

EXTENSÔMETRO CAPACITIVO PARA A DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM SISTEMAS ESTRUTURAIS

Josivaldo Godoy da Silva, josivaldog@gmail.com¹
Elise Katherine Chaparro Ferreira, elisekatherine@hotmail.com¹
Laila Rodrigues Cirquera, lailinha_rodrigues@hotmail.com¹
Thaisa Cristina dos Santos, thaisacsantos@hotmail.com¹
André da Costa Borges da Silva, andrecostaborges@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Cidade Universitária Universitário, CEP: 79070-900

Resumo: Esta pesquisa teve como objetivo projetar e implementar um extensômetro capacitivo para aplicação em célula de carga. A célula de carga com o extensômetro capacitivo poderá ser utilizada para determinar grandezas mecânicas tais como força, deformação e deslocamento. Estas grandezas provocam deformações em sistemas estruturais de edifícios, usinas hidrelétricas, usinas de álcool, pontes, veículos automotores e outros. O dispositivo possui oito sensores capacitivos desenvolvidos com eletrodos móveis de aço inox de 8 mm x 5 mm x 0,1 mm e eletrodos fixos de 40 mm x 5 mm x 0,1 mm. Estes sensores foram ligados em duas Pontes de Wheatstone, alimentadas com tensão senoidal de 7 V e frequência de 15 kHz. Os eletrodos dos sensores capacitivos foram colados à estrutura por meio de adesivo cianocrilato de uso genérico. A resposta do extensômetro capacitivo foi conectada em um circuito de condicionamento de sinais compacto. O dispositivo foi submetido a testes estáticos, dinâmicos e apresentou sensibilidade 820 vezes maior quando comparado com extensômetro convencional de grade metálica. O extensômetro apresenta as seguintes características: construção simples e robusta, resposta linear independente da temperatura ambiente, resolução de 0,009 N e histerese de 2,7%. A existência de histerese se deve a utilização de adesivo em quantidade elevada no desenvolvimento da estrutura do extensômetro. O dispositivo poderá ser utilizado na determinação de grandezas de sistemas estruturais que esteja submetido à baixa frequência mecânica.

Palavras-chave: extensômetro, capacitivo, sensibilidade, grandeza mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Os extensômetros capacitivos são dispositivos que medem deformação. A deformação pode ser determinada por meio de métodos mecânicos, ópticos, acústicos, pneumáticos e elétricos. Deformações experimentadas por um material podem acarretar variações na capacitância, indutância ou na resistência elétrica do mesmo (Areny, 1991).

Ao selecionar um extensômetro deve-se considerar as características que provocam a deformação, mas também sua estabilidade e sensibilidade com a temperatura (Cobbold, 1974).

HPI (entre 2000 e 2004) desenvolveu extensômetros capacitivos que podem ser usados em temperaturas superiores à 1500 °C para curtos e longos períodos de tempo. O extensômetro consiste de dois capacitores variáveis conectados em meia ponte que cancelam os efeitos indesejáveis produzidos pela temperatura e pressão. Seu projeto eliminou problemas que limitavam o desempenho de dispositivos medidores de deformação em altas temperaturas e apresentou excelente linearidade.

Perusek *et al.* (2002) implementaram um extensômetro capacitivo para medição da deformação do osso em seres humanos. Ele utiliza pares de sensores capacitivos montados em pinos, que são introduzidos nos ossos, permitindo medir a deformação provocada no plano do extensômetro, a compressão uniaxial ou a tensão mecânica.

Kolb, Decca e Drew (1998) desenvolveram um sensor compacto para medir posição em duas dimensões. O dispositivo opera de acordo com o princípio de que a capacitância de eletrodos de placas paralelas depende da área mútua de sobreposição. É adequado para operação em campos magnéticos intensos e temperaturas criogênicas. Uma resolução de aproximadamente 1,2 mm foi obtida, sendo a limitação determinada pela eletrônica utilizada.

Peters (1993) desenvolveu extensômetros capacitivos que apresentaram boa sensibilidade para medir pequenos deslocamentos. Possuem alta resolução, grande estabilidade com a temperatura e foram ligados em ponte completa. Apresentaram resolução de 0,1 µm, coeficiente de correlação de 0,999 e puderam medir baixos níveis de expansão térmica.

Neste trabalho é apresentado um novo extensômetro capacitivo desenvolvido com a finalidade de ser utilizado no desenvolvimento de células de carga para a determinação de grandezas mecânicas em sistemas estruturais. A sua

resposta não é afetada pela temperatura do ambiente. O dispositivo possui construção simples, robusta, baixo custo e apresenta elevada sensibilidade.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A estrutura do sensor capacitivo foi idealizada de maneira a provocar a variação da capacitância (Δc) devido a variação do espaçamento (ΔD_{mf}) entre eletrodo fixo (E_f) e eletrodo móvel (E_m). ΔD_{mf} surge com a ocorrência de força longitudinal (F) nas extremidades de (E_m). (F) surge proporcionalmente com a deformação (ϵ_L) no material em que o sensor está colado.

A Figura 1 apresenta a estrutura fundamental do sensor capacitivo.

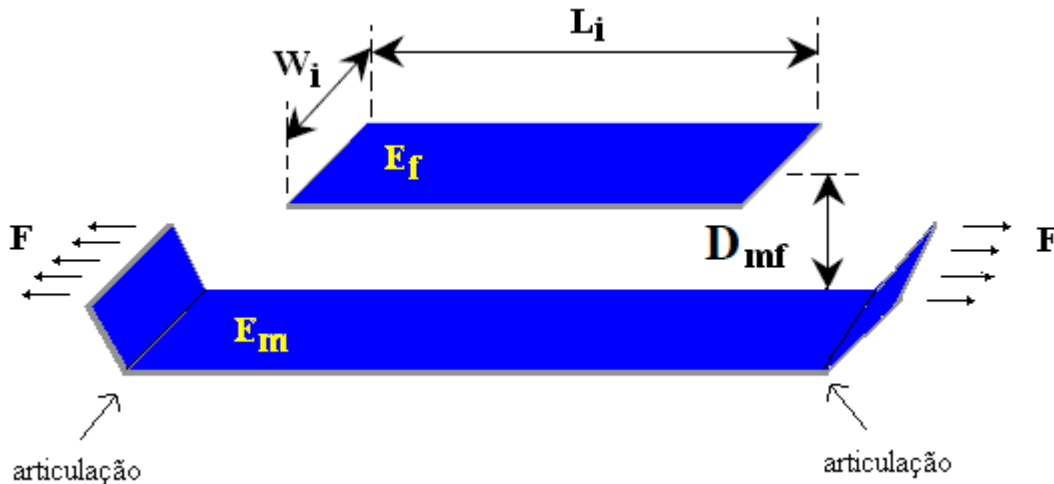


Figura 1. Estrutura de um sensor capacitivo (S_C).

Sendo L_i : comprimento inicial de (E_f); W_i : largura inicial de (E_f); D_{mfo} : distância inicial entre (E_m) e (E_f). O sensor capacitivo possui eletrodos planos e paralelos cuja capacitância (c) é definida pela Eq. (1).

$$c = \frac{\xi \cdot L_i \cdot W_i}{D_{mfo}} \quad (1)$$

Sendo ξ : permissividade dielétrica.

A Equação (2) mostra a relação entre variação de capacitância (dc) com a variação (dD_{mf}) considerando L_i , W_i e ξ constantes.

$$\frac{dc}{d(D_{mf})} = -\frac{\xi \cdot L_i \cdot W_i}{D_{mfo}^2} \quad (2)$$

Na Equação (3) substitui-se as constantes por k_1 .

$$k_1 = (\xi \cdot L_i \cdot W_i) / D_{mfo}^2 \quad (3)$$

Sendo k_1 = fator de calibração.

Integrando a Equação (2) e incorporando $\Delta c(t)$, obtém-se a Eq. (4).

$$\Delta c = -k_1 \cdot \Delta D_{mf} \pm \Delta c(t) \quad (4)$$

Sendo $\Delta c(t)$: variação da capacitância provocada pela variação de temperatura (t).

Se verifica relação de proporcionalidade entre (Δc) e (ΔD_{mf}), porém $\Delta c(t)$ precisa ser eliminado por gerar instabilidade no sensor.

Na fase seguinte projetou-se um extensômetro capacitivo formado por quatro sensores capacitivos com objetivo de aumentar a sensibilidade e estabilizar a resposta com a temperatura.

A Figura 2 mostra a vista lateral da estrutura do extensômetro capacitivo contendo quatro sensores capacitivos idênticos.

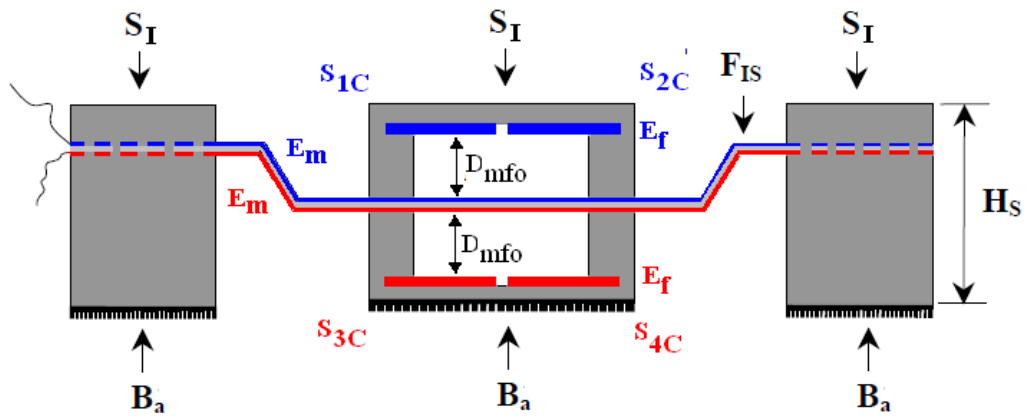


Figura 2. Extensômetro capacitivo.

Sendo S_I : suporte isolante; B_a : bases coladas; H_S : altura da base; F_{IS} : filme isolante colado entre eletrodos móveis; S_{1C} , S_{2C} , S_{3C} e S_{4C} : sensores capacitivos.

Os eletrodos fixos (E_f) foram colados ao suporte (S_I) isolante enquanto os eletrodos móveis (E_m) foram separados entre si e colados em um filme isolante flexível.

A estabilidade da resposta com a temperatura (t) foi obtida com a ligação em Ponte de Wheatstone entre os sensores S_{1C} , S_{2C} , S_{3C} e S_{4C} .

A Figura 3 apresenta o extensômetro capacitivo (A) com os quatro sensores capacitivos apresentados na Fig. 2.

A ligação em Ponte de Wheatstone permite eliminar $\Delta c(t)$ na resposta (V_o) e obter valor médio dos sensores capacitivos.

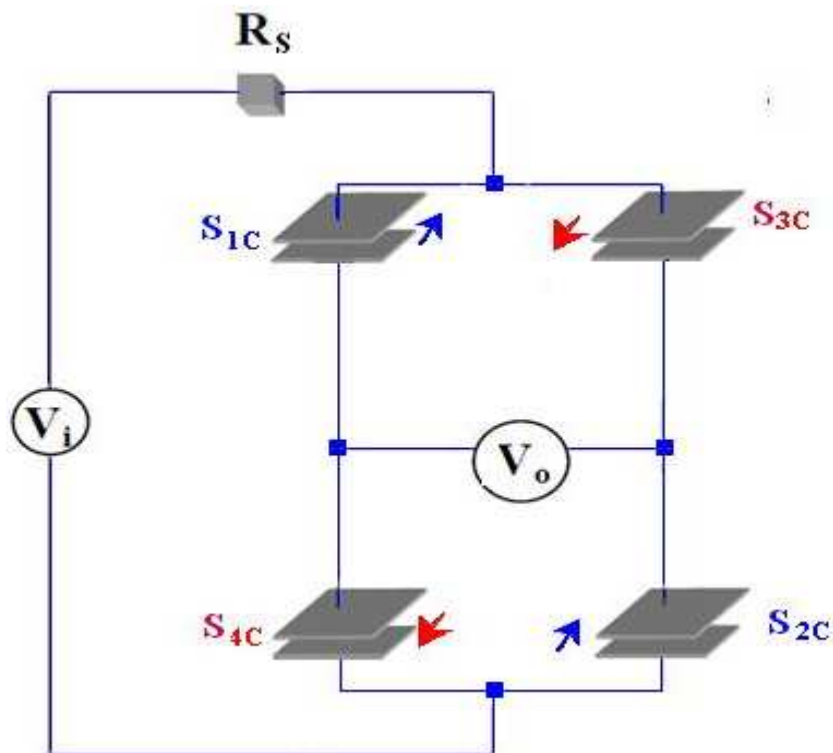


Figura 3. Ligação em Ponte de Wheatstone.

Sendo R_s : resistência série com a Ponte de Wheatstone; V_i : Tensão senoidal de alimentação e V_o : tensão de saída da Ponte de Wheatstone contendo sensores capacitivos

R_s é necessário para evitar curto-circuito.

A Figura 4 mostra estrutura de célula de carga onde está colado extensômetro capacitivo da Fig. 3.

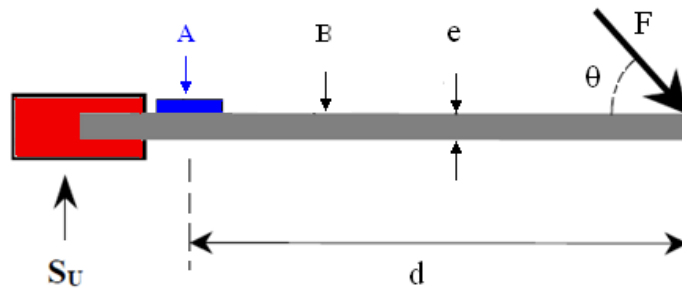


Figura 4. Estrutura de célula de carga.

Sendo S_u : suporte da haste metálica; A: extensômetro capacitivo; B: haste metálica; e: espessura; F: força aplicada com ângulo (θ) e d: distância do ponto de aplicação de (F) até (A).

A Equação (5) apresenta a deformação sofrida na haste metálica devido aplicação de (F).

$$\epsilon_L = \pm \frac{\cos\theta \cdot F}{E \cdot A_T} \pm \frac{\text{sen}\theta \cdot 6 \cdot F \cdot d}{e \cdot E \cdot A_T} \quad (5)$$

Sendo ϵ_L : deformação longitudinal; E: Módulo de Young e A_T : área de seção transversal da haste metálica.

A Equação (6) mostra relação entre deformações (ϵ_T) e (ϵ_L).

$$\epsilon_T = -\nu \epsilon_L \quad (6)$$

Sendo ϵ_T : deformação transversal e ν : coeficiente de Poisson.

A Equação (7) mostra relação entre (ϵ_L), (ϵ_{FN}) e (ϵ_{FC}).

$$\epsilon_L = \pm \epsilon_{FN} \pm \epsilon_{FC} \quad (7)$$

Sendo ϵ_{FN} : deformação provocada pela força normal e ϵ_{FC} : deformação provocada pela força cortante.

A Equação (8) mostra (ϵ_{FN}) enquanto a Equação (9) mostra (ϵ_{FC}).

$$\epsilon_{FN} = \pm \frac{\cos\theta \cdot F}{E \cdot A_T} \quad (8)$$

$$\epsilon_{FC} = \pm \frac{\text{sen}\theta \cdot 6 \cdot F \cdot d}{e \cdot E \cdot A_T} \quad (9)$$

As Equações (10), (11) e (12) apresentam o comprimento final (L_F), a largura final (W_F) e a distância final (D_{mF}) entre eletrodos (E_m) e (E_r) dos sensores capacitivos.

$$L_F = L_i \cdot (1 \pm \epsilon_L) \quad (10)$$

$$W_F = W_i \cdot (1 \mp \nu \epsilon_L) \quad (11)$$

$$D_{mF} = D_{mfo} \cdot (1 \pm \epsilon_L) \quad (12)$$

A resposta (V_O) do extensômetro capacitivo é definida pela Equação (13).

$$V_O = \epsilon_L \cdot V_i \cdot \frac{(1 + \nu)}{2} \quad (13)$$

Substituindo (ϵ_L) na Equação (13) obtém-se (V_O) na Eq. (14).

$$V_O = F \cdot \left[\frac{(\pm e \cdot \cos\theta \pm 6 \cdot d \cdot \text{sen}\theta) \cdot V_i \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot e \cdot A_T \cdot E} \right] \quad (14)$$

A Equação (15) apresenta uma constante (k_2) que simplifica a Eq. (14).

$$\text{Fazendo } k_2 = \frac{(\pm e \cdot \cos\theta \pm 6 \cdot d \cdot \text{sen}\theta) \cdot V_i \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot e \cdot A_T \cdot E} \quad (15)$$

Sendo k_2 : fator de calibração.

A Equação (16) corresponde a introdução de (k_2) na Eq. (14) e mostra a relação de linearidade entre (F) e (V_0).

$$V_0 = F.k_2 \quad (16)$$

3. METODOLOGIA E MATERIAIS UTILIZADOS

A pesquisa atual foi desenvolvida no laboratório de Instrumentação Eletrônica e Sensores da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. O projeto consistiu em implementar um extensômetro capacitivo formado por duas Pontes de Wheatstone contendo oito sensores capacitivos.

A estrutura para cada quatro sensores capacitivos idênticos é apresentada na Fig. 2. Foi utilizado um resistor (R_s) de metal filme de 150Ω ligado em série as duas Pontes de Wheatstone, com objetivo de evitar curto-circuito entre os eletrodos dos sensores (S_{1C} , S_{2C} , S_{3C} , S_{4C} , S_{5C} , S_{6C} , S_{7C} e S_{8C}).

Os eletrodos de cada sensor capacitivo foram construídos em aço inox com objetivo de evitar a oxidação. O eletrodo fixo (E_f) mediu 40 mm de comprimento e o eletrodo móvel (E_m) mediu 8 mm de comprimento. A largura dos eletrodos (E_f) e (E_m) são iguais e mediram 5 mm enquanto a espessura da lâmina de aço inox foi de 0,1 mm. O espaçamento (D_{mf}) entre os eletrodos foi de 0,5 mm.

O adesivo utilizado para fixar os eletrodos (E_m) e (E_f) foi cianocrilato de uso genérico. O suporte isolante (S_I) utilizado foi desenvolvido em polímero rígido.

Em cada Ponte de Wheatstone foram utilizados quatro sensores capacitivos idênticos como é apresentado na Fig. 3. A vantagem de utilizar nas duas pontes esta metodologia é permitir a comparação das diferenças de potencial elétrico (V_{R1}) e (V_{R2}) nos ramos idênticos das pontes.

A Figura 5 mostra o extensômetro capacitivo formado pelas duas Pontes de Wheatstone ligadas em paralelo com objetivo de utilizar apenas uma fonte de tensão senoidal para garantir a mesma alimentação (V_i), corrente, fase, frequência (F) e ruído. Além disso, a mesma alimentação (V_i) permitirá a compensação de variações de capacitâncias $\Delta c(t)$.

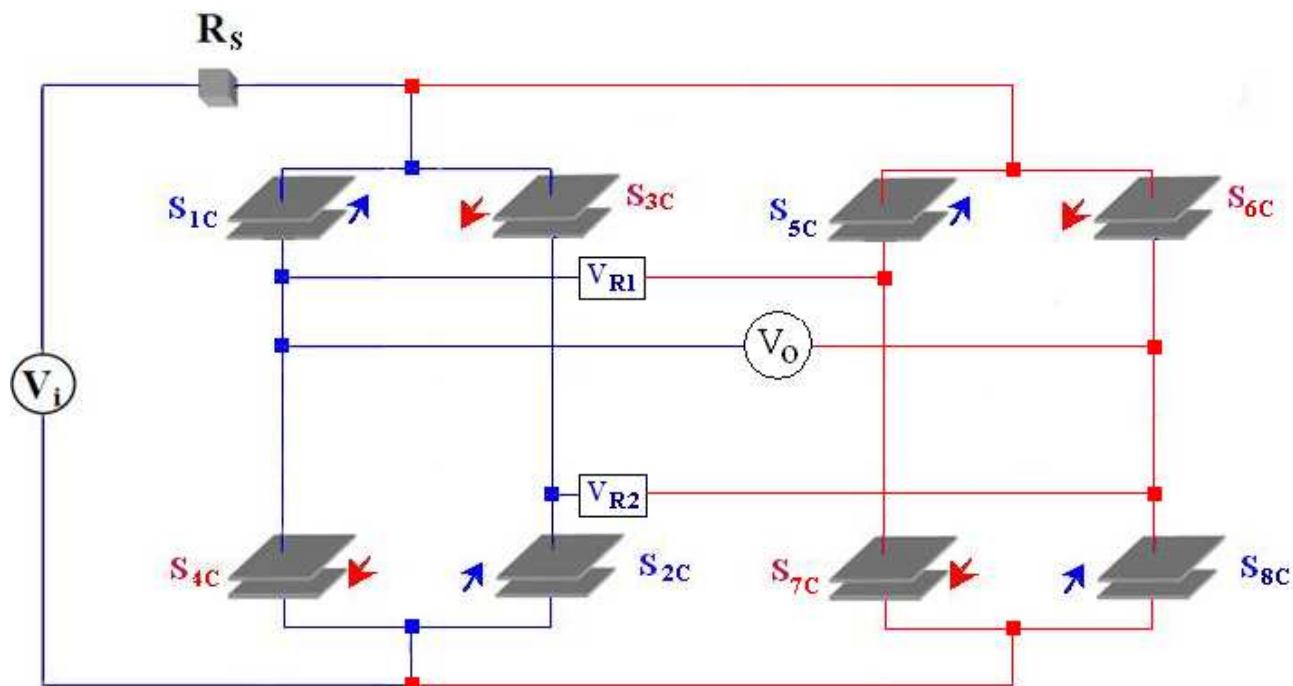


Figura 5. Extensômetro capacitivo.

A tensão senoidal (V_i) aplicada pelo gerador de sinais foi de 7 V com frequência de 15 kHz. Esta fonte de tensão possui modelo DEGEM PU 2222 (Minipa).

Foram desenvolvidos três circuitos de condicionamento de sinais idênticos considerando que os ramos do extensômetro capacitivo também são idênticos. Um dos circuitos foi utilizado para obter a resposta (V_0) do extensômetro e os outros dois circuitos foram utilizados para comparar (V_{R1}) e (V_{R2}). Assim, é possível detectar diferenças que não deveriam existir entre ramos das duas pontes.

Se $V_{R1} = V_{R2}$, os sensores capacitivos são de boa qualidade e fornecem as mesmas respostas. Se $V_{R1} \neq V_{R2}$, existe ao menos um sensor capacitivo com defeito que precisa ser encontrado e substituído.

Os amplificadores operacionais (AOs) utilizados nos circuitos de condicionamento de sinais foram alimentados com fonte de tensão constante modelo MPC 3006D (Minipa) fornecendo +12 V e -12 V.

3.1. Circuito de Condicionamento de Sinais

A Figura 6 mostra o diagrama do circuito de condicionamento de sinais.

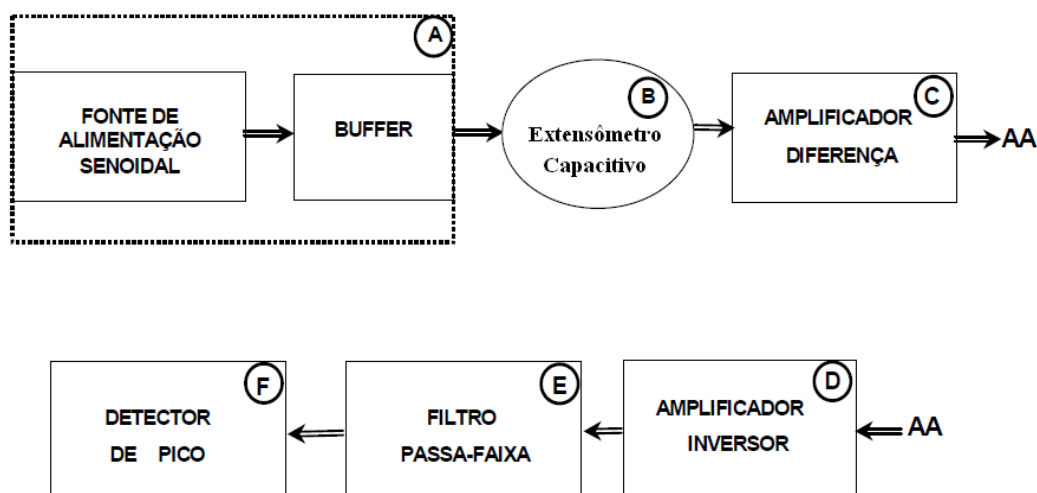


Figura 6. Esquema do circuito de condicionamento de sinais.

O circuito de condicionamento é representado pelos blocos (A, B, C, D, E e F). O bloco (A) é constituído pela fonte de tensão senoidal (V_i) e por um *buffer* cuja finalidade é isolar a fonte de tensão e reforçar a corrente para os demais blocos. A tensão na saída do *buffer* alimenta o extensômetro capacitivo (B). Foi obtida a tensão de saída (V_o) entre os ramos das Pontes de Wheatstone que foi pré-amplificada por meio do amplificador diferença (C) com ganho $3 \cdot 10^3$.

A saída do amplificador (C) foi submetida ao amplificador inversor (D) para realizar nova amplificação com ganho 30. A saída do amplificador (D) foi conectada ao filtro Passa-Faixa (PF) (E) para excluir ruídos externos cujos sinais possuem frequências diferentes e que poderiam se misturar a tensão (V_i) da fonte de alimentação. Este filtro é de quarta ordem, possui estrutura MFB (*Multiple Feed Back*) para operar com frequência de 15 kHz, largura de banda de 2 kHz e ganho 10.

A saída do filtro (E) foi conectada ao detector de pico (F) para obter a amplitude da resposta do extensômetro capacitivo (B) medida com osciloscópio digital de dois canais modelo 54603B (HP). No circuito de condicionamento de sinais foram utilizados (AOs) LF 356N (National Semiconductor) exceto em (C), que utilizou INA129 (Burr-Brown). O ganho total do circuito de condicionamento foi de $9 \cdot 10^5$.

3.2. Comparação com Sensor Capacitivo Convencional

Para poder comparar o extensômetro capacitivo com o extensômetro resistivo convencional ligados em ponte completa os dois dispositivos foram submetidos às mesmas condições experimentais, ao mesmo circuito de condicionamento de sinais e a mesma estrutura mecânica apresentada na Fig. 4.

Para aplicação da força (F) foi utilizada haste de aço inox com as seguintes características: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0,27$, $e = 0,5 \text{ mm}$, largura = 40 mm e $d = 120 \text{ mm}$. A força (F) foi realizada por meio de um cesto pendurado com fio de *nylon* contendo massas padronizadas de 50 g.

Foi feito a calibração estática realizando-se seis medidas compreendidas na faixa de 0 até 250 g acrescentando-se massas de 50 g. Depois, cada massa foi retirada do cesto gradativamente até retornar a zero. Cada medida foi repetida três vezes.

A Tabela 1 mostra as medidas realizadas.

Foi aplicado o método dos mínimos quadrados para realizar a regressão linear, obter a curva de calibração e determinar a sensibilidade do extensômetro capacitivo. A curva é definida pela Eq. (17).

$$V_C = 0,0025 + 0,47.F \quad (17)$$

Sendo V_C : tensão de resposta do circuito de condicionamento de sinal, em Volts.

A histerese refere-se à diferença entre dois valores de saída para uma mesma entrada, dependendo da direção (aumento ou decréscimo) de sucessivos valores.

Sendo MOD: máxima diferença da resposta para uma mesma entrada e FSO: saída de fundo de escala. A Equação (18) apresenta a fórmula de cálculo da histerese.

$$\% \text{histerese} = \frac{100 \cdot (\text{MOD})}{\text{FSO}} \quad (18)$$

A resolução foi definida como a menor variação no valor medido que o sistema responde.

A resposta dinâmica do novo dispositivo foi avaliada aplicando uma força com forma de onda degrau. Esta foi aplicada e posteriormente removida abruptamente. O tempo de descida é definido como o tempo necessário para a saída do extensômetro atingir o valor de 63% do valor em regime.

O intervalo de confiança foi obtido realizando-se dez vezes as medidas.

4. RESULTADO

A Tabela 1 mostra a resposta do extensômetro capacitivo com massas na faixa de 0 a 250 g.

Tabela 1. Resposta do extensômetro capacitivo obtida com a repetição de três medidas.

Massa acrescida (g)	Resposta (V)			Desvio padrão	Massa retirada (g)	Decréscimo (V)			Desvio padrão
0	0	0	0	0,00	250	1,17	1,17	1,17	0,00
50	0,23	0,22	0,23	0,00	200	0,93	0,92	0,93	0,00
100	0,50	0,50	0,49	0,00	150	0,69	0,69	0,68	0,00
150	0,70	0,70	0,69	0,00	100	0,48	0,48	0,47	0,00
200	0,93	0,93	0,92	0,00	50	0,23	0,23	0,22	0,00
250	1,17	1,17	1,16	0,00	0	0	0	0	0,00

A estrutura do sensor foi projetada de maneira que opere na região elástica. A Figura 7 mostra a calibração estática do novo extensômetro.

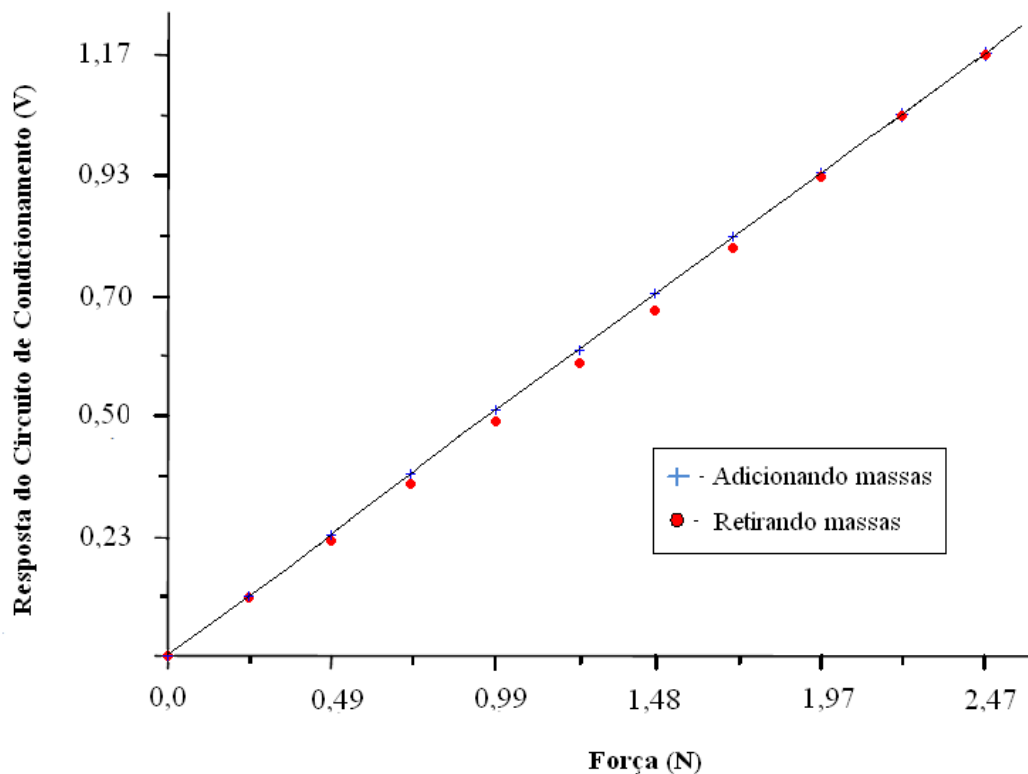


Figura 7. Resposta estática do novo extensômetro.

A histerese obtida foi de 2,7% e o seu principal fator responsável foi a quantidade elevada de adesivo utilizado no desenvolvimento do extensômetro. A (MOD) ocorreu para a força de 1,48 N.

A resolução com o circuito de condicionamento de sinais foi de 0,009 N, o tempo de resposta dinâmica foi de 15 ms e o intervalo de confiança de 95,8%.

A Figura 8 apresenta a resposta da Ponte de Wheatstone completa constituída pelos extensômetros resistivos convencionais. Esta resposta, por ser muito pequena, foi obtida com a utilização de multímetro digital de bancada MDM8156-A (Minipa) de 5 ½ dígitos.

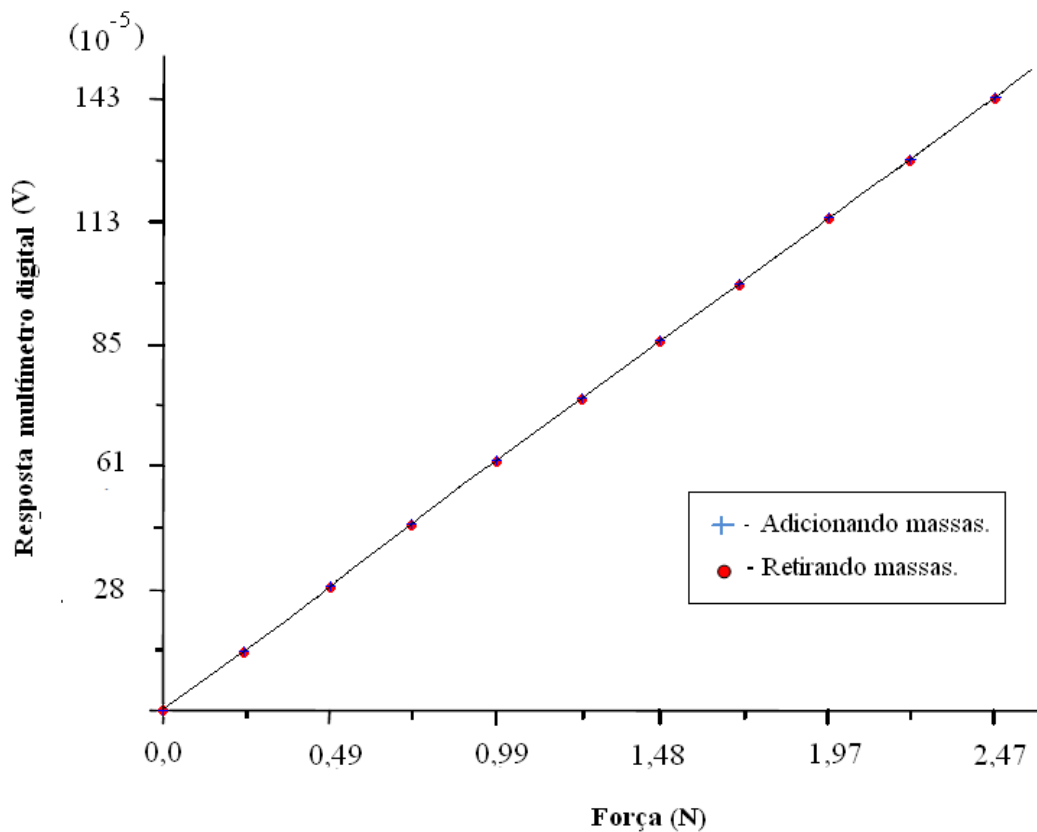


Figura 8. Resposta da ponte de extensômetros resistivos.

No caso do extensômetro resistivo convencional não se verificou a presença de histerese, o tempo de resposta dinâmica foi de 12 ms e o intervalo de confiança de 99,97%.

5. CONCLUSÃO

O projeto consistiu em implementar um extensômetro capacitivo que apresentou baixo custo, robustez e alta sensibilidade quando comparado ao extensômetro resistivo convencional. A sua configuração em Ponte de Wheatstone tornou a resposta insensível à temperatura do meio onde está colado.

O dispositivo apresentou sensibilidade 820 vezes maior que o extensômetro convencional, resposta linear, histerese de 2,7%, tempo de resposta dinâmica de 15 ms, intervalo de confiança de 95,8% e resolução de 0,009 N. A explicação para histerese e tempo de resposta dinâmica elevados residuiu no fato de utilizar grande quantidade de adesivo na sua implementação.

O dispositivo poderá ser utilizado no desenvolvimento de células de carga com objetivo de determinar grandezas mecânicas como força, deformação e deslocamento em sistemas estruturais, cuja frequência mecânica seja baixa.

A utilização de adesivo de melhor qualidade e em menor quantidade diminuiria a histerese e aumentaria a velocidade de resposta do dispositivo, permitindo sua aplicação na determinação de grandezas mecânicas mais rápidas.

6. REFERÊNCIAS

- Areny, R. P.; Webster, J. W., 1991, "Sensors and Signal Conditioning". New York: Wiley.
Cobbold, R.S.C., 1974, "Transducers for Biomedical Measurements". New York: Wiley.
Hitec Products Inc - HPI, entre 2000 e 2004, Disponível em: <http://www.hitecprod.com>. "Sensors for Hostile Environments". Acesso em dezembro em 2013.
Kolb, P. W.; Decca, R. S.; and Drew, H. D., 1998, "Capacitive sensor for micropositioning in two dimension". Rev. Sci. Instrum, v. 69, n. 1, p. 310-312.
Perusek, G. P.; Davis, B. L.; Courtney, A. C.; Andrea, S. E. D., 2002, "An extensometer for global measurement of bone strain suitable for use in vivo in humans". Journal of Biomechanics, v. 34, n. 3, p. 385-391.
Peters, R. D., 1993, "Full-bridge capacitive extensometer". Rev. Sci. Instrum., v. 64, n.8.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo apresentado neste trabalho.

CAPACITIVE EXTENSOMETER FOR THE DETERMINATION OF STRAIN IN STRUCTURAL SYSTEMS

Josivaldo Godoy da Silva, josivaldog@gmail.com¹
Elise Katherine Chaparro Ferreira, elisekatherine@hotmail.com¹
Laila Rodrigues Cirquera, lailinha_rodrigues@hotmail.com¹
Thaisa Cristina dos Santos, thaisacsantos@hotmail.com¹
André da Costa Borges da Silva, andreconstaborges@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, Cidade Universitária, CEP: 79070-900

Abstract. *This research aims to design and implement a capacitive extensometer for use in load cell . The load cell with capacitive extensometer can be used for determining mechanical quantities such as force, deformation and displacement. These quantities cause deformations in structural systems of buildings , power plants , ethanol plants, bridges, and other automotive vehicles . The device has eight capacitive sensors developed with movable electrodes stainless steel of 8 mm x 5 mm x 0.1 mm and fixed electrodes 40 mm x 5 mm x 0.1 mm. These sensors were connected in two Wheatstone bridges, fed with sinusoidal voltage of 7 V and frequency of 15 kHz . The electrodes of the capacitive sensors were bonded to the frame by means of cyanoacrylate adhesive for general purpose. The response of capacitive extensometer was connected to a conditioning circuit compressed signals. The device was subjected to static and dynamic testing showed 820 times higher sensitivity compared to conventional strain gauge metal grille. The extensometer has the following features: simple and robust construction, linear response independent of ambient temperature resolution of 0.009 N and hysteresis of 2.7 %. The existence of hysteresis is due to the use of adhesive in large quantity in the development of the structure of the extensometer. The device can be used in the determination of mechanical quantities in structural systems that are subjected to low mechanical frequency.*

Keywords: *extensometer, capacitive, sensibility, mechanical greatness.*