

Circuito Condicionador de Ultrabaixo Consumo para Sensor ISFET



Candidato ao título de mestre:

Ronaldo Martins da Ponte

Orientador:

Fernando Rangel de Sousa

20 de fevereiro de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL

DE SANTA CATARINA

Agenda

Introdução

Modelo Comportamental
Caracterização Elétrica

Circuitos de Condicionamento para ISFET

Condições Propostas

Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos Futuros

- **Introdução**
 - Contextualização
 - Motivação
- **ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)**
 - Histórico
 - Aplicação
 - Princípio de Operação
 - Modelo Comportamental (Verilog-A)
 - Caracterização Elétrica do ISFET
- **Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados**
 - Revisão bibliográfica
- **Condiçãoadores Propostos e Desenvolvidos**
 - Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
 - Resultados de Simulações e Experimentais
- **Conclusões**
- **Propostas de Trabalhos Futuros no tema**

Agenda

Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracterização Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

Condições
Propostas

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

Introdução

- Contextualização
- Motivação

ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)

- Histórico
- Aplicação
- Princípio de Operação
- Modelo Comportamental (Verilog-A)
- Caracterização Elétrica do ISFET

Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados

- Revisão bibliográfica

Condicionadores Propostos e Desenvolvidos

- Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
- Resultados de Simulações e Experimentais

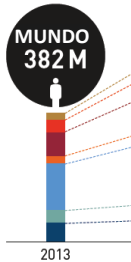
Conclusões

Propostas de Trabalhos Futuros no tema

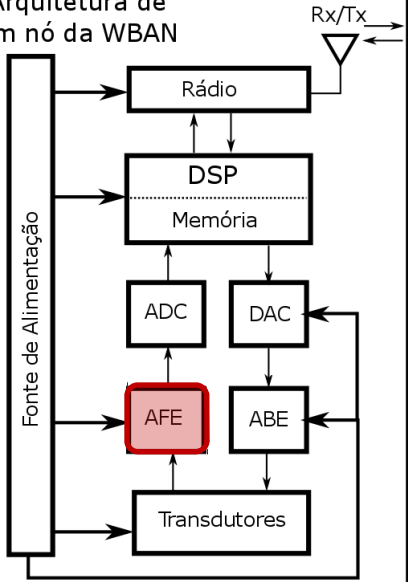
Introdução

Motivação

- Pessoas das com

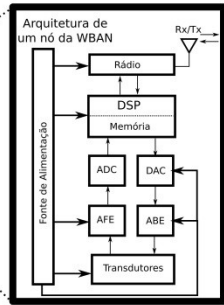


Arquitetura de um nó da WBAN



Arquitetura de um nó da WBAN

Integração de Componentes Integrados para WBAN



- Introdução
- o ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condições Propostas
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

Introdução

Interação entre áreas do NAMITEC



Área A4-1-1
Prof. José Alexandre Diniz

Áreas A2-2 e A2-3:
Prof. Fernando Rangel de Sousa
Prof. Yuri Catunda

Desenvolvido neste trabalho:

- Circuitos condicionadores para sensor ISFET utilizando componentes discretos
 - Seguidor de fonte-e-dreno
 - pHCO
- Circuito condicionador integrado (pHCO)
 - Tecnologia IBM 0,18 μm
 - Ultra baixo consumo
 - Faixa linear do pH 1 ao pH 10

Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracterização
Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

Condições
Propostas

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

Agenda

Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental
Caracterização ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondições
PropostasSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

- Introdução
 - Contextualização
 - Motivação
- **ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)**
 - **Histórico**
 - **Aplicação**
 - **Princípio de Operação**
 - Modelo Comportamental (Verilog-A)
 - Caracterização Elétrica do ISFET
- Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados
 - Revisão bibliográfica
- Condicionadores Propostos e Desenvolvidos
 - Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
 - Resultados de Simulações e Experimentais
- Conclusões
- Propostas de Trabalhos Futuros no tema

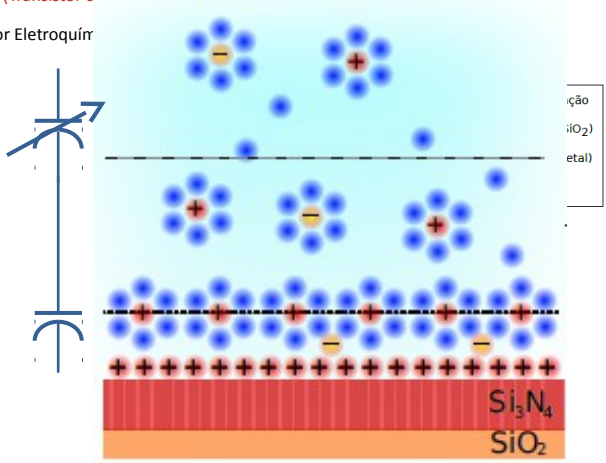
ISFET

Histórico: Bergveld, 1970

Aplicação: Biosensor para detectar íons em tecidos nervosos

ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons):

Sensor Eletroquímico



- Introdução
- ISFET**
- Modelo
- Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de
- Condicionamento para ISFET
- Condiçõe
- dores
- Propostos
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

ISFET

Princípio de Operação

- Modulação na tensão de limiar do dispositivo devido as flutuações no pH do eletrólito

$$V_{THISFET} = E_{ref} + \phi_{lj} - \phi_{eo} + \chi_{sol} + V_{THMOSFET}$$

$$V_{THISFET} = V_{chem} + V_{THMOSFET}$$

$$\Delta pH \Rightarrow \Delta \phi_{eo} \Rightarrow \Delta V_{FB} \Rightarrow \Delta V_{TH}$$

Introdução

ISFET

Modelo

Comportamental

Caracterização Elétrica

Circuitos de

Condicionamento para ISFET

Condições de

Propostas

Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO

Resultados

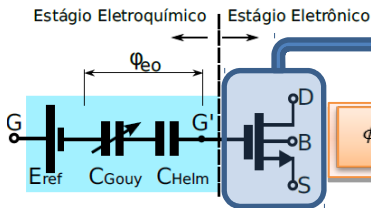
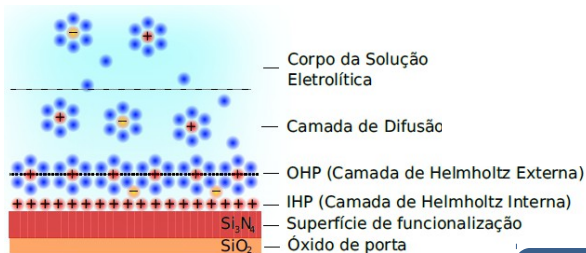
Conclusões

Trabalhos Futuros

ISFET

Modelo Comportamental:

- MARTINOIA, S.; MASSOBRIO, G. A behavioral macromodel of the ISFET in SPICE. Sensors and Actuators B: Chemical, 2000.



Parâmetros Tecnológicos

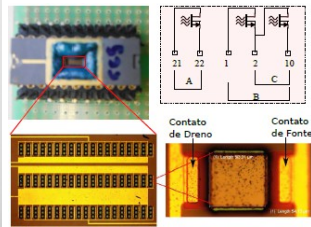
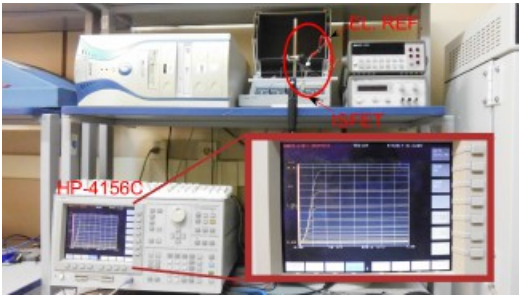
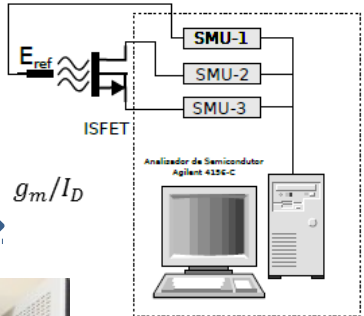
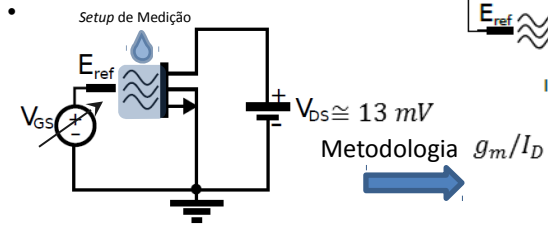
Extração

$$\phi_{eo} = \frac{q}{C_{eq}} [N_{sil} f_a(\phi_{eo}, pH) + N_{nit} f_b(\phi_{eo}, pH)]$$

ISFET

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica**
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condições Propostas
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

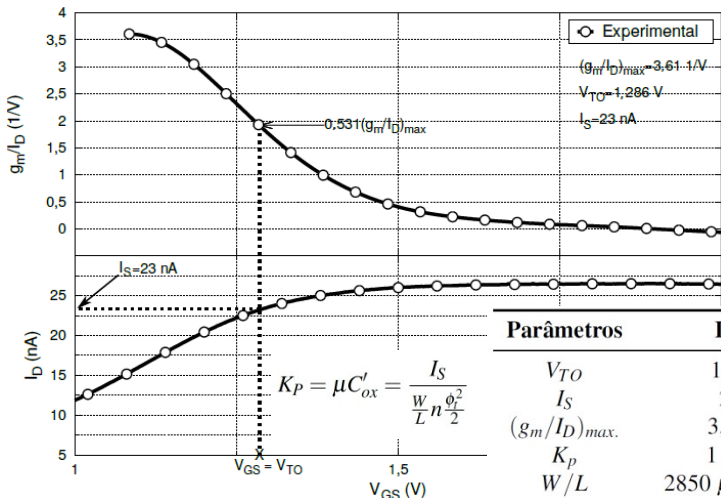
Caracterização Elétrica



ISFET

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica**
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condições de Propostas
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

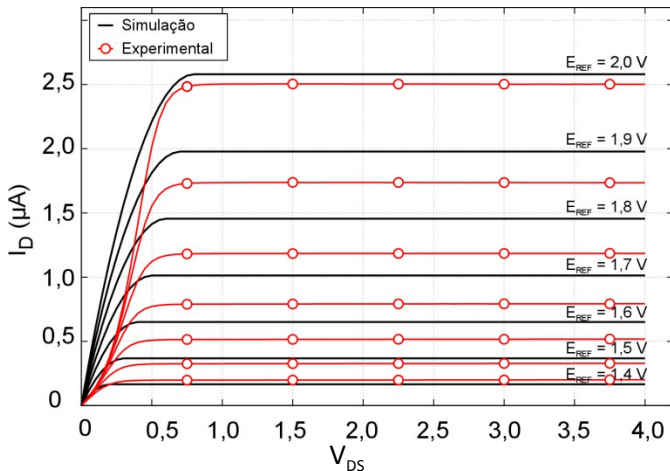
Resultados da Caracterização Elétrica



Parâmetros	ISFET
V_{TO}	1,286 V
I_S	23 nA
$(g_m/I_D)_{max}$	3,61 1/V
K_p	$1 \mu\text{A}/\text{V}^2$
W/L	$2850 \mu\text{m} / 50 \mu\text{m}$
Filme sensitivo	Si_3N_4

ISFET

Resultados do Macromodelo



Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental**Caracteriza-
ção Elétrica**Circuitos de
Condicionamento
para ISFETCondiçiona-
dores
PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

Agenda

Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental
Caracterização ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondições
PropostasSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

- Introdução
 - Contextualização
 - Motivação
- ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)
 - Histórico
 - Aplicação
 - Princípio de Operação
 - Modelo Comportamental (Verilog-A)
 - Caracterização Elétrica do ISFET
- **Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados**
 - **Revisão bibliográfica**
- Condicionadores Propostos e Desenvolvidos
 - Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
 - Resultados de Simulações e Experimentais
- Conclusões
- Propostas de Trabalhos Futuros no tema

Circuitos de Condicionamento para ISFET

Introdução

ISFET

Modelo

Comportamental

Caracterização
Elétrica

**Circuitos de
Condicionamento
para ISFET**

Condições

Propostas

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

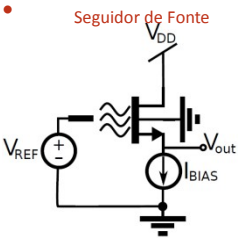
Conclusões

Trabalhos
Futuros

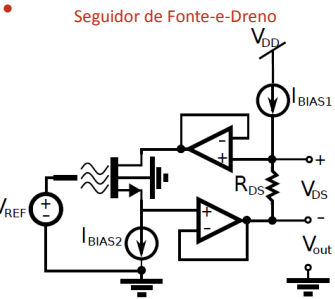
- Topologias apresentadas nesta seção:
 - Seguidor de Fonte
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - Par Diferencial ISFET-MOSFET e ISFET-REFET
 - Par Complementar ISFET-MOSFET
 - Circuito Operando ISFET na Saturação
 - Circuito Baseado em PWM

Circuitos de Condicionamento para ISFET

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET**
- Condições
- Propostos
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros



$$V_{out} = V_{REF} - V_{THISFET} - \sqrt{\frac{I_{BIAS}}{\beta}}$$



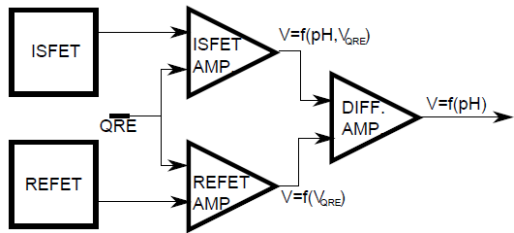
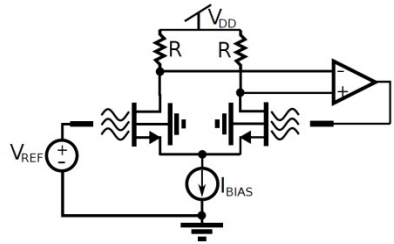
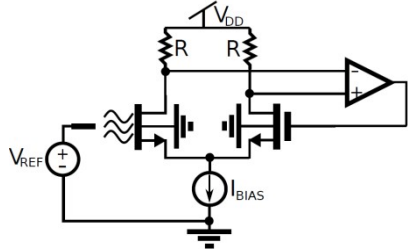
$$V_{out} = V_{REF} - V_{THISFET} - \frac{I_{BIAS2}}{\beta I_{BIAS1} R_{DS}} - \frac{I_{BIAS1} R_{DS}}{2}$$

Circuitos de Condicionamento para ISFET

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET**
- Condições Propostas
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

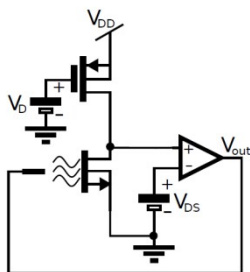
Par Diferencial ISFET-MOSFET

Par Diferencial ISFET-REFET

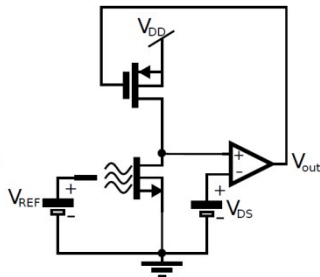


Circuitos de Condicionamento para ISFET

Par Complementar Realimentado ISFET-MOSFET



(a)



(b)

(a) CIMP Direto

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{TH\text{ISFET}} (pH)$$

Saturação

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{TH\text{ISFET}} (pH)$$

(b) CIMP Indireto

$$\Delta V_{out} = \frac{-\Delta V_{TH\text{ISFET}} (pH)}{\sqrt{a}}$$

$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta V_{TH\text{ISFET}} (pH)}{a}$$

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondiçiona-
dores
PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

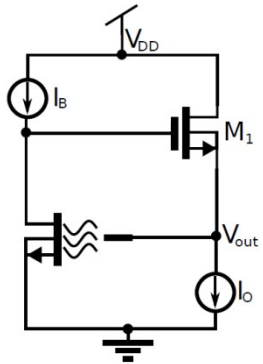
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Circuitos de Condicionamento para ISFET

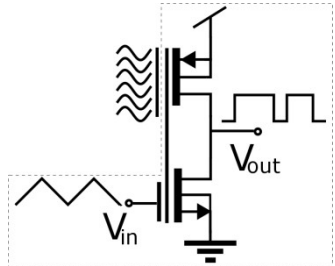
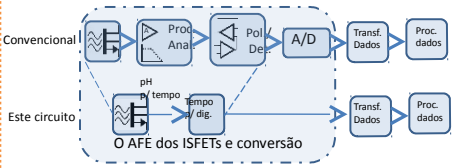
- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condições Propostas
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

Circuito Operando ISFET na Saturação



$$V_{out} = V_{TH_{ISFET}} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_B}{\mu_n C'_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)}} + I_B R_S$$

Circuito Baseado em PWM



$$T_{out} = \frac{T_{trig} C_{pass}}{V_{r-r} C_{trig}} 2,3 U_t \cdot \alpha \cdot pH + \frac{T_{trig}}{V_{r-r} C_{trig}} \kappa_{DC}$$

Agenda

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiçio-
nares
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

- Introdução
 - Contextualização
 - Motivação
- ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)
 - Histórico
 - Aplicação
 - Princípio de Operação
 - Modelo Comportamental (Verilog-A)
 - Caracterização Elétrica do ISFET
- Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados
 - Revisão bibliográfica
- **Condicionadores Propostos e Desenvolvidos**
 - **Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados**
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
 - **Resultados de Simulações e Experimentais**
- Conclusões
- Propostas de Trabalhos Futuros no tema

Condicionadores Propostos

ISFET Utilizado nos Circuitos Condicionadores Discretos Propostos

Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracteriza-
ção Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

Condiciona-
dores
Propostos

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

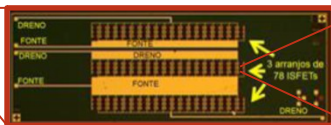
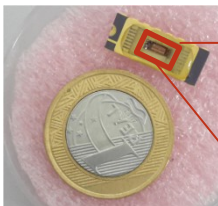
Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

Amostra	W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Dispositivos em paralelo	Terminais de Contato
1	50/10	78	1-16
2	50/50	57	13-15
3	50/50	57	13-15
4	50/10	78	1-16
5	50/10	78	1-5,1-16,13-15

Parâmetros	ISFET
V_{TO}	1,26 V
I_S	15,7 μA
$(g_m/I_D)_{max}$	8,65 1/V
K_p	120 $\mu\text{A}/\text{V}^2$
W/L	3900 $\mu\text{m}/10 \mu\text{m}$
Filme sensível	TiOx

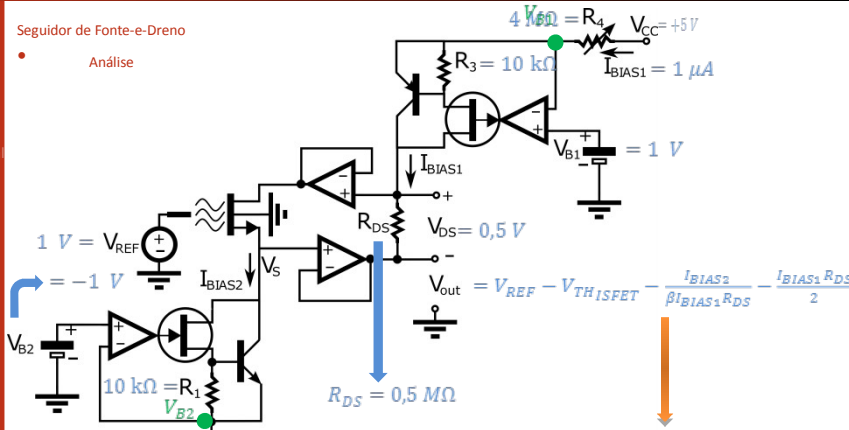


Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO
- Resultados

Seguidor de Fonte-e-Dreno

- Análise



$$I_{BIAS1} = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{R_4}$$

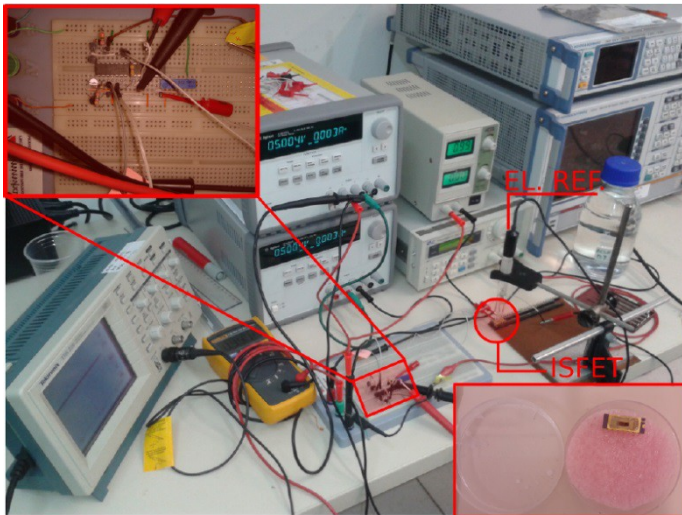
$$I_{BIAS2} = \frac{V_{B2} - V_{EE}}{R_2}$$

$$V_{out} \cong -V_{THISFET}$$

Condicionadores Propostos

Seguidor de Fonte-e-Dreno

- Foto da Bancada



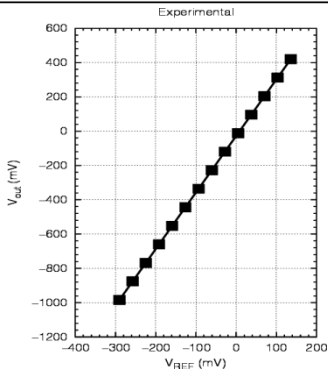
- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos
- Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

Condicionadores Propostos

Seguidor de Fonte-e-Dreno

Resultados de Simulação e Experimentais

	V_{REF} (V)	V_{out} (V)	V_{DS} (V)	Faixa de Variação (V)	S (V/V)
Simulação	0,8	-0,508	0,500	1,443	0,72
	2,8	0,935	0,500		
Experimental	-0,290	-0,984	0,574	1,404	3,3
	0,136	0,420	0,574		



Variável Mensurável	Simulado	Experimental
V_{CC}	+5 V	+5 V
V_{EE}	-5 V	-5 V
I_{BIAS1}	1 μ A	0,85 μ A
I_{BIAS2}	4 μ A	1,2 μ A
Consumo Total	-	30 mW

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondiciona-
dores
PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

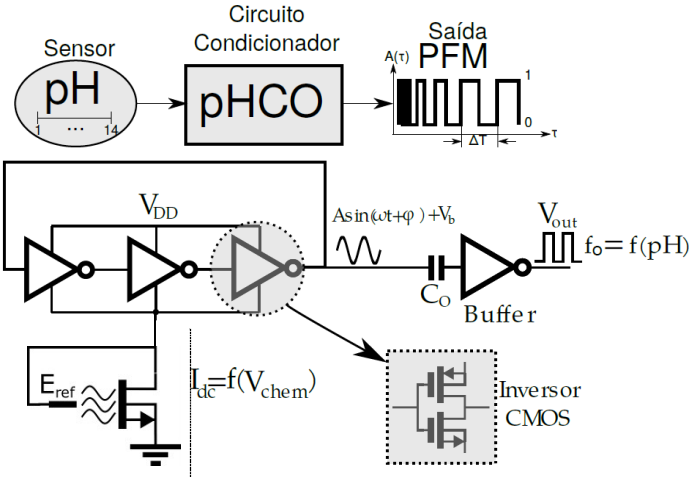
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Medição do pH pela frequência dos pulsos



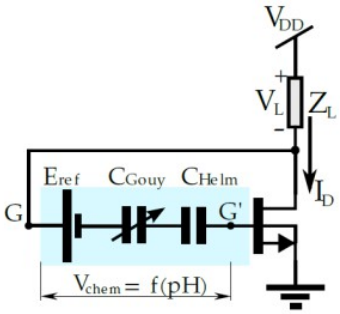
- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

Condicionadores Propostos

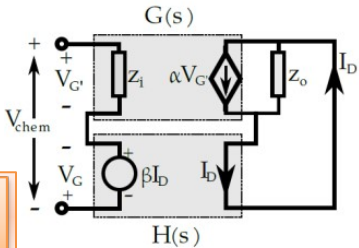
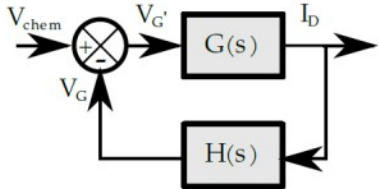
- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

- Autopolarização DC do circuito via realimentação negativa



$$V_L = K_V - n\phi_t \ln\left(\frac{I_D}{I_0}\right) - \alpha \cdot S_N \cdot pH$$



Condicionadores Propostos

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condi-
ciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

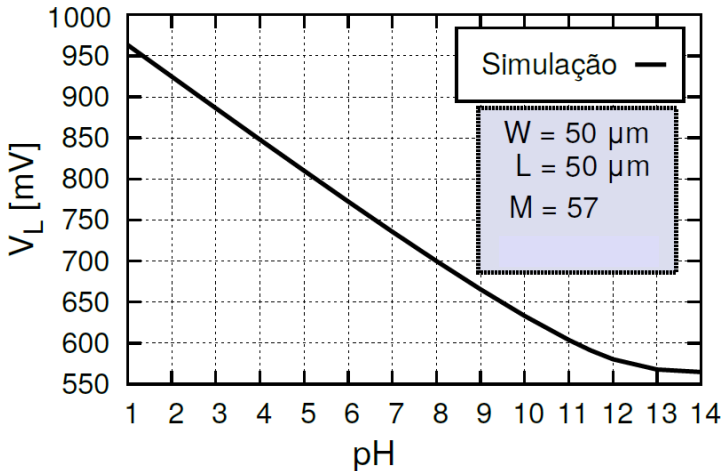
Conclusões

Trabalhos
Futuros

pHCO

•

Simulação



Condicionadores Propostos

pHCO

- Foto da Bancada de Medição

Introdução

ISFET

Modelo Comportamental

Caracterização Elétrica

Circuitos de Condicionamento para ISFET

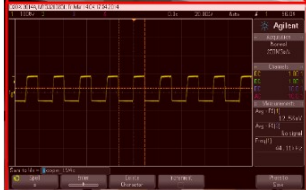
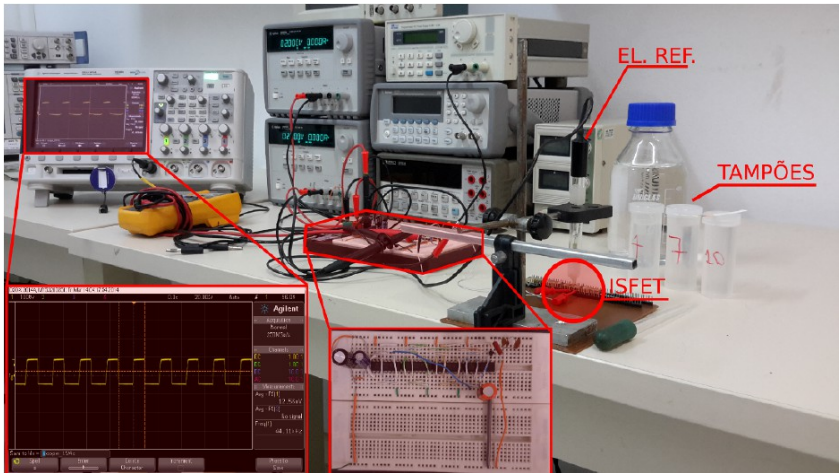
Condicionadores Propostos

Seguidor de Fonte-e-Dreno pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos Futuros

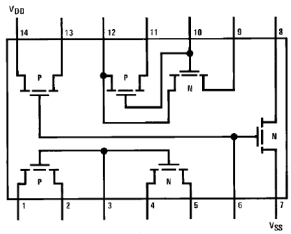


Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados**
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

- Resultados – Versão Discreta
- Metodologia 1:
 - Microgota de água DI 18 MΩ-cm depositada no ISFET
 - Malha de realimentação aberta
 - Varredura do potencial V_{REF} aplicado no eletrodo de referência



CD-4007UBE

Parâmetro	Valor Experimental Medido
Faixa de Variação	9 KHz
Sensibilidade	9 KHz/V

V_{REF} [V]	Freq. [KHz]
0	15,5
0,1	14,5
0,2	13,7
0,3	13,5
0,4	13,3
0,5	12,9
0,6	11,6
0,7	10,3
0,8	8,9
0,9	7,5
1,0	6,5

Condicionadores Propostos

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO**Resultados**

Conclusões

Trabalhos
Futuros

pHCO

- Resultados – Versão Discreta
- Metodologia 2:
 - Malha de realimentação fechada
 - Soluções tamponadas pH 4, pH 7 e pH 10

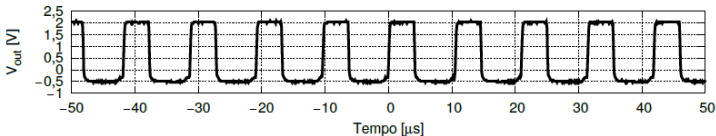
Parâmetro	Experimental
Faixa de Variação (kHz)	93,5 - 41
Sensibilidade (kHz/pH)	9

Condicionadores Propostos

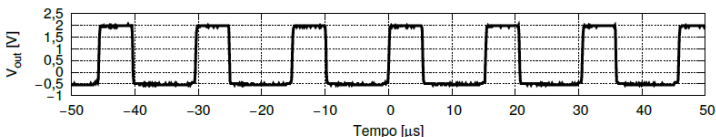
pHCO

Resultados – Versão Discreta

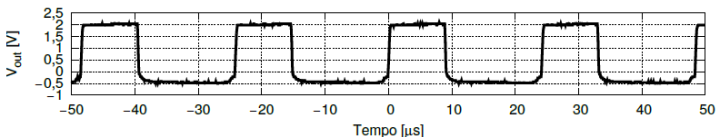
Resultado Experimental – freq. = 93,5 kHz @ pH 4



Resultado Experimental – freq. = 65,5 kHz @ pH 7



Resultado Experimental – freq. = 41 kHz @ pH 10



Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracteriza-
ção Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

Condiciona-
dores
Propostos

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Circuito Integrado pHCO
- Faixa de interesse do pH: 1 ao 10
- Tecnologia IBM 0,18 μm
- Virtuoso da Cadence®
- Modelo Comportamental do ISFET em Verilog-A
 - Razão de Aspecto W/L = 50 μm /50 μm e multiplicidade 57 (ISFET A)
 - Razão de Aspecto W/L = 50 μm /10 μm e multiplicidade 78 (ISFET B)

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

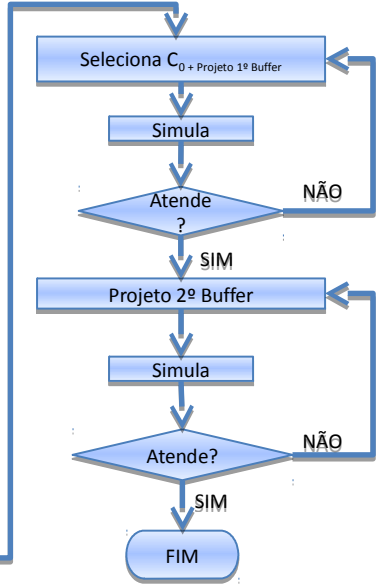
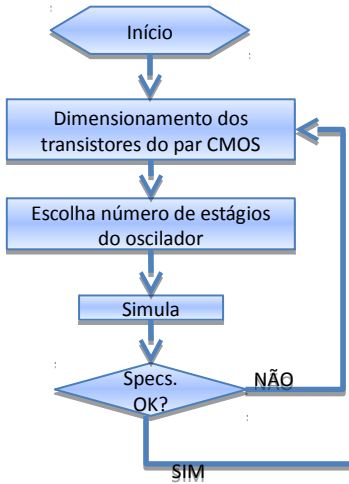
Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

Fluxograma do Projeto

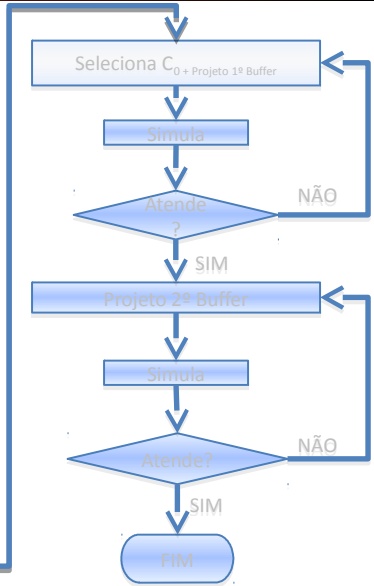
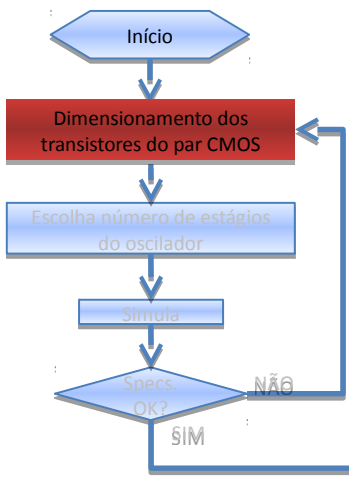


Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

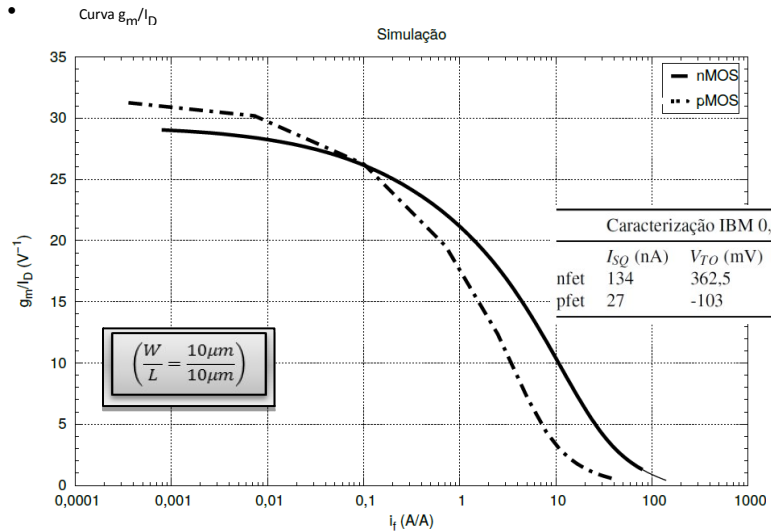
Fluxograma do Projeto



Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo
- Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO



Condicionadores Propostos

pHCO

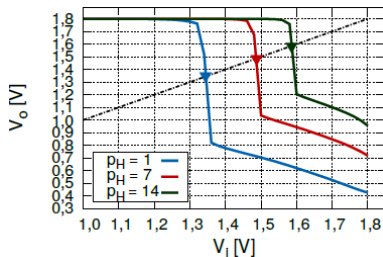
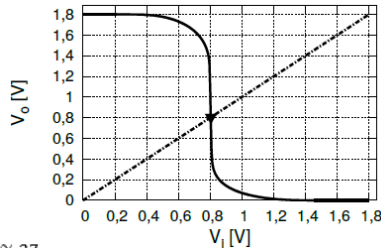
Dimensionamento dos transistores

$$i_f = \frac{I_D}{I_{SQ} \left(\frac{W}{L}\right)}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right) = \frac{I_D}{I_{SQ} i_f}$$

$I_D = 100 \text{ nA}$
 $i_f = 0,1$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{100 \text{ nA}}{134 \text{ nA} \times 0,1} \approx 8 \quad \left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{100 \text{ nA}}{27 \text{ nA} \times 0,1} \approx 37$$



Razão de Aspecto Obtida ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)		Razão de Aspecto Adotada ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	
Razão de Aspecto Obtida ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Razão de Aspecto Adotada ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Razão de Aspecto Obtida ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Razão de Aspecto Adotada ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$
$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{74}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{50}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{74}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{50}{2}$
Razão de Aspecto Obtida ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Razão de Aspecto Adotada ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Razão de Aspecto Obtida ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Razão de Aspecto Adotada ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{16}{2}$
$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{74}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{50}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{74}{2}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_p = \frac{50}{2}$

Introdução
ISFET
Modelo Comportamental
Caracterização Elétrica

Circuitos de Condicionamento para ISFET

Condicionadores Propostos

Seguidor de Fonte-e-Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

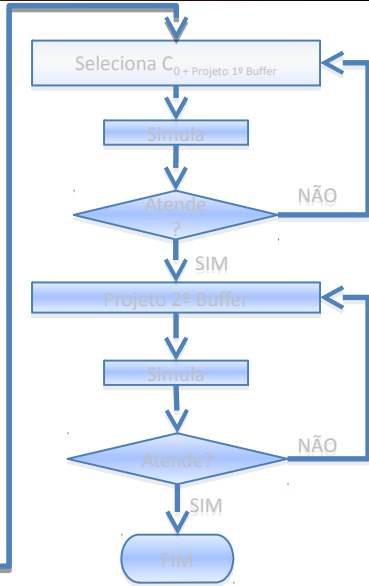
Trabalhos Futuros

Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

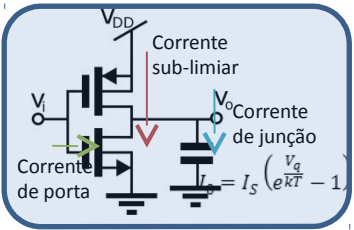
Fluxograma do Projeto



Condicionadores Propostos

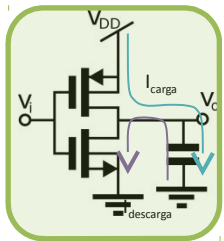
pHCO

- Número de estágios do oscilador
- Critério:
 - Dissipação de potência



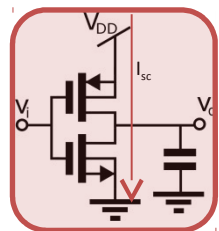
Estática

$$P_E = N \cdot V_{DD} \cdot I_L$$



Dinâmica

$$P_D = N \cdot V_{DD}^2 \cdot f_o \cdot C_L$$



Curto-Circuito

$$P_{CC} = N \cdot V_{DD} \cdot I_P \cdot \tau_{cc} \cdot f_o$$

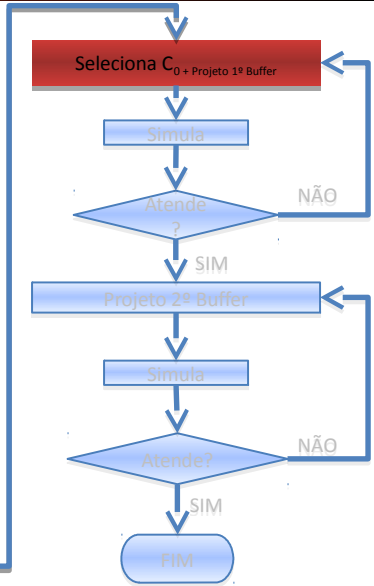
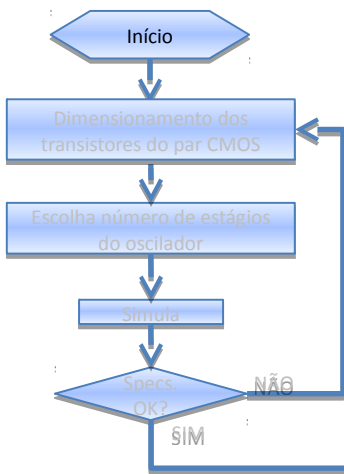
- Introdução
- ISFET
- Modelo
- Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de
- Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

Fluxograma do Projeto



Condicionadores Propostos

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondiciona-
dores
PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

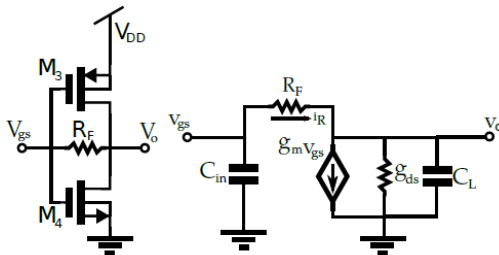
Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

pHCO

- Projeto do Primeiro Buffer e Seleção de C_0



$$R_F = 510 \text{ k}\Omega$$

$$A_0 = 10 \text{ V/V}$$

$$\frac{v_o(s)}{v_{gs}(s)} = -\frac{(g_m + R_F^{-1})}{g_{ds} - R_F^{-1} + sC_L}$$

Condicionadores Propostos

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET
**Condiciona-
dores
Propostos**
Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

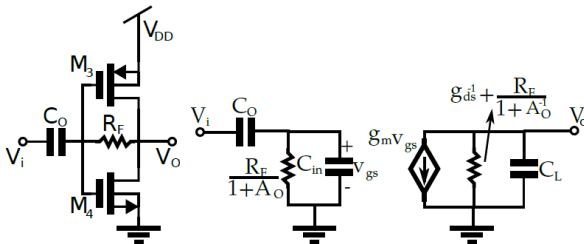
Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

pHCO

- Projeto do Primeiro Buffer e Seleção de C_0



$$\omega_p = \frac{1}{R'_F C_0} \quad R'_F = \frac{R_F}{(1 + A_o)}$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi R'_F f_c} \approx 17 \text{ pF}$$

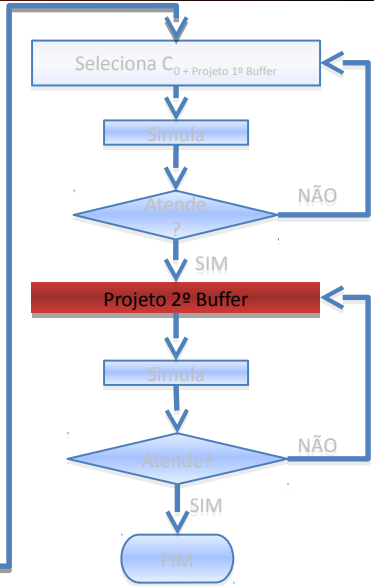
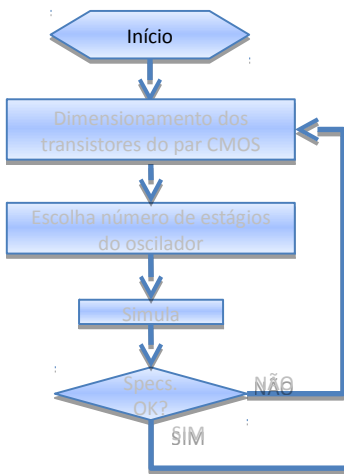
Parâmetro	Valor obtido	Valor adotado
C_0	17 pF	12 pF
f_c	0,2 MHz	0,26 MHz

Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

Fluxograma do Projeto



Condicionadores Propostos

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET
**Condiciona-
dores
Propostos**
Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

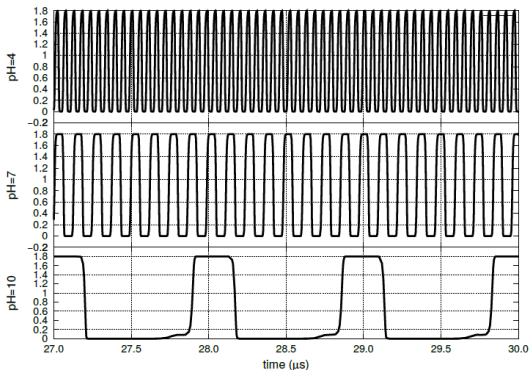
Conclusões

Trabalhos
Futuros

pHCO

- Projeto do Segundo Buffer
 - Período do sinal de maior frequência – $T = 30 \text{ ns}$
 - Capacitância da ponteira – $C = 16 \text{ pF}$

$$I_C = C \frac{\Delta V_C}{\Delta t} = 16 \text{ pF} \times \frac{1,8 \text{ V}}{20 \text{ ns}} = 1,45 \text{ mA}$$

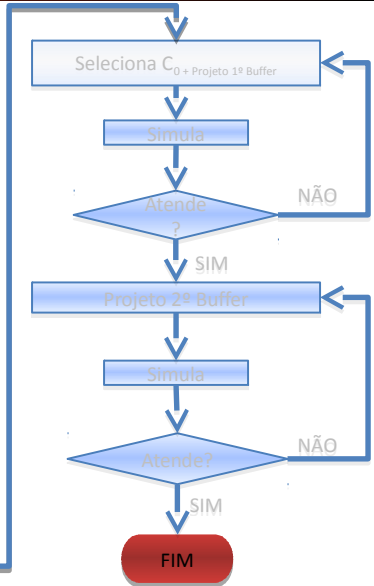
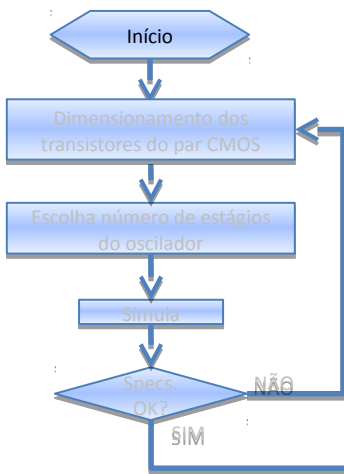


Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

Fluxograma do Projeto

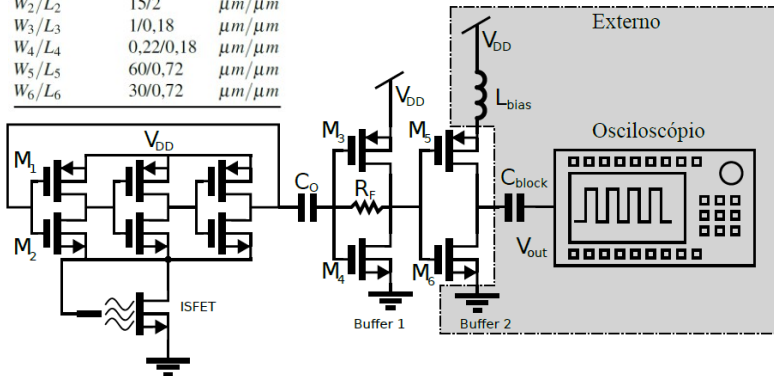


Condicionadores Propostos

pHCO

Esquemático detalhado do circuito condicionador pHCO

Componente	Valor	Unidade
C_0	12	pF
R_F	510	$k\Omega$
W_1/L_1	50/2	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$
W_2/L_2	15/2	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$
W_3/L_3	1/0,18	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$
W_4/L_4	0,22/0,18	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$
W_5/L_5	60/0,72	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$
W_6/L_6	30/0,72	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$



Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracteriza-
ção Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

Condiciona-
dores
Propostos

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

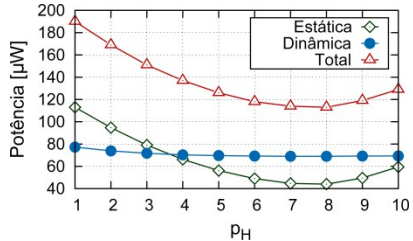
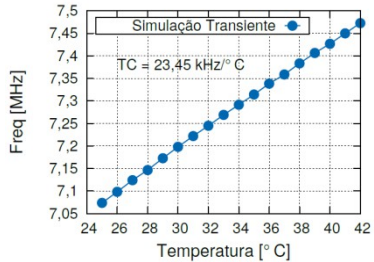
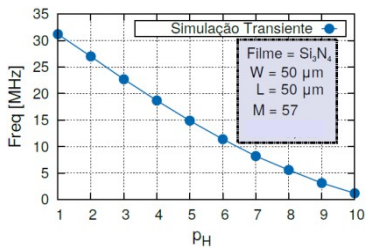
Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
 - Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno **pHCO**
- Resultados
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO

-

Resultados de Simulação – ISFET A



Condicionadores Propostos

pHCO

Resultados de Simulação – ISFET A

Cantos	Frequência (MHz)	Potência DC (μ W)	Potência Transiente (μ W)	Potência Total (μ W)
Nominal	8,75	68,2	45,5	114
ff	11,2	87,9	61,4	149
fff	12,5	99,9	71,2	171
ss	6,79	53,6	34,4	88,0
ssf	5,85	46,2	29,4	75,6
fs	9,90	70,3	47,2	118
sf	7,33	65,7	43,7	109
Min	5,85	46,2	29,4	75,6
Max	12,5	99,9	71,2	171



Trabalhos	pHCO - ISFET A
Tecnologia	0,18 μ m
V_{DD} (V)	1,8
Área Total (mm^2)	0,018
Consumo Total (μ W)	114,9
Faixa de Variação (pH)	1 - 10
Faixa de Variação Sensibilidade	31 MHz - 1,2 MHz 3,3 MHz/pH
DR ⁹	65,03 dB

Introdução

ISFET

Modelo

Comportamental

Caracterização Elétrica

Circuitos de

Condicionamento para ISFET

Condicionadores Propostos

Seguidor de Fonte-e-Dreno

pHCO

Resultados

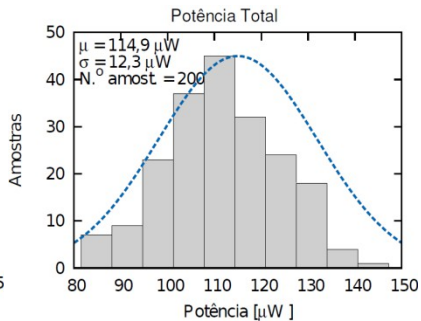
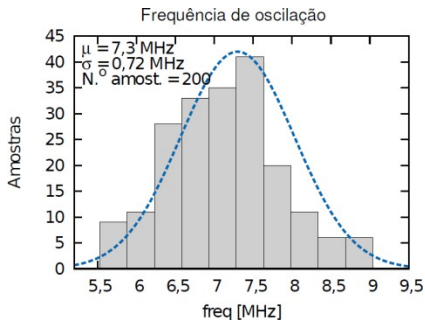
Conclusões

Trabalhos Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Resultados de Simulação – ISFET A



Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

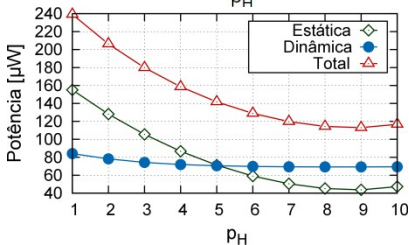
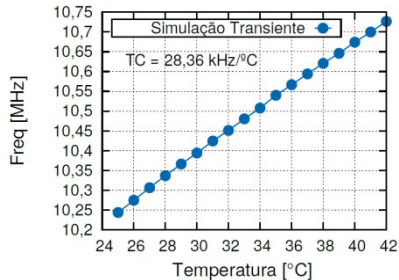
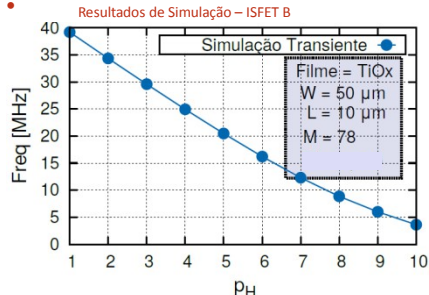
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

- Introdução
- ISFET
- Modelo Comportamental
- Caracterização Elétrica
- Circuitos de Condicionamento para ISFET
- Condicionadores Propostos**
- Seguidor de Fonte-e-Dreno
- pHCO**
- Resultados**
- Conclusões
- Trabalhos Futuros

pHCO



Condicionadores Propostos

pHCO

Resultados de Simulação – ISFET B

Cantos	Frequência (MHz)	Potência DC (μ W)	Potência Transiente (μ W)	Potência Total (μ W)
Nominal	10,1	68,3	47,0	115
ff	13,0	88,1	63,7	152
fff	14,6	100	74,1	174
ss	7,70	53,7	35,2	88,8
ssf	6,55	46,3	29,8	76,1
fs	11,3	70,4	49,1	120
sf	8,49	65,9	44,5	110
Min	6,55	46,3	29,8	76,1
Max	14,6	100	74,1	174

Trabalhos	pHCO - ISFET B
Tecnologia	0,18 μ m
V_{DD} (V)	1,8
Área Total (mm^2)	0,018
Consumo Total (μ W)	113,6
Faixa de Variação (pH)	1 - 10
Faixa de Variação Sensibilidade	39 MHz - 3,6 MHz 4,4 MHz/pH
DR ¹⁰	47,65 dB

Introdução

ISFET

Modelo

Comportamental

Caracterização Elétrica

Circuitos de

Condicionamento para ISFET

Condicionadores Propostos

Seguidor de Fonte-e-Dreno
pHCO

Resultados

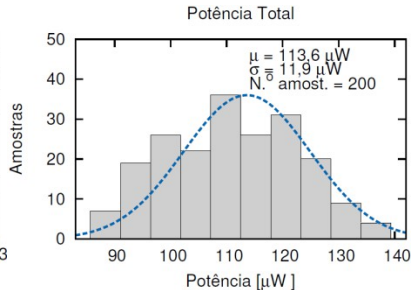
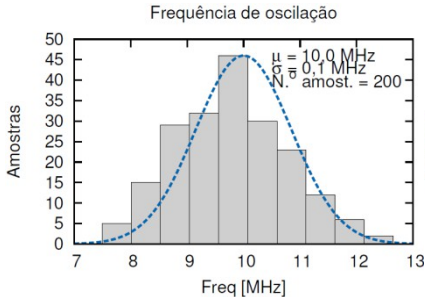
Conclusões

Trabalhos Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Resultados de Simulação – ISFET B



Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

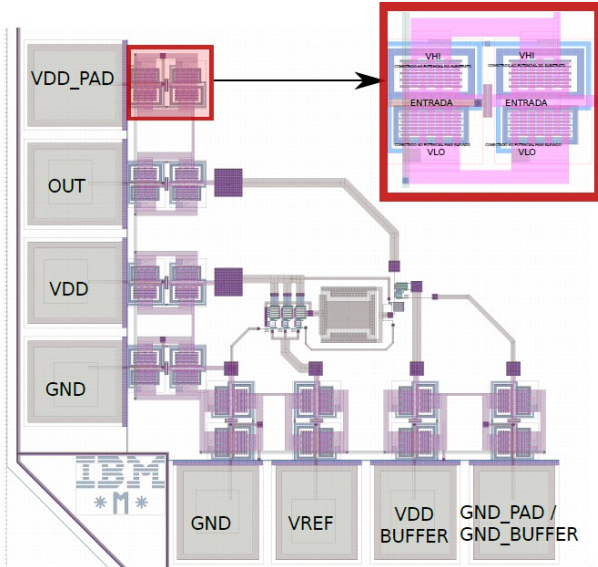
Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

•

Layout



Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO**Resultados**

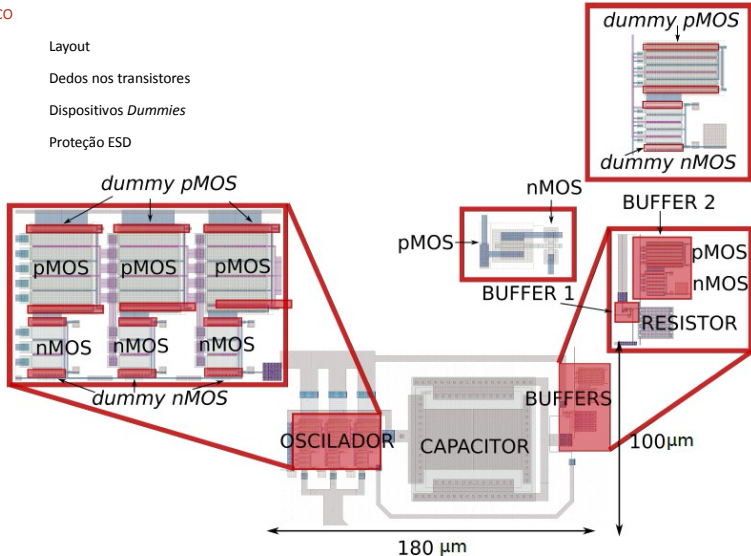
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Layout
- Dedos nos transistores
- Dispositivos *Dummies*
- Proteção ESD



Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondiçio-
nadores
PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

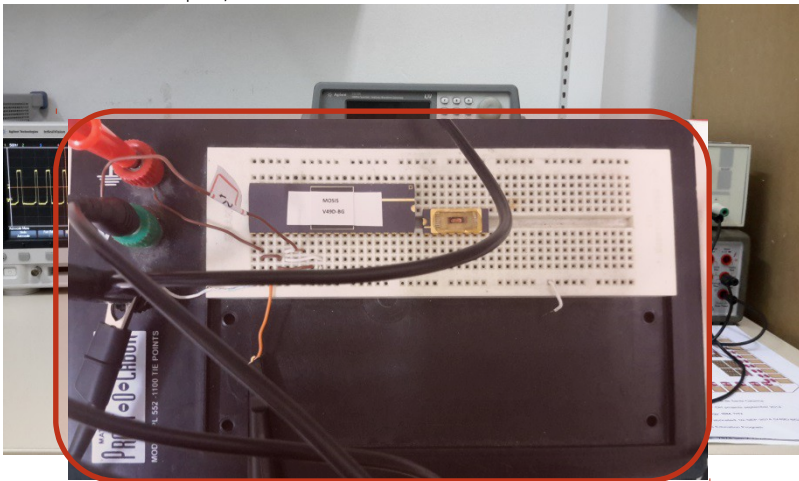
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Tape-out: Set/2014
- Recebimento do chip: Dez/2014



Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracteriza-
ção Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

**Condi-
ciona-
dores
Propostos**

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

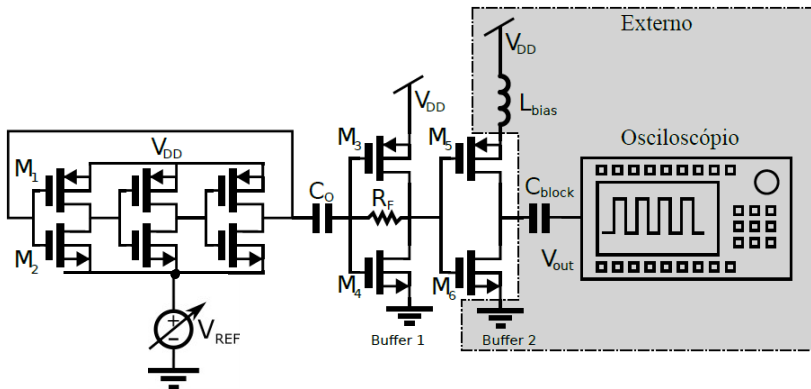
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Testes Experimentais Preliminares do Chip sem o sensor ISFET



Introdução

ISFET

Modelo
Comportamental

Caracteriza-
ção Elétrica

Circuitos de
Condicionamento
para ISFET

**Condiciona-
dores
Propostos**

Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

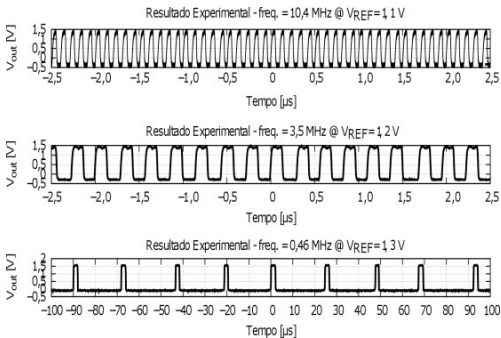
Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Testes Experimentais Preliminares do Chip sem o sensor ISFET



V_{REF} (V)	I_{DC} (μA)	f_o (MHz)	P_{DC} (μW)
1,0	38,6	17,4	69,4
1,1	18,3	10,4	32,9
1,2	4,5	3,5	8,1
1,3	0,1	0,46	0,18

DR (dB)	S (MHz/V)
13,92	70

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFET**Condiciona-
dores
Propostos**Seguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO**Resultados**

Conclusões

Trabalhos
Futuros

Condicionadores Propostos

pHCO

- Comparativo de trabalhos recentes e de relevância em circuitos de leitura do ISFET com este trabalho

Trabalhos	[6]	[7]	[8]	pHCO - ISFET A	pHCO - ISFET B
Tecnologia	0,18 μm	0,18 μm	0,25 μm	0,18 μm	0,18 μm
V_{DD} (V)	2,5	1,8/3,3 ¹¹	2,5	1,8	1,8
Área Total (mm^2)	$\approx 0,4$	2,6	-	0,018	0,018
Consumo Total (μW)	600	76 ¹²	4,5	114,9	113,6
Faixa de Variação (pH)	0,5 @ 3 V	pH:4@10	Glicose: 5 @ 25 mM	pH: 1@10	pH: 1@10
Faixa de Variação	0,05 @ 1,9 V	80 @ 200 kHz	50 @ 250 nA	31 MHz - 1,2 MHz	39 MHz - 3,6 MHz
Sensibilidade	$\approx 0,6$ V/V	81 kHz/V	10 nA/mM	3,3 MHz/pH	4,4 MHz/pH
DR ¹⁴	72,8 dB	18,32 dB	32,2 dB	65,03 dB	47,65 dB

[6] ZHU, B. et al. A wireless SoC for alimentary canal pH value continuously monitoring. 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), leee, p. 1–4, ago. 2011.

[7] CHAN, W. P.; PREMANODE, B.; TOUMAZOU, C. An Integrated ISFETs Instrumentation System in Standard CMOS Technology. IEEE Journal of Solid-State Circuits, v. 45, n. 9, p. 1923–1934, set. 2010. ISSN 0018-9200.

[8] GEORGIU, P.; TOUMAZOU, C. A silicon pancreatic Beta cell for diabetes. IEEE transactions on biomedical circuits and systems, v. 1, n. 1, p. 39–49, mar. 2007. ISSN 1932-4545.

Condicionadores Propostos

pHCO

- Comparativo de trabalhos recentes e de relevância em circuitos de leitura do ISFET com este trabalho

Trabalhos	[10]	[11]	pHCO - ISFET A	pHCO - ISFET B
Tecnologia	0,35 μm	0,18 μm	0,18 μm	0,18 μm
V_{DD} (V)	3,3	1,8	1,8	1,8
Área Total (mm^2)	3	0,036	0,018	0,018
Consumo Total (μW)	168,3	230	114,9	113,6
Faixa de Variação (pH)	-	-	pH: 1 @ 10	pH: 1 @ 10
Faixa de Variação	3,6 @ 14,4 nA	-	31 MHz - 1,2 MHz	39 MHz - 3,6 MHz
Sensibilidade	1,233 e 1,17 nA/mM ¹⁵	27 ns/pH	3,3 MHz/pH	4,4 MHz/pH
DR ¹⁶	27,7 dB	58 dB	65,03 dB	47,65 dB

[10] THANAPITAK, S.; TOUMAZOU, C. A bionics chemical synapse. IEEE transactions on biomedical circuits and systems, v. 7, n. 3, p.296–306, jun. 2013. ISSN 1940-9990.

[11] TOUMAZOU, C.; GEORGIU, P. A TDC based ISFET readout for large-scale chemical sensing systems. 2012 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Ieee, p. 176–179, nov. 2012.

Agenda

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondicionador
e PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

- Introdução
 - Contextualização
 - Motivação
- ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)
 - Histórico
 - Aplicação
 - Princípio de Operação
- Modelo Comportamental (Verilog-A)
 - Caracterização Elétrica do ISFET
- Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados
 - Revisão bibliográfica
- Condicionadores Propostos e Desenvolvidos
 - Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
 - Resultados de Simulações e Experimentais
- **Conclusões**
- Propostas de Trabalhos Futuros no tema

Conclusões

1. Realizou-se o projeto e fabricação de um circuito condicionador integrado para sensor ISFET:
 - Os testes experimentais preliminares indicaram que o chip enviado para fabricação funciona;
 - A topologia pHCO permitiu simplificar o estágio de condicionamento, eliminando o uso do bloco ADC e de forma a realizar uma interface direta com o dispositivo microcontrolador;
2. Foram realizados dois protótipos de circuitos condicionadores discretos que permitiram avaliar o comportamento e a resposta das amostras de ISFET fabricadas pelo CCS:
 - Seguidor de fonte-e-dreno;
 - pHCO;
3. A realização do trabalho no contexto da rede NAMITEC permitiu realizar o curso de microfabricação de ICs na UNICAMP, o que foi importante para consolidar o aprendizado das etapas de construção do dispositivo;
4. O período de formação foi importante para aprendizagem do fluxo de projeto em circuitos integrados e obter domínio nas ferramentas e nos *softwares* de projeto.

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondicionador
es PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

ConclusõesTrabalhos
Futuros

Agenda

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondicionador
PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

Trabalhos
Futuros

- Introdução
 - Contextualização
 - Motivação
- ISFET (Transistor de Efeito de Campo Sensível a Íons)
 - Histórico
 - Aplicação
 - Princípio de Operação
- Modelo Comportamental (Verilog-A)
 - Caracterização Elétrica do ISFET
- Circuitos de Condicionamento para ISFET Reportados
 - Revisão bibliográfica
- Condicionadores Propostos e Desenvolvidos
 - Análise e Projeto dos circuitos discretos e integrados
 - Seguidor de Fonte-e-Dreno
 - pHCO
 - Resultados de Simulações e Experimentais
- Conclusões
- **Propostas de Trabalhos Futuros no tema**

Propostas de Trabalhos Futuros no tema

- Realizar as medições do chip com o sensor ISFET;
- Funcionalização do sensor para medir variações de glicose;
- Análise de grandes sinais da topologia pHCO;
- Solução monolítica do sensor + circuito condicionador.

Introdução

ISFET

Modelo
ComportamentalCaracteriza-
ção ElétricaCircuitos de
Condicionamento
para ISFETCondicionador
e PropostosSeguidor
de Fonte-e-
Dreno
pHCO

Resultados

Conclusões

**Trabalhos
Futuros**

Fim da apresentação.

Muito obrigado!