

## Trabalho prático 4: Processos Aleatórios.

**Aluno:** Mairon Schneider Cardoso.

**Data:** 12/11/2021

**Número de matrícula:** 17102515.

## 1 Introdução

Desde a sua primeira implementação física, na década de 1960, as dimensões dos transistores de metal-óxido-semicondutor (MOS) vêm sendo constantemente reduzidas, alcançando escalas nanométricas. Essa curva de escalonamento já prevista por químicos e físicos através de análises empíricas acerca da densidade dos circuitos integrados semicondutores na indústria [1].

A redução das dimensões de transistores MOS, no entanto, impulsionou a discussão a respeito da confiabilidade de circuitos submetendo aplicações que esses estão inseridos, a incertezas quanto ao funcionamento robusto dos dispositivos semicondutores. O principal responsável por este tipo de incerteza em relação as respostas dos circuitos é a atividade de armadilhas de carga.

Armadilhas de carga correspondem a níveis energéticos presentes no interior do dielétrico e na interface entre dielétrico e semicondutor, tendo origem na má formação do óxido de porta durante o processo de fabricação ou em ligações incompletas na interface entre óxido e semicondutor [2]. A redução da escala dos dispositivos intensificaram o impacto causado por essas armadilhas, tornando a resposta dos circuitos diretamente dependentes das atividades e posicionamento das armadilhas contidas nos semicondutores [3]. Essas armadilhas podem afetar a confiabilidade e robustez de dispositivos e circuitos eletrônicos, frequentes em diversas aplicações na indústria, através dos efeitos denominados *Bias Temperature Instability* (BTI) e *Random Telegraph Noise* (RTN).

O RTN, como mencionando anteriormente, originário do processo de emissão e captura de portadores de carga por armadilhas. As armadilhas responsáveis por esse fenômeno, no entanto, são aquelas cuja probabilidade de ocupação é próxima de 50%, fazendo com que os tempos de emissão e captura possuam valores bastante semelhantes.

O estudo acerca do impacto do RTN no que tange a área de princípios de comunicação é de suma relevância, uma vez que a resposta estocástica deteriora a confiabilidade na transmissão de dados gerando a necessidade de criar camadas extras para garantir a coerência dos dados como vista na técnica de verificação cíclica de redundância.

## 2 Resultados e Discussões

O RTN está presente nas principais discussões a cerca de confiabilidade de circuitos eletrônicos que é justificado pelas suas respostas dependentes de aleatoriedades presentes no processo de fabricação. Uma das formas de quantificarmos o impacto desse efeito é através da inferência estatística que permite com que seja possível utilizar os conceitos de probabilidade estatística para prever o comportamento de um determinado dispositivo sobre influência do RTN.

A inferência estatística é uma área que permite com que através de amostras de uma população (conjunto que engloba todos os possíveis resultados) seja possível prever o comportamento de um processo aleatório. Portanto, baseando-se em metodologias presentes na inferência estatística o trabalho terá como propósito avaliar o impacto de processos aleatórios em conjunto com a área de princípios de comunicação.

### 2.1 Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um relevante método estatístico que tem como objetivo extrair o comportamento da população através da execução de um número massivo de experimentos. As amostras

são um semi conjunto da população, portanto, é possível prever estatisticamente o comportamento da população quando tendemos o número de amostras, consequentemente o número de execuções de um determinado evento, a um valor infinito (tamanho da população).

Quando tratamos da aplicação de um método como o de Monte Carlo em um efeito estocástico como é o RTN o que queremos determinar é como se comporta a curva que deve aproximar-se do comportamento real da população. Portanto, em termos de implementação o RTN foi simulado 100 vezes, considerando o poder computacional limitado, com constante de tempo médios das armadilhas iguais cerca de 5 *ms*. A janela de tempo definida respeita os limites impostos para que seja cabível observar o efeito das armadilhas, onde é definido uma janela de tempo de 400 *ms* que é maior que a média das ocorrências das armadilhas, ou seja, é coerente afirmar que naquela janela de tempo haverá a atividade das armadilhas e será possível observá-la. O passo definido deve ser menor que a média das ocorrências das armadilhas para que seja possível observar nas próximas seções do trabalho a atividade das armadilhas em detalhes nos gráficos.

Os resultados a seguir referem-se a impressão de 100 simulações de um sinal sobre efeitos de RTN (figura 1), isto é, dentre todo o conjunto denominado população foram extraídos 100 eventos (ou amostras). O que podemos ver através dessa figura é a variabilidade que acontece na amplitude do sinal  $x(t)$ .

## 2.2 Potência Média

O cálculo de potência média ou energia de um sinal, como visto na disciplina de sinais, diferencia-se quando o assunto é referente a sinais periódicos e aperiódicos. Em geral, o cálculo de sinais periódicos é generalizado através do equacionamento da integral do período total limitando a ocorrência de T. Esse equacionamento nos diz que a potência em um sinal periódico pode ser generalizado para toda sua extensão. Em sinais aperiódicos o cálculo de energia é feito considerando a área abrangida pelo sinal (integral indefinida convergente).

Ao estipularmos uma *bitstream* sobre influência do efeito de RTN acabamos por notar seu comportamento aperiódico tornando em primeiro momento impossível calcular sua potência média. Contudo, é possível calcular a potência média de um sinal aperiódico através do uso da equação de cálculo periódico adequando o período de análise, isto é, é um artifício matemático usado para calcular a potência média desse sinal no determinado intervalo, entretanto, é importante notar que as definições de constância na média de potencia que sinais periódicos oferecem não adéquam-se ao modelo empregado em sinais aperiódicos e isso vai contra o uso desse tipo de equação quando não se conhece o tamanho total do sinal aperiódico.

A equação utilizada para cálculo da potência média é exibida na equação 1. Para encontrar a potência média das 100 simulações foi dividido pelo número de simulações vezes o número de pontos presente nessas simulações. O resultado da potência média de  $x(t)$  pode ser visto através da figura 2.

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)^2 dt \quad (1)$$

## 2.3 Estimativa da Função Autocorrelação

A função de autocorrelação é descrita como a esperança do produto de duas variáveis aleatórias pela observação de  $X(t)$  em dois intervalos distintos de tempo (equação 2). Uma vez que o operador esperança é linear, é possível através de métodos algébricos, descreve-lo através da equação 3.

$$R_{xx}(t_1, t_2) = E[x(t_1)x(t_2)] \quad (2)$$

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (3)$$

A grande vantagem da autocorrelação é tornar tangível analisar sinais contaminados por ruídos. A análise de contaminação de um sinal no domínio tempo é útil uma vez que é possível observar quando duas variáveis aleatórias e independentes estão relacionadas linearmente, tornando-se extremamente útil para detecção de tendência e portanto extremamente útil em contexto de predição da resposta de funcionamento de dispositivos semicondutores.

A utilização da função de autocorrelação no contexto de RTN foi feito levando em consideração as equações anteriormente citadas em conjunto com manipulações aritméticas. Nesse contexto, o  $\tau$  usado como deslocamento no intervalo de tempo é referente a metade da janela de  $t$ , possibilitando a sobreposição dos dois intervalos com a curva.

O resultado da autocorrelação do sinal  $x(t)$  pode ser visto através da figura 3, onde nela, já é possível comparar-mós a sua autocorrelação ao passar o sinal  $x(t)$  através de um sistema LTI, onde nesse caso é um filtro passa baixa, simulando um canal de transmissão semelhante ao da tarefa anterior.

## 2.4 Densidade Espectral de Potência

Ao obtermos a função de autocorrelação, é possível analisar sua densidade espectral de potência deste processo de maneira mais clara, isto é, apesar do sinal estar repleto de ruídos a sua representação em termos da densidade de potência permite-nós observar as componentes de ruído de forma mais clara. Semelhante ao que foi demonstrado quando aplicamos um ruído branco em um sinal senoidal, em domínio do tempo, seria caótico prever o comportamento da resposta, contudo, ao empregar a função de autocorrelação, o que vamos observar é apenas uma função senoidal com uma semelhante a uma delta de Dirac.

A obtenção da densidade espectral de potência do sinal  $x(t)$  está correlacionada com o cálculo de  $R_{xx}$  e pode ser observada através da figura 4. Do mesmo modo, através da mesma figura é possível ver a densidade espectral de potência do sinal ao passar por um sistema LTI.

## 3 Transmissão

A transmissão do sinal é feita considerando um filtro passa baixas. Para que seja necessário transmitir o sinal através do filtro em domínio tempo, é necessário convolucionar o sinal  $x(t)$  com o filtro  $h(t)$  (como sabemos, a multiplicação de um sinal em frequência é descrito como a convolução no tempo).

Ao compararmos com os conteúdos bibliográficas referentes ao RTN, é comumente usado domínio  $db/log$ , portanto, foi realizado a conversão dos sinais  $R_{xx}$  e  $R_{yy}$  para o domínio correto possibilitando assim a comparação entre os materiais na bibliografia, como pode ser visto através da comparação entre as figuras 5 e 6.

Outro fator que é imprescindível reconhecer, é a capacidade de diminuir a potência de transmissão do sinal, uma vez que ao aplicarmos o filtro passa baixas, acabaremos por mitigar uma parte da componente DC do sinal contida no eixo  $y = 0$  e  $x = 0$ , isto é, através do uso de filtros é possível reduzir a potência de transmissão. Podemos ver a redução de potência ao observarmos o consumo de potência do sinal filtrado na figura 7.

É possível observarmos que a recuperação do sinal que é submetido ao filtro passa baixas consegue representar de maneira satisfatória o sinal  $x(t)$ , é possível agregar mais fidelidade ao elevar a ordem do filtro, a um custo maior de complexidade e construção, como podemos observar através da figura 8.

## 4 Conclusões

O uso de ferramentas que permitam analisar efeitos estocásticos é de suma importância no contexto de princípios de comunicação pois ajudam a quantificar o impacto dos processos aleatórios em contextos sensíveis em termos de confiabilidade. Além disso, através das ferramentas aritméticas observadas nesse trabalho, é possível agregar conhecimento a cerca das funções de autocorrelação para mitigar possíveis ruídos através da aplicação de filtros.

## Referências

- [1] Gordon E Moore et al. Cramming more components onto integrated circuits, 1965.
- [2] Gilson I. Wirth, Roberto da Silva, and Ben Kaczer. Statistical model for mosfet bias temperature instability component due to charge trapping. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58(8): 2743–2751, 2011. doi: 10.1109/TED.2011.2157828.
- [3] Nabil Ashraf, Dragica Vasileska, Gilson Wirth, and P. Srinivasan. Accurate model for the threshold voltage fluctuation estimation in 45-nm channel length mosfet devices in the presence of random traps and random dopants. *IEEE Electron Device Letters*, 32(8):1044–1046, 2011. doi: 10.1109/LED.2011.2158287.

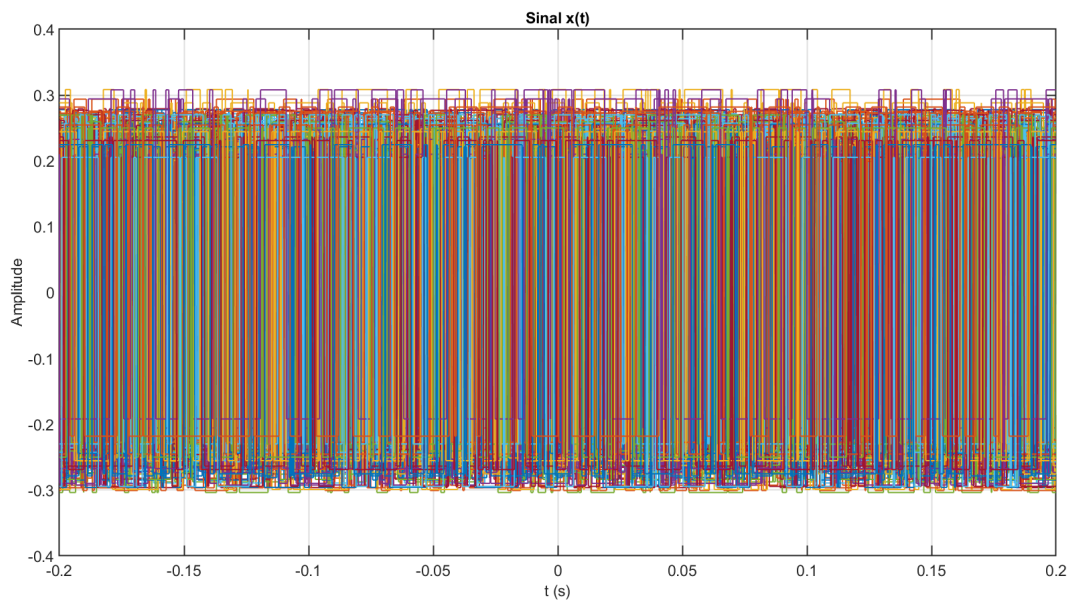


Figura 1: Método de Monte Carlo de um sinal influenciado pelo efeito de RTN.

**Potência média do sinal x (sem filtro) : 6.1853e-06**

Figura 2: Potência média das 100 simulações feitas a partir do método Monte Carlo do sinal  $x(t)$ .

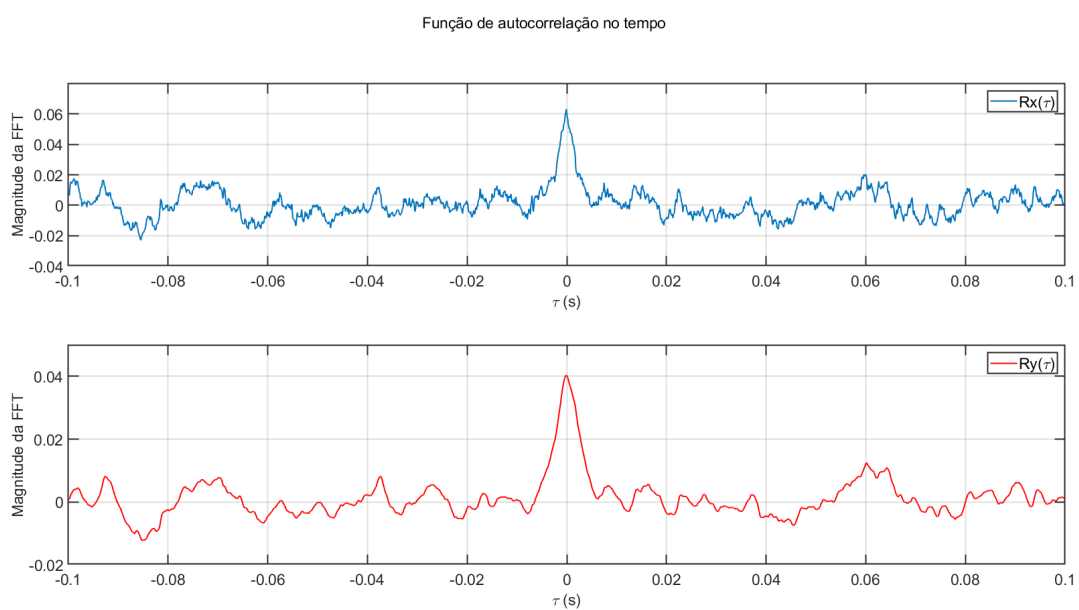


Figura 3: Função de autocorrelação em domínio tempo do sinal a partir do  $x(t)$  e do sinal filtrado  $y(t)$ .

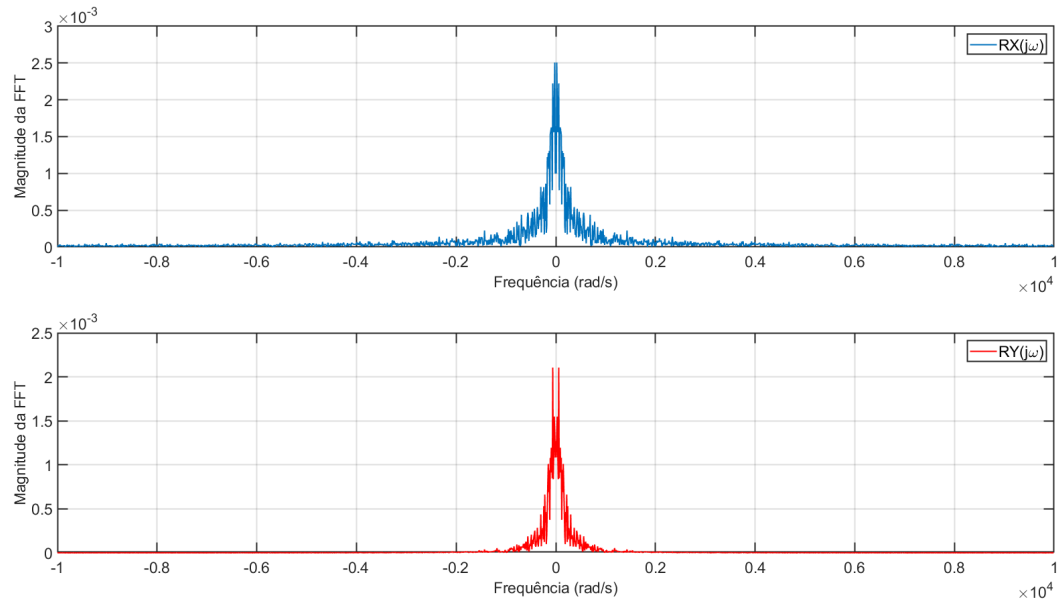


Figura 4: Extração da densidade espectral de potência através da representação da autocorrelação em termos da frequência.

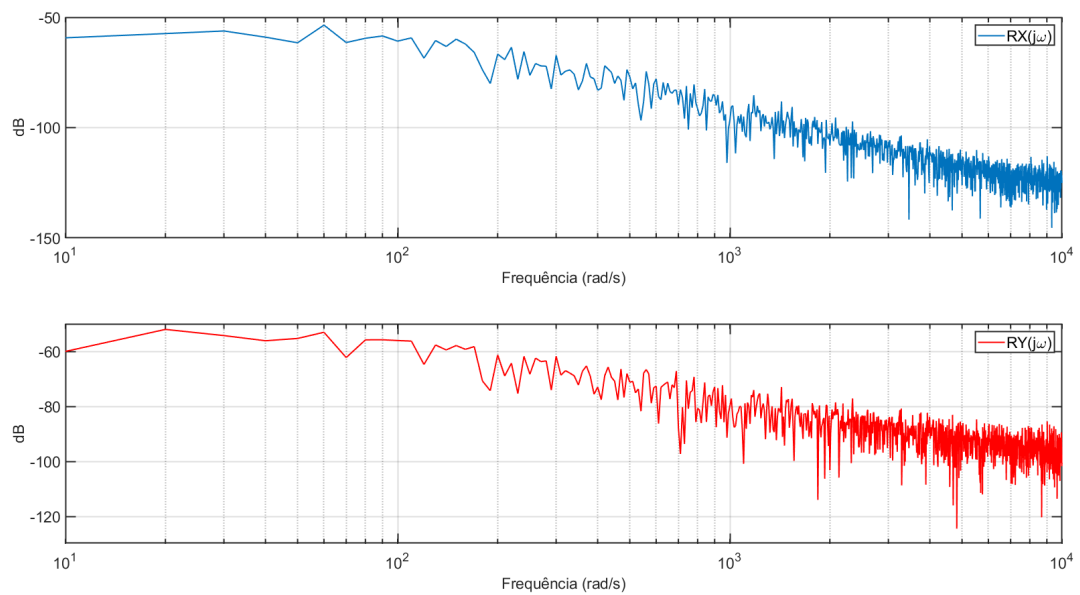


Figura 5: Extração da densidade espectral de potência através da representação da autocorrelação em domínio db/log. Quanto maior o tau nesse contexto, maior será o número de erros contidos na resposta.

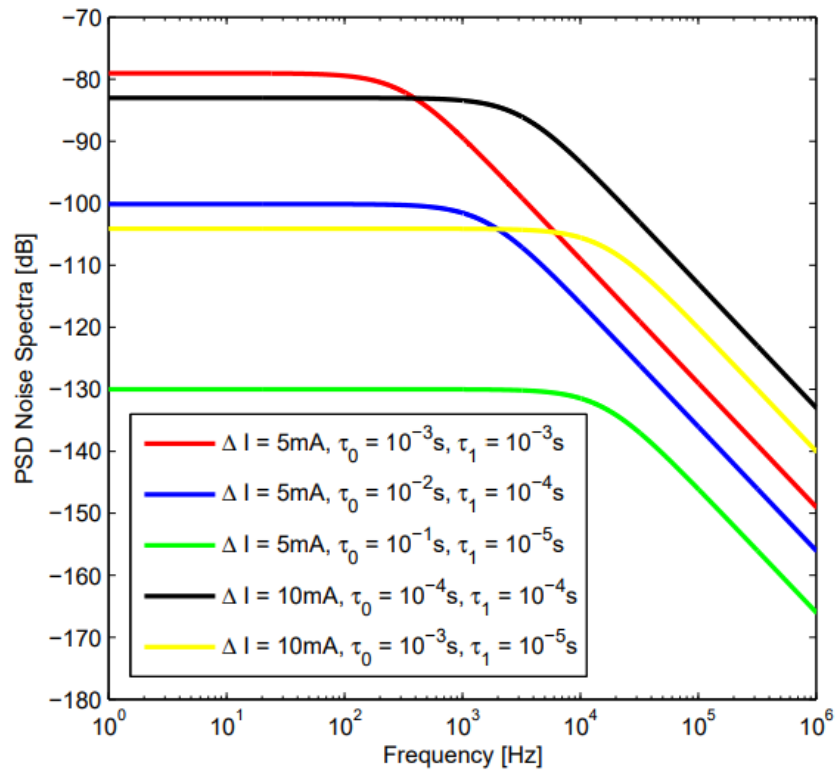


Figura 6: Representação da fórmula matemática que descreve o comportamento do RTN. Figura contida na bibliografia.

**Potência média do sinal y (com filtro) : 3.9213e-06**

Figura 7: Potência média das 100 simulações feitas a partir do método Monte Carlo do sinal  $y(t)$ .

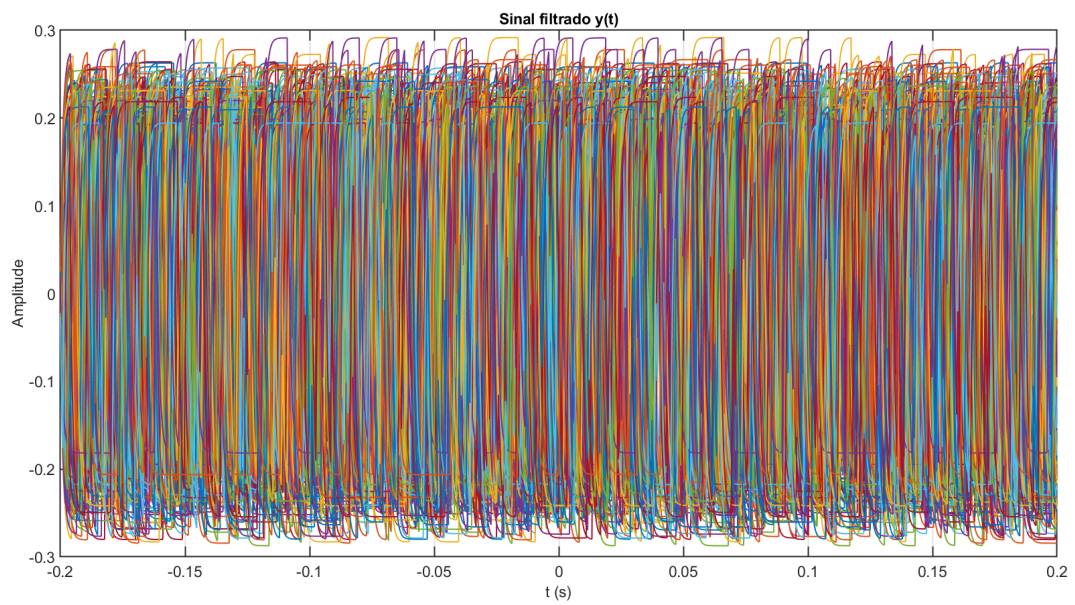


Figura 8: Método de Monte Carlo de um sinal influenciado pelo efeito de RTN ao passar por um sistema LTI.