

## **Apresentação de uma ferramenta tecnológica para a caracterização elétrica de sensores de pH do tipo EGFET**

*Development of a technological tool for the electrical characterization of pH sensors based on EGFET platform*

Edgar Monteiro da Silva

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*

*Rua Dr. Xavier Sigaud,*

*150 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP:22290-180 e*

*Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca*

*Av. Maracanã, 229 - Maracanã, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, CEP: 20271-110*

Pablo Diniz Batista\*

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*

*Rua Dr. Xavier Sigaud,*

*150 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - 22290-180*

*Submetido em 05/02/16*

**Resumo:** A medida de pH encontra diversas aplicações na sociedade. O valor dessa grandeza em uma solução aquosa pode ser obtida facilmente utilizando um eletrodo de vidro. Porém, nas últimas décadas observa-se o interesse pela pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico de sensores de pH a partir de transistores de efeito de campo principalmente devido ao seu potencial uso na área de biosensores com aplicações, por exemplo, em áreas como a Medicina e a Biologia. Nesse caso, as medidas elétricas são fundamentais durante as diversas etapas de otimização desse sensor. Portanto, apresentamos neste trabalho detalhes de uma instrumentação científica desenvolvida para realizar diversas medidas de caracterização elétrica comumente utilizadas durante a fabricação e a pesquisa científica dos sensores de pH do tipo EGFET. Finalmente, destacamos que tanto o hardware como o software apresentados nesse trabalho serão disponibilizados apostando no paradigma *open source hardware*.

**Palavras-chave:** EGFET, sensor de pH, instrumentação científica.

**Abstract:** The pH measurement is present in many applications in society. The value of this chemical quantity in an aqueous solution can be obtained easily using a glass electrode. However, in recent decades there has been interest in scientific research and technological development of pH sensors from field-effect transistor mainly because of its potential use in biosensors area with applications, for example in areas such as Medicine and Biology. In this case, the electrical measurements are critical during the various optimization steps for the pH sensor. Therefore, this work presents details of a scientific instrumentation designed to perform various electrical characterization measurements commonly used in the manufacture and scientific research of pH sensors based on EGFET platform. Finally, we point out that both the hardware and the software presented in this work will be made available according to the paradigm of open source hardware.

**Keywords:** EGFET, pH sensor, scientific instrumentation, open source hardware.

## 1. INTRODUÇÃO

A grandeza que indica o nível de acidez ou alcalinidade de uma solução é o potencial hidrogeniônico, ou potencial de hidrogênio iônico, conhecido como pH. Este termo foi introduzido em 1909 pelo bioquímico dinamarquês Soren Peter Lauritz Sorensen [1, 2]. A medida de pH é necessária em diversos processos industriais, biológicos, científicos etc. Portanto, o desenvolvimento de sensores de pH desperta a atenção de vários pesquisadores em todo o mundo. O primeiro sensor de pH é o tradicional eletrodo de vidro. Com o avanço na área de semicondutores surge a proposta do uso dos transistores aplicados à medida de pH, a partir da apresentação do ISFET em 1968 por Bergveld. Esse dispositivo é considerado como sendo o primeiro sensor químico com dimensões reduzidas e que utiliza um semicondutor de efeito de campo como mostra a figura 1-a [3–5].

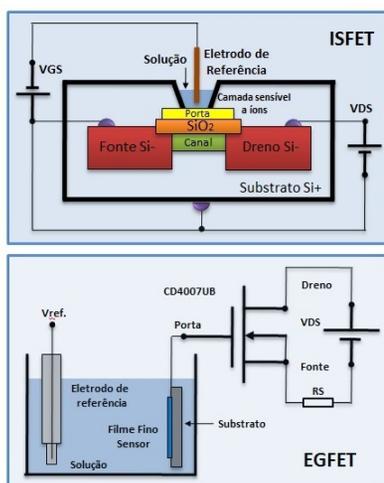


Figura 1: (a) Modelo do ISFET com a construção do transistor no substrato de silício. (b) Modelo do EGFET com construção mais simples em função de usar um MOSFET comercial do tipo CD4007UB.

O ISFET despertou grande interesse como biossensor devido ao fato de usar um transistor de efeito de campo modificado biologicamente e, atualmente serve de base estrutural para a construção de micro-sensores químicos e biológicos. Desde então, uma das grandes motivações para a pesquisa científica na área de sensores de pH é a possibilidade de construção de diversos biossensores devido ao potencial de utilização na área médica. Além disso, podem ser aplicados em biotecnologia e monitoramento ambiental de indústrias alimentícias e farmacêuticas [6–12].

Como uma alternativa ao ISFET, surge mais tarde o EGFET, que pode ser entendido como um transistor de efeito de campo comercial com seu terminal *gate* ligado a uma membrana sensível a íons como mostra a figura 1-b. O EGFET consiste num MOSFET comercial tendo o terminal *gate* conectado a um filme fino sensível à íons, previamente depositado em um substrato condutor [13–17]. No eletrodo de referência é aplicada uma tensão em relação a massa do circuito onde o terminal fonte do MOSFET fecha o circuito. De forma simples, ele possibilita a pesquisa e o desenvolvimento de sensores de pH e biossensores. Ao contrário do

ISFET, o EGFET pode ser fabricado com baixo custo, pois as etapas relacionadas ao desenvolvimento do MOSFET não são necessárias. Essas características fazem dele uma alternativa à fabricação do ISFET, podendo ser utilizado como ferramenta para o estudo de materiais com aplicações em sensores de pH e biossensores, apresentando vantagens como miniaturização, baixo custo, alta sensibilidade e potencial para multi-deteção em relação a outros biossensores [18–22].

Percorrendo os artigos publicados após o ano 2000, verifica-se que foram usados diferentes materiais para a construção de sensores e biossensores de pH tendo o EGFET como base. Por exemplo, a partir de 2004 destaca-se o interesse no uso de ZnO como sensor de pH tanto em ISFET como em EGFET inclusive em aplicações para a detecção de glicose [23–33].

Entretanto, de uma maneira geral, observa-se a ausência de propostas para o desenvolvimento da instrumentação científica necessária para a caracterização destes sensores uma vez que grande parte dos trabalhos apresentados utilizam equipamentos consolidados no mercado internacional [34–36]. Assim, apostando na ideia do paradigma *open source hardware* propomos neste trabalho o desenvolvimento de um sistema de medidas para a caracterização elétrica dos sensores de pH do tipo EGFET [37–50]. O principal argumento apresentado dentro dessa concepção é que tornar a instrumentação científica disponível pode facilitar que a mesma possa ser modificada por outros grupos de pesquisas e dessa forma espera-se que com o tempo esse projeto de pesquisa possa ser aprimorado.

Este sistema de medidas é composto por duas placas de circuitos eletrônicos. A primeira consiste em um circuito eletrônico tendo um MOSFET comercial, um amperímetro e um voltímetro enquanto, que a segunda é um circuito de controle e aquisição de dados tendo comunicação com um computador através de uma porta USB. Disponibiliza também um conversor analógico-digital para converter os valores de corrente no MOSFET. Finalmente, um software executado no computador configura e controla todo o procedimento de caracterização elétrica utilizando os periféricos presentes em ambas as placas eletrônicas. Detalhes serão apresentados a seguir.

## 2. DESCRIÇÃO DO HARDWARE

O diagrama em blocos na figura 2 apresenta o circuito do EGFET, do amperímetro e do voltímetro que compõe a placa de caracterização do sistema.

Na placa de caracterização utilizamos um dos MOSFETs disponíveis no circuito integrado CD4007UB. O terminal porta pode ser ligado ao conector *sensor de pH* através da chave *S*. O terminal de dreno recebe tensão elétrica programada através de um DAC da placa de controle. O terminal fonte possui em série um resistor *shunt* para possibilitar a leitura da corrente do MOSFET. Este circuito forma o EGFET.

Um amperímetro foi construído utilizando o amplificador de instrumentação INA121. A tensão desenvolvida pela corrente que flui no resistor *RS* é aplicada na entrada não in-

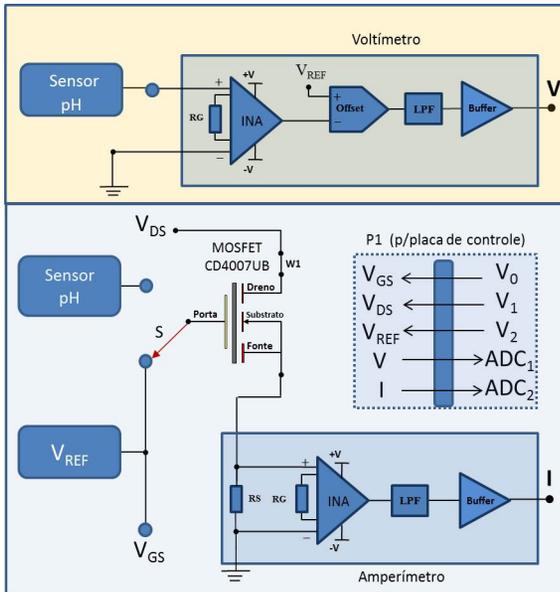


Figura 2: Circuito eletrônico da placa de caracterização, composto pelo EGFET, amperímetro e voltímetro a partir do amplificador de instrumentação INA121. A placa possibilita a utilização de técnicas para a caracterização do sensor de pH e do EGFET

versora. O conjunto de resistores  $R_G$  permitem ajustar o ganho do amplificador. A saída é seguida por um circuito filtro passa baixa de segunda ordem com o objetivo de reduzir possíveis sinais espúrios de alta frequência durante a medida. Após o filtro, temos um circuito *buffer* para que o sinal de saída esteja adequado para ser conectado a um canal do ADC da placa de controle. O eletrodo de referência, através do conector  $V_{ref}$  pode receber um nível de tensão programada por um DAC. A chave  $S$  permite que sejam aplicados diversos níveis de tensão na porta do MOSFET para o processo de caracterização.

Um voltímetro, também formado por um INA121, foi construído com a finalidade de permitir outra técnica de caracterização do sensor. O conector  $V_i$  recebe a tensão gerada pelo sensor e a aplica na entrada inversora do amplificador. Os resistores  $R_G$  permitem o ajuste do ganho do mesmo. A tensão de saída é conectada a entrada inversora de um circuito subtrator. A outra entrada deste está ligada a um DAC da placa de controle, que gera uma tensão de *off-set*. Este circuito é necessário porque o sensor pode gerar, em função do pH da solução em teste, tensão positiva ou negativa. Como o ADC só recebe tensão positiva, se faz necessária esta adequação do sinal medido. Após o subtrator o sinal é encaminhado a um filtro passa baixa de segunda ordem, seguido de um *buffer* com a mesma função descrita no amperímetro.

O sistema de caracterização de sensores de pH do tipo EGFET é controlado pela placa apresentada no diagrama em blocos da figura 3. Nesta, temos um microcontrolador principal, PIC18F45K20, que executa a comunicação com todos os periféricos, inclusive com o segundo microcontrolador, PIC18F14K50, que tem a função de comunicação com um computador através de um circuito conversor do padrão USB para RS-232.

O conversor analógico digital (ADC) de 14 canais e dez

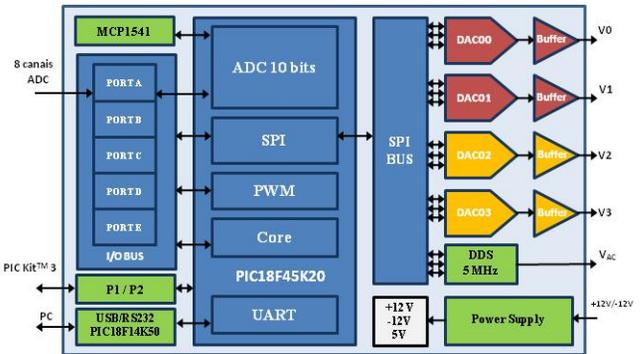


Figura 3: Diagrama em blocos da placa de controle e aquisição de dados tendo o microcontrolador PIC18F45K20 como o responsável por acessar todos os periféricos. O PIC18F14K50 disponibiliza a comunicação com o PC por meio da porta USB.

bits de resolução do PIC18F45K20 é utilizado para ler as amostras dos sinais enviados pela placa de caracterização. Os canais 0 e 1 do ADC, recebem respectivamente, as tensões lidas pelo voltímetro e pelo amperímetro da placa de caracterização elétrica do EGFET. O circuito regulador de tensão MCP1541 fornece uma tensão de referência de 4,096V para o ADC. Como o mesmo tem 10 bits, temos uma resolução de 4mV por valor binário. Os canais do ADC estão disponíveis através das portas de comunicação do microcontrolador nos seus respectivos conectores.

Quatro tensões programáveis podem ser geradas pelos MCP4822. Os DACs são de 12 bits e tem tensão de referência interna de 4,096V de modo que a resolução é de 1 mV por valor binário, podendo gerar em cada saída valores de 0 à 4V. Nas saídas de tensão, foram colocados amplificadores de potencia do tipo L272M, com ganho 2, tendo a finalidade de gerar até quatro tensões de 0 à 8V com capacidade total de corrente de 400 mA. As tensões de saída estão disponíveis nos conectores  $V_0$  à  $V_3$ . O controle e acesso de todos os DACs são feitos pelo microcontrolador principal através da interface SPI (Serial Peripheral Interface).

Um circuito gerador de tensão senoidal do tipo AD9835 foi montado na placa de modo a permitir aplicações futuras nas quais é necessário o uso de tensão alternada. A frequência pode ser programada através do software executado no computador com resolução de 0,01Hz e com valor de até 5MHz. Os conectores P1 e P2 possibilitam a gravação *in circuit* do software interno dos microcontroladores. Finalmente, a alimentação da placa, para aplicações onde não será necessário o uso das tensões de saída, pode ser fornecida pelo cabo da porta USB. Caso contrário, a alimentação é feita por fonte simétrica externa de +/-12V.

### 3. FABRICAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Inicialmente os protótipos dos circuitos foram montados em uma matriz de contatos. Após os testes, para a montagem do circuito, foi projetado o *layout* de cada placa de circuito impresso, a partir do esquemático eletrônico do sistema, utilizando a ferramenta *Altium*. A partir desse aplica-

tivo desenhamos os circuitos posicionando os componentes e conectores de modo a facilitar o uso da placa. Nota-se que na placa de caracterização foi utilizada uma cobertura de aterramento, nas partes livres da mesma, com o objetivo produzir uma blindagem, reduzindo a possibilidade de interferência eletromagnética. Foram fabricados três pares de placas, em fibra e com dupla face, por uma empresa especializada. Posteriormente as mesmas foram montadas e testadas no laboratório. A figura 4 apresenta a placa de controle e aquisição e também o circuito de caracterização elétrica do EGFET.



Figura 4: Placa de aquisição de dados e placa de caracterização elétrica do EGFET

#### 4. RESULTADOS

Apresentamos os resultados de caracterização da placa de controle e aquisição através dos resultados das medidas das tensões geradas nas saídas dos DACs. Cada saída pode ser configurada remotamente com valores entre 0 e 8,190V com uma resolução de 2 mV. Utilizando um multímetro Agilent 34450A, a tensão de saída é monitorada na medida em que se excursiona a tensão em toda a faixa com passos de 10 mV. Para cada valor de tensão aplicado, esse procedimento é repetido vinte vezes, permitindo analisar o desempenho das saídas analógicas em termos de estabilidade ao longo do tempo. A figura 5 apresenta o resultado obtido para a caracterização elétrica dos canais de tensão analógica disponibilizados no sistema de aquisição e controle de dados.

Além disso, foram realizados testes para verificar o funcionamento da placa de caracterização elétrica do EGFET. Inicialmente, executamos medidas que permitem obter as curvas tradicionais de caracterização do MOSFET ou do EGFET. Na figura 6-a, a corrente é obtida considerando diversos níveis constantes da tensão  $V_{GS}$ , para diferentes valores de  $V_{DS}$ , enquanto que, na 6-b diversos níveis constantes de  $V_{DS}$  são utilizados para diferentes valores de  $V_{GS}$ . Em ambos os casos as tensões variam de 0 até 4 V e a corrente de 0 até 4 mA. Além disso, para investigar a precisão das medidas realizadas com nossa placa, foram feitas medidas concomitantes com o multímetro 34450A da Agilent, permitindo assim, obter o erro absoluto entre as medidas de corrente. Pode-se concluir que em toda a faixa de corrente

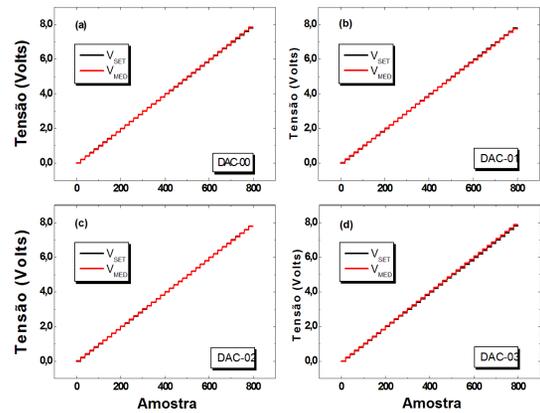


Figura 5: Caracterização elétrica das saídas analógicas presente no sistema de aquisição e controle

observa-se um erro máximo de 0.10 mA, o que corresponderia a um erro relativo de 4% considerando a máxima corrente. Portanto, os resultados apresentados indicam que o protótipo desenvolvido pode ser utilizado para caracterizar o EGFET como sensor de pH.

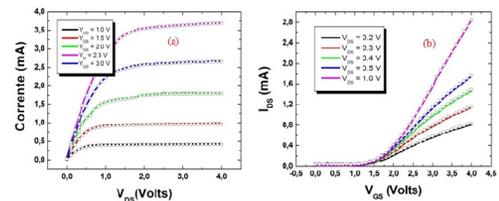


Figura 6: (a) Curva tradicional do MOSFET medindo a corrente em função da tensão  $V_{DS}$  para diferentes valores  $V_{GS}$ . (b) Curva tradicional do MOSFET medindo a corrente em função da tensão  $V_{GS}$  para diferentes valores  $V_{DS}$ .

A figura 7-a apresenta os resultados obtidos para a caracterização do voltímetro. Para isso, a tensão é medida em função do tempo utilizando um eletrodo de vidro padrão como sensor de pH imersos em diferentes soluções. Os resultados mostram que a tensão permanece constante ao longo do tempo indicando a estabilidade do sistema de medidas. A partir disso é possível obter a curva de calibração do sensor, isto é, o valor de tensão em função do pH como mostra a figura 7-b.

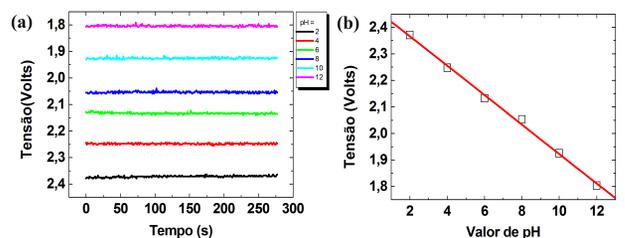


Figura 7: (a) Medida da tensão do eletrodo de pH padrão em função do tempo e (b) curva de calibração do sensor

A partir da análise satisfatória dos resultados investigamos também o desempenho de alguns filmes produzidos como sensores de pH. Por exemplo, a figura 8 apresenta as curvas em função do tempo obtidas para dois tipos de sensores: (a) FTO (fluor tin oxide) e (b) grafeno depositado em FTO. Esses filmes foram obtidos em colaboração com pesquisadores da Universidade de Minas Gerais (UFMG). Nesse primeiro momento apenas as curvas em função do tempo serão apresentadas.

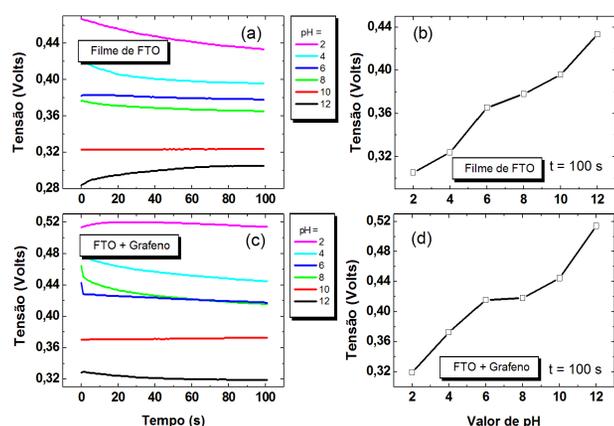


Figura 8: Curvas para a caracterização do EGFET como sensor de pH tendo como membrana seletiva o FTO ou o grafeno em substrato de FTO.

A resposta dos filmes ainda não está satisfatória, entretanto, de uma maneira geral, os resultados preliminares obtidos mostram que a instrumentação científica desenvolvida para a caracterização elétrica do EGFET como sensor de pH permite que diferentes filmes possam ser investigados a par-

tir desse trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

Este módulo é capaz de aplicar tensões ao MOSFET e ao eletrodo de referência ao mesmo tempo em que a corrente entre o dreno e a fonte é monitorada. Os valores dessas tensões assim como as medidas de corrente são controlados remotamente de modo a permitir medidas automatizadas da corrente em função da tensão para diversas situações. Algumas das principais características esperadas deste módulo eletrônico são: baixo custo, flexibilidade, portabilidade e comunicação com um computador pessoal. Atualmente estamos expandindo o módulo eletrônico para caracterização elétrica do EGFET em função da temperatura. Em seguida, esforços serão empreendidos para tornar esse protótipo o mais próximo possível de um produto tecnológico visando à transferência de tecnologia para empresas e grupos de pesquisa. Nesse caso, uma segunda versão do hardware e do software encontra-se em desenvolvimento visando contribuir com grupos de pesquisa interessados na otimização de filmes finos para sensores de pH utilizando transistores de efeito de campo. Além disso, vislumbra-se que esse módulo poderá ser utilizado para a caracterização de dispositivos semicondutores não se restringindo apenas a sensores de pH.

## Agradecimento

Os autores desse trabalho agradecem à FAPERJ (E-26/110.997/2009) e ao CNPq (486742/2013-0) pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

- 
- [1] Fernandes C. et al., *Eletrodos íons-seletivos: Histórico, mecanismos de resposta, seletividade e revisão dos conceitos*, Quim. Nova, Vol. 24, No. 1, 120-130, 2001.
- [2] Miao Yuqing and et al., *New technology for the detection of pH*, J. Biochem. Biophys. Methods 63 (2005) 1-9.
- [3] Bergveld, P., *Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements*, IEEE Trans Biomet. Engineering, 1970, 17, 70.
- [4] Bergveld, P., *The future of Biosensors*, Sensors and Actuators A 56 (1996) 65-73
- [5] Bergveld, P., *Thirty years of ISFETOLOGY What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years*, Sensors and Actuators B (88) 1-20.
- [6] Chaubey A. et al., *Mediated Biosensors*, Biosensors & Bioelectronics 17 (2002) 441-456.
- [7] Thévenot, D. R. and et al., *Electrochemical biosensors: recommended definitions and classifications*, Biosensors & Bioelectronics, 16 (2001) 121-131
- [8] Cunningham, A. J., *Introduction to Bionalytical Sensors*. pp 2006 (1998)
- [9] Cass, A.E.G., *Biosensors: A practical approach*. pp 171 (1990).
- [10] Malhotra, B. D. and et al., *Biosensors for clinical diagnostics industry*, Sensors and Actuators B 6931 (2003).
- [11] Schoning, M. J. and et al., *Recent advances in biologically sensitive field-effect transistor*, Analyst 127 (2002) 1137-1151.
- [12] Yuqing. M and et al., *Ion sensitive field effect transducer based biosensors*, Biotechnology Advances 21 (2003) 527-534.
- [13] Spiegel, J Van Der and et al., *The extended gate chemically sensitive field effect transistor as multi-species microprobe*,

- Sensors and Actuators 4 (1983) 291-298.
- [14] Yin, L. and et al., *Separate structure extended gate H<sup>+</sup> ion sensitive field effect transistor on a glass substrate*, Sensor and Actuators B 71 (2000) 106-111.
- [15] Chi, L. and et al., *Study on extended gate field effect transistor with tin oxide sensing membrane*, Materials Chemistry and Physics 63 (2000) 19-23.
- [16] Yin, L.T. and et al., *Study of indium tin oxide thin film for separative extended gate ISFET*, Materials Chemistry and Physics 70 (2001) 12-16.
- [17] Chou, J.C. and et al., *SnO<sub>2</sub> Separative Structure Extended Gate H<sup>+</sup>-Ion Sensitive Field Effect Transistor by Sol-Gel Technology and Readout Circuit Developed by Source Follower*, Journal Applied Physics Vol 42 (2003) pp 6790-6794.
- [18] Batista, P.D. and et al., *ZnO Extended-gate field-effect transistor as pH sensors*, Applied Physics Letter 87, 1435508 (2005)
- [19] Batista, P.D. and et al., *SnO<sub>2</sub> Extended Gate Field-Effect Transistor as pH sensor*, Brazilian Journal of Physics, vol 36, no 2A (2006).
- [20] Batista, P.D. and et al., *Polycrystalline fluorine-doped tin oxide as sensing thin film in EGFET pH sensor*, Journal Material Science (2010) 45:5478-5481.
- [21] Chi, L.Land et al., *Study on separative structure of EnFet to detect acetylcholine*, Sensor and Actuators B 71 (2000) 68-72
- [22] Chen, J.C. and et al., *Portable urea biosensor on the extended gate field effect transistor.*, Sensors and Actuators B 91 (2003) 180-186.
- [23] Al-Hilli, S.A. and et al., *ZnO nanorods as an intracellular sensor for pH measurements*, Micro and Nano Technologies in Bioanalysis Methods in Molecular Biology. Vol: 544, 2009, pp 187-200.
- [24] Chiu, Y.S. and et al., *pH Sensor Investigation of Various-Length Photoelectrochemical Passivated ZnO Nanorod Arrays*, Journal of the Electrochemical Society, 2011.
- [25] Chang S.P. and et al., *ZnO-Nanowire-Based Extended-Gate Field-Effect-Transistor pH Sensors Prepared on Glass Substrate*, Science of Advanced Materials, 2012.
- [26] Chiu Y.S. and et al., *Nanostructured EGFET pH Sensors With Surface-Passivated ZnO Thin-Film and Nanorod Array*, Sensors Journal, IEEE, 2012.
- [27] Li, H.H. and et al., *Coaxial-structured ZnO-silicon nanowires extended-gate field-effect transistor as pH sensor*, Thin Solid Films. Elsevier: 2013.
- [28] Huang, B.R. and et al., *ZnO-Silicon Nanowire Hybrids Extended-Gate Field-Effect Transistors as pH Sensors*, Journal of The Electrochemical Society, 2013.
- [29] Lee, C.T. and et al., *Integrated pH Sensors and Performance Improvement Mechanism of ZnO-Based Ion-Sensitive Field-Effect Transistors*, Sensors Journal, 2014.
- [30] Maiolo, L. et al., *Flexible pH sensors based on polysilicon thin film transistors and ZnO nanowalls*, Applied Physics Letters, 2014.
- [31] Yang, P.Y. and et al., *pH Sensing Characteristics of Extended-Gate Field-Effect Transistor Based on Al-Doped ZnO Nanostructures Hydrothermally Synthesized at Low Temperatures*, Device Letters, IEEE, 2011.
- [32] Lee, C.T. and et al., *Investigation of a Photo electrochemical Passivated ZnO-Based Glucose Biosensor*, Sensors 2011, 11, 4648-4655.
- [33] Chiu, Y.S. et al., *Wide linear sensing sensors using ZnO:Ta extended-gate field-effect-transistors*, Sensors and Actuators B. Elsevier: Chemical, vol 188, November 2013, pp 944-948.
- [34] Kokot, M. et al., *Excitation-independent constant conductance ISFET Driver*, Metrology and Measurement Systems Vol. XVI (2009), No 4, pp. 631-640.
- [35] Abdul, R.R. et al., *Operation of ISFET as a pH sensor by using signal modulated reference electrode*, International Conference on Information and Multimedia Technology (2009). 548-550
- [36] Batista P.D., *An embedded measurement system for the electrical characterization of EGFET as a pH sensor*, Measurement Science and Technology 25 (2014) 027001 (6pp).
- [37] Pearce, J.M. *Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware*, Science, Vol: 337, 14 September 2012.
- [38] Fisher, D.K. et al., *Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research*, Modern Instrumentation, 2012, 1, 8-20.
- [39] Harnett, C. *Open Source Hardware for Instrumentation and Measurement*, IEEE, Instrumentation & Measurement Magazine, (2011).
- [40] Purdon, P.L. et al., *An open-source hardware and software system for acquisition and real-time processing of electrophysiology during high field MRI*, Journal of Neuroscience Methods, 175, 2008, pp. 165-186.
- [41] Christian, W. et al., *Open Source Physics*, Science, Vol: 334, 25 November 2011.
- [42] Pearce, J.M. *Commentary: Open-source hardware for research and education*, Physics Today, 66, (11), 8, 2013, doi:

- 10.1063/PT.3.2160.
- [43] Anzalone,G.C. et al., *Open-Source Colorimeter*, *Sensors*, 2013, 13, 5338-5346.
- [44] Koenka,I.J. et al., *Instrumentino: An open-source modular Python framework for controlling Arduino based experimental instruments*, *Computer Physics Communications*, 185, 2014, pp. 2724–2729.
- [45] Rorden,C.et al., *Open-source hardware for behavioral and MRI experiments*, *Journal of Neuroscience Methods*, 227, 2014, pp. 90–99.
- [46] Urban,P.L. *Open-Source Electronics As a Technological Aid in Chemical Education*,. *J Chem. Educ.* 2014, 91, pp. 751–752.
- [47] Wijnen,B.et al., *Open-Source Syringe Pump Library*, *PLOS ONE*, September 2014,v. 9,n. 9.
- [48] Van Der Bij,E. et al. *How to create successful Open Hardware projects*, *Topical Workshop on Electronics for Particle Physics*, 2013, 23–27 september 2013,perugia, Italy.
- [49] Bonaccorsi, A.et al., *Why Open Source software can succeed*, *Research Policy*, 32, 2003, pp. 1243–1258.
- [50] Kelley,C.D. et al., *An Affordable Open-Source Turbidimeter*, *Sensors*, 2014, 14, 7142-7155.