

Um Aparato Experimental para Estudo e Desenvolvimento de Circuitos de Acondicionamento de Sinal: Uma Experiência Pedagógica

M. Gomes^{(1) (2)}, A. Pinto ^{(1) (2)}, P. Fazenda^{(1) (2)}, J. Casaleiro^{(1) (2)}

¹ Dept. de Eng. de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores
Secção de Electrónica Aplicada
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Rua Conselheiro Emídio Navarro, N. 1, 1950-062 Lisboa
sea@cedet.isel.ipl.pt Tel.218317000 <http://www.isel.ipl.pt>

² Centro de Estudos e Desenvolvimento de Electrónica e Telecomunicações
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Rua Conselheiro Emídio Navarro, N. 1, 1950-062 Lisboa
contact@cedet.isel.ipl.pt Tel.218317284 <http://www.cedet.isel.ipl.pt>

Resumo

Este documento descreve um aparato experimental desenvolvido pelos autores e relata alguns aspectos da respectiva experiência pedagógica que tem constituído a sua utilização na componente laboratorial de uma disciplina da área da electrónica aplicada. O aparato contém sensores e actuadores incorporados em dois tanques de água e é direccionado para o estudo e teste dos respectivos circuitos de acondicionamento de sinal. A modelação das funções características dos sensores e o desenvolvimento de simples algoritmos de controlo é também exercitado na utilização deste sistema. No contexto académico em que tem sido utilizado, pode encarar-se este sistema como uma reprodução em pequena escala de um hipotético processo industrial, o que tipicamente contribui para uma maior motivação por parte dos alunos e facilita a concepção de enunciados de trabalhos que promovam uma atitude direccionada ao processo como um todo e menos numa soma de tarefas individuais não relacionadas.

1. Introdução

A importância do estudo de sistemas realimentados e, de uma forma geral, do controlo de sistemas é frequentemente patente em publicações de carácter eminentemente pedagógico [1] [2] [3], mesmo que nesse estudo sejam abordadas apenas noções básicas. Para a realização de trabalhos laboratoriais de índole pedagógica relacionados com aquelas áreas, estão comercialmente disponíveis aparatos experimentais que são tipicamente dedicados a um conjunto pré-determinado de experiências e que na generalidade dos casos utilizam sensores e actuadores com acondicionamento de sinal embutido. O foco habitual destes sistemas é a validação de sistemas de controlo, eventualmente para desenvolvimento e teste de algoritmos específicos, deixando pouco espaço para o estudo e ensaio dos circuitos de acondicionamento de sinal associados aos sensores e actuadores do aparato. Em diversos contextos académicos, nomeadamente na área da electrónica aplicada, algumas disciplinas contêm no seu currículo o estudo de circuitos de acondicionamento de sinal para sensores e actuadores. Nestas disciplinas, poderia ser motivante para os alunos se este estudo pudesse ser aplicado a sensores e actuadores reais integrados num sistema/processo a ser controlado, mesmo que construído propositadamente para fins académicos. O aparato experimental descrito neste documento foi desenvolvido para preencher esta necessidade.

2. Descrição do Aparato Experimental

O sistema didáctico apresentado neste documento engloba diversos componentes, dos quais alguns serão aqui descritos e outros apenas referidos. Este aparato experimental foi construído integralmente nas instalações do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), sendo habitualmente utilizado pelos alunos na disciplina “Electrónica de Aquisição e Processamento” do Curso de Licenciatura em Engenharia de Sistemas das Telecomunicações e Electrónica deste instituto.

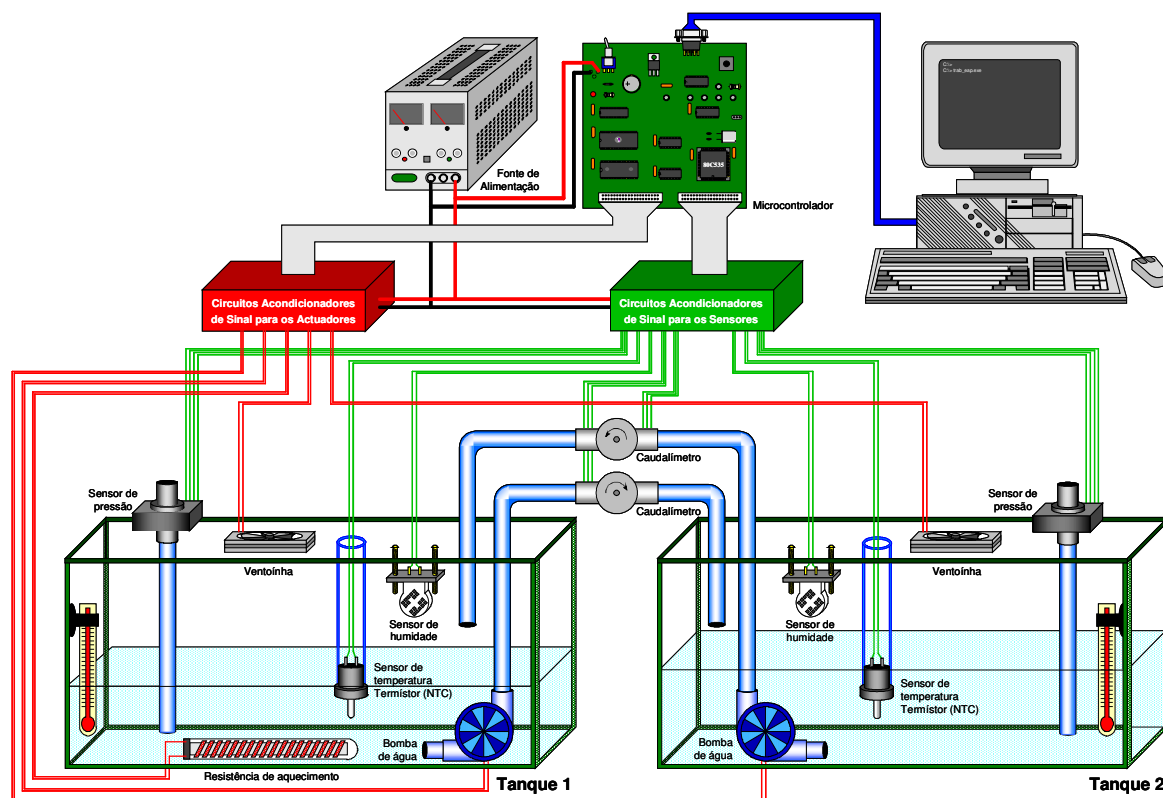


Figura 1 : Diagrama do aparato experimental.

O aparato é constituído por dois tanques de água, com a dimensão aproximada de 40cm x 20cm x 30cm, nos quais estão instalados diversos sensores e actuadores. Na figura 1 está representado um diagrama esquemático do aparato experimental e respectivas ligações a circuitos de acondicionamento de sinal que por sua vez estão ligados a um microcontrolador. Cada tanque é tapado por uma placa de acrílico (não representada na figura) que suporta a ventoinha e permite criar algum isolamento entre o ar no interior do tanque e a atmosfera ambiente, sendo assim possível obter uma humidade relativa no interior diferente daquela presente no exterior do tanque. Para realização da medição de algumas das variáveis do sistema composto pelos dois tanques existem os seguintes sensores: um sensor de temperatura para medição da temperatura da água; um sensor de humidade para medição da humidade relativa do ar no interior do tanque; um sensor de caudal instalado no tubo de exaustão de água que permite medir a quantidade de água extraída do tanque; e um sensor de pressão que é utilizado para o cálculo do volume de água contida no tanque. É ainda possível medir a velocidade de rotação da ventoinha uma vez que esta contém um sensor para este efeito. Para interactuar com o sistema existem três actuadores: a ventoinha já mencionada, a bomba que permite extrair água de cada tanque e uma resistência de aquecimento da água.

2.1. Controlo da temperatura da água

O sensor de temperatura da água é uma termistância do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) encapsulada num invólucro impermeável e sem qualquer acondicionamento de sinal. Esta termistância está permanentemente imersa e tem uma localização fixa no tanque. Para diminuir o gradiente térmico da água, existe uma bomba de água permanentemente ligada (não representada no diagrama esquemático) cuja função é apenas agitar a água no tanque.

Os circuitos de acondicionamento de sinal habitualmente propostos pelos alunos para este sensor são relativamente simples, sendo baseados em divisores de tensão resistivos ou em variantes dos amplificadores inversor e não inversor realizados com amplificadores operacionais. Em conjunto com o programa que é executado no microcontrolador, o que os alunos na realidade projectam com estes circuitos é um ohmímetro optimizado para uma gama específica calculada em função das características da termistância e da gama de temperatura que se pretende medir. Por vezes, os alunos projectam circuitos mais elaborados como os representados na figura 2.

Para caracterizar estaticamente a termistância os alunos utilizam, na generalidade dos casos, o habitual modelo de dois parâmetros [4] dado pela equação $R_T \approx R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$, adoptando para R_0 e β os valores típicos fornecidos pelo fabricante. No entanto, alguns alunos tentam validar aquela equação (e respectivos parâmetros) realizando testes experimentais e comparando a medição de temperatura da água obtida pelo sistema por eles projectado e dois termómetros de mercúrio que estão permanentemente imersos no tanque. Esta atitude é particularmente bem vinda porque exercita uma atitude crítica que os alunos devem ter face aos valores de parâmetros habitualmente fornecidos pelos fabricantes com a designação de “valor típico”, que são frequentemente adoptados como válidos para acelerar a produção de resultados experimentais sem o necessário cuidado de validação experimental, nomeadamente em situações onde é exigido algum rigor na medição em causa.

A modelação dinâmica deste sensor só raramente é abordada pelos alunos.

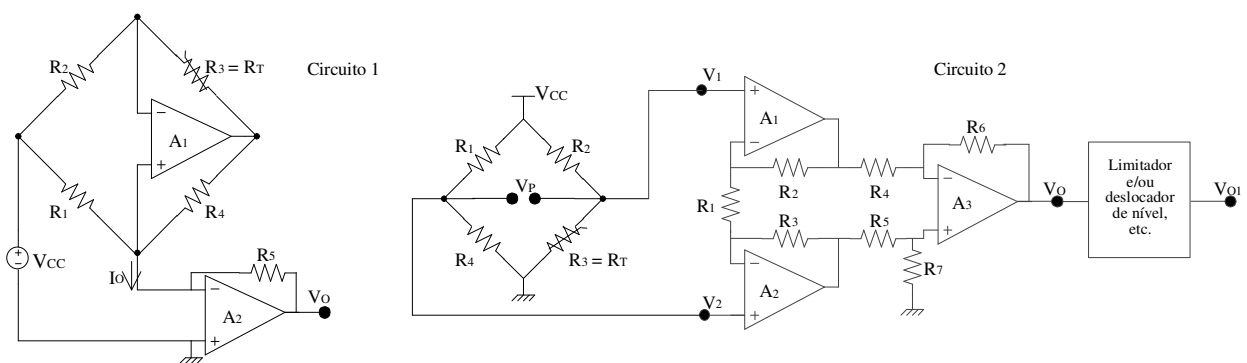


Figura 2 : Exemplo de outros circuitos de acondicionamento de sinal para a termistância.

A termistância é exemplo de um sensor com função característica não linear mas com modelo conhecido.

Os circuitos de acondicionamento de sinal habitualmente projectados pelos alunos para actuação da resistência de aquecimento da água, sendo circuitos que interligam o microcontrolador a um relé (de isolamento da rede de 230 V), são baseados em topologias de dois ou três transístores bipolares que constituem um amplificador de corrente contínua para operação em regime de comutação.

2.2. Controlo da humidade do ar

Cada tanque possui um sensor de humidade do ar instalado no seu interior. Este sensor é utilizado para medição da humidade relativa do ar dentro dos tanques, que é normalmente superior à humidade relativa do ar no exterior destes por efeito da constante evaporação da água. É possível diminuir a humidade no interior dos tanques activando a ventoinha do respectivo tanque, uma vez que esta força a exaustão do ar nele contido, causando a sua renovação por troca com o ar do exterior. Esta troca é possível dado que o tampo dos tanques não é estanque, permitindo a entrada de ar do exterior por diversos pontos distribuídos pela sua superfície.

O modelo utilizado para o sensor de humidade é o de um condensador variável, cuja capacidade é alterada pela quantidade de vapor de água existente no meio em que o sensor se encontra. Na realidade trata-se de um condensador de placas paralelas, de geometria fixa, cujo material presente entre placas¹ está em contacto com o ar e tem uma constante dielétrica que varia com a quantidade de vapor de água a que está exposto. A curva de calibração deste sensor (figura 3) não é linear e os alunos optam normalmente por realizar uma aproximação por troços lineares ou por interpolação polinomial desta curva.

Dos vários sensores disponíveis no aparato experimental, este é o que suscita maior apreensão inicial por parte dos alunos (por ser capacitivo), originando mais dúvidas quanto às possíveis soluções para o acondicionamento de sinal e tornando-se assim o sensor que tipicamente gera o maior desafio. No entanto, as soluções encontradas pelos alunos não são necessariamente mais complexas para este sensor do que para os restantes.

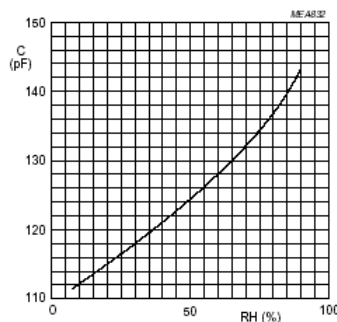


Figura 3 : Curva de calibração do sensor de humidade.

A solução que é mais frequentemente proposta pelos alunos para realização do acondicionamento de sinal deste sensor é um circuito estável de sinal rectangular, cuja frequência depende de uma malha R-C da qual faz parte o sensor. Desta forma a capacidade do sensor é determinada pela medição da frequência que pode ser realizada por um programa executado pelo microcontrolador. Alguns alunos sugerem a conversão daquela frequência para tensão, sendo esta depois medida pelo conversor analógico-digital do microcontrolador. Outras soluções propostas são baseadas em circuitos monoestáveis, para os quais a duração do pulso de saída é determinada pela capacidade do sensor. Esta duração é medida pelo microcontrolador que é também o responsável pela emissão do pulso de início da temporização.

Ocasionalmente são apresentadas soluções para medição da capacidade baseadas na determinação da impedância (ou admitância) do sensor a uma frequência fixa. Nestes casos, a topologia empregue é baseada

¹ O óxido de alumínio é frequentemente utilizado como dielétrico em sensores de humidade do ar [4] mas há vários outros materiais em utilização e em estudo para este efeito [5].

no diagrama da figura 4. A geração do sinal sinusoidal é frequentemente obtida com um oscilador em ponte de Wien, sendo interessante constatar que os alunos não utilizam um circuito standard, igual de grupo para grupo, sugerindo antes variantes da topologia básica para a resolução do controlo da amplitude ou da alimentação única (não simétrica).

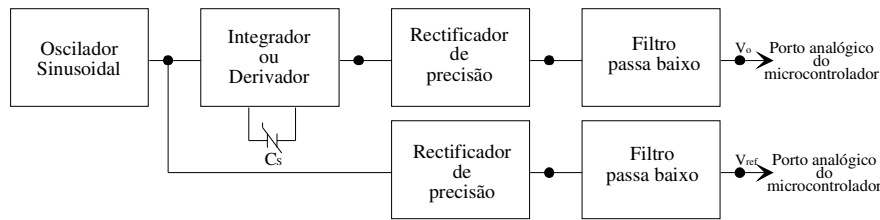


Figura 4 : Acondicionamento do sensor de humidade com oscilador sinusoidal.

Na figura 4 o sensor está incluído no segundo bloco, que para alguns alunos é concretizado por um integrador não-ideal mas para outros o é por um derivador não-ideal. Em ambos os casos, estes circuitos são dimensionados de modo a que a amplitude do respectivo sinal de saída varie com a capacidade do sensor o suficiente para poder ser medida pelo conversor analógico-digital depois do sinal ser processado por um detector de envolvente. Este detector é habitualmente efectuado por um rectificador de precisão seguido de um filtro passa baixo. Alguns alunos duplicam o detector de envolvente para tornarem possível a medição da amplitude do sinal de saída do oscilador sinusoidal, o que é particularmente importante se esta não for constante. Nestes casos, mesmo que haja variações daquela amplitude, o ganho do integrador (ou derivador) é avaliado correctamente, o que é essencial para o cálculo da impedância (admitância) do condensador.

O sensor de humidade é exemplo de um sensor com função característica não linear cujo modelo não é fornecido aos alunos, sendo apenas conhecido o gráfico típico daquela função.

O acondicionamento de sinal habitualmente projectado pelos alunos para o actuador que permite variar a humidade relativa do ar dentro do tanque, a ventoinha, é baseado em circuitos que realizam amplificadores de corrente contínua para ataque directo da ventoinha. Na generalidade dos casos são amplificadores para operar em regime de comutação (ventoinha ligada/desligada) mas por vezes os alunos realizam topologias lineares para actuação proporcional da velocidade angular da ventoinha.

2.3. Controlo do volume de água contido no tanque

É possível calcular o volume de água contido no tanque através da determinação da altura de água realizada por um sensor de pressão de ar do tipo diferencial. Este sensor mede a diferença entre as pressões a que estão sujeitos os seus dois portos, p_1 e p_2 (figura 5), e está montado num tubo vertical inserido no tanque, na configuração descrita na figura 5. Nesta configuração, um dos portos está sujeito à pressão atmosférica e o outro à pressão do ar que está dentro do tubo. Estas pressões são iguais entre si e iguais à pressão atmosférica se o tanque estiver sem água, mas são diferentes se existir água dentro do tanque, que comprimirá o ar dentro do tubo. A pressão dentro do tubo ficará então superior à pressão atmosférica, o que possibilita o cálculo da altura da água no tanque e conseqüentemente o cálculo do volume de água nele contido. Este sensor de pressão é baseado no efeito piezoresistivo, sendo composto por uma ponte de Wheatstone cujos ramos são piezoresistências. Estas piezoresistências deformam-se solidariamente com um diafragma que está sujeito às pressões de ar presentes nos portos p_1 e p_2 . Esta topologia de construção de sensores de pressão é frequentemente utilizada para sensores de baixo custo produzidos em grandes quantidades [6]. Se não houver

água no tanque, a pressão em ambos os portos do sensor é igual à pressão atmosférica, sendo portanto nula a pressão diferencial, ficando assim a ponte em equilíbrio. Quando existe diferença de pressões o diafragma deforma-se, provocando então o desequilíbrio da ponte de piezoresistências.

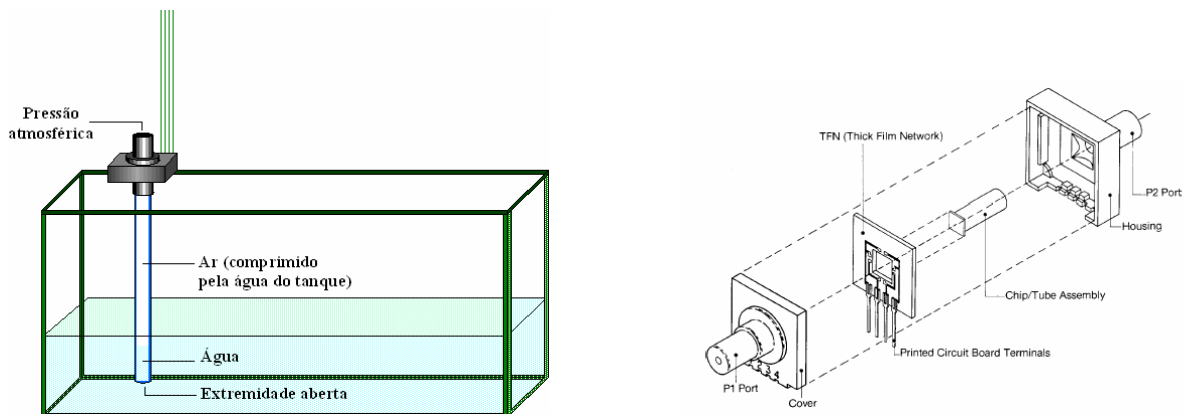


Figura 5 : Estimação do nível de água utilizando um sensor de pressão.

Embora este sensor tenha uma função característica linear, com sensibilidade fornecida pelo fabricante, a relação entre a pressão diferencial e o volume de água no tanque não é dada aos alunos. Esta relação é também linear, pelo que o subsistema de medida envolvendo este sensor é exemplo de um sistema linear com função característica desconhecida, que assim terá que ser estimada experimentalmente pelos alunos.

Os circuitos de acondicionamento de sinal para actuação da bomba de água habitualmente desenvolvidos pelos alunos são muito semelhantes aos utilizados para actuação da resistência de aquecimento uma vez que também a bomba de água está isolada da rede de 230 V por um relé.

2.4. Exemplo de um trabalho realizado com o aparato

No enunciado de um trabalho realizado com este aparato experimental é solicitado aos alunos que desenvolvam circuitos de acondicionamento de sinal (e um programa a ser executado num microcontrolador) para resolução do seguinte problema (este exemplo é centrado apenas num dos tanques).

Admita-se que o tanque 1 funciona como reservatório intermédio num determinado processo industrial, colocado imediatamente antes da ligação daquele processo à rede pública de saneamento básico. Pretende-se com este reservatório evitar que a água (ou outro líquido, embora neste aparato apenas se use água) seja descarregada para esta rede em condições impróprias, por exemplo demasiado fria. Para cumprir este requisito, exige-se que a temperatura da água expelida deste reservatório seja sempre superior a um determinado limiar. É também necessário garantir que existe sempre um volume mínimo de água para se evitar que a resistência de aquecimento fique emersa. Simultaneamente pretende-se que a humidade relativa do ar dentro do tanque não seja superior a um determinado limiar (por exemplo para minorar a oxidação de peças metálicas). Deve ainda admitir-se que a entrada de água neste reservatório ocorre aleatoriamente (no tempo e em quantidade).

Para cumprimento destes objectivos é necessário estimar a temperatura da água, a humidade relativa do ar e o nível de água no reservatório. Depois, de acordo com algoritmos desenvolvidos pelos próprios alunos, o microcontrolador deverá actuar a resistência de aquecimento e/ou a ventoinha e/ou a bomba de água de forma automática, ou seja, sem intervenção do utilizador. Não são fornecidos esquemas de circuitos para realização do acondicionamento de sinal, pelo que é tarefa dos alunos projectar e construir estes circuitos (bem como desenvolver o programa de controlo).

3. Notas Finais

No contexto académico a que se refere este documento, pretendeu-se com a utilização deste aparato promover a capacidade dos alunos de reconhecimento dos problemas concretos que há a resolver face a uma situação prática, a correcta descrição destes, e a sua consequente resolução através de procedimentos metódicos previamente estudados e ensaiados, como é frequente na prática da engenharia. Pretendeu-se encorajar uma atitude mais focada no problema global a resolver (no processo como um todo) e não tanto na tarefa individual, como é frequentemente o caso em trabalhos de engenharia com equipas multidisciplinares: “*As business organizations move from Task-Centered (TCO) to Process-Centered (PCO) Organizations, people work on **processes**, not in individual tasks. A **process** is a complete, end-to-end set of related tasks (or activities) that together create value for a customer*” (in [7]).

De uma forma geral os alunos reagem bem aos trabalhos que utilizam este aparato, embora refiram frequentemente que poderiam ser menos extensos. Na opinião dos autores, a dificuldade que a generalidade dos alunos enfrenta no contacto com este aparato experimental, e que o torna “extenso”, prende-se essencialmente com a falta de realização prática de circuitos electrónicos e com o intervalo que medeia entre a realização deste trabalho e a última disciplina da área da electrónica aplicada por eles realizada. É muito frequente haver alunos para quem este período é superior a dois anos, não sendo raro existirem alunos com mais de dez anos volvidos.

É de realçar a diversidade de soluções que os alunos têm apresentado para resolver o problema que lhes é apresentado. Não sendo dados nas aulas circuitos direccionados para utilização no aparato experimental, é bastante satisfatório observar que, na generalidade, os alunos conseguem propor, estudar, dimensionar e colocar a funcionar circuitos que cumprem os objectivos que lhes foram propostos.

Na sua essência, este documento relata aspectos de uma experiência pedagógica na área da docência da engenharia electrotécnica, fazendo parte de um todo que tem sido a experiência de leccionar uma disciplina desta área. No nosso meio académico este tipo de iniciativas não terão a ocorrência que desejaríamos, até pela ocupação temporal que implicam. Como é do conhecimento geral no ensino superior: “*The amount of effort that the academic staff dedicates do pedagogical activities is relatively small. These activities are much less rewarded then research activities*” [8]. No entanto, estas experiências são importantes na busca de um aperfeiçoamento das técnicas de ensino.

4. Referências

- [1] Albright, Robert J., Hoffbeck, Joseph P., “Discovering the Effects of Feedback on Control Systems: Informative and Interesting Numerical Exercises”, *IEEE Trans. on Education*, 44(2), pp. 104-108, 2001.
- [2] Eydgahi, Ali M. e Ghavamzadeh, Mohammad, “Complementary Root Locus Revisited”, *IEEE Transactions on Education*, 44(2), pp. 137-143, 2001.
- [3] Giron-Sierra, J., “A Simple Device and a Project for the Nonlinear Control Systems Laboratory”, *IEEE Transactions on Education*, 44(2), pp. 144-150, 2001.
- [4] Areny, R., *Sensores y Acondicionadores de Señal*. 3ª Ed., Marcombo Boixareu Eds, Barcelona, 1998.
- [5] Costa, M. E. J. V. *Preparação e propriedades eléctricas de sensores de humidade baseados em cerâmicas de ZnO*. Tese de doutoramento em Ciência e Eng. de Materiais, Univ. de Aveiro, Aveiro, 1997.
- [6] Tandeske, D., *Pressure Sensors*, Ed. Marcel Dekker, New York, chapter 5, pp. 77-115, 1991.
- [7] Teixeira, I. C. e Teixeira, J. P., “Trends on Microelectronics Systems Education”, T. J. Mouthaan and C. Salm (eds.), *Microelectronics Education*, pp. 117-120. Kluwer Academic Publishers, Holanda, 1998.
- [8] Pereira, M., *European Pilot Project for Evaluating Higher Education: An Exchange of Experiences in Engineering Programmes*, Instituto Superior Técnico, Lisboa., 1997.