

Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força



Paulo Henrique Guadagnini¹, Fábio Saraiva da Rocha², Vania Elisabeth Barlette¹

¹Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, CEP 96413-170 Bagé, RS, Brasil.

²Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, CEP 96010-900 Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: pguadagnini@gmail.com

(Received 3 November 2011, accepted 28 November 2011)

Resumo

Este trabalho apresenta a concepção, construção e teste de desempenho de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. O extensômetro efetua a transdução de pequenas quantidades de variações espaciais em quantidades equivalentes de variações na resistência elétrica. A concepção e o desenvolvimento deste sensor são discutidos a partir de seus componentes básicos desde o processo de escolha e definição dos extensômetros até o condicionamento de sinal elétrico. Testes de qualidade do sinal elétrico e de ruído indicam uma incerteza de 0,05N nas medições de força. Para uma avaliação de desempenho, valores de força medidos com este sensor são comparados diretamente com valores de força medidos através de um sensor padrão da marca *3B Scientific*. Resultados de medição de força obtidos desta comparação indicam um desvio máximo em relação ao sensor padrão de cerca de 3% em toda a faixa de operação. Verifica-se que este sensor integra as características de sensibilidade e de extensão do sensor padrão, atestando a sua confiabilidade para fins educacionais.

Palavras-chave: Sensor de força, Extensômetro, Educação mediada por tecnologias, Ensino de Física.

Abstract

This work presents the design, construction and performance testing of an electronic sensor based on strain gauge for measuring force. The strain gauge transduces small amounts of spatial variations in equivalent amounts of variations in electrical resistance. The design and development of this sensor are discussed from their basic components since the process of choosing and setting of the strain gauges up to the electrical signal conditioning. Quality tests of electrical signal and of noise indicate an uncertainty of 0.05N in the measurements. For a performance evaluation, force values measured with this sensor are compared directly with ones measured from a standard sensor of the *3B scientific* brand. Results obtained from this comparison indicate a maximum deviation relative to the standard sensor of about 3% across the operating range. It is verified that the sensor designed here integrates the features of sensitivity and of span the standard sensor, attesting to its reliability for educational purposes.

Keywords: Force sensor, Strain gauge, Technology-mediated Education, Physics Education.

PACS: I74, 74.60.-w, 74.80.Bj

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

Medições de força têm importantes aplicações práticas em ciências e engenharias, tais como em ensaios de resistência de materiais e em análise de tensões em estruturas e deformações, e são comumente realizadas por meio de sensores mecânicos ou eletrônicos [1]. Em aplicações educacionais, medições de força são frequentemente utilizadas em estudos teórico-práticos envolvendo as leis da mecânica newtoniana, com uso crescente de sensores eletrônicos e incremento das possibilidades de abordagens didático-pedagógicas [2].

Com o avanço tecnológico, especialmente da eletrônica e da computação, recursos como componentes eletrônicos e documentação técnica ficaram mais acessíveis em termos

de disponibilidade e custo para projetos de sensores e sua potencial aplicação educacional. A maior parte dos sensores com finalidade educacional, disponíveis atualmente, são comercializados por empresas especializadas as quais fornecem uma grande variedade de produtos de alta qualidade [3, 4].

Para essa finalidade, consideram-se importantes as iniciativas de projetos abertos de sensores devido a sua flexibilidade para modificação e possibilidade de uso didático-pedagógico para explicitação de mecanismos físicos de funcionamento, técnicas envolvidas, detalhes construtivos, procedimentos de calibração, testes e medição. Nessa direção, desenvolvemos um sensor de temperatura baseado num transdutor do tipo termistor com leitura direta [5], e um sensor de distância e velocidade

baseado num sonar ativo e num software para cálculo de distância [6].

Seguindo nessa direção, o presente artigo descreve o projeto, construção e teste de um sensor de força com dois extensômetros resistivos de fita metálica e um circuito eletrônico de condicionamento de sinal. A faixa de operação deste sensor para medição de força é de 0 a 10N com incerteza máxima de 0,05N. O projeto deste sistema permite medição de força tanto por um multímetro quanto por uma interface de aquisição automática de dados assistida por computador.

Uma interface desse tipo tem o recurso de apresentar, em tempo real, os dados numéricos ou gráficos sobre o fenômeno em observação à medida que este é produzido. Essa possibilidade apresenta-se como um estímulo aos professores de ciências no planejamento e realização de práticas experimentais com o uso dessas tecnologias, explorando fenômenos físicos de forma integrada à teoria na perspectiva apontada por Gil Pérez e col. [7]. Essa integração possibilita aos estudantes situações concretas de aprendizagem que lhes permitem desenvolver e testar novos conhecimentos científicos, bem como confrontar e refletir sobre suas concepções, privilegiando suas experiências prévias [8].

No plano deste artigo, a seção II apresenta a física do sensor de força com ênfase no funcionamento da fita extensométrica que atua como transdutor, a seção III apresenta o projeto do sensor de força, a seção IV apresenta a descrição do circuito de condicionamento de sinal, e a seção V apresenta o teste de desempenho do sensor de força. As considerações finais são apresentadas na seção VI.

II. MEDIÇÃO DE FORÇA POR EXTENSOMETRIA DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A medição de força mecânica por extensometria de resistência elétrica baseia-se na aplicação de um elemento transdutor, chamado extensômetro (*strain gauge*), que é sensível à deformação produzida sobre um corpo elástico devido a força a ser medida. Um extensômetro é um transdutor resistivo, mecanicamente deformável, cuja resistência elétrica varia com seu grau de deformação. A medida da variação da resistência elétrica do extensômetro, utilizando um circuito elétrico, permite estimar o seu grau de deformação e a força aplicada sobre ele [1, 9, 10, 11].

Quando um corpo é submetido a uma força axial, F , de tração ou compressão, há um aumento ou redução do seu comprimento original, l , identificado como Δl . A Fig. 1 ilustra esquematicamente uma barra retangular submetida a uma força axial. A deformação, ε , é definida como a razão entre a variação de comprimento resultante da aplicação da força F , Δl , e o comprimento original, l ,

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (3)$$

Considerando que a extremidade esquerda da barra, representada na Fig. 1, encontra-se fixada firmemente a um objeto estacionário, a força externa aplicada ao corpo traçado ou comprimido é contrabalançada por uma força de mesmo módulo, gerada internamente. A magnitude da força aplicada por unidade de área, A , do corpo que sofre a deformação, é chamada de tensão, σ ,

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Na definição acima, se considera que a força é uniformemente distribuída sobre a seção transversal da barra. Observa-se, experimentalmente, que a tensão aplicada sobre o objeto, durante a tração ou compressão, é proporcional a sua deformação para uma faixa de tensões mais baixas e limitadas, identificada como a região elástica da curva tensão-deformação característica. A relação entre a tensão e a deformação, na região elástica, pode ser identificada com a Lei de Hook, segundo

$$\sigma = E_Y \varepsilon, \quad (2)$$

em que a constante de proporcionalidade $E_Y = \sigma/\varepsilon$ é o módulo de elasticidade longitudinal, também chamado de módulo de Young.

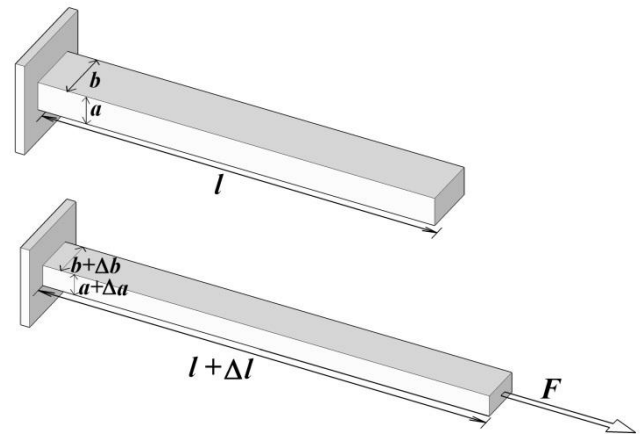


FIGURA 1. Força axial aplicada ao longo do eixo de uma barra retangular.

Um extensômetro de fita (ou lâmina) metálica é composto de uma fita metálica com área total de superfície típica entre 2 e 10mm², arranjada em um padrão alternado, e colada sobre um suporte elástico isolante, chamado de base. A base, geralmente feita de um polímero, é, por sua vez, colada ao corpo o qual se deseja medir a deformação e a força aplicada, chamado de corpo de prova. Um diagrama esquemático de um extensômetro de fita metálica, contendo fita metálica, base, e terminais para conexão elétrica com o circuito de excitação e condicionamento de sinal, é apresentado na Fig. 2.

Os extensômetros metálicos são largamente utilizados na engenharia de instrumentação, especialmente na <http://www.lajpe.org>

Projeto de um dinamômetro eletrônico com extensômetro para medidas de força resistência, $R + \Delta R$. A mudança relativa na resistência, $\Delta R/R$, pode ser obtida diferenciando-se os dois membros da Eq. (4),

$$dR = \frac{l}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA, \quad (5)$$

e, combinando-se as Eqs. (4) e (5),

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}. \quad (6)$$

Como as variações de resistência elétrica nos extensômetros são geralmente pequenas, torna-se possível aproximar a Eq. (6) para

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}. \quad (7)$$

Quando a fita do extensômetro está sujeita a uma tensão de tração, ocorrerá um alongamento axial da fita, ε , e simultaneamente uma contração de sua espessura, a , e largura, b , conforme a Fig. 1. A deformação lateral da fita, ε_l , é definida como o valor médio das mudanças relativas na espessura e largura da fita

$$\varepsilon_l = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \right), \quad (8)$$

em que Δa e Δb são, respectivamente, a variação de espessura e de largura da fita devido à tensão aplicada. A razão entre a deformação lateral e a deformação axial é definida como o coeficiente de Poisson, um número adimensional e positivo,

$$\nu = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Para um extensômetro construído com uma fita como representada na Fig. 1, a área da seção transversal é

$$A = ab. \quad (10)$$

A mudança relativa da área da fita, devido à presença de uma tensão de tração ou compressão pode ser obtida calculando a diferencial da área, definida na Eq. (10)

$$dA = adb + bda. \quad (11)$$

Aproximando-se as diferenciais da Eq. (11) para variações finitas e dividindo-se os dois membros desta equação resultante pela área A , obtém-se

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}. \quad (12)$$

realização de ensaios não destrutivos para medidas de tensões. Dentre as características desejáveis dos extensômetros metálicos, destacam-se elevada precisão das medições, excelente linearidade do sinal de saída, tamanho compacto, e fácil aplicação sobre uma grande variedade de superfícies.

Em um sistema que visa medições de força, aplica-se a força a ser medida sobre o corpo de prova, cujo extensômetro encontra-se colado. A força aplicada produz uma deformação nesse corpo, a qual é transmitida à base do extensômetro e, em seguida, à fita metálica, que é o elemento ativo.

O tipo de medida primária que é obtida utilizando um extensômetro é a deformação. A partir dessa medida primária, é possível obter-se medidas indiretas de outras propriedades que possam estar relacionadas à deformação, como força, pressão, torque e aceleração. A seguir será mostrado como medidas de força estão relacionadas a variações de resistência do extensômetro que, por sua vez, dependem da deformação que o extensômetro está submetido.

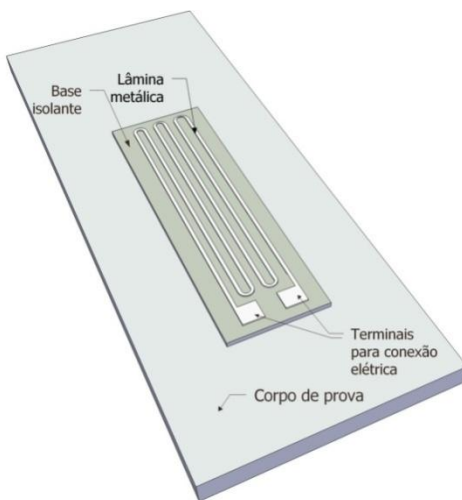


FIGURA 2. Diagrama esquemático de um extensômetro de fita metálica, colado sobre um corpo de prova.

O princípio físico de operação dos extensômetros elétricos resistivos é a variação de resistência elétrica do condutor (lâmina metálica) quando o mesmo sofre uma variação dimensional [12]. A lâmina metálica do extensômetro, representada na Fig. 2 pode ser modelada como uma barra retangular de comprimento l , altura a e largura b , como ilustrado na Fig. 1. A resistência elétrica da lâmina metálica do extensômetro é proporcional à resistividade do metal, ρ , e seu comprimento, l , e inversamente proporcional à sua área de seção transversal, A , segundo

$$R = \rho \frac{l}{A}. \quad (4)$$

Uma fita de comprimento l e resistência R ao ser deformada terá um novo comprimento, $l + \Delta l$, e uma nova

Combinando-se a Eq. 12 com as Eqs. (1, 8) e (9), obtém-se a variação relativa da área em função do coeficiente de Poisson e da variação relativa do comprimento da fita,

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta l}{l}. \quad (13)$$

A razão entre a variação relativa na resistência elétrica, $\Delta R/R$, e a deformação que causa tal variação é definida como fator do extensômetro, k , e pode ser expresso combinando-se as Eqs. (13, 7) e (1),

$$k = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\varepsilon} = \frac{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)}{\varepsilon} + (1 + 2\nu). \quad (14)$$

O fator do extensômetro mede o quanto muda a resistência da fita metálica para uma dada deformação, e portanto, em um sistema de medida de força que utiliza um extensômetro metálico, o fator do extensômetro, k , é relacionado com a sensibilidade do instrumento.

Condutores metálicos mudam sua resistência elétrica com a aplicação de uma tensão mecânica, pela aplicação de forças de alongamento ou compressão, e a variação relativa da resistência é proporcional à magnitude da deformação resultante,

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (15)$$

A mudança relativa na resistência elétrica depende principalmente da deformação mecânica do condutor, o que está associado ao primeiro termo da Eq. (15), e depende também, em menor grau, da mudança na resistividade do material do condutor como resultado de alterações na sua microestrutura [9]. Na construção de extensômetros, são preferíveis materiais que não apresentam alterações significativas de resistividade com a deformação na região elástica, o que implica, nesta aproximação, que o fator do extensômetro depende somente do coeficiente de Poisson do material,

$$k = 1 + 2\nu. \quad (16)$$

Assim, a variação relativa da resistência torna-se

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon k. \quad (17)$$

Combinando-se as Eqs. (2), (3) e (17), obtém-se a relação entre a força aplicada e a variação relativa na resistência elétrica do extensômetro,

$$F = \left(\frac{E_Y A}{k}\right) \frac{\Delta R}{R}. \quad (18)$$

Considerando um extensômetro no qual E_Y, A e k são constantes, a relação esperada entre a força e a variação

relativa de resistência é descrita por uma função linear com coeficiente linear nulo. Experimentalmente, a curva de força em função de $(\Delta R/R)$ é uma reta com coeficiente angular determinado empiricamente que depende das características físicas particulares do extensômetro e do corpo de prova onde ele é colado.

III. O PROJETO DO SENSOR DE FORÇA

A partir da possibilidade de aproveitar as características básicas dos extensômetros elétricos como sensores que relacionam diretamente pequenas deformações mecânicas sofridas com variações da resistência elétrica correspondente, e da variedade de extensômetros disponíveis comercialmente, projetamos um dinamômetro para uso em práticas experimentais para o ensino de Física. O extensômetro elétrico de lâmina constituído por grelha metálica condutora depositada sobre substrato polimérico é a unidade fundamental do sensor de força, que passamos a apresentar. Os extensômetros são transdutores de baixo custo financeiro e alta precisão nas medidas elétricas.

Utilizamos em nosso protótipo duas unidades do extensômetro modelo PA-06-250BA-350-LEN de 350Ω e dimensões totais de (9,47mm x 3,18mm), adquirido da empresa Excel Sensores [13] ao custo de 14,40 Reais por unidade. Os transdutores foram fixados a uma lâmina metálica num procedimento especial [14], utilizando cola à base de cianoacrilato, comumente encontrada no mercado com o nome comercial de superbonder. Para que este sistema apresente bom desempenho, é necessário que ocorra um adequado acoplamento mecânico entre o corpo de prova e a fita metálica. Para tal, é desejável que (i) tanto o corpo de prova como a base e a fita metálica, e também a cola utilizada para fixar o extensômetro no corpo de prova, sejam deformados elasticamente, e, ainda, que (ii) não haja ocorrência de tensões espúrias em quaisquer das interfaces entre as camadas citadas. O processo de colagem do extensômetro ao corpo de prova exige a aplicação de uma técnica correta para minimizar tais tensões espúrias entre o extensômetro e o corpo de prova [14].

Foi utilizada uma lâmina de aço temperado termicamente tipo “aço-mola” de 0,50mm de espessura, 150mm de comprimento e 25mm de largura, a qual ficou sujeita a esforços de flexão, quando submetida à carga de força. A lâmina foi encontrada em sucata e escolhida devido à possibilidade do metal retornar ao estado original de forma após o esforço elástico de flexão previsto dentro da faixa de utilização de nosso sensor de força. Há que se ter atenção aqui no sentido de garantir a reversibilidade mecânica da lâmina após o esforço; para isso, tanto a lâmina quanto os extensômetros não devem ter superado o seu limite de deformação plástica permanente. Nosso sensor foi projetado para ser submetido a esforços de até 10N, porém a lâmina escolhida suporta bem flexões provocadas por cargas da ordem de 200% deste valor com margem de segurança. Os extensômetros axiais foram colados em faces opostas da lâmina solicitada à flexão.

A Fig. 3(a) apresenta a disposição dos sensores na lâmina. O extensômetro da superfície inferior da barra está posicionado exatamente sob o extensômetro da superfície superior da lâmina, com ambos respondendo a mesma deformação mecânica com sinais contrários. Nas flexões, ocorridas pela ação das forças sobre um pequeno gancho fixado no centro de simetria da lâmina, enquanto o extensômetro superior, ϵ_1 , é traçado, o inferior, ϵ_2 , é comprimido.

A variação da resistência elétrica é correlacionada linearmente com a força aplicada no sensor de força, segundo a Eq. (18). Devido às pequenas variações de resistência elétrica do extensômetro que acompanham suas mudanças dimensionais (usualmente entre $0,1\Omega$ e 1Ω), medidas diretas de variações de resistência elétrica do extensômetro não são práticas. Uma técnica mais conveniente que permite o acompanhamento indireto da variação de resistência é a ligação dos extensômetros em um circuito elétrico do tipo ponte de Wheatstone, contendo quatro braços resistivos e uma tensão de excitação, E , segundo a Fig. 3(b). Nesta técnica, a grandeza a ser medida é a tensão elétrica de saída da ponte, E_0 , resultante do estado não balanceado da mesma, que é proporcional à resistência do extensômetro. Para o projeto do nosso sensor de força, foi utilizado um circuito do tipo meia ponte, que consiste em uma ponte de dois transdutores ativos de 350Ω (extensômetros) e dois resistores passivos feitos de carvão ($1/8W$) de resistência constante e igual a 350Ω . Essa ponte de resistores foi alimentada por uma tensão contínua de $10,0V$, obtida a partir de uma fonte de alimentação. A Fig. 3(b) apresenta as ligações elétricas na ponte.

A tensão de saída da ponte, representada na Fig. 3(b), pode ser expressa como [11]

$$E_0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{R_{\epsilon 1}}{R_{\epsilon 1} + R_{\epsilon 2}} \right) E, \quad (19)$$

em que, $R_{\epsilon 1}$ e $R_{\epsilon 2}$ são, respectivamente, as resistências elétricas dos extensômetros ϵ_1 e ϵ_2 , e E é a tensão de excitação da ponte. Para uma resistência nominal do extensômetro (sem sofrer deformação) de $R_E = 350\Omega$, a sua nova resistência após sofrer uma tração é

$$R_{\epsilon 1} = R_E + \Delta R_{\epsilon 1}, \quad (20)$$

em que $\Delta R_{\epsilon 1}$ é a mudança na resistência do extensômetro ϵ_1 devido à tração. No caso do extensômetro ϵ_2 , que sofre compressão e tem sua resistência reduzida, a sua nova resistência após a flexão da lâmina é

$$R_{\epsilon 2} = R_E - \Delta R_{\epsilon 2}, \quad (21)$$

em que $\Delta R_{\epsilon 2}$ é a mudança na resistência do extensômetro 2 devido à compressão. As variações de resistências nas Eqs. (20) e (21) podem ser expressas em termos da resistência nominal do extensômetro, R_E , a deformação, ϵ , e o fator do extensômetro, k , segundo a Eq. (17), resultando em

$$R_{\epsilon 1} = R_E(1 + \epsilon k), \quad (22)$$

e

$$R_{\epsilon 2} = R_E(1 - \epsilon k). \quad (23)$$

Combinando a Eq. (19) com as Eqs. (22) e (23) obtém-se a expressão que relaciona a tensão de saída da ponte com a deformação que os extensômetros são submetidos,

$$E_0 = \frac{Ek}{2} \epsilon. \quad (24)$$

A Eq. (24), juntamente com a definição de tensão (Eq. 2) e a relação entre tensão e deformação (Eq. (3)), permite expressar a tensão de saída da ponte em termos de um conjunto de parâmetros constantes para o arranjo experimental (k, E_Y e A) e a força aplicada ao medidor de força,

$$E_0 = \frac{Ek}{2E_Y A} F. \quad (25)$$

A disposição dos extensômetros escolhida neste projeto é tal que ficam cancelados os efeitos de variações da temperatura relacionadas aos extensômetros. O protótipo eletromecânico fica sensível apenas às deformações provenientes da flexão da peça, e o sinal de saída, expresso na Eq. (24), é dobrado em relação à deformação de apenas um lado da lâmina. O sinal elétrico medido através da ponte de resistores é referente ao dobro da deformação à flexão ocorrida no caso de somente um extensômetro ficar ativo (em apenas uma das faces). Após testes iniciais, verificamos que o arranjo com dois extensômetros deveria ser escolhido, pois foi o mais simples que possibilitou alcançar, para o nosso protótipo, a sensibilidade na leitura de forças igual ou superior a aquela encontrada nos dinamômetros didáticos comuns de escala de 0 até 10N de uso em laboratórios de ensino de física experimental.

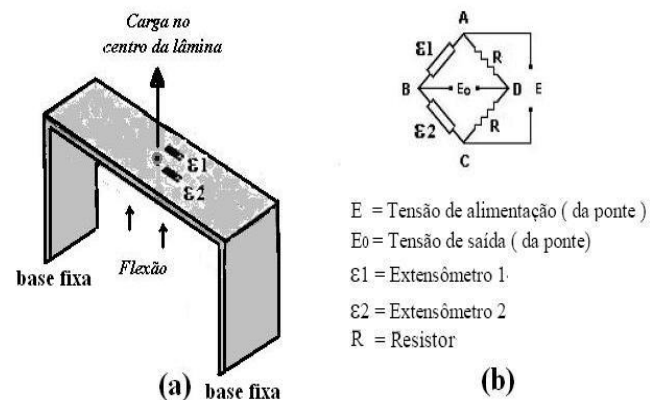


FIGURA 3. (a) Esquema da montagem dos sensores na lâmina de aço em flexão. (b) Disposição dos sensores na ponte de resistores; figura adaptada do trabalho de Barreto Jr. [14].

O sinal de tensão elétrica de saída da ponte de resistores é direcionado para o circuito condicionador de sinais, descrito a seguir, que irá amplificar o sinal elétrico entregando como produto final de medida uma tensão

proporcional à carga mecânica a que foi submetida a lâmina metálica. É importante atentar para a relação sinal/ruído adequada aos propósitos didáticos deste trabalho.

A Fig. 4 mostra o ajuste numérico de calibração que foi utilizado em nosso sensor. A medida se deu a partir do registro dos valores de força peso referentes a um conjunto de massas que foram suspensas, uma a uma, enquanto eram registrados os valores de tensão elétrica provenientes do estágio de saída do condicionador de sinais. Os valores de massas foram registrados numa balança eletrônica de uso em laboratório didático, marca Coleman, modelo BN3000, com resolução de 0,1g. É possível ver na Fig. 4 duas regiões lineares de resposta da tensão elétrica para força aplicada. A primeira região, com maior derivada deve ir do valor mínimo de escala até 4,85N de carga e, a segunda região, deste valor até o limite testado aqui, ou seja, 10N. A Tabela I apresenta valores dos coeficientes (a e b) e estimativas de erros (Δa e Δb) ajustados numericamente através do método de mínimos quadrados utilizando o programa Origin 6.0. A função linear ajustada foi $V = a + b F$, que correlaciona a tensão elétrica de saída com o valor de força peso correspondente as massas suspensas. O valor de força foi obtido multiplicando-se a massa medida na balança pelo valor da aceleração da gravidade local. O valor utilizado foi de $9,793050\text{m/s}^2$ com base nos levantamentos gravimétricos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para a cidade de Porto Alegre, RS [15]. Os coeficientes foram utilizados para a transformação de tensão elétrica (V), com valores numericamente maiores que o parâmetro a , em valor de força (F) correspondente. A Eq. (26) é aplicada aos dois regimes em seus respectivos intervalos,

$$F = \frac{V - a}{b} \tag{26}$$

A função linear foi escolhida em razão da simplicidade matemática e da boa descrição dos dados experimentais alcançados. Dependendo dos objetivos em relação à precisão do sensor de força, o leitor poderá melhorar a descrição dos dados experimentais buscando outras funções matemáticas mais complexas para realizar o ajuste numérico.

Em nossas medidas, foi possível observar que, submetida a uma variação no valor da força de carga da ordem 0,1N, a resposta de variação em tensão elétrica ficou, aproximadamente, em 25mV. Foi possível, também, verificar um ruído elétrico constantemente presente nas medidas; uma flutuação aleatória do sinal de tensão que apresentou amplitude variável entre 5,0 até 10,0mV, em toda a faixa testada. Essa flutuação indicou-nos o critério de incerteza máxima de medida na casa de 0,05N, ou equivalente ao peso de uma massa de aproximadamente 5,1g. Dessa forma, nosso instrumento tem incerteza máxima de medida estimada em 0,05N, com boa margem de segurança. Esses valores podem ser estabelecidos na faixa de cargas que vai até 8,0N. Até esse valor de força, não ultrapassamos 2V de tensão de saída e a tensão pode ser medida na segunda escala de maior sensibilidade da

maioria dos voltímetros eletrônicos de laboratório de ensino. Nessa escala até 2,0V de tensão contínua, o aparelho usado neste trabalho (multímetro digital *Minipa*, modelo ET-2082B) mede com resolução de 1mV e precisão de $\pm 0,5\% + 3$ dígitos, sendo possível afirmar o que foi apontado como imprecisão de leitura do valor de tensão. De 8,0N em diante, nosso aparelho de medida de tensão elétrica passa a ter sua resolução diminuída para 10,0mV, dificultando nossos testes a respeito do comportamento do ruído elétrico.

Na Tabela I, podemos ver as estimativas dos erros referentes aos parâmetros da função linear utilizada no ajuste numérico entre tensão elétrica e força. A influência de tais estimativas de erros na interpretação dos valores de força, através da tensão elétrica, projeta uma propagação destas incertezas para o valor final de força que nunca ultrapassam a incerteza devido à influência do ruído elétrico observado sobre o valor final de força, conforme já comentado anteriormente.

TABELA I. Valores dos coeficientes ajustados numericamente para uma função linear que correlaciona a tensão elétrica de saída com o valor de força peso correspondente.

Região	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$
1	$0,085 \pm 0,002$	$0,263 \pm 0,001$
2	$0,343 \pm 0,002$	$0,211 \pm 0,001$

Na busca por maior sensibilidade ou maior simplicidade para o projeto do sensor de força, outros arranjos de posicionamento e quantidade de extensômetros podem ser testados pelo leitor, inclusive trocando o material que ficará sujeito ao esforço mecânico. A princípio, materiais que deformam mais, levam a maiores sensibilidades de medida usando extensômetros, claro que respeitando o limite máximo de elasticidade permitido para o transdutor. Testes com extensômetros baseados em material semicondutor podem apresentar grande sensibilidade aos esforços mecânicos, mesmo com arranjos simples.

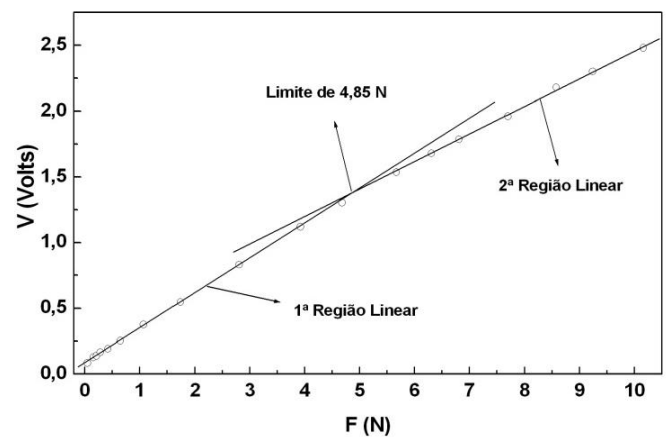


FIGURA 4. Gráfico que mostra a relação entre o sinal de tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone, depois de amplificado, com a carga de força a que a lâmina metálica foi submetida durante a calibração. É possível distinguir dois regimes lineares na resposta de esforços internos da lâmina metálica.

IV. CONDICIONAMENTO DE SINAL E AJUSTE DO SENSOR DE FORÇA

O esquema elétrico do circuito utilizado para excitação dos extensômetros e o circuito de condicionamento de sinal, encontram-se representados na Fig. 5.

Para o circuito de excitação da ponte, representado na parte superior esquerda da Fig. 5, foi utilizada uma tensão de 10V, obtida a partir de uma fonte de alimentação simétrica que disponibiliza tensões de -5V e +5V em relação ao seu terminal de referência. O uso dessa fonte de alimentação simétrica é conveniente, pois permite que o sinal de saída, após o condicionamento de sinal, possa variar entre valores negativos e positivos de tensão, permitindo melhor exatidão da zeragem do sensor de força.

O sinal de saída da ponte, da ordem de poucas dezenas de mV, é sobreposto ao ruído de alta frequência que é resultante, principalmente, de interferência eletromagnética e transmissões de radiofrequência presentes no ambiente. Para reduzir a amplitude do ruído de alta frequência, e limitar a sua amplificação e retificação no circuito de amplificação descrito a seguir, foi utilizado um filtro passa-baixa composto pelos resistores R4 e R5, juntamente com os capacitores C1A, C1B e C2, representado na parte superior esquerda da Fig. 5. A frequência de corte para sinais entre os terminais de saída da ponte (sinais diferenciais) é cerca de 350Hz. O filtro também atenua sinais interferentes de alta frequência entre cada terminal de saída da ponte e o terminal de referência da fonte de alimentação (sinais de modo comum), com uma frequência de corte de aproximadamente 16kHz.

Quanto maior é a tensão de excitação da ponte, maior será a variação da tensão de saída, E_0 , com a resistência dos extensômetros e, conseqüentemente, maior será a sensibilidade do medidor de força. Entretanto, os extensômetros toleram uma corrente máxima de algumas dezenas de mA, devido ao seu auto aquecimento pelo efeito Joule. Em razão disso, a tensão de excitação da ponte deve ser limitada, resultando em uma tensão de saída da ponte de pequena magnitude (tipicamente na ordem de poucas dezenas de mV). Para que seja possível a medição acurada da tensão resultante de variações de resistência dos extensômetros, é necessário aplicar E_0 à entrada de um circuito de amplificação de sinais que será descrito a seguir, e representado na parte central inferior da Fig. 5.

A amplificação do sinal é efetuada utilizando o amplificador de instrumentação de baixo custo U1 (AD623) [16]. O amplificador de instrumentação opera como um amplificador diferencial que amplifica a tensão entre os seus terminais de entrada (pinos 2 e 3 de U1), e disponibiliza uma tensão de saída referenciada ao terminal comum em um terminal de saída de baixa impedância (pino 6 de U1) [17]. Devido ao uso de circuitos internos do tipo *buffers*, a entrada do amplificador de instrumentação apresenta baixa impedância, permitindo o acoplamento de fontes de sinais de entrada de alta impedância sem comprometimento da integridade dos mesmos, como é o caso dos circuitos de ponte e de filtragem utilizados neste projeto.

Uma característica importante do amplificador de instrumentação para este projeto do sensor de força é sua elevada taxa de rejeição de sinais de modo comum, que pode ser definida como a razão entre o ganho para amplificação de sinais diferenciais (entre os pinos 2 e 3 de U1) e o ganho para amplificação de sinais de modo comum (entre o pino 2 de U1 e o terminal comum, e entre o pino 3 de U1 e o terminal comum). Um amplificador diferencial ideal não amplifica sinais de modo comum, ou seja, possui uma taxa de rejeição de sinais de modo comum infinita. Isso não ocorre em amplificadores diferenciais reais, em que a amplificação parcial de sinais de modo comum é indesejável, pois isso produz sinais espúrios na sua saída, que pode comprometer a exatidão das medidas. Sinais de modo comum que podem potencialmente serem amplificados e causar problemas de flutuação e perda de exatidão das medições de força incluem ruídos originados da fonte de alimentação e de interferência eletromagnética. A elevada taxa de rejeição de sinais de modo comum que é oferecida pelo amplificador de instrumentação é especialmente importante na aplicação descrita neste trabalho, pois o sinal de interesse, E_0 , consiste de uma pequena tensão diferencial (da ordem de alguns mV) sobreposta em uma tensão de modo comum, relativamente elevada, de cerca de 5V.

A tensão de saída da ponte, após a etapa de filtragem, é amplificada pelo amplificador de instrumentação por um fator de ganho, G , determinado pela resistência em série R6 e POT1, segundo

$$G = 1 + \left(\frac{100\text{k}\Omega}{0,200\text{k}\Omega + R_{\text{POT1}}} \right), \quad (27)$$

em que R_{POT1} é a resistência do potenciômetro POT1, em unidades de k Ω . Ajustando-se POT1, o ganho do amplificador de instrumentação pode ser selecionado entre 84 e 501. Na saída de U1 (pino 6), a tensão de saída, V_{AI} , é obtida segundo

$$V_{AI} = E_0 G. \quad (28)$$

A tensão de saída de U1 apresenta um valor máximo de aproximadamente 0,5V para a força de 10N.

Uma ponte de Wheatstone, configurada segundo a Fig. 3(b), deve apresentar, teoricamente, uma tensão de saída nula quando os extensômetros não estão sujeitos a deformações. Entretanto, na prática, há geralmente o aparecimento de uma pequena tensão residual, chamada de tensão de *offset*, devido às tolerâncias nos valores nominais das resistências dos elementos resistivos da ponte e a presença de deformações residuais nos extensômetros produzidas durante o processo de colagem no corpo de prova. Para a compensação da tensão de *offset* e zeragem da tensão de saída, quando o medidor de força não é submetido a cargas, foi aplicada uma tensão de referência, V_{ref} , ao terminal de referência (pino 5 de U1). O projeto do amplificador de instrumentação (U1) requer que o sinal aplicado no terminal de referência seja de baixa impedância, o que não é possível quando se utiliza simplesmente um divisor de tensão resistivo para gerar

V_{ref} . Para gerar uma tensão de referência ajustável, e de baixa impedância, foi utilizado o circuito da parte inferior esquerda da Fig. 5, construído em torno do amplificador operacional U2A (LM358) [18], que é configurado como seguidor de tensão. Os elementos resistivos R7, POT2 e R8 compõem um divisor de tensão cuja tensão de saída pode ser ajustada continuamente entre -2,5V e +2,5V. O capacitor C7 permite a filtragem do sinal de saída do divisor de tensão, e os capacitores C8 e C9 desacoplam a fonte de alimentação dos pinos de alimentação do amplificador operacional U2. A tensão de saída do divisor de tensão é aplicada à entrada não inversora de U2A, e é obtida praticamente inalterada no terminal de saída deste componente (pino 1), mas agora com a característica de baixa impedância necessária para alimentar o terminal de referência de U1. Na prática, o potenciômetro POT2 é posicionado na parte externa da caixa do instrumento e é utilizado para ajustar o zero da leitura de força, quando o sensor de força encontra-se sem carga.

A faixa de tensão de saída do amplificador de instrumentação U1 é limitada pela combinação das tensões de entrada, de alimentação e de referência que foram utilizadas. Para manter a faixa de tensão de saída de U1 dentro do especificado pelo fabricante deste componente, nas condições de aplicação utilizadas, a tensão máxima de saída de U1 foi, então, limitada a cerca de 0,5V. Para obter

se tensões de saída do instrumento, V_{out} , entre 0 V e 2,5V foi utilizada uma etapa adicional de amplificação com base no amplificador operacional U2B, que é configurado como amplificador não inversor de ganho 5. O ganho para esse amplificador operacional é definido segundo

$$G_2 = 1 + \frac{R_{R9}}{R_{R10}}, \quad (29)$$

em que R_{R9} e R_{R10} são as resistências dos resistores R9 e R10, respectivamente. A tensão de saída do instrumento, após as etapas de condicionamento de sinal, será

$$V_{out} = G_2 V_{AI}. \quad (30)$$

O procedimento de ajuste do medidor de força consiste basicamente em duas etapas: na primeira etapa, zera-se a tensão de saída através do potenciômetro POT2, com o sensor de força não sujeito a qualquer força; a segunda etapa consiste no acerto do fundo de escala do sensor de força, ajustando-se o ganho do amplificador de instrumentação através do potenciômetro POT1, quando é aplicada a carga máxima de 10N. A tensão de saída do circuito de condicionamento de sinal é ajustada em 2,5V para o fundo de escala de 10N.

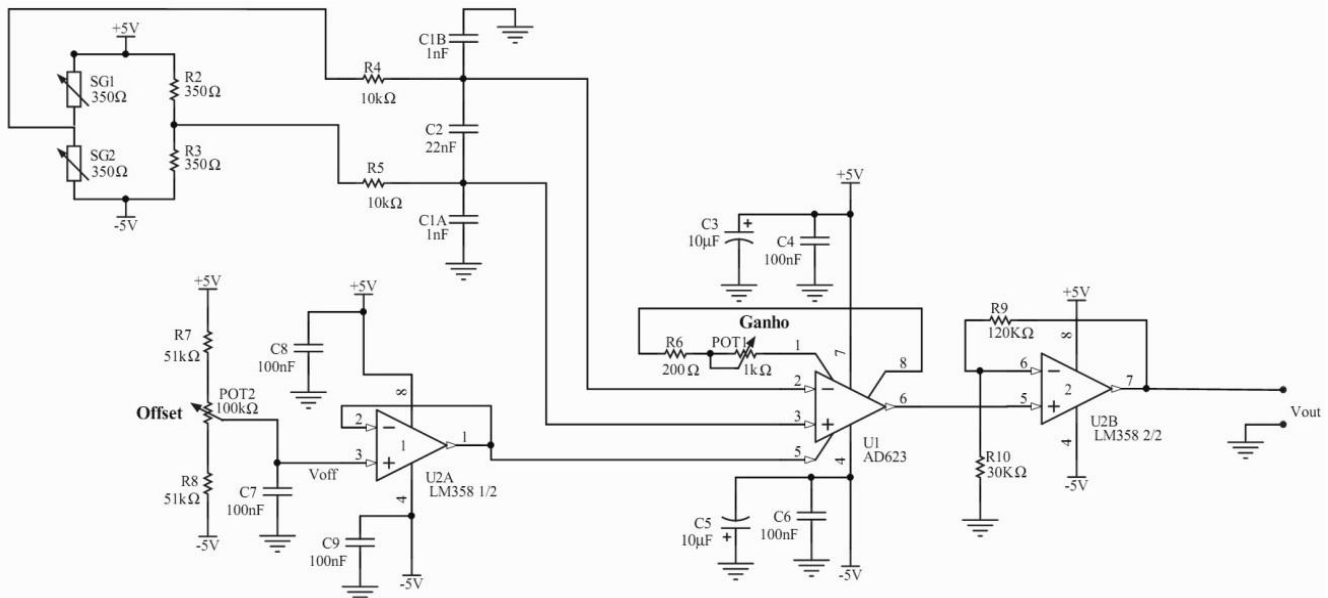


FIGURA 5. Circuito elétrico de excitação dos extensômetros e de condicionamento de sinal para o sensor de força.

V. TESTE DE DESEMPENHO DO SENSOR DE FORÇA

O sensor de força construído foi submetido a uma comparação de desempenho com outro sensor de força. O sensor escolhido para essa comparação é da marca 3B Scientific (modelo U11013 - 10N), com faixa de utilização de 0 até 10N e intervalo de confiança de 0,1N em toda a

faixa de medida. O teste de comparação se deu utilizando a força peso referente a algumas massas de valores conhecidos, que foram suspensas em ambos os sensores, alternadamente. Os valores de tensão obtidos pelo nosso sensor de força foram convertidos em valores de força através da Eq. (26), utilizando os valores contidos na Tabela I. Os valores estão apresentados no gráfico da Fig. 6. O tamanho do marcador do ponto no gráfico do sensor 3B Scientific refere-se a incerteza de medida de 0,05N,

critério adotado como a metade da menor subdivisão da escala deste instrumento. Pelas razões apresentadas anteriormente, uma incerteza de 0,05N foi estabelecida para o nosso sensor de força.

No gráfico da Fig. 6 também está mostrada uma linha contínua que representa o valor do produto massa pela aceleração da gravidade para os valores de massas que foram suspensas em ambos os sensores comparados. O valor utilizado para a aceleração da gravidade foi o já mencionado anteriormente. O desvio máximo de medida encontrado entre os dados comparativos foi de aproximadamente 3% e localizado na região 2 de ajuste numérico.

A Fig. 7 apresenta um esquema com a visão geral do projeto do sensor de força baseado em extensometria, a partir de seus módulos básicos constituintes.

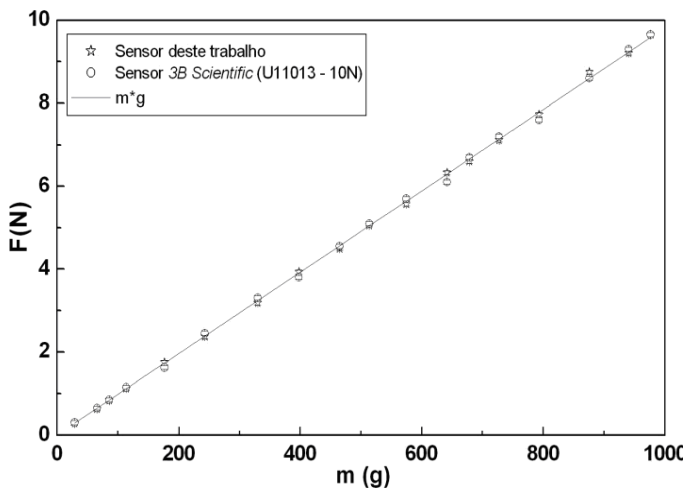


FIGURA 6. Gráfico com o resultado do teste de comparação entre o sensor baseado em extensometria e o sensor didático *3B Scientific*.

Este projeto dispõe ao leitor a possibilidade de construir um sensor que funciona fornecendo um sinal de tensão elétrica proporcional à força aplicada, como carga no centro da lâmina metálica utilizada no sensor de força. O valor de força também poderá ser registrado em um computador através das suas portas de comunicação, como por exemplo, a porta serial [6]. Para isso, é útil um dispositivo atuando como microcontrolador que, além de registrar o sinal analógico de tensão elétrica, vindo do circuito condicionador de sinais, atue também convertendo o sinal para o formato digital e fazendo a manipulação matemática deste sinal para obter o valor de força. Um microcontrolador pode ser utilizado na comunicação com um computador, enviando e recebendo informações que podem ser utilizadas para gerar gráficos, em tempo real, de força aplicada versus tempo. Os microcontroladores possuem relógios internos que podem ser acessados facilmente, fornecendo uma base de tempo altamente

confiável para monitorar a variação dos valores de força em nossas experiências.

A criatividade do professor é fundamental na exploração dos conceitos físicos de mecânica a partir do uso de um sensor de força. Por exemplo, a partir da análise do gráfico de uma força impulsiva no tempo, é possível estudar dinamicamente, em tempo real, a variação da quantidade de movimento ocorrida em colisões. Tendo a disposição mais de um sensor, se pode explorar a Lei da Ação e Reação e estudar seus efeitos práticos. Adicionalmente, devem ser considerados, na escolha da experiência física que se quer explorar, os limites de precisão e escala do sensor de força.

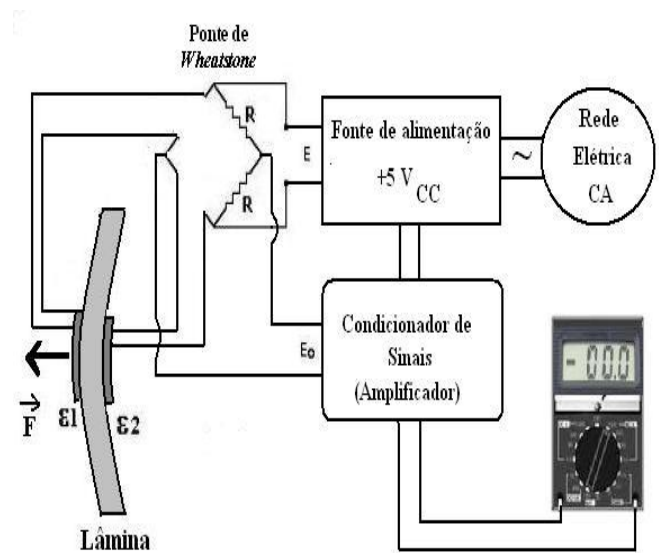


FIGURA 7. Esquema mostrando uma visão geral do projeto do sensor de força.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar o projeto e detalhes da construção de um sensor de força a partir de componentes eletromecânicos de fácil aquisição e custo relativamente baixo para uso em atividades práticas de ensino de ciências. Os testes de comparação deste sensor com o sensor padrão da marca *3B Scientific* atestam a confiabilidade das medidas de força para fins educacionais.

Acreditamos que seja interessante o uso deste sensor tanto para possibilitar o estudo da mecânica quanto envolver os estudantes na montagem e replicação do projeto, tendo-se em vista a quantidade de grandezas físicas envolvidas e o tratamento de dados experimentais utilizado nas etapas de calibração e testes de desempenho. É importante que esta proposta de montagem do protótipo leve em conta o nível adequado de escolaridade dos estudantes. Espera-se que iniciativas de projetos abertos de sensores, como a apresentada neste trabalho, possam contribuir para a difusão do uso destas tecnologias na melhoria na qualidade do ensino de ciências.

REFERÊNCIAS

- [1] Andolfato, R. P., Camacho, J. S., de Brito, G. A., *Extensometria básica*, (NEPAE UNESP, Ilha Solteira, 2004).
- [2] Sokoloff, D. R., Thornton, R. K., Laws, P. W., *RealTime Physics: Active learning laboratories. Module 1: Mechanics*, 2nd Ed. (John Wiley & Sons, New York, 2004).
- [3] Vernier Software & Technology, LCC, <<http://www.vernier.com>>, acesso em 12 de Outubro (2011).
- [4] PASCO scientific, <<http://www.pasco.com>>, acesso em 12 de Outubro, 2011.
- [5] Guadagnini, P. H., Barlette, V. E., *Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor*, Rev. Bras. Ensino Fís. **27**, 369-375 (2005).
- [6] Rocha, F. S. da., Guadagnini, P. H., *Sensor sonar de movimento para o ensino de física experimental*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **4**, 306-315 (2010).
- [7] Gil, P. D., Furió, M. C., Valdés, P., Salinas, J., Martínez-Torregrosa, J., Guisasola, J., González, E., Dumas-Carré, A., Goffard, M., Pessoa de Carvalho, A. M., *Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio?*, Enseñanza de las Ciencias **17**, 311-320 (1999).
- [8] Hodson, D., *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*, Enseñanza de las Ciencias **12**, 299-313 (1994).
- [9] Hoffmann, K., *An introduction to measurements using strain gages*, (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989).
- [10] Elbestawi, M. A., *Measurement, instrumentation, and sensors handbook, Force measurement*, (CRC Press LLC, New York, 1999).
- [11] Morris, A. S., *Measurement and instrumentation principles*, 3rd Ed. (Butterworth Heinemann, Oxford, 2001), p. 120.
- [12] Pallàs-Areny, R., Webster, J. G., *Sensors and signal conditioning*, 2nd Ed. (John Wiley & Sons, New York, 2001), p. 80.
- [13] Excel Sensores Ind. Com. e Exportação Ltda, <www.excelsensor.com.br>, acesso em 10 de Novembro (2010).
- [14] Barreto, Jr., E., *O extensômetro elétrico de resistência*, (iEditora, São Paulo, 2005). <<http://www.edicoes.com.br>>, acesso em 10 de Novembro (2010).
- [15] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/gravimetrica.shtm>>, acesso em 10 de Novembro (2010).
- [16] Analog Devices, Inc., *Single supply, rail-to-rail, low cost instrumentation amplifier AD623*, REV. C (1999).
- [17] Barna, A., Porat, D. I., *Operational Amplifiers*, 2nd Ed. (John Wiley & Sons, New York, 1988), p. 19.
- [18] National Semiconductor Corporation, *LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers*, DS007787 (2004).