

ISSN 0104-1347

PROTÓTIPO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM AUTOMÁTICO PARA ESTUDOS EM CASA DE VEGETAÇÃO

AN AUTOMATIC WEIGHING LYSIMETER PROTOTYPE FOR GREENHOUSE STUDIES

Reinaldo Lúcio Gomide¹, Cid Sidney Garcia de Oliveira² e Gregorio Guirado Faccioli³

RESUMO

Um protótipo de lisímetro de pesagem automático foi desenvolvido para medições do requerimento de água das culturas. O sistema é operado com o auxílio de apenas um computador, na forma de placa, e, basicamente, feito de um conjunto de extensômetros de precisão ("strain gages"), um regulador de voltagem, um conversor de sinal analógico para digital e um conjunto de amplificadores operacionais. Os extensômetros transdutores foram colados, com adesivo epoxy, sobre uma lâmina de alumínio e conectados em um circuito de "ponte de wheatstone" para a medição de variáveis, tais como peso. Um sistema de aquisição automática de dados foi criado. Os princípios, esboço, montagem e funcionamento da instrumentação estão descritos. O sistema foi calibrado através de carregamento e descarregamento de pesos padrão pré-selecionados na plataforma de pesagem e testado e avaliado em plantas de milho e feijoeiro que foram cultivadas em vasos, em condições de casa de vegetação, na EMBRAPA-CNPMS. Um programa de computador foi desenvolvido para adquirir os dados dos sensores, permitindo os registros de local, data, horário e dados para posições específicas da memória e orientando o usuário para a entrada dos intervalos de tempo. Uma linguagem residente BASIC, contida no microprocessador, foi utilizada na programação.

Palavras-chave: lisímetro de pesagem, balanceamento de forças, extensometria elétrica, sensibilidade estática, circuito elétrico, ponte de Wheatstone, automação.

SUMMARY

An automatic weighing lysimeter prototype was developed for measurements of crop water requirement. The system is operated in a stand-alone fashion with the aid of a single board computer and is basically made of a set of precision strain gages, a voltage regulator, an analog-to-digital signal converter, and a set of operational amplifiers. The strain gage transducers were stuck with epoxy adhesive on a flat aluminium blade and connected in a Wheatstone bridge circuit for the measurement of variables such as weight. An electronic automatic data acquisition system was devised. The instrumentation principles, design, assembly and function are described. The system was calibrated by loading and unloading selectable known weights on the weighing platform, and tested and evaluated on corn and beans plants which were grown in pots under greenhouse conditions at EMBRAPA-CNPMS. A software was developed to acquire the data from the sensors, allowing the registration of local, date, time and data to specific memory locations, and prompting the user for the time intervals input. Programming utilized a resident BASIC language contained in the microprocessor.

Key words: weighing lysimeter, balancing forces, electrical strain-gage extensometer, static sensibility, electric circuit, Wheatstone bridge, automation.

INTRODUÇÃO

¹Engenharia e Manejo de Irrigação, Ph.D., Pesquisador da EMBRAPA-CNPMS, bolsista do CNPq, Cx. P. 151, 35701-970 Sete Lagoas-MG. E-mail: gomide@cnpmis.embrapa.br.

²Engenharia e Manejo de Irrigação, M.Sc., Pesquisador da EMBRAPA-CPATSA, Cx. P. 23, 56300-000 Petrolina-PE.

³Engenheiro Agrícola, B.Sc., bolsista do CNPq, Aperfeiçoamento Atividade de Pesquisa.

O requerimento de água das culturas tem sido motivo de estudos em diversas áreas. Na agricultura, principalmente irrigada, é fundamental a sua quantificação. O conhecimento da demanda hídrica das culturas envolve relações de vários fatores ligados à planta, solo e atmosfera que juntos permitem estabelecer o uso e o manejo adequado da água de irrigação.

O fluxo, o consumo, a taxa de extração ou a taxa de evaporação da água podem ser medidos através de técnicas diretas ou indiretas de pesagem. No caso da determinação direta do requerimento de água das culturas, em condições de campo, são utilizados lisímetros. Os lisímetros de pesagem são, via de regra, recipientes de grande porte, preenchidos com solo e água, dotados de dispositivos de drenagem e apoiados em sistemas de balanceamento mecânico (ABOUKHALED *et al.*, 1982; PRUITT & LOURENCE, 1985; DUGAS *et al.*, 1985; MAREK *et al.*, 1988; REYENGA *et al.*, 1988; HOWELL *et al.*, 1991). Os sistemas comerciais de grande porte, com boa sensibilidade e resolução e bom desempenho dinâmico, são normalmente montados sob encomenda e possuem custos de instalação desestimuladores para aplicação agrícola (HOWELL *et al.*, 1991; ALLEN & FISHER, 1990; PRUITT & ANGUS, 1960).

O peso da água extraída ou adicionada ao conteúdo dos recipientes dos lisímetros de pesagem é medido através de princípios de anulamento, de deflexão e, mais recentemente, através de células de carga comerciais (HOWELL *et al.*, 1991; ALLEN & FISHER, 1991; DOEBELIN, 1990). A acuidade das medidas de quantidades de água adicionadas ou extraídas dos recipientes é função da sensibilidade estática, da resolução e das características dinâmicas do sistema de medição. Atualmente é comum sistemas com acurácia da ordem de ± 0.05 mm (BACKER *et al.*, 1991). Os registros obtidos dos lisímetros são geralmente tomados como referência para correções e ajustes de alguns métodos de estimativa de evapotranspiração, validação de modelos numéricos e calibração de uma ampla gama de sensores.

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo de lisímetro de pesagem, enfatizando os princípios teóricos, montagem e funcionamento de todo o sistema. Os objetivos principais deste estudo foram:

1) Desenvolver um protótipo de lisímetro de pesagem com monitoramento automático do requerimento de água das culturas, buscando uma relação adequada entre custo, sensibilidade, resolução e desempenho dinâmico;

2) Desenvolver uma tecnologia para a automação do protótipo utilizando técnicas de microprocessamento, de dispositivos de microeletrônica e de sensores, visando o controle, a coleta, a transferência e o armazenamento dos dados para obtenção de medições precisas, rápidas e em tempo real;

3) Calibrar e avaliar o sistema para operar em condições de casa de vegetação.

MATERIAL E MÉTODOS

Técnicas de extensometria elétrica foram utilizadas para traduzir pequenas variações de consumo de água das culturas em um sinal analógico. Extensômetros elétricos ("strain-gages") de precisão, do tipo lâmina, foram usados como sensores para transformar as deformações desta lâmina, devido ao consumo de água da cultura, em sinais analógicos equivalentes às variações de suas resistências elétricas. O modelo WA-06-250BG-120, da "Micro-Measurements", escolhido para os testes, apresentou as seguintes características: a) base de um material epoxy, laminado e reforçado; b) filme metálico de uma liga de constantan; c) compensação de temperatura adequada a materiais como aço; d) comprimento ativo da grelha de 6,35 mm; e) geometria da grelha e terminais do tipo serpentina; f) resistência de 120 Ω . A fixação e instalação dos extensômetros foram realizadas de acordo com as normas técnicas (IT-1-2) da TRANSDUTEC (1984).

Métodos de balanceamento de forças para o caso de uma lâmina engastada livre foram empregados no cálculo das tensões máximas admissíveis, a fim de se evitar deformações não elásticas do material. As medidas das deformações estáticas e dinâmicas da referida lâmina foram realizadas com extensômetros elétricos de resistência, colados diretamente sobre a superfície da lâmina, utilizando o circuito da "ponte de Wheatstone". Com isso eliminou-se a possibilidade de influência da variação de temperatura nos sensores. O diagrama esquemático da Figura 1 ilustra a geometria e dimensões da lâmina engastada, a fixação dos sensores na lâmina, o ponto de aplicação da carga e o circuito da ponte.

O momento fletor (m_f) na seção em que estão instalados os extensômetros, o momento de inércia (I) e a tensão (σ) atuantes no corte BB' são fornecidos através das seguintes equações:

$$m_f = P \cdot L \quad (1a)$$

$$I = (b \cdot h^3) / 12 \quad (1b)$$

$$\sigma = (m_f \cdot y) / I \quad (1c)$$

em que P é a carga aplicada na plataforma de pesagem sobre a lâmina no ponto "t", L é o comprimento entre o ponto de aplicação de P e o centro dos sensores no sentido longitudinal da lâmina, b é a largura da lâmina, h é a espessura da lâmina e y é a metade de h, respectivamente. Considerando uma linha neutra ($y=h/2$) passando pelo eixo de simetria da seção transversal da lâmina e rearranjando as equa-

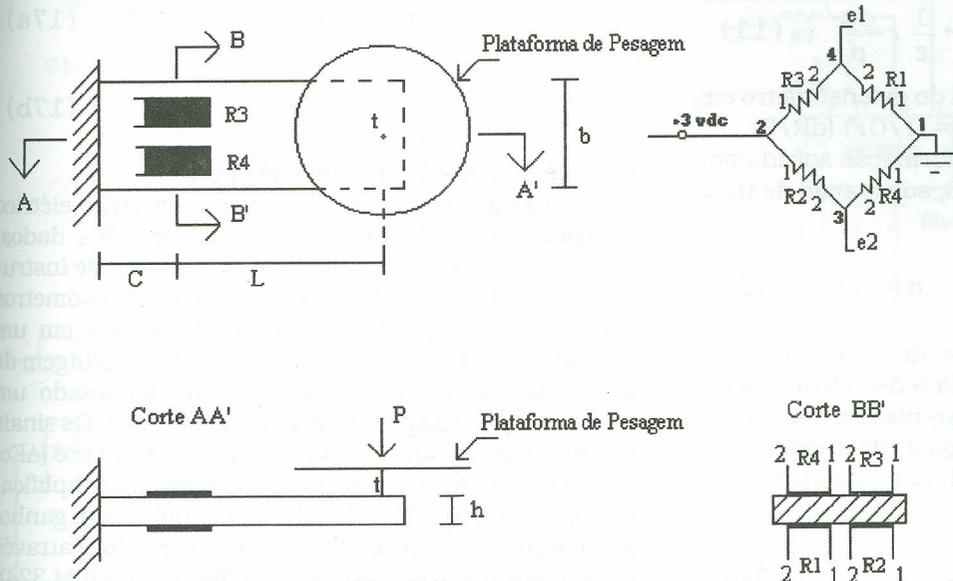


Figura 1 - Diagrama esquemático da geometria e dimensões da lâmina engastada, da fixação dos sensores (R1,R2,R3,R4) na lâmina, do ponto de aplicação da carga (P) e do circuito da ponte de Wheatstone.

ções (1a, 1b e 1c) tem-se:

$$\sigma = (6 P \cdot L) / (b \cdot h^2) \quad \text{ou} \quad (2)$$

$$P = (\sigma \cdot b \cdot h^2) / (6 L)$$

Na determinação da carga máxima admissível (P_{max}) dentro do regime de deformação elástica, condição de maior tensão admissível (σ_{adm}) no ponto de engastamento da lâmina, correspondendo à tensão limite de escoamento do material (σ_e), e, ainda usando um fator de segurança (F_s) de 50 %, tem-se:

$$P_{max} = \frac{\sigma_e}{F_s} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6(L+C)} = \sigma_{adm} \cdot \frac{(b \cdot h^2)}{6(L+C)} \quad (3)$$

em que C é o comprimento entre o centro dos sensores e o ponto de engastamento da lâmina e $\sigma_{adm} = \sigma_e / F_s$.

Para o cálculo da sensibilidade estática dos extensômetros (K_s), partiu-se da resistência (R) de um condutor:

$$R = (\rho \cdot \lambda) / A \quad (4)$$

onde ρ é a resistividade, λ é o comprimento e A é a área da seção transversal do condutor. Diferenciando a equação (4), tem-se:

$$dR = [(\lambda \cdot d\rho + \rho \cdot d\lambda) A - \rho \cdot \lambda (dA)] / A^2 \quad (5)$$

Definindo um volume do condutor $V=A \cdot \lambda$, pode-se expressar um volume diferencial da forma

$$dV = A \cdot d\lambda + \lambda \cdot dA \quad (6)$$

Através da equação clássica da mecânica dos materiais (teoria da elasticidade), tem-se:

$$dV = [(\lambda(1+\epsilon) \cdot A(1-\epsilon \cdot \nu)^2) - V] \quad (7a)$$

em que ϵ é uma deformação adimensional ($d\lambda/\lambda$) e ν o coeficiente de Poisson. Fazendo $(1-\epsilon \cdot \nu)^2 = 1 - 2 \cdot \epsilon \cdot \nu + (\epsilon \cdot \nu)^2$ e para o caso de $\epsilon \ll 1$, então $(\epsilon \cdot \nu)^2$ pode ser desprezível. Daí a equação (7a) torna-se:

$$dV = A \cdot \lambda \cdot \epsilon (-2\nu + 1) + A \cdot \lambda (-2\nu \cdot \epsilon^2) \quad (7b)$$

Com o termo $(-2 \cdot \nu \cdot \epsilon^2)$ tendendo a zero, tem-se:

$$dV = A \cdot \lambda \cdot \epsilon (1 - 2\nu) \quad (7c)$$

Igualando as equações (7c) e (6) e sendo $\epsilon = d\lambda/\lambda$, obtém-se:

$$A \cdot \lambda (d\lambda/\lambda) (1 - 2\nu) = A \cdot d\lambda + \lambda \cdot dA \quad \text{ou} \quad (8)$$

$$-2\nu \cdot A \cdot d\lambda = \lambda \cdot dA$$

Substituindo a equação (8) na equação (5) e resolvendo, tem-se:

$$dR = [\rho \cdot d\lambda (1 + 2\nu)] / A + (\lambda \cdot d\rho) / A \quad (9)$$

Dividindo cada termo da equação (9) por $R = \rho \cdot \lambda / A$ e em seguida por $\epsilon = d\lambda/\lambda$, e rearranjando, obtém-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{[\rho \cdot d\lambda (1 + 2\nu)] / A}{\rho \cdot \lambda / A} + \frac{(\lambda \cdot d\rho) / A}{\rho \cdot \lambda / A} \quad (10a)$$

$$\frac{dR}{R} = \left(\frac{d\lambda}{\lambda}\right) (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (10b)$$

$$\frac{dR/R}{d\lambda/\lambda} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{d\lambda/\lambda} \quad (10c)$$

onde, $(dR/R)/(d\lambda/\lambda)$ representa o fator de sensibilidade do extensômetro que relaciona a modificação de sua resistência com a deformação correspondente e $1 + 2 \cdot \nu + ((d\rho/\rho)/(d\lambda/\lambda))$ são termos que relacionam a variação da resistência devido a alteração do comprimento λ a mudança na área A e ao efeito piezoresistivo, respectivamente. O fator de sensibilidade é conhecido como "Gage Factor" (GF), deste modo,

$$GF = \frac{dR/R}{\epsilon} = 1 + 2\nu + \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\rho}{\rho} \quad (11)$$

Expressando a deformação local do extensômetro em função de GF, R e dR, tem-se $\epsilon = (1/GF) \cdot (dR/R)$.

Segundo a lei de Hooke, a deformação sofrida por um corpo de seção transversal S, sob a ação de uma carga P é definida por:

$$\epsilon = \frac{P/S}{E} = \frac{\sigma}{E} \quad \text{OU} \quad \sigma = E \cdot \epsilon \quad (12)$$

em que $\sigma = P/S$ e E é o módulo de elasticidade da lâmina. Utilizando a expressão da tensão (equação 2) e partindo do princípio que os extensômetros encontram-se bem fixados à lâmina engastada, o cálculo da faixa máxima de deformação pode ser feito através da seguinte expressão:

$$\epsilon = \frac{6 P \cdot L}{b \cdot h^2 \cdot E} \quad (12a)$$

Para o caso de um circuito em ponte de Wheatstone completa e considerando que $(\Delta R_i/R_i)^2 \approx 0$, tem-se:

$$\frac{\Delta E_o}{E_i} = \frac{R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (13)$$

onde ΔE_o é a diferença de voltagem entre dois braços da ponte, E_i a voltagem de excitação da ponte, R's são as resistências dos extensômetros e ΔR 's as variações dos R's. Como todos os extensômetros utilizados apresentaram a mesma resistência, ou seja, $R_1=R_2=R_3=R_4$, tem-se $\Delta R_1/R_1 = -\Delta R_2/R_2 = \Delta R_3/R_3 = -\Delta R_4/R_4$. Desta forma a equação (13) torna-se:

$$\frac{\Delta E_o}{E_i} = \frac{\Delta R}{R} \quad (14)$$

Usando a equação (11) e fazendo $dR/R = \Delta R/R$ e $d\lambda/\lambda = \Delta\lambda/\lambda$, obtem-se:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta\lambda/\lambda} \quad \text{OU} \quad GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (15)$$

$$\text{OU} \quad \frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \epsilon$$

Substituindo as equações (12a) e (14) na equação (15) e rearranjando, obtem-se:

$$\Delta E_o = E_i \cdot GF \cdot \frac{6L}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot P \quad (16)$$

Fazendo $\Delta E_o = E_o = e_2 - e_1$ e considerando um ganho do amplificador do circuito de G, a equação (16) torna-se:

$$E_o = E_i \cdot GF \cdot \frac{6L \cdot G}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot P \quad (17a)$$

$$E_o = K_s \cdot P \quad (17b)$$

em que K_s é a sensibilidade da ponte.

A Figura 2 mostra o diagrama do circuito elétrico utilizado para a aquisição automática dos dados. Todos os componentes elétricos do sistema de instrumentação desenvolvido, incluindo os extensômetros da ponte de wheatstone, foram montados em um "solderless breadboard". Para obter uma voltagem de excitação da ponte (E_i) de + 3 Vdc foi usado um regulador de voltagem de precisão (LM 723). Os sinais de voltagem da saída dos dois braços da ponte (ΔE_o , E_o ou $e_2 - e_1$) foram estabilizados com um amplificador operacional (NE 5532) de baixo ruído, sem ganho, e, em seguida, convertidos em um único sinal através de um amplificador operacional diferencial (LM 324), com um ganho de 3 vezes (MITCHELL & McCLURE, 1983; PERTENCE JR., 1989). Este sinal foi amplificado duas vezes por amplificadores operacionais (CA 741) ligados em série, com ganhos de 100 e 6,67 vezes. O ganho total do sinal (G) foi de aproximadamente 2000 vezes.

Um conversor de sinal analógico/digital (ADC 0816, 8 bits, 16 canais) foi usado para a conversão do sinal. A resolução do ADC foi obtida através da equação (DOEBELIN, 1990; NEWARK ELECTRONICS, 1988):

$$N = \left(\frac{V_{in} - V_{ref(-)}}{V_{ref(+)} - V_{ref(-)}} \right) \pm 0,5 N_d \quad (18)$$

em que, N é um número inteiro da saída digital, V_{in} é o sinal de entrada a ser convertido, $V_{ref(-)}$ é a voltagem de referência negativa (0 Vdc), $V_{ref(+)}$ é a voltagem de referência positiva (5 Vdc), n é o número de bits e N_d é a acurácia absoluta. O sinal digital foi transferido e armazenado em um computador em forma de placa (BCC 52) através da interface paralela de entrada/saída (MICROMINT, 1988). Como a faixa de conversão do ADC 0816 é de 0 a + 5 Vdc, utilizou-se um potenciômetro de 10 K Ω (P1) para o ajuste do offset. No conversor, o sinal do relógio foi controlado pelo CMOS CD 4093. Além do mais, o circuito elétrico foi composto por capacitores de cerâmica de 0,1 μ F - 50 v (C1, C4), 470 pFd - 50 v (C3) e 300 pFd - 50 v (C5); capacitor eletrolítico de 4,7 μ F - 16 v (C2); transistor (BD 135); resistências de extensômetros de 120 Ω (R1, R2, R3, R4); resistores de 4,7 K Ω - 1/8 W (R5), 3,3 K Ω - 1/8 W (R6), 2,7 Ω - 1/2 W (R7), 1,8 K Ω - 1/8 W (R8); e resistores metafilme de 1 M Ω (R9), 1 K Ω (R10), 10 K Ω (R11), 150 K Ω (R12) (BENITO, 1987; MUIDERKRING, 1985; GRUTER, 1988; NEWARK ELECTRONICS, 1988).

Para a automação do protótipo e a obtenção de medições precisas, rápidas e em tempo real dos

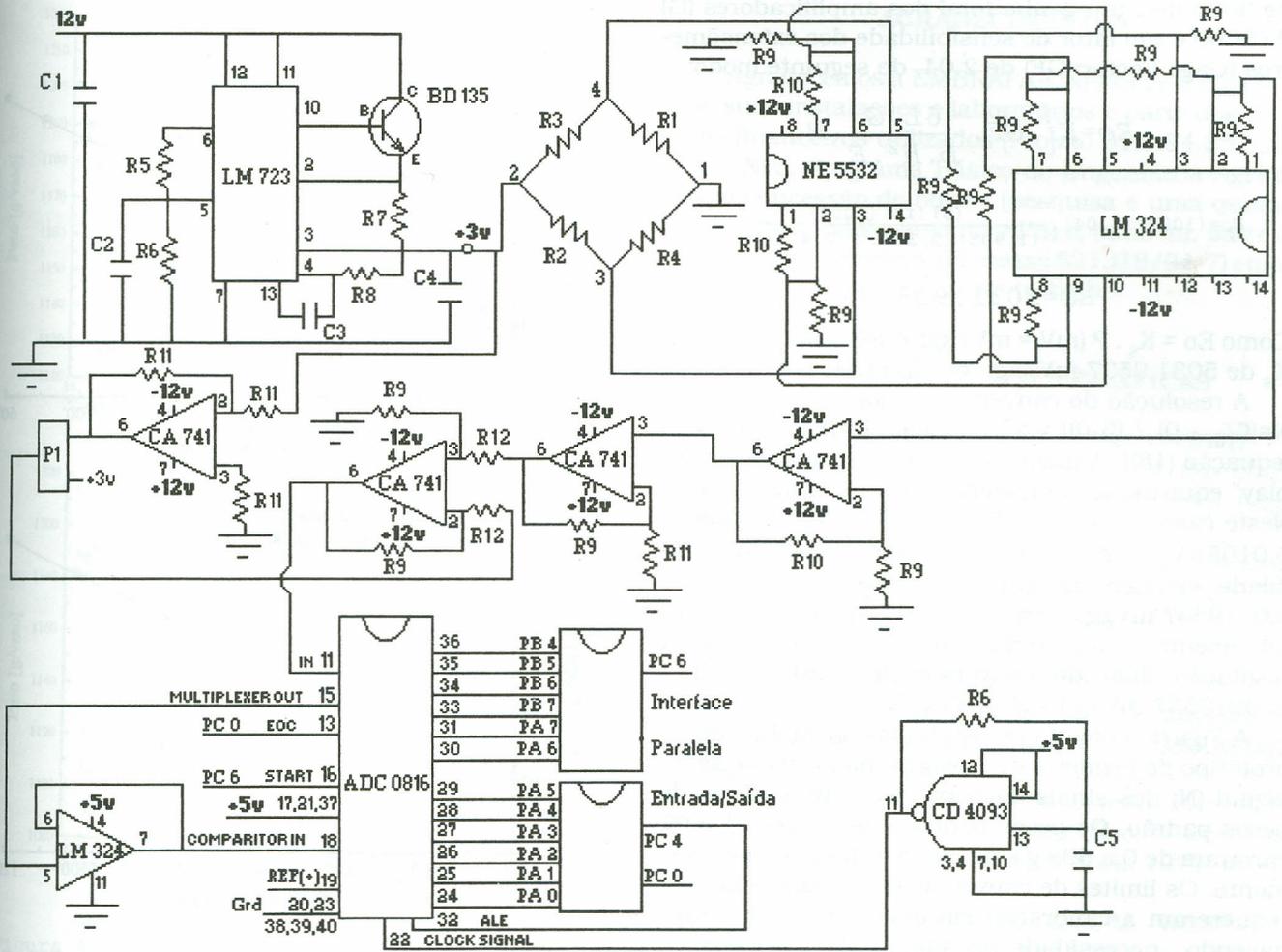


Figura 2 - Diagrama do circuito elétrico do sistema de aquisição automática de dados.

sinais, desenvolveu-se um programa de computador na linguagem Basic-52 (INTEL, 1988), visando o controle, a coleta, a transferência e o armazenamento dos dados. A calibração do protótipo de lisímetro de pesagem foi realizada com pesos padrão de valores conhecidos, visando determinar a sua sensibilidade estática real e a resolução real do conversor. A curva de calibração foi obtida para as condições de carregamento e descarregamento da plataforma de pesagem do lisímetro.

O protótipo de lisímetro de pesagem foi avaliado em condições de casa de vegetação com as culturas de milho e feijão, cultivadas em pequenos vasos com aproximadamente 0,9 kg de solo (3 % de umidade, base peso, Latossolo vermelho-escuro álico, fase arenosa). Três sementes foram semeadas em cada vaso. O vaso com as plantas e 100 % de água disponível apresentou um peso de 1190 g. As plantas foram avaliadas com 50 a 55 dias após a semeadura. O protótipo admitia em sua plataforma de pesagem

um vaso por vez.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O material da lâmina engastada foi de alumínio. De acordo com a Figura 1, a lâmina utilizada apresentou as seguintes dimensões: $C=45$ mm, $L=100$ mm, $b=19,05$ mm e $h=3,175$ mm. O módulo de elasticidade (E) para este tipo de lâmina foi de $7,6 \times 10^5$ kgf/cm².

A carga máxima admissível (P_{max}) dentro do regime de deformação elástica da lâmina foi de 1,377 Kgf para uma tensão limite de escoamento do material (σ_s) de 936 Kgf/cm² e um fator de segurança (F_s) de 1,5.

A sensibilidade estática (K_s) da ponte de wheatstone foi calculada a partir das equações (17a) e (17b) para uma voltagem de excitação da ponte (E)

de 3000 mV, um ganho total dos amplificadores (G) de 2000 e um fator de sensibilidade dos extensômetros (Gage Factor=GF) de 2.04, do seguinte modo:

$$E_o = E_i \cdot GF \cdot \frac{6 L \cdot G}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot P$$

$$E_o = (3000) (2,04) \cdot \frac{(6) (10) (2000)}{(1,905) (0,3175^2) (7,6) (10^9)} \cdot P$$

$$E_o = 5031,9537 P$$

Como $E_o = K_s \cdot P$ (mV = mV/kgf x kgf), obteve-se uma K_s de 5031,9537 mV/kgf ou 5,0319537 mV/g.

A resolução do conversor analógico digital foi de $N = (V_{in} - 0) / (5 - 0) \times 2^8$, ou seja, $N = (V_{in} / 5) \times 256$ (equação (18)). A menor variação indicada pelo "display" equivale ao incremento de N de uma unidade. Neste caso, $1 = (V_{in} / 5) \times 256$ ou $V_{in} = 5/256 = 0,019537 \sim 20$ mV. O resultado do cálculo da sensibilidade estática da ponte de wheatstone indicou 5,0319537 mV/g. Como são necessários 20 mV para incrementar uma unidade no display tem-se uma resolução final do conversor de $(20 \text{ mV}/N) / (5,0319537 \text{ mV/g}) = 3,9745 \text{ g}/N$.

A Figura 3 mostra os resultados da calibração do protótipo de lisímetro de pesagem na forma de saída digital (N) dos sinais da ponte para duas faixas de pesos padrão. Os pesos padrão das Faixas 01 e 02 variaram de 0 a 598 g e de 598 a 1192 g, respectivamente. Os limites de conversão dos sinais pelo ADC requereram a calibração em duas faixas de pesos, havendo necessidade de ajuste do offset com o potenciômetro. As curvas e as equações da Figura 3 representam a média para as seqüências de carregamento e descarregamento dos pesos padrão. Com os coeficientes angulares das equações, determinaram-se valores de sensibilidade estática real da ponte de 5,289 e 5,610 mV/g e de resolução real do conversor de 3,781 e 3,565 g/N para as Faixas 01 e 02, respectivamente.

Os valores do monitoramento automático do consumo de água foram obtidos através do protótipo de lisímetro de pesagem com as culturas de milho e feijoeiro para as condições de casa de vegetação. A variação do consumo de água do milho e do feijoeiro, na forma de peso (g/vaso), em função do tempo (horas) para os dias 29/06 a 30/06 e 30/06 a 01/07 de 1995 encontra-se na Figura 4. Os registros foram tomados logo após a irrigação dos vasos, visando uma boa condição hídrica das plantas. A reposição integral da água consumida pelas culturas foi realizada através de pesagens dos vasos, com uma balança eletrônica digital, usando a curva característica de retenção de umidade do solo.

Os dados adquiridos foram tratados com a aplicação sucessiva do critério de Chauvenet (HOLMAN, 1989), visando a sua uniformização. Para o caso do milho (Figura 4a), verifica-se um maior incremento de

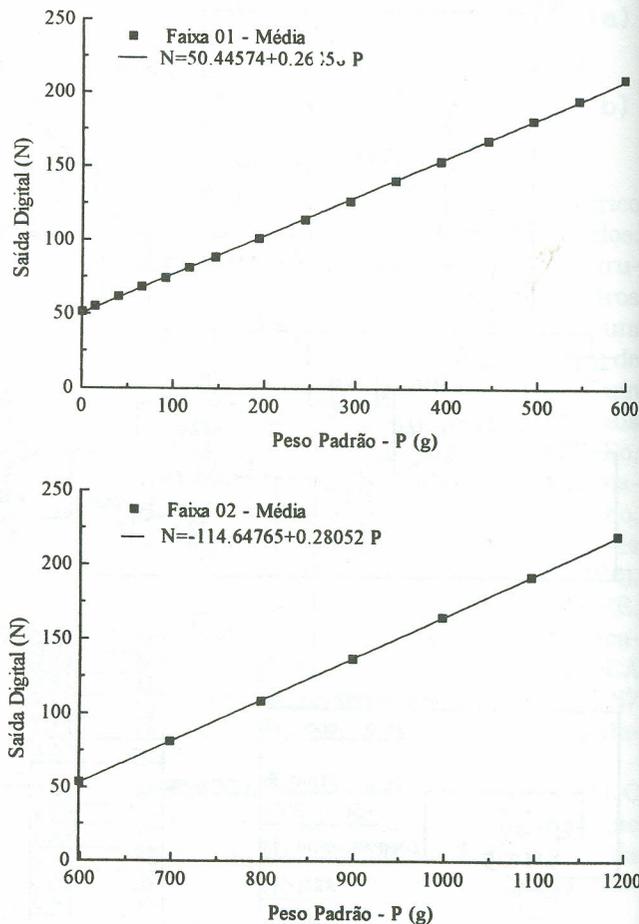


Figura 3 - Calibração do protótipo do lisímetro de pesagem na forma de saída digital (N) dos sinais da ponte Wheatstone para duas faixas de pesos padrão.

variação do consumo de água durante o dia, isto é, entre 6 e 13 horas do dia 30/06. Isto é explicado em decorrência da maior variação da radiação solar e da temperatura do ar nestes horários, propiciando uma maior demanda evaporativa da atmosfera. No início e durante a noite o consumo de água tende a estabilizar. Os resultados obtidos para o feijoeiro (Figura 4b) apresentaram o mesmo comportamento do milho.

É importante ressaltar que à noite, o sinal de referência para o circuito comparador do conversor ADC (Figura 2) modificou-se, devido a uma elevação da voltagem na rede de alimentação da casa de vegetação, à qual estava ligado o estabilizador que alimentava o sistema de medição. Isto fez com que houvesse uma pequena elevação do sinal na saída digital do conversor, principalmente entre as 20:00 e 6:00 horas, não expressando necessariamente um ganho real de peso do sistema planta/vaso (Figura 4). Este problema pode ser contornado através da estabilização da voltagem na rede de alimentação e da

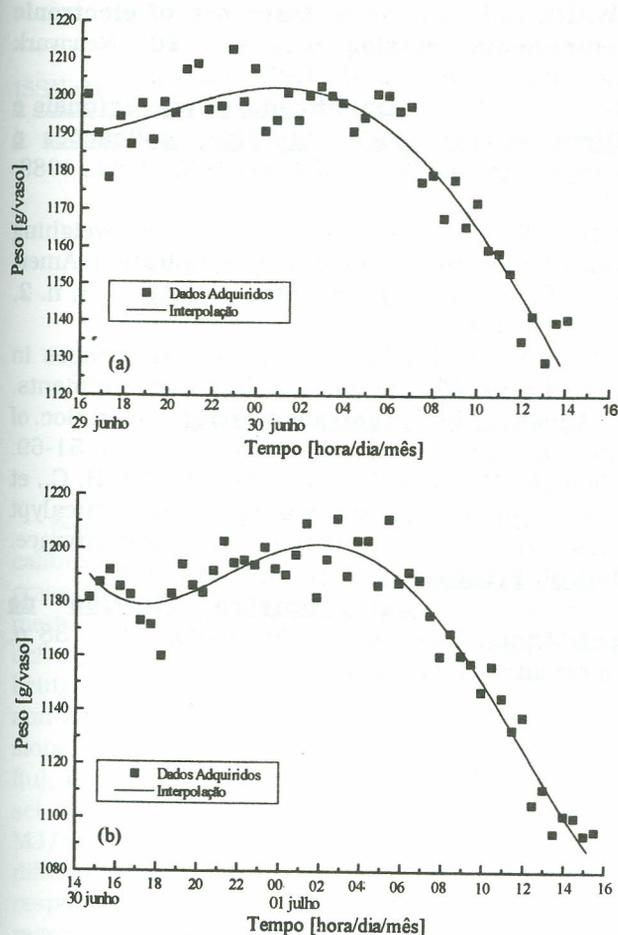


Figura 4 - Variação do consumo de água do milho em função do tempo para os dias 29 a 30 de junho (4a) e do feijoeiro para os dias 30 de junho e 01 de julho (4b), Sete Lagoas-MG, 1995.

filtragem do sinal analógico antes da entrada do conversor.

O protótipo mostrou-se sensível para detectar o requerimento de água das culturas. A sensibilidade real da curva de variação do peso com o tempo esta de acordo com a obtida pela calibração.

CONCLUSÕES

O protótipo de lisímetro de pesagem mostra-se sensível para detectar o requerimento de água das culturas com valores de sensibilidade estática real da ponte de Wheatstone de 5,289 e 5,610 mV/g e de resolução real do conversor de sinal analógico digital de 3,781 e 3,565 g/N (número inteiro da saída digital) para as variações de peso de 0 a 598 g e 598 a 1192 g, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à EMBRAPA-CNPMS pela concessão de suas instalações e laboratórios e parte dos recursos financeiros utilizados (Projeto 01.0.94.337-12) e ao CNPq, Programa Básico de Engenharia Agrícola, pela concessão de bolsas (pesquisa e uma quota de bolsa de aperfeiçoamento-APB) e, também, parte dos recursos financeiros (Processo 521318/94-7) empregados na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A., ALFARO, A., SMITH, M. **Lysimeters**. Food and Agr. Org. of the United Nations, FAO Irrig. and Drain., 1982. 68 p. (Paper No. 39).
- ALLEN, R. G., FISHER, D. K. Low-cost electronic weighing lysimeters. *Amer. Soc. of Agric. Eng. Trans. of the ASAE*, v. 33, n. 6, p. 1823-1833, 1990.
- ALLEN, R. G., FISHER, D. K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. (ed.), Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, Amer. Soc. of Civil Eng., Irrig. and Drain. Division, New York, 1991. p. 114-124.
- BACKER, L. W. de, ROUMIEUX, S. M., WÉRY, B. J. Electronic lysimetry for hydrologic studies. In: **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. (ed.), Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, Amer. Soc. of Civil Eng., Irrig. and Drain. Division, New York, 1991. p. 70-78.
- BENITO, T. P. **Circuitos integrados en video: descripcion y circuitos practicos**. Madrid, Paraninfo, 1987. 240 p.
- DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: application and design**. New York, McGraw-Hill, 4ª ed., 1990. 960 p.
- DUGAS, W. A., UPCHURCH, D. R., RITCHIE, J. T. A weighing lysimeter for evapotranspiration and root measurements. *Agronomy J.* v. 77, p. 821-825, 1985.
- GRUITER, A. F. DE. **Amplificadores operacionais: fundamentos e aplicações**. São Paulo, McGraw-Hill, 1988. 251 p.
- HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers**. Singapura, McGraw-Hill, 5ª ed., 1989. 549 p.
- HOWELL, T. A., SCHNEIDER, A. D., JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental**

- Measurements.** Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. (ed.), Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, Amer. Soc. of Civil Eng., Irrig. and Drain. Division, New York, 1991. p. 1-9.
- INTEL. **MCS Basic-52 user's manual.** Santa Clara, California, Intel Corporation, 1988. 215 p.
- MAREK, T. H., SCHNEIDER, A. D., HOWELL, T. A., et al. Design and construction of large weighing monolith lysimeters. Amer. Soc. of Agric. Eng. **Trans. of the ASAE**, v. 31, p. 477-484, 1988.
- MICROMINT. **The micromint catalog of single board computers and industrial controllers.** Vernon, CT, Micromint Inc., 1988. 31 p.
- MITCHELL, B. W., McCLURE, W. F. Signal conditioning for filtering, amplifying, computing, simulating, and controlling. In: **Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences.** Mitchell, B.W. (ed.), Amer. Soc. of Agric. Eng., St. Joseph, Michigan, 2^a ed., 1983. p. 10.01-10.19.
- MUIDERKRING, B. de **Circuitos integrados lineales: equivalencias con designación de patillas.** Madrid, Paraninfo, 2^a ed., 1985. 257 p.
- NEWARK ELECTRONICS. **Directory of electronic components: catalog number 110.** Newark Electronics, Chicago, IL, 1988. 1104 p.
- PERTENCE JR., A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório.** São Paulo, McGraw-Hill, 2^a ed., 1989. 359 p.
- PRUITT, W. O., ANGUS, D. E. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. Amer. Soc. of Agric. Eng. **Trans. of the ASAE**, v. 3, n. 2, p. 13-18, 1960.
- PRUITT, W. O., LOURENCE, F. J. Experiences in lysimetry for ET and surface drag measurements. In: **Advances in Evapotranspiration**, Amer. Soc. of Agric. Eng., St. Joseph, Michigan, 1985. p. 51-69.
- REYENGA, W., DUNIN, F. X., BAUTOVICH, B. C., et al. A weighing lysimeter in a regenerating eucalypt forest: design, construction, and performance. **Hydrol. Processes** v. 2, p. 301-314, 1988.
- TRANSDUTEC. **Extensômetro elétrico de resistência.** São Carlos, São Paulo, 1984. 38 p. (Informativo Técnico IT-1-2).