

# Caracterização elétrica de um Sensor de pH usando um Transistor de Efeito de Campo com Gate-Estendido.

**William Max dos Santos Silva Silva<sup>1</sup>; Ernando Silva Ferreira<sup>2</sup>**

1. Bolsista Probiç/Uefs, Graduando em Bel.Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail:

[max.fisuefs@gmail.com](mailto:max.fisuefs@gmail.com)

2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [ernando@yahoo.com](mailto:ernando@yahoo.com)

**PALAVRAS-CHAVE:** Egfet; Sensor; pH.

## INTRODUÇÃO

Devido as aplicações dos biossensores para o desenvolvimento dos mais variados segmentos como processamento de alimentos, farmácia, medicina entre outros, e com o avanço exponencial da microeletrônica, a cada dia esses sensores vêm se tornando mais baratos e compactos, possibilitando medidas confiáveis em tempo real tão seguras quanto as dos aparelhos empregados em laboratórios de análise. (Sugimoto L. 2003)

Sensores são dispositivos capazes de mensurar ou quantificar uma grandeza – luminosidade, pressão, pH – a partir de um sinal físico ou químico. São compostos também por um transdutor, o qual converte um sinal de entrada para um domínio desejável, geralmente sinal elétrico (Balbinot, A.; Brusamarello.2011).

Os biossensores baseados na técnica de potenciometria proposta por Nernste em 1888 é uma das técnicas mais aplicadas para medidas de pH, atividade fundamental para os mais diversos campos, uma vez que com este é possível fazer medidas indiretas de ureia, colesterol, glicose e etc. (Daniel R. Thévenot, at.al. 1999).

Com o advento dos transistores muitas pesquisas vêm surgindo a exemplo do *Ion Sensitive Field Effect Transistor* ISFET e suas aplicações como biossensor (Bergveld, P. 2003). Dentro desta perspectiva o trabalho propõe simular e caracterizar eletricamente uma membrana sensível a  $H^+$  a partir de um transistor.

### 1.1 O EgFet

Em 1970 Bergveld (Bergveld, P. 1970, 2003) propõem pela primeira vez um sensor baseado em Fet, o Isfet, que é uma tecnologia cara e inflexível. (Silva, Gláucio Ribeiro. 2009)

Anos depois, um novo dispositivo similar ao ISFET foi criado, o *Extended-gate field effect transistor* (EGFET) (Van der Spiegel.1983). Este consiste basicamente um MOFET comercial com um elétrodo ligado ao *gate*, garantindo ao EGFET flexibilidade, uma vez que o elétrodo de trabalho pode ser substituído por qualquer outro, e os transistores usados são acessíveis e reutilizáveis, tornando-se um ótimo sensor de pH.

Muitos testes são feitos para encontrar membranas que respondam a uma ampla faixa de pH. Algumas características do material interferem na sensibilidade; uma delas é a cristalinidade. Nesse sentido, o *Fluorine-doped Tin Oxide* (FTO) apresenta particularidades interessantes (Diniz, Pablo .2008).

Os sensores de pH do tipo EGFET têm a sua corrente modulada a partir do campo elétrico gerado pelos íons ( $H^+$ ) da solução, os quais alteram o potencial entre a membrana e o eletrólito. Tendo como modelo para o sistema a teoria *electrolyte insulator semiconductor*

(EIS), que leva em consideração a teoria *Site-bending model* e o funcionamento do ISFET, que também se aplica ao EGFET. Lembrando que o comportamento do Egfet só diverge do Mosfet na tensão de *threshold*  $V_{TH}$  devido as contribuições do dipolo de superfície ( $\chi_s$ ), potencial de superfície ( $\psi_0$ ) devido a meio e potencial do eletrodo de referência ( $E_{ref}$ ). Sendo assim, para o Mosfet na região não saturada (Resende, S. M. 1996)

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} \left[ V_{GS} (V_{GS} - V_{TH}) - \frac{V_{DS}^2}{2} \right], \quad (1)$$

Para região saturada

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} [(V_{GS} - V_{TH})^2], \quad (2)$$

Seja

$$V_{TH}(EGFET) = V_{TH}(MOSFET) + E_{ref} - \psi_0 + \chi_s - \frac{\phi_s}{q}. \quad (4)$$

$V_{FB}$  é a tensão de *float band* que depende da função trabalho do metal e do oxido, e  $Q_b$  é a carga na região de depleção. No Egfet todo o sistema contribui para uma variação de  $V_{TH}$ .

### 1.1.1 Site- bending model

A forma com a qual o potencial do *gate* é modulada a partir da atividade de  $H^+$  é explicada pelo modelo de sitio de ligações (*site-bending model*). Este proposto por Yets e generalizado por Fung em 1986. Neste modelo a membrana sensível, um óxido, têm sítios de ligações anfóteros e dada interação com o os prótons da solução formam-se sítios neutros, ácidos e básicos que podem ser descritos pelas constantes de equilíbrio ácido ( $K_a$ ) e base ( $K_b$ ).

podem ser escritos em função das características da superfície,  $K_a$ ,  $K_b$  e número de sítios por área  $N_s$ . Seja o  $pH_{pzc}$  ou  $pH$  no ponto de carga zero,  $\psi_0 = 0 = \psi_0$ .

$$pH_{pzc} = -\log(K_b x K_a)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (pK_a + pK_b), \quad (5)$$

O  $\psi_0$  é definido como:

$$2,303(pH_{pzc} - pH) = \frac{q\psi_0}{kT} + \sinh^{-1}\left(\frac{q\psi_0}{kT\beta}\right); \quad \beta = \frac{2q^2 N_s \left(\frac{K_a}{K_b}\right)^{-1/2}}{C_{dl} kT}. \quad (7)$$

Sendo  $k$  a constante de Boltzman e, o parâmetro  $\beta$  expressa a sensibilidade do óxido em função do  $pH$ , sobretudo a Eq.[4] é uma aproximação para superfícies nas quais o número de sítios é suficientemente grande assegurando que a densidade de carga não seja máxima na fixa de  $pH$  a se trabalhar, para isso  $\Delta pK = pK_a - pK_b$  é grande o suficiente para garantir que  $\frac{K_a}{K_b} \ll 1$ .

## METODOLOGIA

Para caracterizar a membrana, no caso FTO, seguindo os procedimentos de literatura fora escolhido o CMOS (do inglês *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) comercial, cd4007ube. Para caracterização do dispositivo fora selecionando um Fet tipo N que foi

simulado no software livre LTSpice®<sup>1</sup>. Tendo em mão fontes de 12 volts e divisores de tensão obtendo variação de 0,06 a 5 volts foi variando manualmente  $V_{DS}$  a valores fixos de  $V_{GS}$  e assim é possível observar variações de  $I_{DS}$ , deste modo plotar a curva característica  $I_{DS}$  vs  $V_{DS}$ .

Com as relações entre  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$  e  $I_{DS}$  apresentadas nas Eq.[1,2], espera-se obter uma curva que se modifique de acordo com a tensão no *gate*, conseqüentemente com o pH. A partir destes dados e equações determinar a sensibilidade da membrana e comportamento em uma faixa de *pH*.

## RESULTADOS

Tendo em vista a caracterização do transistor, a Figura [3,4] apresentam simulações do dispositivo obtidas no software LTSpice®.

No gráfico da Figura[1] é possível visualizar o comportamento do transistor, ainda mais, nele é apresentado como a tensão de entrada controla a corrente de saída como também o  $V_{TH}$ . Para esta simulação é necessário fixar  $V_{DS}$  e variar  $V_{GS}$ . A partir do esquema apresentado na Figura [1] variou-se  $V_{GS}$  de 0 a 5 em passos de 0,01 Volts e  $V_{DS}$  de 0 a 5 em passos de 1 Volts. A partir do esquema apresentado na Figura [1], variou-se  $V_{GS}$  de 0 a 5, em passos de 0,01 Volts, e  $V_{DS}$  de 0 a 5, em passos de 1 Volts.

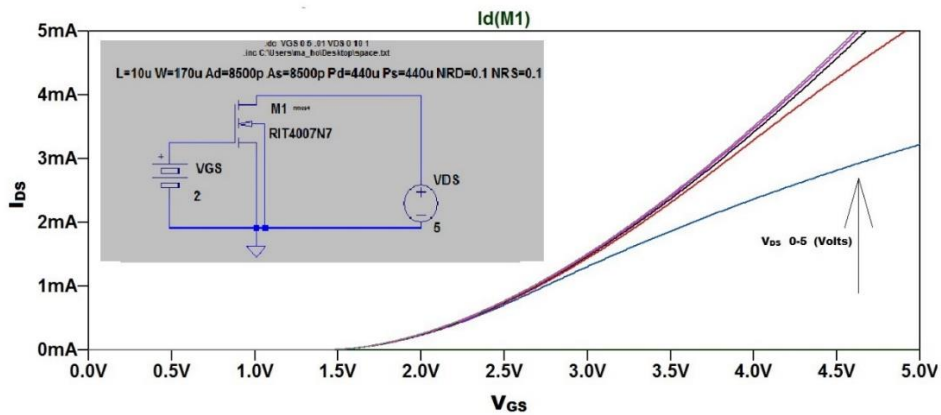


Figura 1. Simulação da curva de transcondutância do cd4007ube e esquema do circuito para obtenção dos dados.

Com o LTSpice e os parâmetros do cd4007 obtidos no Rochester Institute of Technology<sup>2</sup> foi possível plotar a curva característica deste componente. Vide Figura [2]

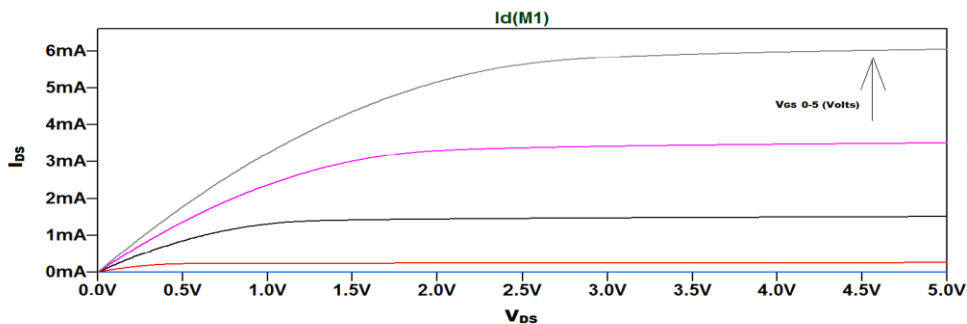


Figura 2 Simulação da curva característica do cd4007ube e esquema.

<sup>1</sup> Disponível para download em <<http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>>, acesso em 01/08/2018.

<sup>2</sup> Disponível em <[https://people.rit.edu/lffeee/CD4007\\_SPICE\\_MODEL.pdf](https://people.rit.edu/lffeee/CD4007_SPICE_MODEL.pdf)>, acesso em 01/08/2018.

No gráfico apresentado na Figura [3] apresenta a curva características do transistor. Nesta é de fácil visualização das zonas: saturação, corte e trípodo. A ultima é uma zona de interesse neste trabalho. Tendo essas simulações como referência é possível uma melhor análise do gráfico apresentado na Figura [3].

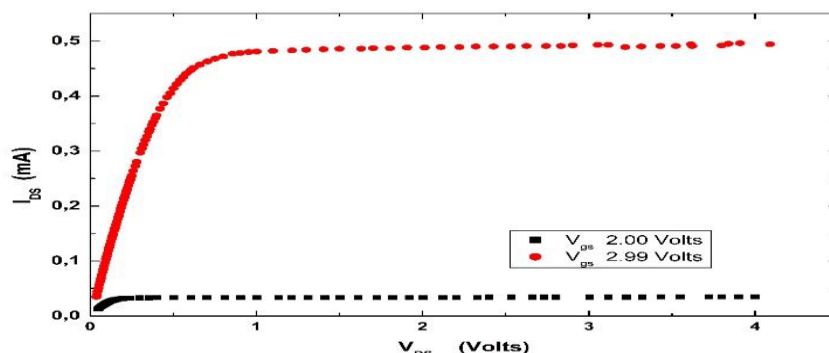


Figura 3 Curva característica experimental do cd4007ube.

Esta curva apresenta um resultado aceitável se observado seu comportamento. Deste modo o próximo passo é montar o EgFet e caracterizar a membrana, para assim calibrar o sistema possibilitando determinar a sensibilidade do eletrodo de trabalho. Isso não foi feito pois, ainda não se dispõem de um eletrodo de referência Ag/AgCl no laboratório. Contudo, é possível obter uma relação linear entre o pH e a raiz quadrada de  $I_{DS}$ , tendo em vista a Eq.[6] basta aplicar raiz quadrada em ambos os membros da equação. Assim se tem algo semelhantes a uma função do primeiro grau. Nesta garantia basta fixar um valor de  $V_{DS}$  na zona de saturação e plotar uma curva  $\sqrt{I_{DS}}$  vs pH.

Com a curva de transcondutância para valores fixos de pH é possível determinar a sensibilidade da membrana, para isso varia-se  $V_{ref}$  a  $V_{DS}$ , valores de  $V_{DS}$  próximos ao  $V_{TH}$ , ou seja próximo o  $pH_{pzc}$ , constante é possível levantar uma curva  $V_{ref}$  vs pH, seja o valor de  $I_{DS}$  o limiar de condução. Nestas condições  $\frac{q\psi_0}{kT} \ll \beta$  observe que a Eq.[3] pode ser reescrita de tal forma que ao substituir Eq.[3] na Eq.[7] lembrando que  $I_{DS}$  é constante

$$C = \alpha_{V_{DS}} V_{GS}; \quad C = I_{DS} + S_{T,\beta} + S'_{V_{TH},V_{DS}}$$

Deste modo o método se apresenta confiável e funcional, as dificuldades de materiais impediram a realização completa do experimento, sobretudo os estudos realizados mostram que é possível e existe uma robustez teórica.

## REFERÊNCIAS

- Bergveld, P.1970. Development of an Ion-Sensitive Solid-State Device for Neurophysiological Measurements. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Bm17,1,p.70-71
- Van der spiegel, J., Lauks, I., Chan, P., Babic, D.1983. The extended gate chemically sensitive field effect transistor as multi-species microprobe. Sens. Actuators 4,p.291–298.
- Daniel R. Thévenot,at.al.1999. Electrochemical Biosensors: Recommended Definitions and Classification ,Pure Appl. Chem., Vol. 71, No.12, p. 232-348.
- Sugimoto L.2003.Biossensores:de tão simples e baratos, as pessoas desconfiam, Jornal da Unicamp, 232, p.8.
- Bergveld, P. 2003. Thirty years of ISFETOLOGY: what happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years. Sens. Actuators B: Chem. 88 , p1–20.
- Diniz, Pablo Batista.2008. Dispositivos semicondutores a partir de óxidos de estanho e zinco, Ribeirão Preto, pp. 171.
- Silva, Gláucio Ribeiro.2009. Materiais micro e nanoestruturados para sensores de íons do tipo EGFET. Ribeirão Preto.p.6-33.
- Balbinot, A.; Brusamarello, V.J.2011. Instrumentação e Fundamentos de Medidas 2a. ed. LTC,p.9-11.