



## **SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO UTILIZADO PARA ESTIMULAR O APRENDIZADO EM ELETROMAGNETISMO**

**Marcílio A. F. Feitosa** – marcelio@poli.br  
**Gustavo O. Cavalcanti** – gustavooc@poli.br  
**Larissa M. F. Bacelar** – larissa\_bacelar@hotmail.com  
**Aline V. C. Pereira** – alinevcavalcantip@gmail.com  
Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco  
Rua Benfica, 455, Madalena  
CEP 50720-001 – Recife – Pernambuco

***Resumo:** O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de medição de campos elétricos e magnéticos com o objetivo de estimular o aprendizado em eletromagnetismo e reduzir o índice de evasão. A medição de campo elétrico foi realizada com a análise da separação de cargas induzidas em uma esfera condutora e, para a medição de campo magnético, foi empregado um sensor magneto resistivo. Foram desenvolvidos circuitos de acoplamento para conectar os sensores a uma plataforma de desenvolvimento da família Arduino. O Arduino realiza a comunicação com os sensores e converte os valores recebidos de forma que possam ser exibidos em um display nas grandezas corretas para campo elétrico e magnético. Este sistema é apenas o primeiro de uma série de experimentos/equipamentos a serem desenvolvidos pelos alunos da Escola Politécnica, com o objetivo de diminuir a evasão de alunos em disciplinas complexas como Eletromagnetismo. Uma redução de 15% na evasão entre o segundo semestre de 2012 e o primeiro semestre de 2013 é um indicativo do sucesso dessa intervenção pedagógica.*

***Palavras-chave:** Sensores, Campo Elétrico, Campo Magnético, Arduino.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de medição de campos eletromagnéticos para auxiliar no aprendizado de eletromagnetismo. Essa disciplina tradicionalmente apresenta rejeição por parte dos discentes em função da complexidade matemática exigida. O índice de reprovação em eletromagnetismo no segundo semestre de 2012, na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI), foi de aproximadamente 60%. Sendo que 40% desistiram da disciplina. Esse índice de desistência motivou o desenvolvimento de um sistema com aplicação prática para integrar e estimular os alunos. Jogos e outras técnicas de estímulo já são utilizados no ensino da matemática (LARA, 2003). O sistema escolhido foi um medidor de campo eletromagnético que está sendo construído pelos estudantes e será utilizado em um projeto de extensão. O desenvolvimento do projeto

vem estimulando os estudantes e o índice de evasão diminuiu em 15% no primeiro semestre de 2013 quando comparado com o segundo semestre de 2012.

Em Recife temos muitas comunidades situadas próximo às linhas de alta tensão da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e o projeto de extensão, que surgiu do questionamento de um aluno, será medir a intensidade de campo nessas localidades. Um sistema de medição comercial poderia ser utilizado nesse projeto, porém a proposta é que o equipamento seja aperfeiçoado a cada semestre por novos estudantes, promovendo sempre a integração e estimulando a turma.

Este sistema é apenas o primeiro de uma série de experimentos/equipamentos a serem desenvolvidos pelos alunos da Escola Politécnica, ora durante projetos de Iniciação Científica ora durante TCC's ou monitorias. O objetivo é criar uma série de projetos que possam ser aprimorados a cada semestre e estimulem os estudantes. Dessa forma, a iniciação científica é utilizada com ferramenta de estímulo acadêmico e contribui com a formação profissional do discente. Esperamos que o impacto dessas ações seja uma redução na retenção e na evasão dos cursos de engenharia da POLI.

O diagrama de blocos do sistema de medição de campos eletromagnéticos está ilustrado na Figura 1. Os sensores são as entradas do sistema e realizam a transdução do campo elétrico e magnético para sinais elétricos. Esses sinais são amplificados e seguem para um microcontrolador (numa plataforma de desenvolvimento Arduino) que determina as intensidades dos campos que foram medidos pelos sensores e as apresenta em um display. Durante a execução do projeto observou-se que estudantes de outras disciplinas poderiam contribuir com o projeto, tornando-o interdisciplinar. Alunos de Instrumentação contribuíram com a escolha e construção dos sensores, alunos de Eletrônica Analógica com o desenvolvimento e montagem dos amplificadores, os de Sistemas Digitais e Microcontroladores com a programação do microcontrolador e os de Processamento Digital de Sinais com o tratamento do sinal obtido pelos sensores. O projeto descrito a seguir envolve alunos dos cursos de Engenharia Elétrica Eletrônica, Eletrotécnica e Telecomunicações da Escola Politécnica, sendo um deles bolsista PIBIC CNPq.

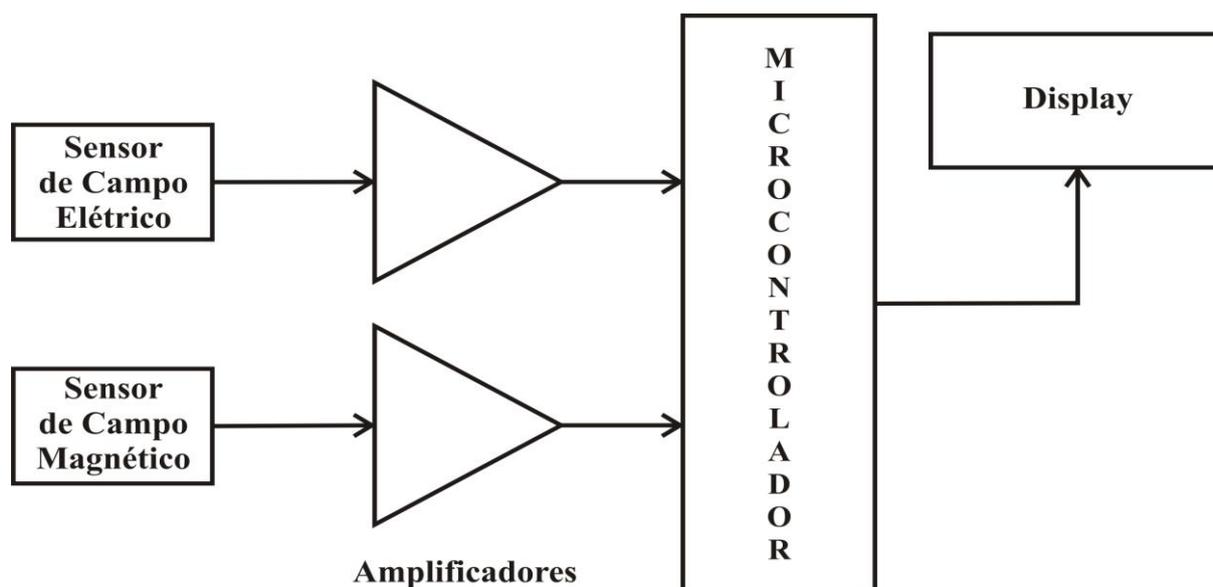


Figura 1 - Diagrama de bloco do sistema de medição de campos eletromagnéticos.



## 2. MEDIÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Linhas de transmissão e equipamentos eletrônicos, entre outros, são fontes de radiação eletromagnética de alta ou baixa frequência. O campo gerado nessas situações pode ser prejudicial à saúde (HAUPT & NOLFI, 1984) e gerar interferência em equipamentos eletrônicos (KOLB, et al., 2001). A lei que regulamenta a intensidade de campo no Brasil é a resolução normativa N° 398 da ANEEL, de 23 de março de 2010 (RESOLUÇÃO, 2010). Esta norma prevê que, para o público em geral, a máxima intensidade de campo elétrico e magnético devem ser de 4,17 kV/m e 83,33  $\mu$ T, respectivamente. Para a população ocupacional as intensidades máximas devem ser de 8,33 kV/m 416,67  $\mu$ T para campos elétricos e magnéticos, respectivamente.

A seguir descreve-se um sistema proposto a ser utilizado para realizar a medição do campo eletromagnético próximo às linhas de transmissão da CHESF e verificar se as intensidades estão dentro dos níveis previstos por Lei (RESOLUÇÃO, 2010). O desenvolvimento está sendo realizado por estudantes de engenharia da POLI, em especial os que estão cursando a disciplina de eletromagnetismo, mas com o apoio e envolvimento de alunos de outras disciplinas, numa atividade interdisciplinar. Esperamos estimular os discentes e reduzir os índices de reprovação e evasão das disciplinas, através do envolvimento dos mesmos em pesquisas e comprovação prática de conhecimentos ministrados em sala de aula. Além disso, numa próxima etapa, onde serão desenvolvidas atividades de extensão, como a medição dos campos em comunidades próximas a ambientes geradores de campos intensos, os estudantes terão a oportunidade de conhecer subestações, ambientes industriais e linhas de transmissão de alta tensão.

### 2.1. Medição de Campo Magnético

Foram analisados dois tipos de sensores para detecção de campo magnético. O primeiro, baseado em antenas tipo dipolo, é capaz de medir diretamente campos elétricos e magnéticos. O segundo, baseado em ligas magneto-resistivas e comercializado na forma de circuitos integrados, é capaz de medir apenas campo magnético. A medição do campo elétrico foi realizada com a análise da separação de cargas induzidas em uma esfera condutora. Já para a medição do campo magnético optou-se pelo sensor magneto-resistivo no qual, quando um campo magnético atua sobre esse material, os domínios magnéticos mudam de posição fazendo com que a resistência elétrica do mesmo mude de valor. Sua escolha se deu ao seu baixo custo, baixo consumo e facilidade de comunicação via protocolo serial de 2 fios apenas.

O medidor de campo magnético emprega uma plataforma Arduino para fazer a aquisição do sinal proveniente do sensor e apresentar o resultado no display, conforme ilustrado na Figura 2. O sistema da Figura 2 poderá também fazer a aquisição dos dados durante um determinado tempo e enviar estes dados a um notebook via canal serial (USB) para futura geração de gráficos indicativos da evolução dos campos e tratamentos estatísticos. O sistema pode incorporar alarmes de forma a emitir sinais sonoros toda vez que o campo medido exceder os limites pré-estabelecidos pela resolução normativa da ANEEL.

O sensor magneto resistivo comercial escolhido foi o HMC5883L da Honeywell, capaz de medir campos magnéticos de  $-8$  a  $8$  Gauss ( $-800$  a  $800$   $\mu$ T). O HMC é de uma série de sensores magneto-resistivo com medição nos três eixos coordenados ortogonais  $x$ ,  $y$  e  $z$  que apresenta linearidade, baixa histerese, saída nula, e estabilidade no fator de escala sobre a temperatura.

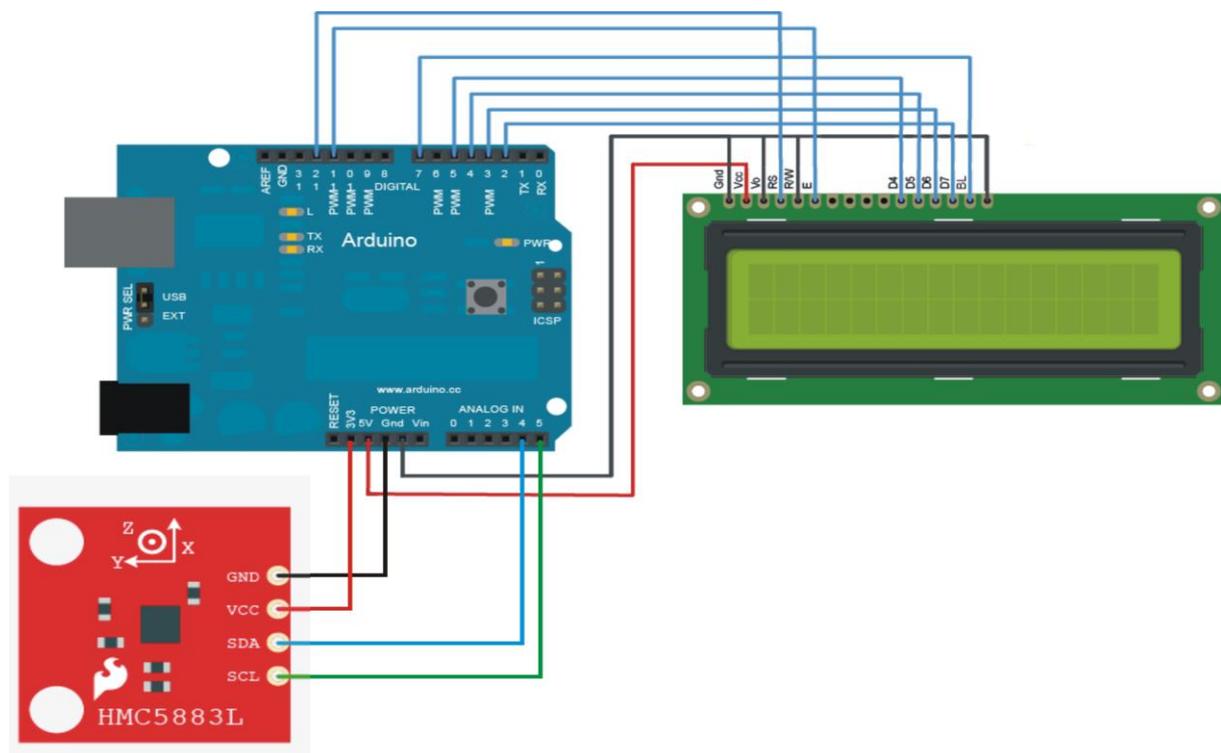


Figura 2 - Diagrama do circuito do medidor de campo magnético.

O sensor se comunica com a plataforma Arduino por meio do protocolo de comunicação  $I^2C$  utilizando as conexões ilustradas na Figura 2. O HMC5883 gera os sinais de saída  $X_{OUT}$ ,  $Y_{OUT}$  e  $Z_{OUT}$  que representam os três eixos de orientação do campo magnético que está sendo medido. O sensor foi colocado próximo a um transformador de fonte de tensão para verificar seu funcionamento e o campo magnético foi medido em função do tempo. A Figura 3 apresenta a amplitude da transformada de Fourier do campo magnético medido. Podemos destacar duas contribuições do campo magnético medido e apresentado na Figura 3. A primeira é a componente do campo gerado pela terra e a segunda é o campo gerado pelo transformador.

No presente estágio o medidor de campo magnético está montado como ilustrado na Figura 2, porém a transformada de Fourier está sendo calculada em um computador. O próximo passo será implementar a transformada na plataforma Arduino para tornar o sistema autônomo e passar a realizar medições em campo. O envolvimento de alunos de outras disciplinas nessa etapa é muito interessante. Alunos de Processamento Digital de Sinais podem comprovar o espectro gerado por uma fonte alvo da monitoração. Já alunos de Microcontroladores e/ou de programação partem para a implementação embarcada do código da FFT.

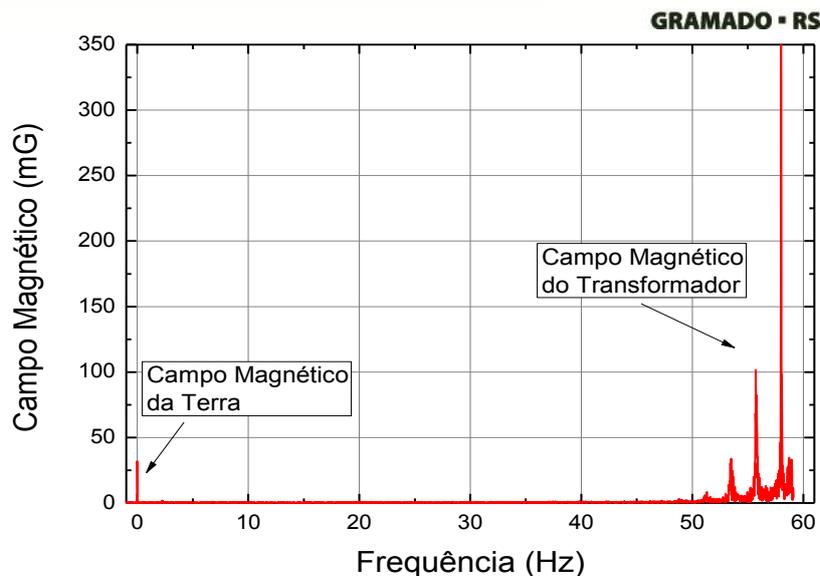


Figura 3 - Amplitude do campo magnético em função da frequência.

## 2.2. Medição de Campo Elétrico

O sensor de campo elétrico utilizado no sistema ilustrado na Figura 1 foi construído a partir de duas semiesferas condutoras separadas por um isolante, conforme ilustrado na Figura 4. O campo elétrico induz uma separação de cargas nos meios condutores e a quantidade de cargas separadas é proporcional ao campo elétrico aplicado (SADIKU, 2004). Esse fenômeno pode ser utilizado para construção de sensores de campo elétrico (SWINKA, 1998). O sensor de campo elétrico, ilustrado na Figura 4, na presença de um campo elétrico alternado, produz um sinal elétrico também alternado que após amplificação e condicionamento é utilizado na medição de campo elétrico.

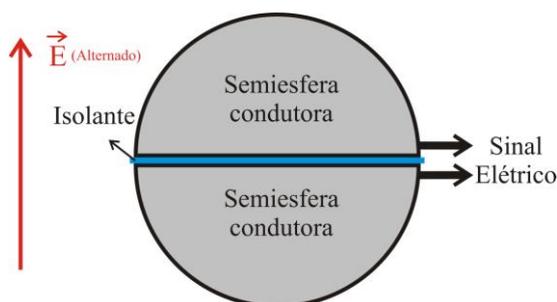


Figura 4 - Sensor de campo elétrico.

O sensor de campo elétrico proposto neste trabalho baseia-se no princípio do deslocamento de cargas causado pela incidência de um campo elétrico sobre um corpo condutor (HALLIDAY, 1993). Por possuir uma forma uniforme, sem cantos vivos ou pontas que provocam grandes irregularidades na distribuição de cargas sobre o corpo, adotou-se o formato esférico como transdutor para o sensor.

Seja  $\sigma$  a densidade superficial de cargas para uma esfera (SWINKA, 1998)

$$\sigma = 3\epsilon_0 E_0 \cos\theta, \quad (1)$$



entretanto

$$\sigma = \frac{dQ}{dS}. \quad (2)$$

Logo, de (1) e (2), vem

$$dQ = \sigma dS. \quad (3)$$

Em coordenadas esféricas o elemento diferencial de área  $dS$  é dado por

$$dS = r^2 \sin\theta d\theta d\phi. \quad (4)$$

Como a carga elétrica distribuída em um corpo condutor está situada sobre sua superfície, é dispensável uma esfera maciça para a aplicação do princípio em pauta. Porém, por questões construtivas, adotar-se-á uma esfera maciça. Isso se deve ao fato de que a usinagem do tarugo para se criar as superfícies esféricas teria um maior custo comparado à esfera maciça. Além disso, com uma casca esférica é necessário o preenchimento de toda a cavidade da mesma com um dielétrico a fim de se evitar que ela esteja preenchida com ar, pois o ar tem sua constante dielétrica variável com as condições do ambiente.

A esfera é confeccionada em alumínio e é bipartida pelo centro; tendo-se assim duas semiesferas idênticas. As semiesferas são montadas para comporem uma esfera inteira, porém com uma separação entre as semiesferas feita por um material dielétrico homogêneo. Assim, quando da incidência de um campo elétrico sobre a esfera, uma das metades terá sua carga elétrica deslocada do seu estado inicial, o que induzirá um deslocamento de cargas proporcional na outra metade. Como há um dielétrico impedindo o fluxo direto de cargas de um dos lados para o outro, não há troca de cargas entre as esferas, apenas a indução ao deslocamento das mesmas. A carga deslocada pelo campo elétrico de uma das semiesferas para a outra é obtido da integração da equação (3)

$$Q = \int \sigma dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma dS, \quad (5)$$

e integrando na esfera de raio  $R$ , vem

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} R^2 \sin\theta d\theta d\phi = 3\pi R^2 \epsilon_0 E_0. \quad (6)$$

Como o sensor proposto se destina à medição de campos elétricos alternados, o deslocamento de cargas também será alternado, com a mesma frequência do campo. Portanto, o deslocamento de cargas causado nas semiesferas gera uma corrente alternada no tempo. Esta corrente é o sinal enviado ao circuito do sensor para medição do campo elétrico incidente no transdutor. Por ser um material com propriedades magnéticas lineares, utiliza-se para a construção da esfera o alumínio (REZENDE, S. M., 2004). Além disso, o alumínio é uma alternativa que não agrega muita massa ao módulo, além de ser um material de fácil usinagem.

A corrente definida por

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

em que a carga está definida em (6) e  $E_0$  é senoidal no tempo na forma

$$E_0 = E_{0Max} \sin(\omega t). \quad (8)$$

O  $\omega$  é a frequência angular do campo e  $E_{0Max}$  é o valor máximo do módulo do campo aplicado. Substituindo (6) e (8) em (7) obtemos a corrente induzida nas semiesferas

$$I = 3\pi R^2 \varepsilon_0 E_{0Max} \omega \cos(\omega t). \quad (9)$$

O circuito utilizado na saída do transdutor deve ser capaz de captar a intensidade da corrente deslocada induzida de uma semiesfera para a outra e converter este sinal em um valor proporcional ao campo incidente. O transdutor pode ser modelado como uma fonte de corrente com frequência igual a do campo incidente e proporcional a ele. A Figura 5 ilustra o circuito desenvolvido para o tratamento do sinal de saída das semiesferas. O primeiro estágio é um amplificador, uma vez que a corrente induzida é de nano amperes (SWINKA, F. V. & ROBERT, R., 1998). O segundo é um integrador, necessário para eliminar a dependência da corrente produzida pelo transdutor com a frequência do campo. O último estágio é um retificador que gera um nível de tensão contínua proporcional ao campo aplicado.

Utilizando a Equação (9) determinamos a grandeza da corrente  $I$  em função do raio da esfera  $R$ . Para possibilitar maior mobilidade e menor custo do transdutor foi construída uma esfera de 10 cm de diâmetro. No presente estágio a esfera foi construída, o circuito foi montado e testado em uma placa de protoboard. Os próximos passos serão construir uma placa de circuito impresso e converter o nível de tensão em campo elétrico que será calibrado empregando um sensor comercial disponibilizado pela CHESF. A Figura 6 apresenta uma fotografia da esfera de alumínio construída, do sensor de campo magnético e do Arduino que estão sendo utilizados neste projeto.

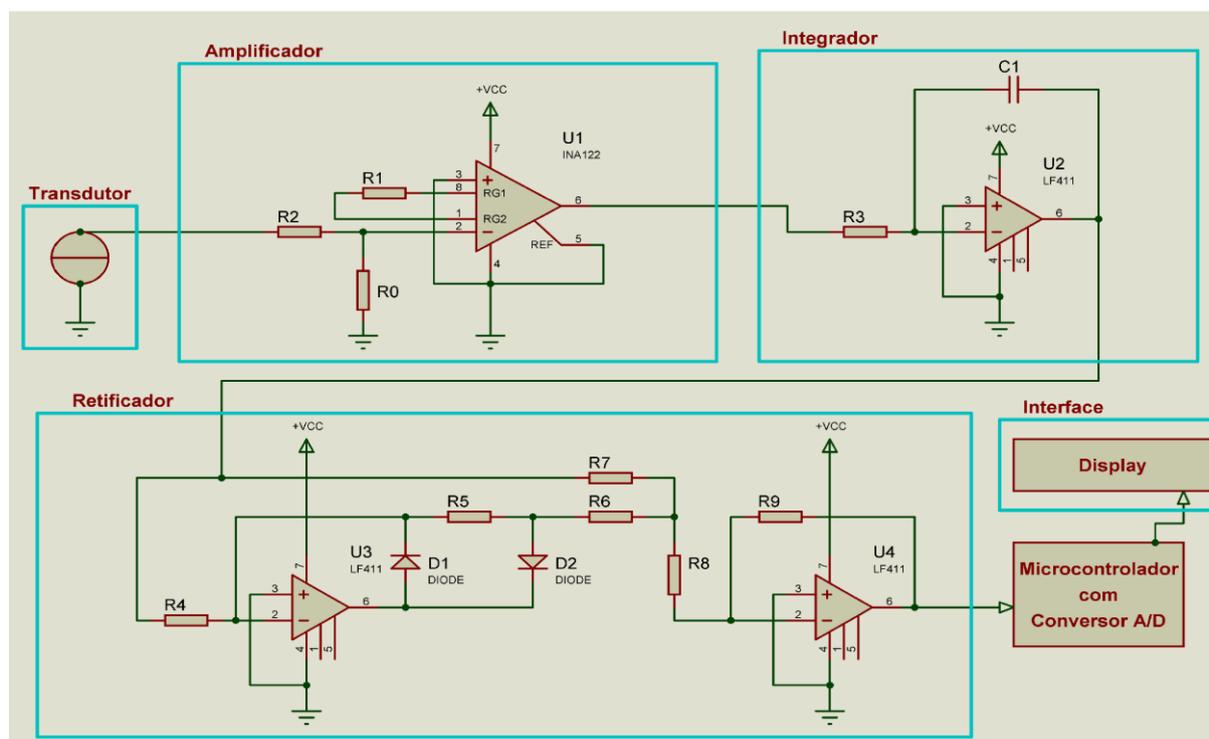


Figura 5 - Circuito condicionador do sinal de saída do transdutor de campo elétrico.



Figura 6 - Fotografia da esfera de alumínio do sensor de campo elétrico, do sensor de campo magnético e da plataforma Arduino utilizados no projeto.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Evidenciamos uma redução de 15% na evasão entre o segundo semestre de 2012 e o primeiro semestres de 2013. Essa diminuição pode até não ser atribuída diretamente às intervenções pedagógicas adotadas, mas há um forte indicativo que o tenham sido. O dia a dia mostra que o desenvolvimento de sistemas, como o proposto neste trabalho e outros semelhantes, estimulam os estudantes, que mais motivados acabam crescendo academicamente.

Os sistemas de medição de campo elétrico e magnético estão em fase final de desenvolvimento. O sinal analógico obtido do sensor de campo elétrico (esfera) é condicionado e enviado ao Arduino, através de uma de suas entradas analógicas. O sinal referente ao campo magnético é obtido pelo sensor magneto-resistivo e enviado ao Arduino por comunicação serial. O sistema microcontrolado, por sua vez, ajusta os valores obtidos de forma que sejam exibidas no display LCD as informações referentes aos campos nas unidades desejadas, como pode ser visto na Figura 7.

A fase em destaque agora é o início do projeto de extensão. A perspectiva de medição de campo em áreas industriais, subestações e áreas próximas às linhas de transmissão está motivando os alunos de eletromagnetismo que desejam participar das visitas mesmo já tendo concluído a disciplina. Os alunos, envolvido até o momento, estão apresentando maior comprometimento com a conclusão do curso de graduação e estão servindo de “veículo” para os demais estudantes.

A interação entre os alunos de diversas disciplinas em atividades interdisciplinares era um desejo antigo de alguns professores, pois pretende-se com isso fazer os alunos vivenciarem a solução de problemas de forma ampla, mesclando conceitos e aprendizados. Com isso objetiva-se também um maior comprometimento e interesse por parte dos alunos, não em uma, mas em todas as disciplinas.

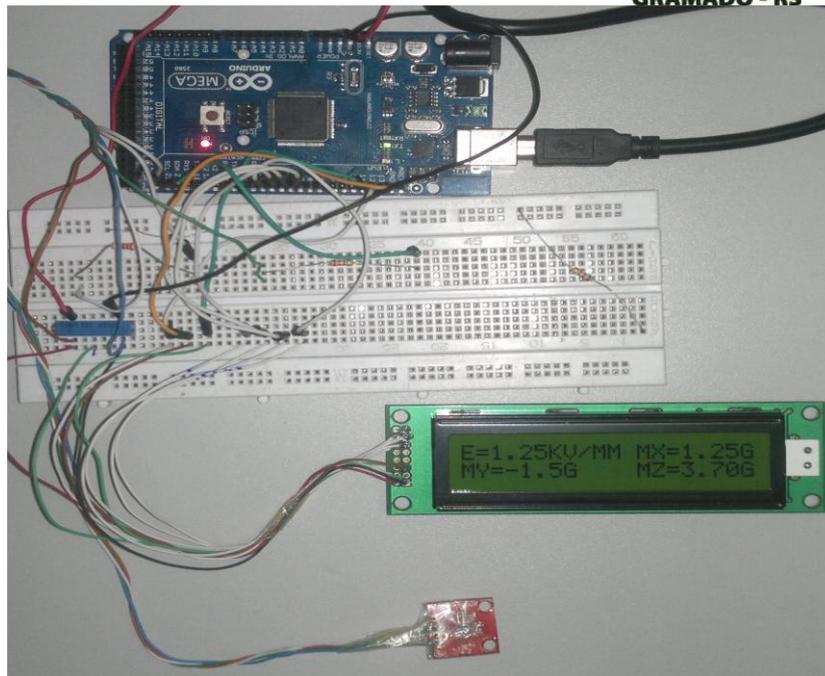
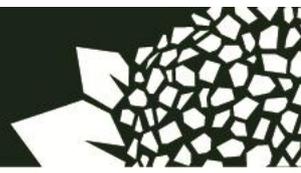


Figura 7 - Sistema de medição de campo magnético em funcionamento.

Em trabalhos futuros pretende-se desenvolver outros experimentos/equipamentos envolvendo outros conceitos, outros conhecimentos e outras disciplinas, criando-se assim um leque de atividades motivadoras ao alunado.

### *Agradecimentos*

À Universidade de Pernambuco pelo incentivo financeiro e pela estrutura física disponibilizada e à Companhia Hidroelétrica do São Francisco CHESF pela disponibilização de suas estruturas para as visitas dos alunos e pelo empréstimo do equipamento comercial de medição de campo elétrico.

## **4. REFERÊNCIAS / CITAÇÕES**

HALLIDAY, D., RESNICK, R. and WALKER, J. "Fundamentals of Physics", 4th edition, 1993.

HAUPT, R. C. and NOLFI, J. R. "The Effects of High Voltage Transmission Lines on the Health of Adjacent" Public Health, Vol. 74, No. 1, January 1984.

KOLB C., ZRENNER B. and SCHMITT C. "Incidence of Electromagnetic Interference in Implantable Cardioverter Defibrillators" Journal of Pacing and Clinical Electrophysiology, Volume 24, No. 4, Part 1, April 2001.

LARA, I. C. M. "Jogando com a matemática de 5ª a 8ª série." São Paulo: Editora Rêspel, 2003.



RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 398, de 23 de março de 2010. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf)> Acesso em: 21/01/2013.

REZENDE, S. M. “Materiais e Dispositivos Eletrônicos,” 2ª edição São Paulo Editora Livraria da Física, 2004.

SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 3ª edição, Editora Bookman, 2004.

SWINKA, F. V., ROBERT, R. “Desenvolvimento de um sensor de campo elétrico alternado com transmissão por fibra-óptica” Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 13, No. 3, Setembro 1998.

## **ELECTROMAGNETIC FIELD MEASUREMENT SYSTEM USED TO STIMULATE LEARNING IN ELECTROMAGNETISM**

**Abstract:** *This paper describes the development of sensors for measuring electric and magnetic fields in order to stimulate learning in electromagnetism and reduce the evasion. The measurement of the electric field was performed by analysis of induced charge separation in a conductive sphere and the measurement magnetic field has been employed a magneto resistive sensor. Coupling circuits were developed to connect the sensors to a microcontroller Arduino. The Arduino performs communication with the sensors, converts the voltage levels measured in electric and magnetic fields and shows the results on a display. This system is just the first of a series of experiments/equipments to be developed by the students of the Polytechnic School, with the goal of decreasing the dropout students in disciplines as complex as electromagnetism. A 15% reduction in dropout between the second half of 2012 and the first half of 2013 is indicative of the success of this educational intervention.*

**Key-words:** *Sensors, Electric field, Magnetic field, Arduino.*