

Aquiles Rossoni

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Brasil
aquiles.rossoni@hotmail.com.br

H. Klimach

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Brasil
hamilton.klimach@ufrgs.br

DESCASAMENTO EM CIRCUITOS INTEGRADOS

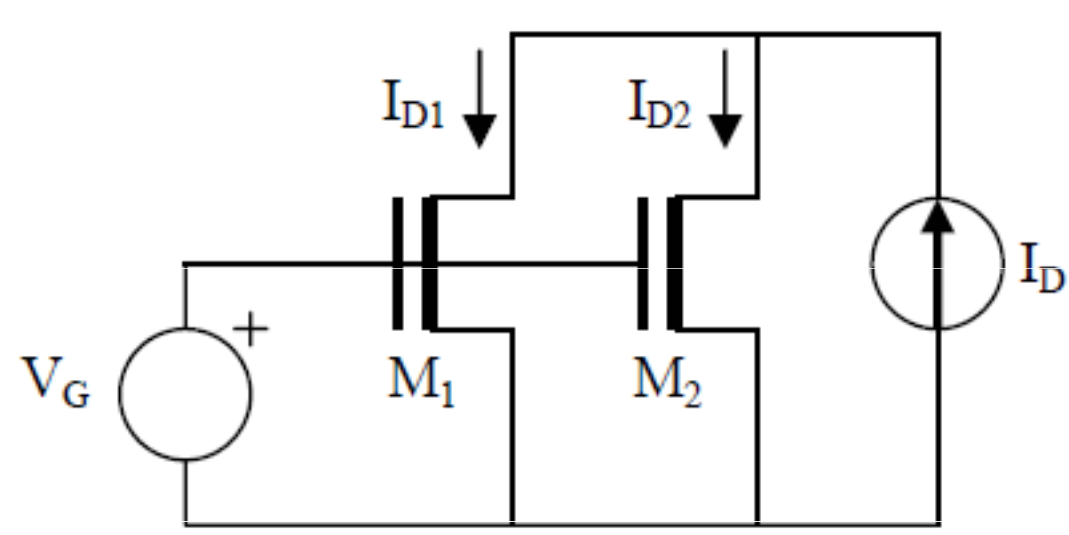
O conceito de casamento ou similaridade comportamental é a suposição que dispositivos identicamente desenhados e fabricados no mesmo processo apresentem um comportamento elétrico idêntico. Devido às variações físicas no processo de fabricação, o descasamento é o conjunto de variações atemporais no comportamento elétrico de um dispositivo. **Circuitos digitais:** flutuações no tempo de atraso entre portas lógicas, aumento das correntes de fuga e aumento dos erros nos processos de escrita e leitura em memórias. **Circuitos analógicos:** reduz a exatidão de conversores analógico-digitais e digital-analógicos, degradando a estabilidade de fontes de referência e aumentando a tensão de off-set de amplificadores operacionais. Variações físicas podem ser globais ou locais e os fatores sistemáticos ou estocásticos.

Sistemáticos: Provocam gradientes nas propriedades físicas ao longo da pastilha, lâmina ou lote, associados aos efeitos globais. **Fatores estocásticos:** provoca flutuações locais nas propriedades físicas do dispositivo fabricado. Associados aos efeitos locais. As técnicas de redução dos efeitos globais estão relacionadas a estratégias de leiautes. Relacionados a efeitos locais, podemos estimar o descasamento na etapa de projeto, utilizando o método **Monte Carlo** ou através de **modelos de descasamento**. O método de Monte Carlo é um método estatístico e o modelo de descasamento é uma forma de estimar o descasamento entre transistores devido aos efeitos locais estabelecendo uma relação física entre as grandezas que variam microscopicamente e o comportamento elétrico.

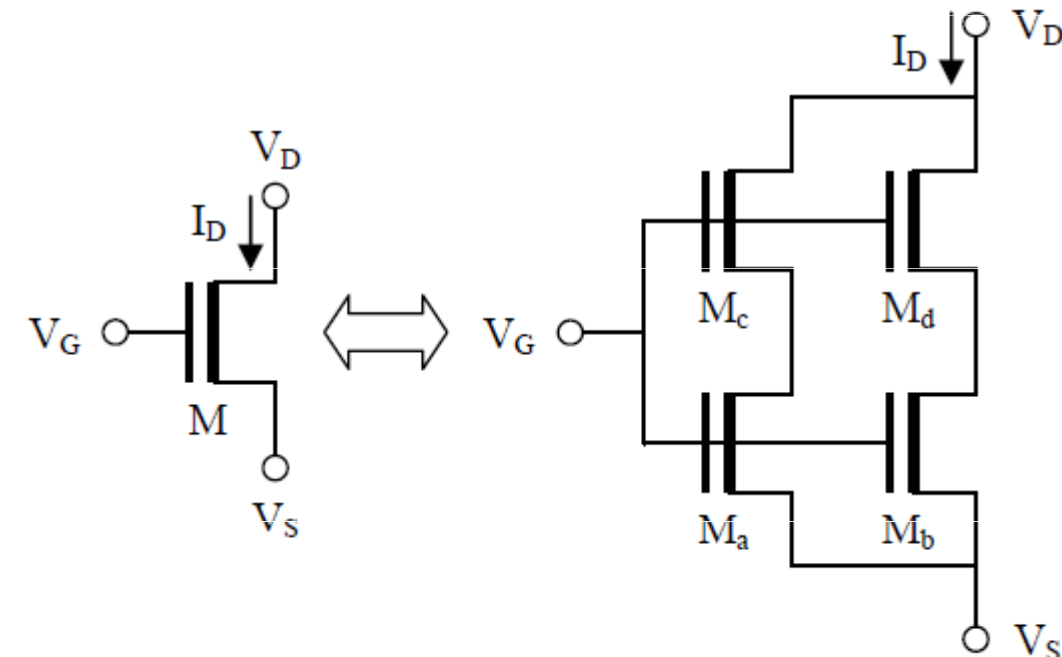
CONVERSOR D/A M-2M

Com a idéia de que dois transistores NMOS idênticos e sob mesma polarização formam um divisor de corrente por dois e que há uma equivalência entre um transistor MOS e uma associação série-paralela, podemos obter um circuito conversor D/A.

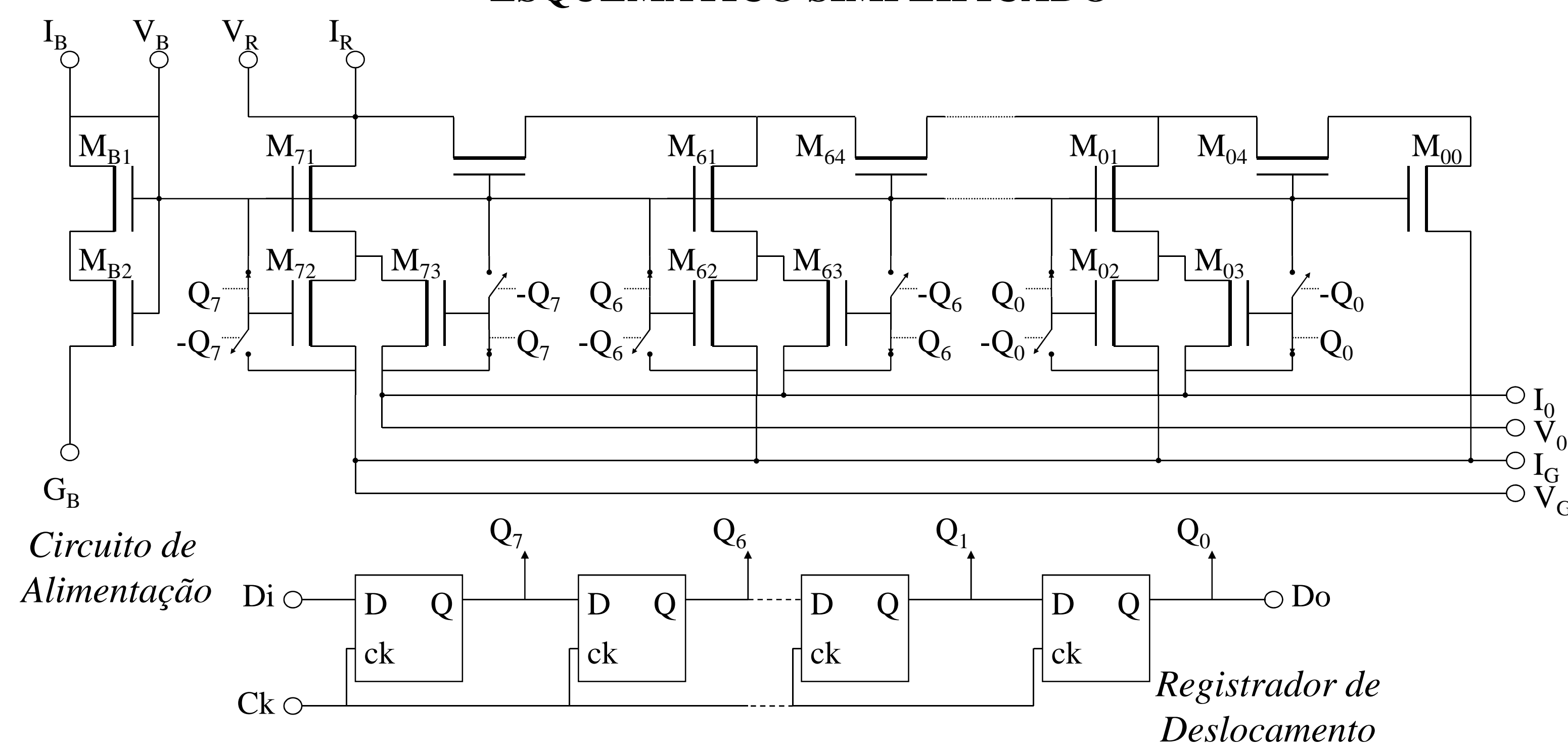
DIVISOR DE CORRENTE



ASSOCIAÇÃO SÉRIE-PARALELA



ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO



Conversor D/A de 8 bits fabricado com tecnologia TSMC 0.35. Valor digital convertido em analógico programado por um registrador de deslocamento. Transistores inferiores implementados com dois transistores com os drenos em paralelo. Fração binária de I_R possa ser desviada por I_0 (saída) ou I_G (terra). Foram medidas 20 amostras de DAC. Foram utilizados transistores com dimensões $W=10\mu$ e $L=5\mu$, sob nível de inversão $i_f = 20$ e com $K_1 = 1.9$. As medidas da corrente de saída foram comparadas com um valor ideal $(data/255)I_R$, obtendo um gráfico do erro da corrente, normalizado para um bit menos significativo, em função de data.

MÉTODO MONTE CARLO

É uma forma de estimar o efeito da variabilidade estatística de um parâmetro de um dispositivo no comportamento ou desempenho do circuito ao qual ele pertence. Neste método, um circuito é simulado repetidas vezes, sendo que em cada uma delas os parâmetros dos dispositivos são ajustados conforme uma regra de variabilidade estatística aleatória. O programa ("software") de simulação elétrica de circuitos se encarrega de coordenar todo o processo, sendo que o usuário precisa atribuir valores aos parâmetros que serão variados, informando também o tipo de distribuição que será empregado. No caso dos MOSFETs, os parâmetros usuais para a análise de variabilidade por Monte Carlo são A_{vt} e A_{β} , que representam a variabilidade da tensão de threshold (V_t) e do 'fator de ganho' (β), e são extraídos experimentalmente pela 'foundry'. O grande inconveniente deste método reside na necessidade de um grande número de repetições da simulação para que se tenha um resultado confiável. Tipicamente se executa entre 100 e 1.000 iterações, o que representa um grande tempo de espera em simulações de circuitos complexos.

MODELO DE DESCASAMENTO UTILIZADO

Usando o Modelo ACM, descasamento na corrente de dreno pode ser escrito como:

$$\frac{\sigma_{I_D}^2}{I_D^2} = \frac{1}{WL} \left[\frac{N_{oi}}{N^{*2}} \frac{1}{i_f - i_r} \ln \left(\frac{1+i_f}{1+i_r} \right) + B_{ISQ}^2 \right] \quad N^* = \frac{-Q'_{IP}}{q} = \frac{nC'_{ox}\phi_t}{q}$$

O modelo é contínuo para qualquer condição de operação, da região triodo à saturação, e da inversão fraca à forte, sendo também consistente para associações de transistores. A expressão apresentada permite estimar a variabilidade da corrente de dreno, em função da condição de polarização (níveis de inversão i_f e i_r), da geometria (W e L) e do processo tecnológico utilizado (N_{oi} , B_{ISQ} e N^*). Os parâmetros N_{oi} e B_{ISQ} são estimados experimentalmente para um determinado processo de fabricação.

N_{oi} : fator relacionado com o número médio de dopantes por unidade de área na região de depleção do canal.

B_{ISQ} : fator relacionado à variabilidade da corrente específica do processo

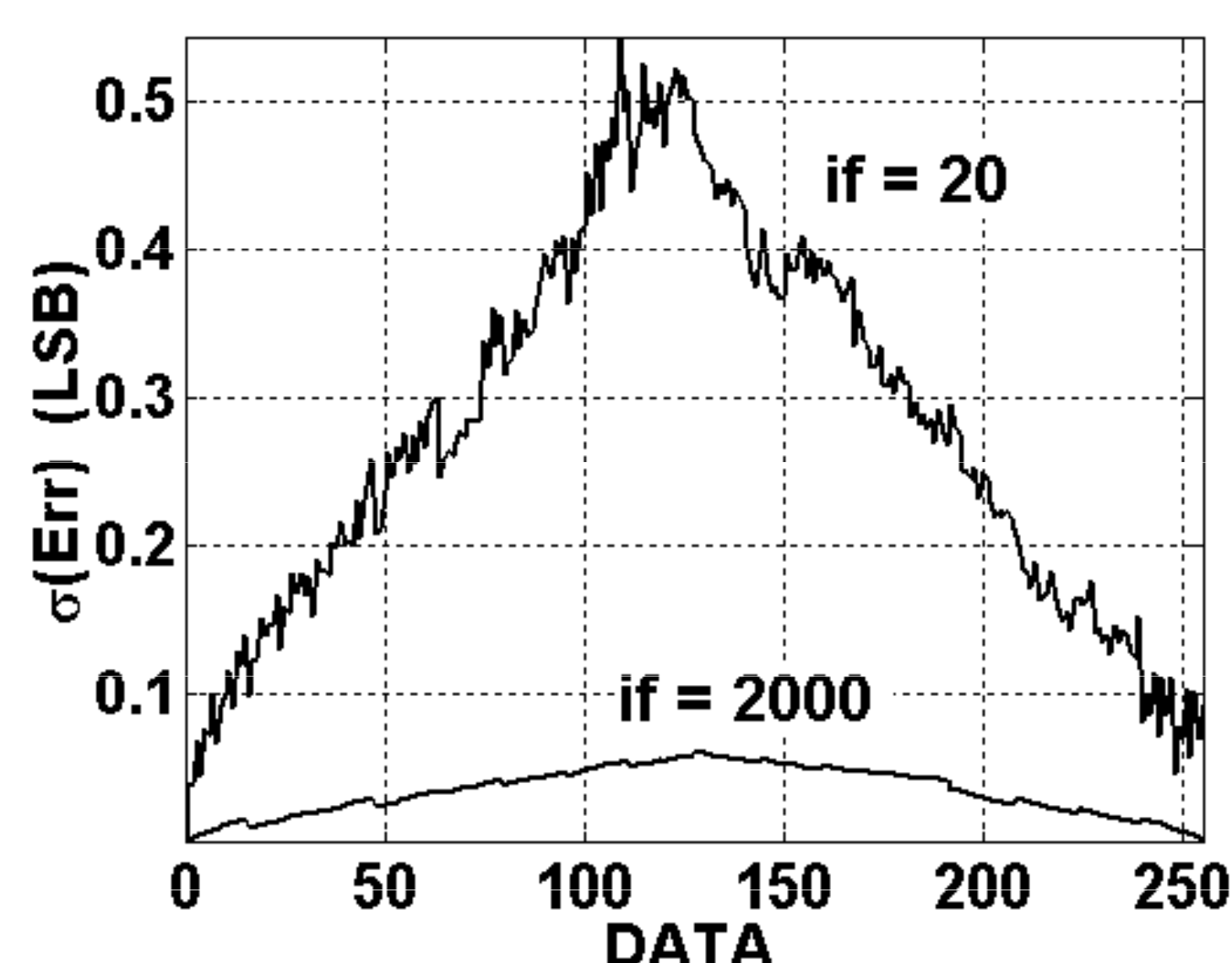
N^* : número de portadores por unidade de área na condição de estrangulamento.

RESULTADOS

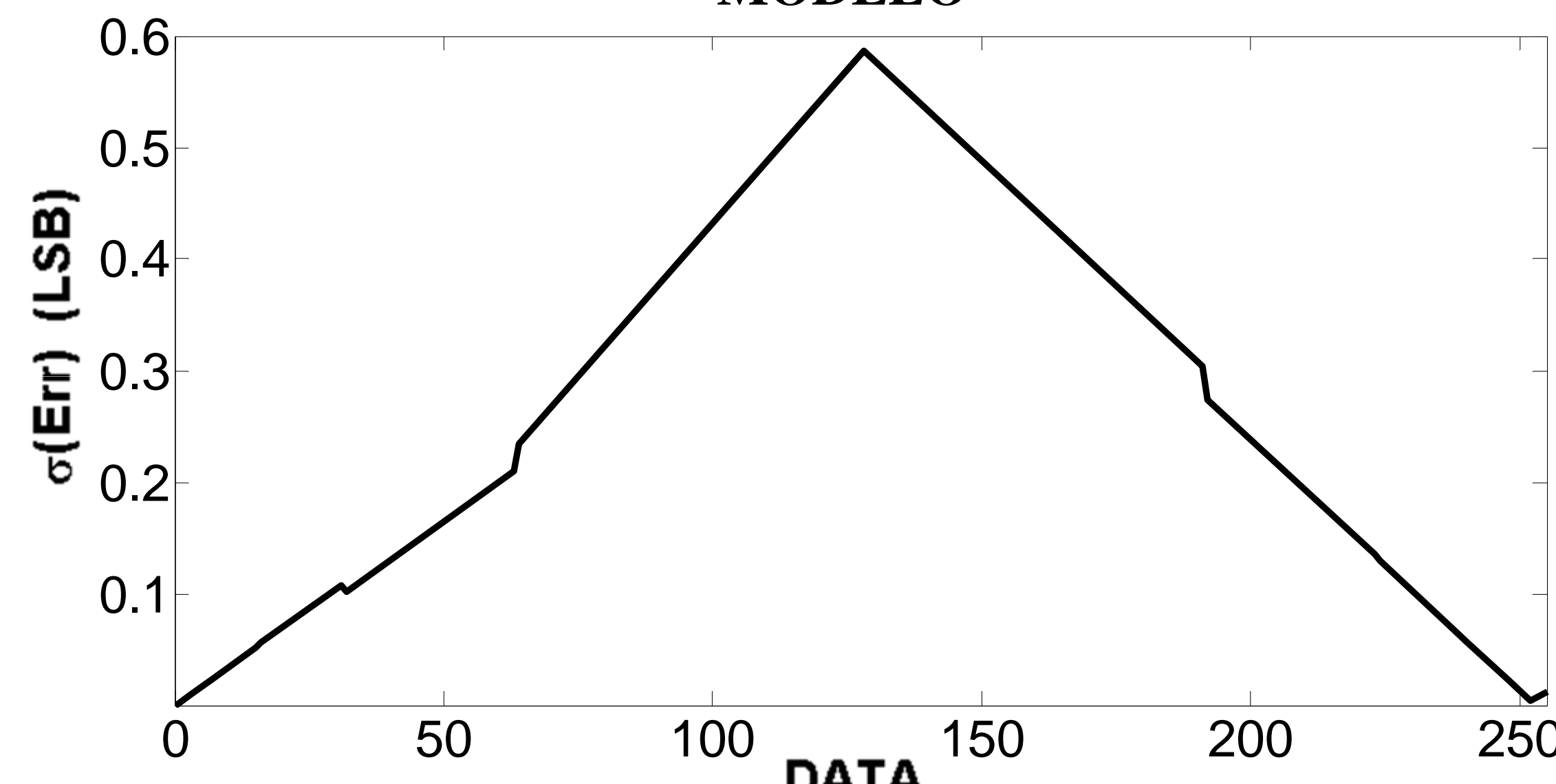
Um conversor M-2M de 8 bits foi projetado e fabricado no processo CMOS TSMC 0.35 através da MOSIS. Durante o projeto, o impacto da variabilidade dos MOSFETs foi estimado através do modelo apresentado, com o uso dos parâmetros N_{oi} e B_{ISQ} previamente extraídos para este processo através de estruturas de teste. Para tanto, calculou-se o descasamento para cada ramo do conversor através de uma única simulação e, com o auxílio do simulador, fez-se o 'somatório' dos efeitos de cada ramo nos ramos restantes. A curva intitulada 'modelo' apresenta esta estimativa, já convertida para 'erro em LSB', e relacionada a todos os valores de entrada (data), entre 0 e 255. Na figura intitulada 'monte carlo' é apresentada a estimativa de erro através deste método, utilizando-se os parâmetros A_{vt} e A_{β} adequados a este processo. Para tanto, realizou-se 1000 simulações, representando um custo computacional muito maior que o necessário através do uso do modelo apresentado.

Os dois métodos de previsão de erro apresentam resultados semelhantes entre si, e coerentes com os resultados experimentais posteriormente obtidos através da medida experimental de um lote fabricado, composto por 20 peças do mesmo circuito (figura intitulada 'resultados experimentais').

RESULTADOS EXPERIMENTAIS



MODELO



MONTE CARLO

