



Motors, relays and switch contacts can generate sparks at points of electrical contact. This type of noise is sometimes referred to as Electrical Fast Transient (EFT)

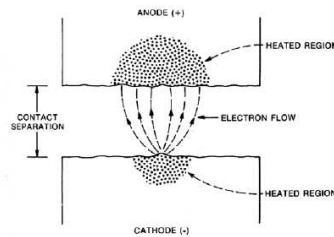
ENG04055 – Concepção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído de Acoplamento – Descarga em Gases



Glow discharge

Glow discharge can occur between two contacts when the gas between the contacts becomes ionized



Arc discharge

An arc discharge is started by field-induced electron emission which required a voltage gradient 0.5MV/cm

ENG04055 – Concepção de CI Analógicos – Eric Fabris

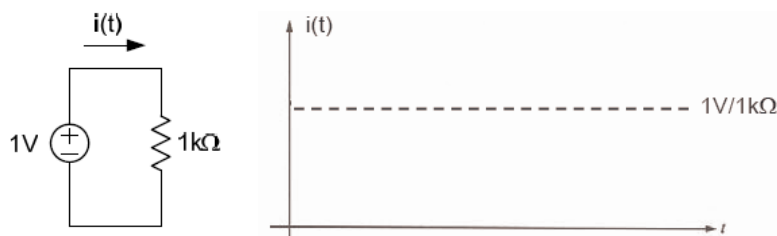
Ruído Intrínseco

- Ruído térmico
- Ruído de contato
- Ruído balístico – “shot”
- Ruído pipoca – “popcorn”

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Resistor Ideal

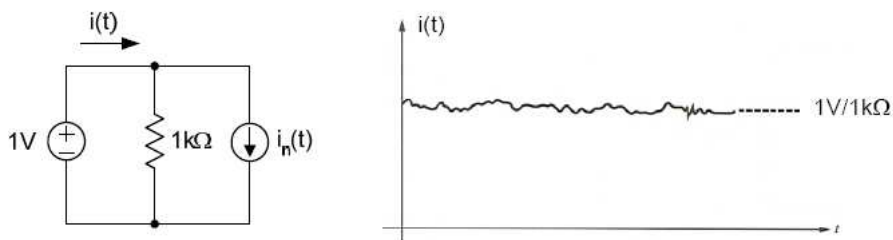
- Corrente constante ao longo do tempo
- Modelo não físico
 - Em resistores reais, os portadores móveis colidem com os átomos da rede, dando origem a pequenas variações de corrente ao longo do tempo.



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Resistor Real ou Físico

- Presença de ruído térmico ou “Johnson Noise”
- Modela a componente randômica da corrente através de uma fonte de corrente $i_n(t)$



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

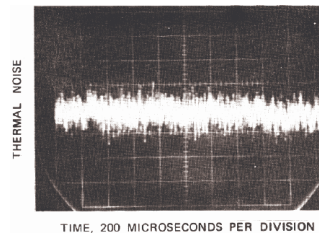
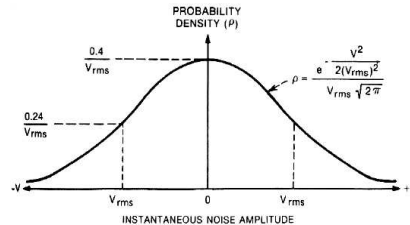
Propriedades do Ruído Térmico

- Está presente em qualquer condutor
- É independente da corrente DC que circula
- O valor instantâneo é imprevisível (sistema estocástico)
 - Ele é decorrente de um grande número aleatório de colisões sobrepostas com tempo de relaxação na casa de 0,17 ps. Logo:
 - A distribuição de amplitudes segue uma distribuição gaussiana
 - Conhecendo $i_n(t)$ não auxilia prever $i_n(t+\Delta t)$, a mesmo que Δt seja da ordem de 0,17 ps.
 - Não conseguimos amostrar os sinais tão rápido
 - A potência gerada se espalha até frequências muito altas ($1/0,17ps \approx 6000$ Grad/s)
- Pode-se prever somente o valor da potência média gerada pelo ruído térmico

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Propriedades do Ruído Térmico

- Distribuição normal ou gaussiana



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído térmico – Potência Média

- Potência média de um sinal determinístico com período **T**
- Pode-se estender esta definição para sinal randômico
- Assumindo um sinal real, estacionário e ergódico
- Por convenção, trabalha-se normalmente com o valor médio quadrático da corrente.

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i^2(t) R \cdot dt$$

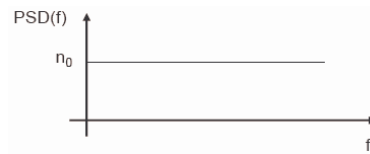
$$P_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i_n^2(t) R \cdot dt$$

$$\overline{i_n^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i_n^2(t) \cdot dt$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído Térmico - Espectro

- Utiliza-se a o conceito de densidade espectral de potência (PSD – *power spectral density*)
 - A PSD reflete quanta potência o sinal carrega em uma frequência particular.
- No caso do ruído térmico, a densidade de potência se espalha uniformemente até frequências muito altas (10% de queda em 2000GHz).
- A potência em uma faixa do espectro é dada por:



$$P_n = \int_{f_1}^{f_2} PSD(f) \cdot df$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído Térmico - Resistor

- Nyquist mostrou que a PSD de um resistor é
- $$PSD(f) = n_0 = 4kT$$
- k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta
 - $4kT = 1,55 \times 10^{-20}$ Joules na temperatura ambiente
 - A potência média total de ruído em um resistor é dada por

$$P_n = \int_{f_1}^{f_2} 4kT \cdot df = 4kT(f_2 - f_1) = 4kT\Delta f$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Gerador Equivalente de Ruído

- Podemos modelar o efeito de ruído pela inserção de uma fonte de tensão ou corrente que gere o mesmo efeito

$$\overline{v_n^2} = P_n \cdot R = 4kT \cdot R \cdot \Delta f$$

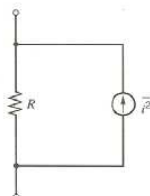
$$\overline{i_n^2} = \frac{P_n}{R} = 4kT \cdot \frac{1}{R} \cdot \Delta f$$

For $R = 1k\Omega$:

$$\frac{\overline{v_n^2}}{\Delta f} = 16 \cdot 10^{-18} \frac{V^2}{Hz}$$

$$\sqrt{\frac{\overline{v_n^2}}{\Delta f}} = 4nV / \sqrt{Hz}$$

$$\Delta f = 1MHz \Rightarrow \sqrt{\overline{v_n^2}} = 4\mu V$$



For $R = 1k\Omega$:

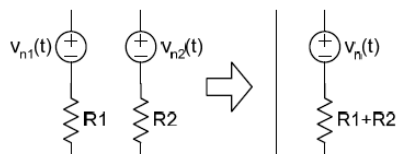
$$\frac{\overline{i_n^2}}{\Delta f} = 16 \cdot 10^{-24} \frac{A^2}{Hz}$$

$$\sqrt{\frac{\overline{i_n^2}}{\Delta f}} = 4pA / \sqrt{Hz}$$

$$\Delta f = 1MHz \Rightarrow \sqrt{\overline{i_n^2}} = 4nA$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Dois Resistores em Série



$$\overline{v_n^2} = \overline{(v_{n1} - v_{n2})^2} = \overline{v_{n1}^2} + \overline{v_{n2}^2} - 2 \cdot \overline{v_{n1} \cdot v_{n2}}$$

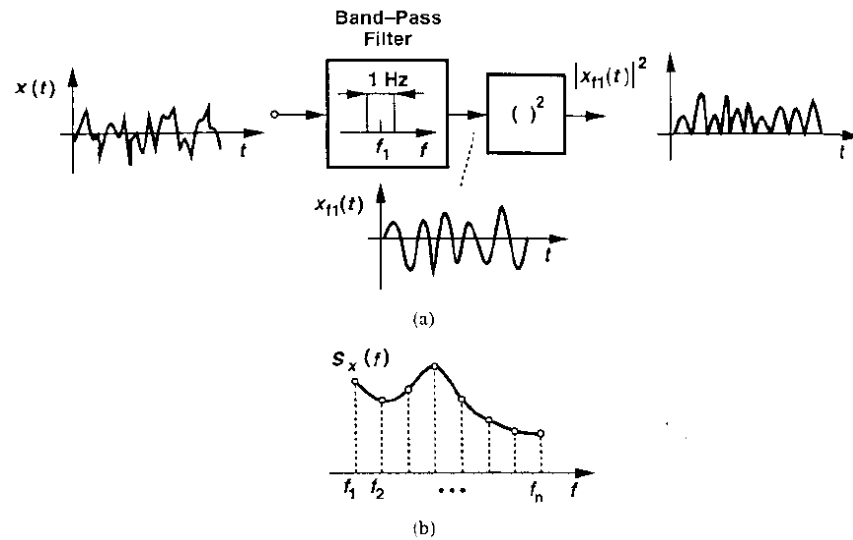
- Since $v_{n1}(t)$ and $v_{n2}(t)$ are statistically independent, we have

$$\overline{v_n^2} = \overline{v_{n1}^2} + \overline{v_{n2}^2} = 4 \cdot kT \cdot (R_1 + R_2) \cdot \Delta f$$

- Always remember to add independent noise sources using mean squared quantities
 - Never add RMS values!

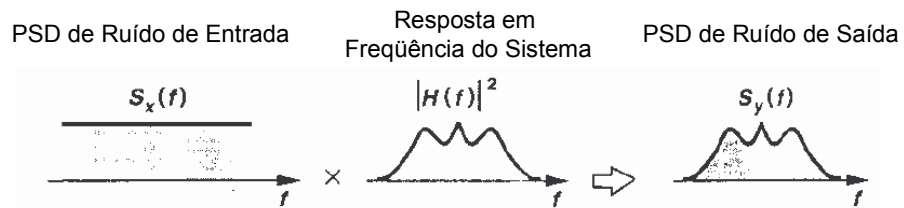
ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Conceito de Densidade Espectral de Potência – PSD

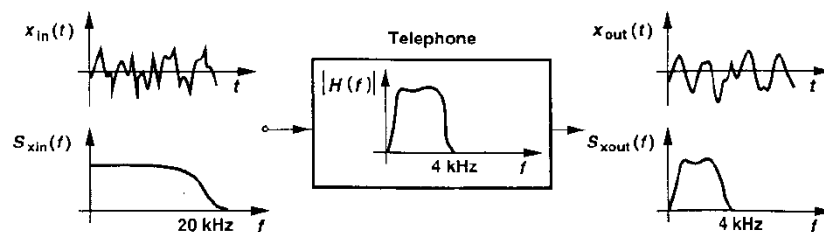


ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Conceito de Conformação de Ruído

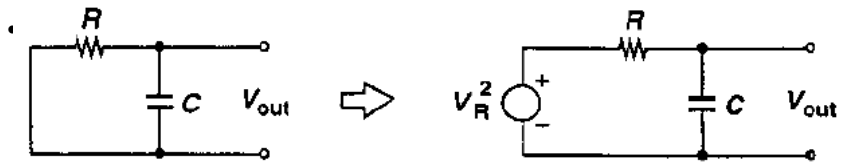


Exemplo de conformação de Ruído em uma linha de Telefônica



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

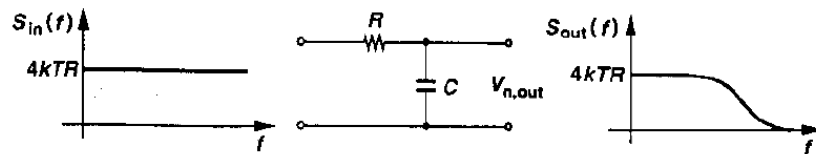
Ruído em um Filtro RC



$$\frac{V_{out}}{V_{Rn}} = \frac{1}{RCS + 1}$$

$$Ruido_PSD_{out} = Ruido_PSD_R \left| \frac{V_{out}}{V_R} (j\omega) \right|^2 = 4kTR \frac{1}{(2\pi RCf)^2 + 1}$$

$$P_{n,out} = \int_0^\infty \frac{4kTR}{(2\pi RCf)^2 + 1} df = \frac{kT}{C} \Rightarrow v_{n,out,rms} = \sqrt{kT/C} \Rightarrow \begin{cases} C = 1pF \\ v_{n,out,rms} = 64,3\mu V_{RMS} \end{cases}$$



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Importância do Ruído Térmico

- Let's look at the SNR of an RC circuit with a 1-V sinusoid applied, considering the total integrated noise (kT/C)

SNR [dB]	C [pF]
20	0.00000083
40	0.000083
60	0.0083
80	0.83
100	83
120	8300
140	830000

Hard to make such small capacitors...

Designer will be concerned about thermal noise; component sizes often set by SNR

A difficult battle with thermal noise ...

- Rules of thumb
 - Up to SNR ~ 30-40dB, integrated circuits are usually not limited by thermal noise
 - Achieving SNR > 100dB is extremely difficult
 - Must usually rely on external components, or reduce bandwidth and remove noise by a succeeding filter

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Detecção Mínima de Sinal e Faixa Dinâmica

- Minimum detectable signal (MDS)
 - Quantifies the signal level in a circuit that yields SNR=1, i.e. noise power = signal power
- Dynamic range (DR) is defined as

$$DR = \frac{P_{signal,max}}{MDS}$$

- If the noise level in the circuit is independent of the signal level (which is often, but not always the case), it follows that the DR is equal to the "peak SNR," i.e. the SNR with the maximum signal applied

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Exemplo do Efeito do Ruído

Imagem com baixo SNR



Imagem com Alto SNR



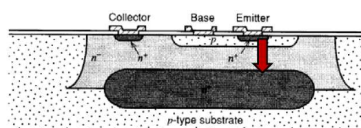
ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Ruído em TMOS e BJT

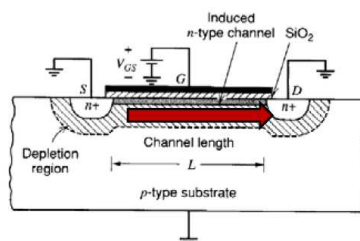
ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Introdução – Tecnologia do Dispositivo

BJT



TMOS



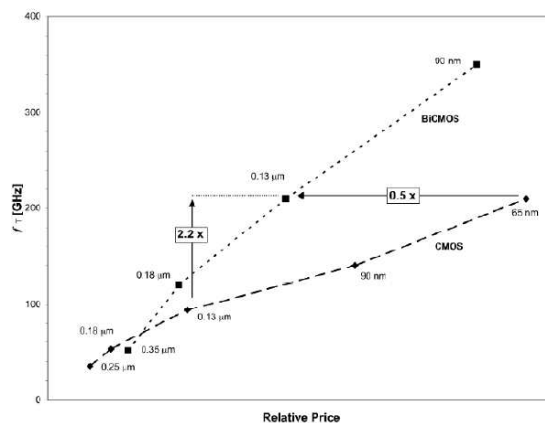
ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Comparação BJT x TMOS

- Quando o TMOS é comparado com o BJT, temos que o BJT:
 - tem variação paramétrica menor
 - pode operar com excursões de tensão maiores
 - tem ganho de tensão maior, r_{out} maior
 - mantém o ganho de corrente por décadas (4 – 5 dec)
 - pode operar com densidade de correntes maiores, para uma dada corrente possui capacitâncias parasitas menores. Maior BW.
- Logo, comparando Amplificadores MOS x BJT, os bipolares apresentam:
 - menor tensão de offset
 - suportam faixas dinâmicas maiores
 - tem BW maior na presença de cargas resistivas

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

CMOS x BJT



A.J. Joseph, et al., "Status and Direction of Communication Technologies - SiGe BiCMOS and RFCMOS," *Proceedings of the IEEE*, vol.93, no.9, pp.1539-1558, Sept. 2005.

A tecnologia CMOS tende a exigir um processo litográfico mais fino quando comparado a uma tecnologia BiCMOS de equivalente velocidade.

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

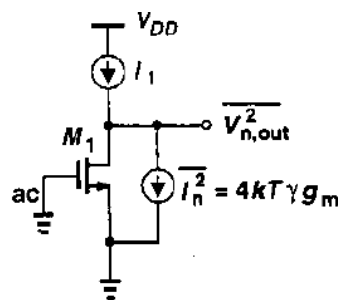
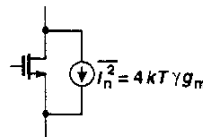
TMOS – Modelo Básico de Ruído

- O TMOS apresenta ruído térmico
 - A parcela mais significativa é a gerada na região do Canal.
 - γ não é o efeito de corpo.
 - γ é função do comprimento do canal
 - para canais longos $\sim 2/3$
 - $L = 0,25\mu\text{m} \sim 2,5$
- A tensão de ruído é função da impedância da carga.

$$\overline{v_n^2} = \overline{I_n^2} r_o^2$$

$$\overline{v_n^2} = 4kT \frac{2}{3} g_m r_o^2$$

$$\overline{I_n^2} = 4kT\gamma g_m$$



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

TMOS – Flicker Noise (1/f)

- Causado “armadilhas” de interface canal – óxido de gate

$$\overline{v_n^2} = \frac{K}{WLC_{ox}} \frac{1}{f}$$

$$K = 10^{-25} \frac{V^2}{F} \text{ dependente do processo}$$

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Amplificador Inversor – Análise de Ruído I

NOISE ANALYSIS OF INVERTING AMPLIFIERS

Noise Analysis of Inverting Amplifiers

Noise model:

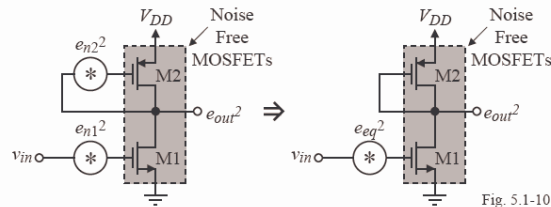


Fig. 5.1-10

Approach:

- 1.) Assume a mean-square input-voltage-noise spectral density e_n^2 in series with the gate of each MOSFET.
(This step assumes that the MOSFET is the common source configuration.)
- 2.) Calculate the output-voltage-noise spectral density, e_{out}^2 (Assume all sources are additive).
- 3.) Refer the output-voltage-noise spectral density back to the input to get equivalent input noise e_{eq}^2 .
- 4.) Substitute the type of noise source, 1/f or thermal.

CMOS Analog Circuit Design

© P.E. Allen - 2006

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Amplificador Inversor – Análise de Ruído II

Noise Analysis of the Active Load Inverter

- 1.) See model to the right.

$$2.) e_{out}^2 = e_{n1}^2 \left(\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \right)^2 + e_{n2}^2$$

$$3.) e_{eq}^2 = e_{n1}^2 \left[1 + \left(\frac{g_{m2}}{g_{m1}} \right)^2 \left(\frac{e_{n2}}{e_{n1}} \right)^2 \right]$$

Up to now, the type of noise is not defined.

1/f Noise

Substituting $e_n^2 = \frac{KF}{2fC_{ox}WLK'} = \frac{B}{fWL}$, into the above gives,

$$e_{eq(1/f)}^2 = \left(\frac{B_1}{W_1 L_1} \right) \left[1 + \left(\frac{K_2 B_2}{K_1 B_1} \right) \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \rightarrow e_{eq(1/f)} = \left(\frac{B_1}{W_1 L_1} \right)^{1/2} \left[1 + \left(\frac{K_2 B_2}{K_1 B_1} \right) \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

To minimize 1/f noise, 1.) Make $L_2 \gg L_1$, 2.) increase the value of W_1 and 3.) choose M1 as a PMOS.

Thermal Noise

Substituting $e_n^2 = \frac{8kT}{3g_m}$ into the above gives,

$$e_{eq(th)} = \left[\left(\frac{8kT}{3[2K_1(W/L)_1 I_1]^{1/2}} \right) \left[1 + \left(\frac{W_2 L_1 K_2}{L_2 W_1 K_1} \right)^{1/2} \right] \right]^{1/2}$$

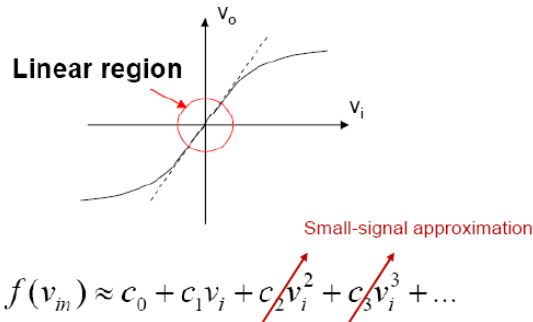
To minimize thermal noise, maximize the gain of the inverter.

CMOS Analog Circuit Design

© P.E. Allen - 2006

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

Distorção - Definição

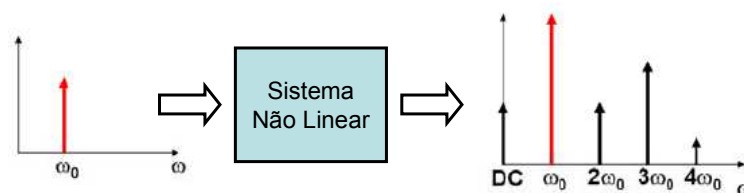


- Todo dispositivo ou sistema eletrônico apresenta algum grau de não linearidade
 - No modelo de pequenos sinais, podemos incorporar essa deformação – Expansão de Taylor
- Normalmente se caracteriza distorção considerando-se como entrada um sinal senoidal.

ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris

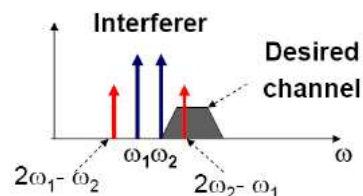
Distorção - Impacto

- A presença de não linearidades em circuito leva que para uma entrada harmônica pura haverá um conjunto de harmônicas correlacionadas com a entrada.



- Tendo na entrada 2 tons próximos, haverá o surgimento de processo de “intermodulação” na saída.

A presença de dois tons de interferência próximos um canal de informação desejada leva um processo de degradação da informação desejada a ponto de não ser possível recuperá-la.



ENG04055 – Conceção de CI Analógicos – Eric Fabris