

ARTIGO TÉCNICO

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO ELETRÔNICO PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO¹

RAIMUNDO A. DE O. LEÃO², ADUNIAS DOS S. TEIXEIRA³,
FRANCISCO J. F. CANAFÍSTULA⁴, PAULO E. G. MESQUITA⁵,
SILVANA DE L. COELHO²

RESUMO: Com o advento da eletrônica e a disponibilidade de “software” de processamento, vários tipos de transdutores têm sido testados, visando à determinação da umidade do solo. O uso desses transdutores tem por objetivo a otimização do consumo de água e o conseqüente retorno econômico da atividade da agricultura irrigada. No Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, construiu-se um dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo, a sua calibração e a determinação de suas principais propriedades, como precisão e cargas mínima e máxima. O dispositivo consistiu numa torre em aço 1020, com 3,0 m de altura, no topo da qual se montou uma balança de braços. Em um dos braços da balança, colocou-se uma amostra de solo para a inserção dos sensores de umidade e, no outro, uma célula de carga para medir a variação de massa de água na amostra de solo. Foi implementado um circuito eletrônico para permitir a interface da célula de carga com um sistema de aquisição de dados. A análise de regressão, cuja variável dependente foi a saída da célula de carga, e a independente, a massa à qual a balança foi submetida, mostrou-se linear entre 1 kg e 50 kg, com coeficiente de determinação de 0,99995 e coeficiente angular de 0,09198 mV g⁻¹. O dispositivo pode ser utilizado para calibração de sensores de umidade do solo com sensibilidade correspondente à variação de 12,28 mL de água e cargas mínima e máxima para as amostras de solo variando entre 1 e 50 kg.

PALAVRAS-CHAVE: célula de carga, instrumentação eletrônica, curva característica do solo.

DEVELOPMENT OF ELETRONIC DEVICE TO CALIBRATE SOIL MOISTURE SENSORS

ABSTRACT: Several types of transducers have been tested to measure soil moisture content for irrigation purpose. Their use aims at optimizing water consumption and net profit from irrigation. A research was conducted at the Agricultural Engineering Department at the University Federal of Ceará and aimed at building a device to calibrate soil moisture sensors, in addition to find its major properties, such as accuracy, maximum and minimum loads. The device is composed of a 3-meter high iron tower, a scale, load cell and a data acquisition system. In one the arms of the scale a horizontal soil column was mounted and adapted to receive soil moisture sensors. In the other arm a load cell was installed in order to measure the change in water content of the soil. A electronic circuit was constructed to allow for the interfacing of the load cell with a data acquisition system. The response of the scale in volts to a load (in grams) shows to be linear between 1 kg and 50 kg, with a correlation coefficient of 0.99995 and slope of 0.09198 mV g⁻¹. The combination to the data acquisition system used resulted in a sensitivity of 12.28 mL of water per count, and minimum and maximum loads of 1 kg and 50 kg, respectively.

KEYWORDS: load cell, soil water retention curve, instrumentation.

¹ Projeto com apoio da FINEP/CNPq.

² Eng^o Agrônomo, Mestre em Irrigação e Drenagem, UFC, Fortaleza - CE, Fone: (0XX85) 288.9765, alipioleao@yahoo.com.br

³ Professor Adjunto, Ph.D., Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza - CE.

⁴ Bacharel em Física, Habilitação em Instrumentação, Eletrotécnico, Departamento de Engenharia Agrícola, UFC.

⁵ Graduando em Engenharia Mecânica, UFC, Fortaleza - CE.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 28-3-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 3-1-2007

INTRODUÇÃO

O aumento na produção de alimentos e nos demais setores produtivos pode levar à escassez de água. Tal fato reforça a importância da programação da irrigação, cuja eficiência depende de conhecimentos a respeito da cultura, como por exemplo, as necessidades hídricas da mesma nos diferentes estágios de crescimento; do clima, no tocante aos fatores meteorológicos governantes do deslocamento da água para a atmosfera, pelos fenômenos da evaporação e da evapotranspiração e do solo, principalmente nas suas características físicas, determinantes da capacidade de armazenamento da água, bem como da retenção da mesma na profundidade das raízes. Estes conhecimentos possibilitam a estimativa de quando e quanto irrigar mantendo a eficiência de irrigação em níveis aceitáveis, pois, com o monitoramento da umidade do solo pode-se ter maior controle da irrigação, minimizando-se o estresse hídrico às culturas, por excesso ou por escassez de água.

Existem métodos diretos e indiretos de determinação da umidade do solo. Dentre os métodos diretos, o gravimétrico é o mais utilizado, consistindo em amostrar o solo e, por meio de pesagens, determinar a sua umidade gravimétrica (u), relacionando a massa de água com a massa de sólidos da amostra ou a umidade volumétrica (θ), relacionando o volume de água contido na amostra e o seu volume. O método gravimétrico possui a desvantagem de necessitar de 24 horas ou mais para obter o resultado (MIRANDA & PIRES, 2001). Contudo, é o método-padrão para calibração dos métodos indiretos.

A possibilidade de determinação instantânea da umidade torna os métodos indiretos mais adequados para indicar o início e a duração da irrigação. Segundo COELHO (2003), os principais métodos indiretos baseiam-se em medidas, como a moderação de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo. Essas são características do solo que variam com a sua umidade. No entanto, esses métodos necessitam de calibração em relação à umidade do solo. Conforme o tipo de sensor e a sua sensibilidade aos fatores ambientais, bem como a variabilidade espacial da característica medida no solo, pode haver a necessidade de várias calibrações para diferentes solos, variação de temperatura, profundidades, etc.

Os avanços na informática e no desenvolvimento de sensores de fácil conexão a computadores e “dataloggers” possibilitam a automação total da irrigação. Com a automação, os controladores desenvolvidos são capazes de acionar ou desligar os sistemas de irrigação a partir dos dados enviados continuamente por sensores de umidade do solo. Um sistema automatizado de irrigação bem programado e instalado garante a umidade necessária às culturas em cada estágio de desenvolvimento, evitando a escassez ou o excesso de irrigação.

HOROWITZ & HILL (1989) definem como transdutores os sensores que convertem grandezas físicas, como temperatura, luminosidade, magnetismo, peso, aceleração, intensidade do som, etc. em grandeza elétrica, gerando sinais que podem ser manipulados por circuitos eletrônicos, quantificados por um conversor analógico-digital e analisados por computadores ou “dataloggers”.

São exemplos de transdutores amplamente empregados: os termopares e os termistores, os quais medem a temperatura, os sensores de pressão de silício integrado, para medir a pressão, e as células de carga, para medir força. Para medir indiretamente a umidade do solo, há sensores, como os resistivos, que tomam por base a variação da resistência do solo à passagem de corrente elétrica, a qual é tanto menor quanto maior sua umidade. Outro exemplo são os sensores com base na propriedade dielétrica do solo, com variação proporcional à umidade, e os transdutores de pressão, que medem a tensão da água do solo.

COELHO (2003) desenvolveu um sensor de umidade do solo, tipo tensiômetro eletrônico, cujo transdutor utilizado foi o sensor de pressão MPX 5100 DP da Motorola. A calibração desse tensiômetro foi realizada de forma indireta, com base em um tensiômetro de mercúrio implantado nas proximidades do sensor eletrônico.

YODER et al. (1998) testaram o desempenho de sete sensores comerciais de umidade do solo, calibrando-os em relação à umidade contida em uma coluna de solo. A umidade do solo foi medida com base na massa de uma coluna de solo, utilizando-se de célula de carga.

Este trabalho teve como objetivo a construção de um dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo com base no controle, por meio de sistemas de sucção e pressão, de umidade do solo e determinação da massa da amostra, com base no peso, por uma célula de carga; sua calibração e determinação de suas principais propriedades, como precisão e cargas mínimas e máximas.

DESCRIÇÃO DO ASSUNTO

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, o qual consistiu da construção de um dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo com base na massa de água contida em uma coluna de solo.

Foi construída uma torre de aço 1020, de 3,0 m de altura (Figura 1-A), visando à utilização de uma adaptação do funil de placa porosa. No topo, dois perfis em “I”, unidos de forma cruzada por um conjunto composto por eixo, mancais e rolamentos, no ponto central dos perfis (Figura 1-B), formaram uma balança de braços. Foi colocado em um dos braços da balança o solo com massa variável, conforme a sua umidade, e do outro lado, uma célula de carga para medir a variação da massa do solo, conforme a umidade do mesmo. Um contrapeso constou do mesmo braço da balança preso à célula de carga e acima dessa.

Em condição de equilíbrio, o somatório dos momentos (M) em torno do eixo de rotação deve igualar-se a zero ($\sum M_o = 0$). Considerando o contrapeso (W_1) e a carga a ser medida (W_2), as cargas atuantes nos dois lados da balança e L_1 e L_2 as distâncias em relação ao ponto central do perfil superior, então $W_1 L_1 = W_2 L_2$. Foi utilizado $L_1 = L_2 = 0,60$ m. L_1 e L_2 foram feitos iguais para melhorar o equilíbrio da estrutura. Nesse caso, quando em equilíbrio, W_1 igual a W_2 e a célula de carga não sofre deformação e registra a saída mínima em Volts.



FIGURA 1. A - Esquema da estrutura de aço 1020 com os componentes da balança e a distribuição das cargas atuantes; eixo, mancais e rolamentos (1); contrapeso (2); coluna de solo com sensores a serem calibrados (3); célula de carga (4), e B - detalhe do cruzamento dos perfis em “I” com os mancais, eixo e rolamentos.

Um tubo de acrílico de 20 cm de diâmetro interno e 100 cm de comprimento foi adaptado para acondicionar a amostra de solo onde foram instalados os sensores a serem calibrados (Figura 2-A). O tubo de acrílico contou com cinco entradas para sensores tipo tensiômetros, dispostas em direção longitudinal na parede do tubo e distantes entre si 0,16 m. Do lado diametralmente oposto, foram perfuradas cinco saídas onde foram adaptados funis de placa porosa, e duas tampas de acrílico fecharam o tubo. Em cada tampa, foi adaptada uma tomada de pressão para a introdução do ar comprimido do compressor, como forma de adaptação da câmara de pressão de Richards. A Figura 2-B é um esquema mostrando a disposição de sensores tipo tensiômetro eletrônico e tipo resistência elétrica na coluna de solo.

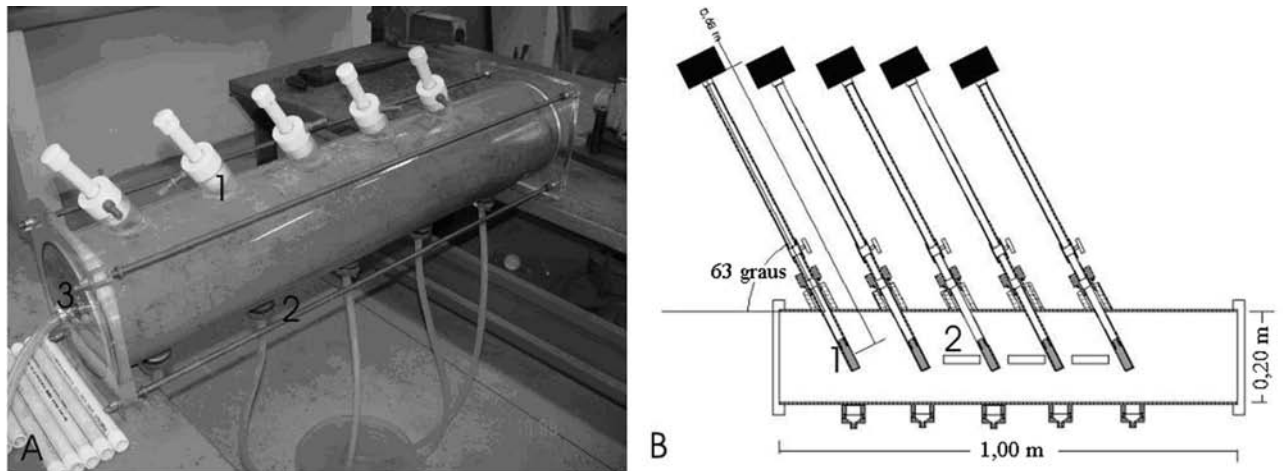


FIGURA 2. A - Tubo de acrílico com a coluna de solo, as entradas para os sensores tipo tensiômetro (1), para os funis com placa porosa (2) e para o ar comprimido (3), e B - esquema do tubo de acrílico com os sensores tipo tensiômetro eletrônico (1) e resistência elétrica (2).

Compondo o calibrador, constou ainda uma adaptação do funil de placa porosa para controle de potenciais mátricos do solo até $-24,53$ kPa (2,5 mca), uma adaptação da câmara de pressão de Richards, para potenciais mátricos abaixo desse valor, e um sistema de aquisição de dados. Na Figura 3-A, apresenta-se o esquema da adaptação do funil de placa porosa, onde um tubo de PVC, disposto verticalmente, com saídas longitudinais, é acoplado por meio de uma mangueira flexível às saídas do tubo de acrílico com placas porosas, possibilitando a saída da água retida a tensões de até $24,53$ kPa (2,5 mca). Na Figura 3-B, mostram-se, esquematicamente, os detalhes da saída de água com a placa porosa.

Para a adaptação da câmara de Richards, providenciaram-se entradas na coluna de solo para o ar comprimido proveniente de um compressor modelo MSV 5,2/130 da marca Schulz. Um sistema com registros e manômetros possibilitou o controle da pressão aplicada (Figura 4).

Foi montado um sistema de aquisição de dados composto por um conversor analógico-digital (CAD) de 12 bits e 11 canais, um microcontrolador (AMD 188), portas seriais e um microcomputador (Figura 5). Os dados brutos são apresentados no monitor em tempo real para controle visual por parte do operador, à frequência de 3 Hz, e gravados em arquivo de texto para processamento posterior. São utilizados dez canais, sendo cinco para os tensiômetros, três para os sensores tipo Watermark, um para o sensor de temperatura e um para a célula de carga.

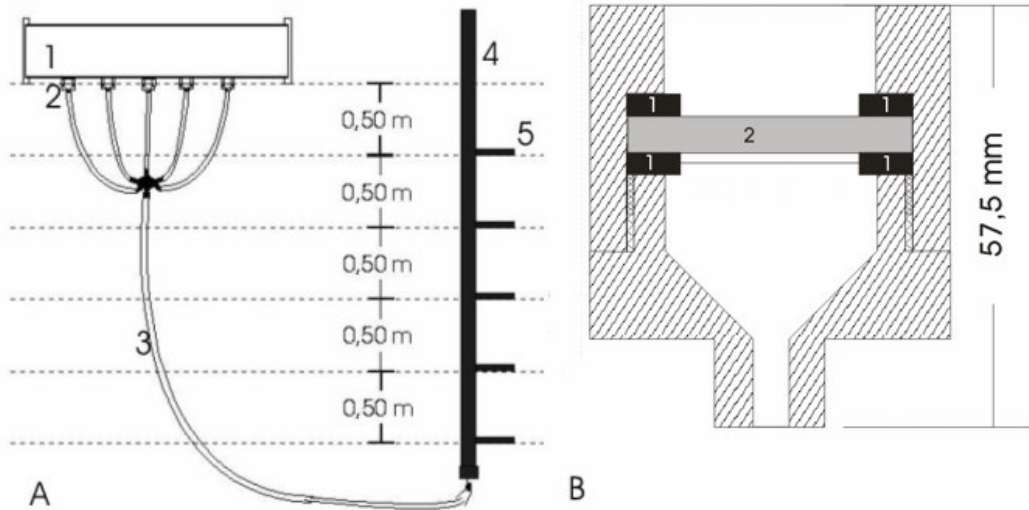


FIGURA 3. A - Esquema do funil de placa porosa com tubo de acrílico para o acondicionamento da coluna de solo (1); saídas com placa porosa (2); tubo flexível conectando a coluna de acrílico ao tubo de PVC (3); tubo de PVC (4); saídas do tubo de PVC (5) para o estabelecimento das tensões de sucção. B - Esquema da saída de água com vedação de borracha (1) e placa porosa (2).

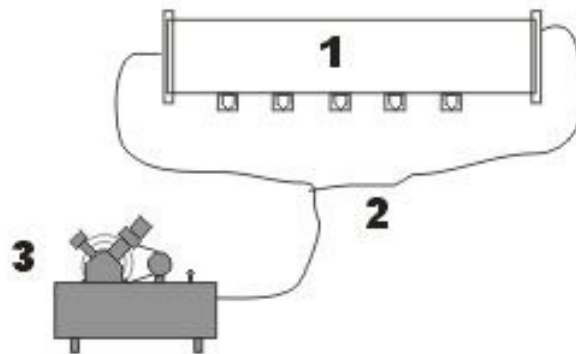


FIGURA 4. Esquema da adaptação da câmara de Richards com tubo de acrílico para o acondicionamento da coluna de solo (1); mangueira flexível para ar comprimido (2), e compressor (3).

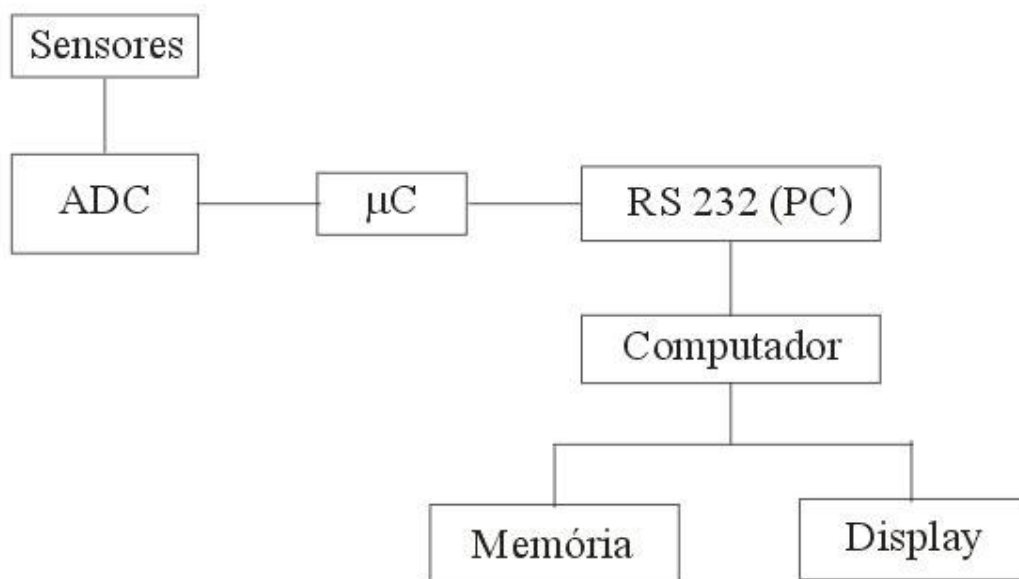


FIGURA 5. Diagrama de blocos com os componentes do sistema de aquisição de dados.

Para interfaceamento ao sistema de aquisição de dados dos sensores Watermark, tipo resistência elétrica, fabricados pela Irrometer Inc., foi implementada e confeccionada uma placa de circuito elétrico, cujo diagrama de blocos está apresentado na Figura 6. Quando usado com um dispositivo de aquisição de dados, a tensão de excitação desses sensores é de 5 VAC, com frequência de 100-120 Hz. A saída dos sensores WaterMark varia de 500 a 30.000 ohms, equivalendo à variação de 0 a 200 centibares (0 a 200 kPa) de tensão do solo, sendo essa relação não-linear.

Foi utilizada uma célula de carga modelo SV 50, da ALFA INSTRUMENTOS ELETRÔNICOS LTDA., com capacidade nominal de 50 kg, sensibilidade de 2 mV/V e tensão de excitação de 10 V. A célula de carga, um transdutor de medição de força, consiste em uma estrutura rígida na qual estão aderidos os sensores denominados “strain gage”. Quando submetida à determinada carga, a deformação na estrutura da célula de carga é transmitida aos sensores, fazendo com que se modifique a resistência à passagem de corrente elétrica através dos mesmos. Os sensores estão dispostos segundo uma ponte de Wheatstone, fazendo com que a tensão de saída da célula de carga varie conforme a carga a que está submetida.

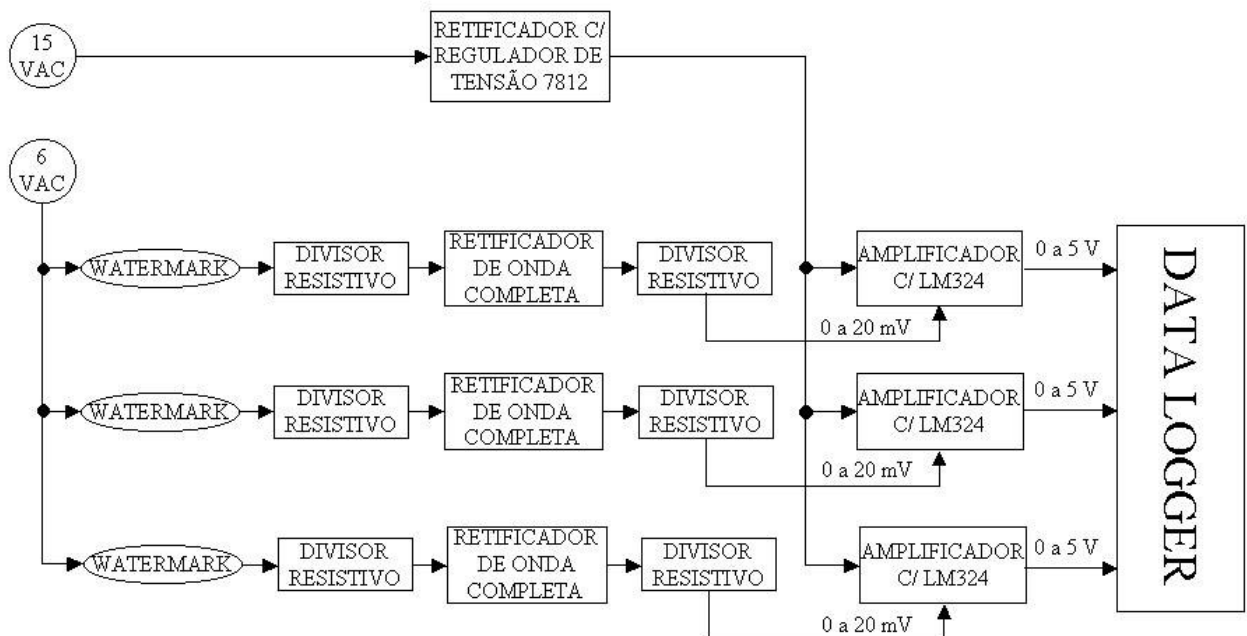


FIGURA 6. Diagrama de blocos da placa de circuito elétrico para interfaceamento dos sensores Watermark com o sistema de aquisição de dados.

Foi projetada e implementada uma placa de circuito impresso para interfaceamento da célula de carga com o CAD (Figura 7). A placa contém um circuito eletrônico que é alimentado por uma fonte DC (com entrada de 220 VAC e saída de 12 VDC). A placa de circuito impresso contém um regulador de tensão 7810, o qual fornece diferença de potencial estabilizada de 10 VDC à célula de carga e ao circuito do amplificador instrumental existente na mesma.

O circuito amplificador instrumental utilizado para amplificar a diferença de potencial elétrico na saída da célula de carga, visando ao interfaceamento com o sistema de aquisição de dados, bem como diminuir o efeito de ruídos sobre a saída da célula de carga, encontra-se esquematizado na Figura 8.

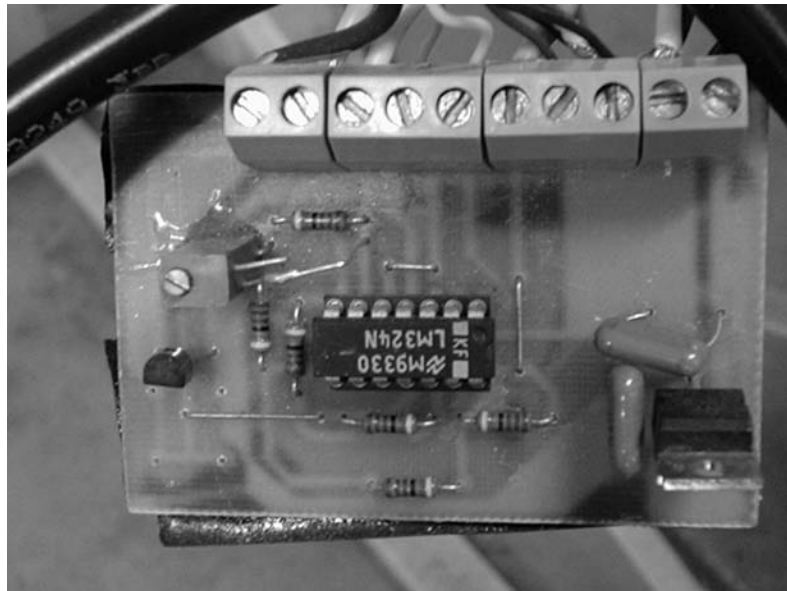


FIGURA 7. Placa de circuito impresso com os componentes.

A equação desse amplificador instrumental é dada por:

$$V_{\text{outamp}} = G(V_2 - V_1) \quad (1)$$

em que,

V_{outamp} - tensão de saída do amplificador instrumental, V;

G - ganho obtido no amplificador instrumental, adimensional;

V_2 - maior tensão de entrada no circuito integrado do amplificador instrumental, V, e

V_1 - menor tensão de entrada no circuito integrado do amplificador instrumental, V.

Esse amplificador instrumental é utilizado em aplicações que requerem amplificação dos sinais de saída acima de 100 vezes (HOROWITZ & HILL 1989) e foi projetado e implementado com o circuito integrado LM324, utilizando-se de três dos quatro amplificadores operacionais nele contidos. No amplificador instrumental desenvolvido, foi utilizado, como R_1 , um “timmer” para ajuste fino até 1 k Ω .

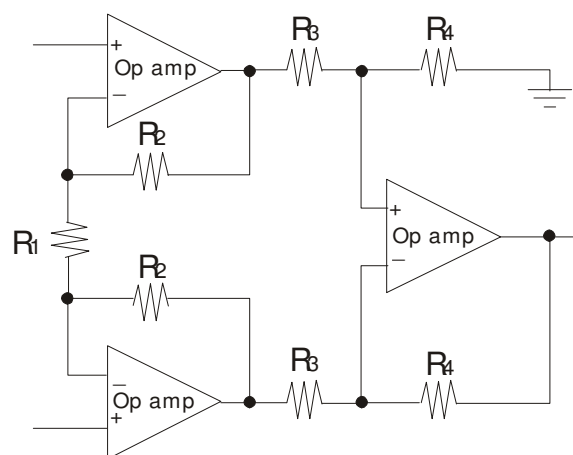


FIGURA 8. Amplificador instrumental para célula de carga.

A equação do ganho é dada por:

$$G = \frac{R_4}{R_3} \left[1 + \frac{2R_2}{R_1} \right] \quad (2)$$

em que,

G - ganho obtido no amplificador instrumental, adimensional, e

R₁, R₂, R₃, R₄ - resistências utilizadas no amplificador instrumental (resistor de filme metálico com imprecisão de 1%), em ohms.

O “software” PSpice foi utilizado para avaliar os parâmetros de calibração de ganho e saída do amplificador instrumental, bem como determinar o valor dos componentes passivos do circuito, os quais compõem o circuito amplificador instrumental.

A calibração do dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo foi realizada adicionando-se objetos com massa conhecida, como variável independente, em torno de 50 g, até a sua capacidade nominal de 50,0 kg e a resposta da célula de carga obtida, em mV, como variável dependente, por meio de um multímetro de bancada. Os dados obtidos foram processados no “software” SPSS para a obtenção da curva de calibração da balança, componente essencial no dispositivo de calibração de sensores.

O “software” PSpice foi utilizado para a obtenção dos valores das resistências (R) para um ganho (G) que resulte em tensão máxima na saída do circuito em torno de 5 V. O resultado final encontra-se apresentado na Figura 9. A parte à esquerda da barra pontilhada representa a célula de carga, na qual os resistores (“strain gages”) foram selecionados de modo a fornecer a máxima tensão de saída da célula de carga utilizada, que é de 20 mV. A parte à direita da barra pontilhada representa o amplificador instrumental. Os resistores foram selecionados de modo que a saída no amplificador instrumental fornecesse valor de tensão próximo de 5 V, visando ao interfaceamento com o sistema de aquisição de dados.

A simulação no PSpice sugere que, quando a célula de carga for submetida à carga nominal (50 kg), a tensão de saída amplificada da mesma será de 4,934 V. A simulação forneceu, para o amplificador operacional, o valor de R₁₁ de 380 Ω e, para as demais resistências, o valor de 47 kΩ.

A regressão linear entre o valor de massa na balança e a tensão amplificada resultou na seguinte equação linear:

$$V_{\text{out}} = 0,09198 W + 52,79114 \quad (3)$$

em que,

V_{out} - tensão de saída do dispositivo de calibração de sensores de umidade do solo, mV, e

W - massa (carga) na balança, g.

A análise de variância realizada entre os dados de W e V_{out} validou a hipótese alternativa de que o coeficiente angular é diferente de zero, com significância superior a 99,9%. No teste dos coeficientes, os mesmos foram validados com significância superior a 99,9%. O coeficiente de determinação apresentado foi 0,99995.

Na Figura 10, é apresentado o diagrama de dispersão dos dados obtidos no teste da balança, na qual se observa que até o peso de 1.000 g a curva não apresenta o comportamento linear observado após o mesmo, sugerindo que a mesma deve ter peso inicial ou “offset” de 1,0 kg.

O coeficiente angular da curva de calibração sugere variação de 0,09198 mV a cada variação de 1,0 g de massa na balança. Para o sistema de aquisição de dados com conversor analógico de 12 bits, isto é, com 4.095 contadores, e sendo a saída máxima da célula de carga de 4.651,8 mV, tem-se que um contador corresponde a 1,13 mV, ou seja, 12,28 g de massa. Considerando o peso específico da água, a sensibilidade do dispositivo é de 12,28 mL de água com esse sistema de aquisição de dados.

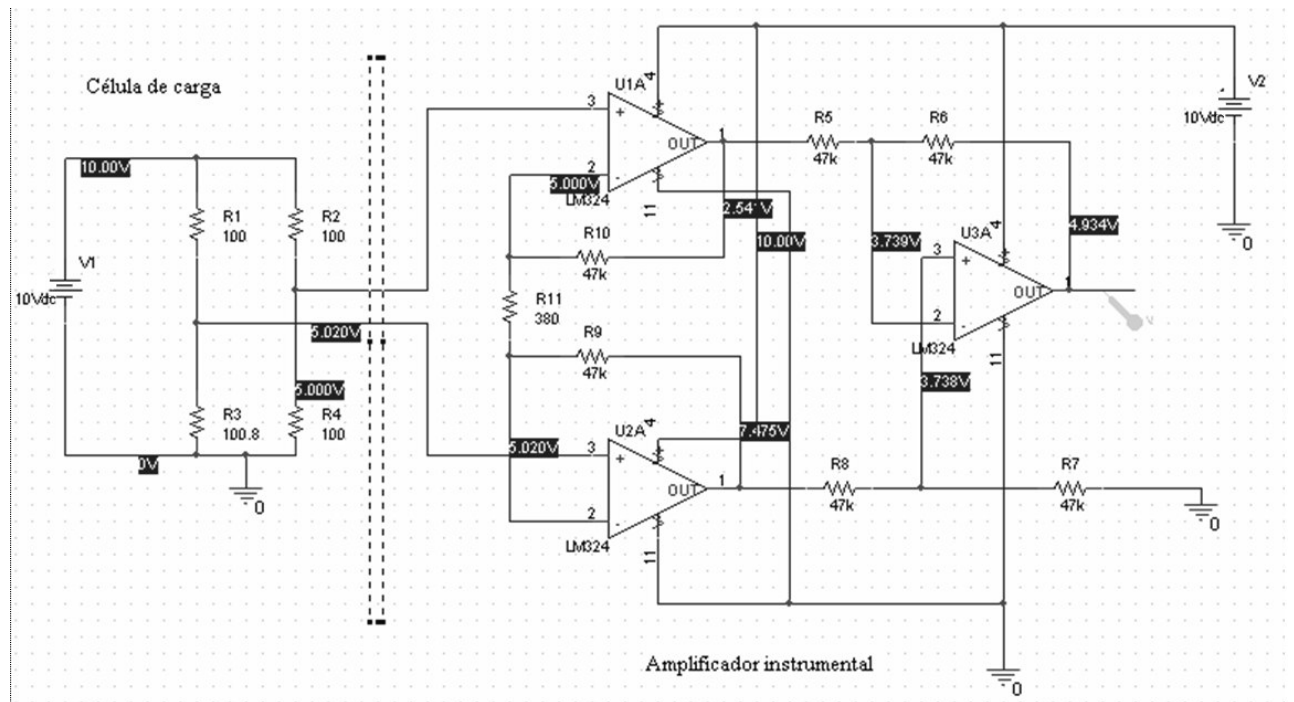


FIGURA 9. Esquema da célula de carga e do amplificador instrumental fornecido pela simulação no “software” PSpice.

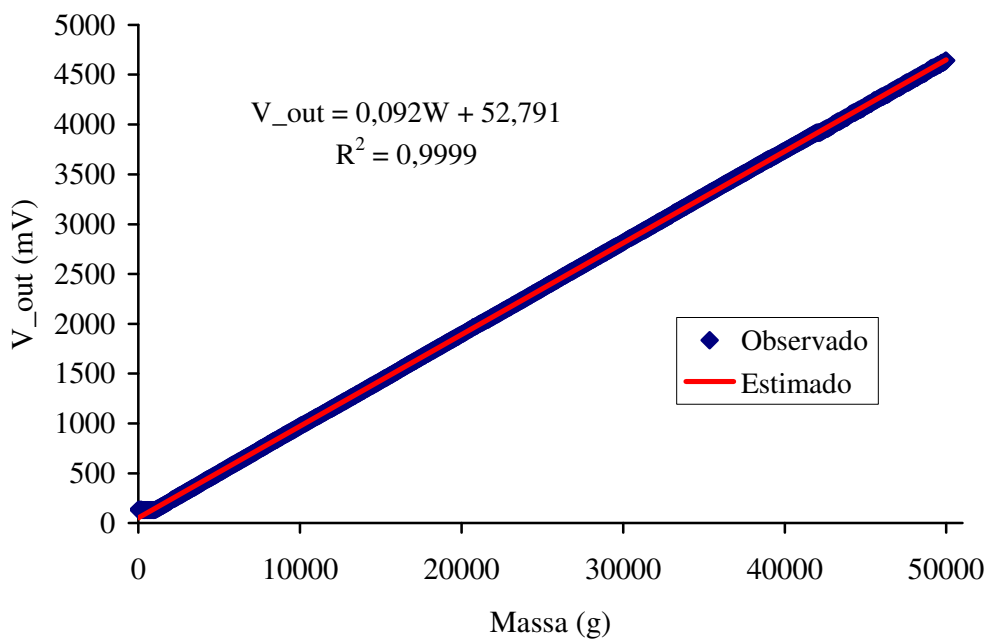


FIGURA 10. Diagrama de dispersão dos dados do teste do dispositivo com a equação de regressão e a linha de tendência.

CONCLUSÕES

O coeficiente de determinação próximo da unidade, respaldado pela análise de variância da regressão, permite o uso da equação de regressão obtida como equação de calibração da balança eletrônica desenvolvida.

Nas condições em que foi desenvolvido, o dispositivo pode ser utilizado para a calibração de sensores de umidade do solo desde que os mesmos possuam sensibilidade para detectar variação na umidade correspondente à perda de 12,28 mL de água. A diferença de peso entre os dois braços da balança deve permanecer entre 1 e 50 kg.

REFERÊNCIAS

- COELHO, S.L. *Desenvolvimento de um tensiômetro eletrônico para o monitoramento do potencial da água no solo*. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.
- HOROWITZ, P.; HILL, W. *The Art of Electronics*. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 450 p.
- MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. *Irrigação*. Piracicaba: SBEA, 2001. v.1, 410 p. (Série Engenharia Agrícola).
- YODER, R.E.; JOHNSON, D.L.; WILKERSON, J.B.; YODER, D.C. Soil water sensor performance. *American Society of Agricultural Engineering*, St. Joseph, v.14, n.2, p.131-3, 1998.