

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de
18/02/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until
February 18, 2027

CAIO NASCIMENTO FERNANDES

**INTEGRAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO E DE COMUNICAÇÃO PARA O
MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO E AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO**

Botucatu

2022

CAIO NASCIMENTO FERNANDES

**INTEGRAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO E DE COMUNICAÇÃO PARA O
MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO E AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Irrigação e Drenagem.

Orientador: João Carlos Cury Saad

Botucatu

2022

F363i

Fernandes, Caio Nascimento

Integração de dispositivos de medição e de comunicação para o monitoramento da umidade do solo e automação da irrigação / Caio Nascimento Fernandes. -- Botucatu, 2022

81 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: João Carlos Cury Saad

1. Umidade do solo. 2. Manejo da irrigação. 3. Irrigação de precisão. 4. Tensiômetro. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO E DE COMUNICAÇÃO PARA O MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO E AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO

AUTOR: CAIO NASCIMENTO FERNANDES

ORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. RUBENS DUARTE COELHO (Participação Virtual)
Engenharia de Biosistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 18 de fevereiro de 2022

*Àos meus amados pais,
Carlos (in memoriam) e Cláudia,*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por meus pais e por guiar minhas decisões.

Aos meus pais, Carlos (in memoriam) e Cláudia, por todo apoio, confiança, motivação e ensinamentos que foram fundamentais para me tornar quem sou hoje e atingir todos meus objetivos.

Ao Professor Dr. João Carlos Cury Saad, pela orientação, paciência, incentivo, pelo exemplo de professor que não mediu esforços para ajudar nos momentos mais complicados e principalmente, sua amizade.

Ao Professor Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román, pelo incentivo e apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao William Bailo, por toda contribuição neste trabalho e amizade, de grande valor, construída nesses anos.

Aos técnicos Ricardo e Gilberto por todo suporte e apoio nos momentos precisos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

A Faculdade de Ciências Agronômicas por todas oportunidades e estrutura concedida.

Aos docentes do Programa de Pós Graduação em Agronomia – Irrigação e Drenagem por todo conhecimento transmitido.

A todos, que diretamente ou indiretamente, participaram desta etapa.

RESUMO

A técnica da irrigação é uma das principais alternativas para o aumento da produtividade das culturas agrícolas. Seu uso sem um manejo adequado pode degradar os recursos naturais, aumentar os custos de produção e não extrair o máximo potencial produtivo das culturas. Uma alternativa para realizar um manejo da irrigação adequado é monitorar a umidade do solo por meio de recursos tecnológicos. Entretanto, grande parte dos equipamentos disponíveis no mercado apresenta alto custo de aquisição, o que dificulta a adoção em larga escala, tanto para pesquisa quanto para os produtores. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo elaborar um conjunto soluções tecnológicas para a tensiometria e que sejam viáveis, técnica e economicamente, abrangendo desde o sensor até o sistema de telemetria e aquisição de dados, constituindo um sistema eletrônico inteligente de baixo investimento baseado na internet das coisas, visando um manejo da irrigação de qualidade, mais eficiente e sustentável. O sistema de telemetria foi capaz de enviar informações a uma distância de 5km, limite máximo da área de teste. O sensor desenvolvido pode ser produzido a nível comercial e está pronto para uso no campo, com todo trabalho de engenharia já finalizado. O tensímetro e o sensor de pressão negativa (SPN) foram capazes de realizar a leitura da tensão de água, com a frequência desejada. Os dados coletados pelo SPN são enviados via rádio para uma central de controle, responsável pelo tratamento das informações, disponibilizadas em um banco de dados online, permitindo ao irrigante o monitoramento em tempo real das informações de umidade do solo. Destaca-se o baixo investimento para produção dos sensores propostos, o que viabiliza a implantação de uma rede integrada, tanto para pesquisa quanto para produtores.

Palavras-chave: umidade do solo; manejo da irrigação; irrigação de precisão; tensiômetro.

ABSTRACT

The irrigation technique is one of the main alternatives for increasing productivity of agricultural crops. Its use without proper management can degrade natural resources, increase production costs and not maximum productive potential from crops. An alternative to perform proper irrigation management is to monitor soil moisture through technological resources. However, most of the equipment available in the market has a high acquisition cost, which makes it difficult to large-scale adoption both for research and producers. Thus, the present work aimed to develop a set of technological solutions for tensiometry that are viable, technically and economically, covering from the sensor to the telemetry and data acquisition system, constituting an intelligent electronic system of low investment based on the Internet of Things, aiming at a quality irrigation management, more efficient and sustainable. The telemetry system was able to send information at a distance of 5km, maximum limit of the test area. The sensor can be produced commercially and is ready for use in the field, with all engineering work already completed. The tensimeter and sensor (SPN) were able to perform the reading of the water voltage at the desired frequency. The data collected by the spn are sent by radio to a control center, responsible for the processing of information, made available in an online database, allowing the irrigator to monitor real-time information from soil moisture. Noteworthy is the low investment for sensor production proposed, which enables the implementation of an integrated network, both for research as well as for producers.

Keywords: soil moisture; irrigation management; precision irrigation; tensiometer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Montagem dos sensores de nível	26
Figura 2 - Instalação do sensor no tensiômetro	27
Figura 3 - LEDS indicadores do nível de água nos tensiômetros.....	27
Figura 4 - Montagem dos sensores de pressão	29
Figura 5 - Conjunto completo para calibração dos sensores	30
Figura 6 - Sistema de conexão para calibração dos sensores	30
Figura 7- Instalação dos tensiômetros nos vasos	31
Figura 8 - Vista dos tensiômetros de punção sem modificação (a) e dos	31
Figura 9 - Vista do sistema de medição com coluna de mercúrio	32
Figura 10 – Instalação dos tensiômetros com sensor em campo.....	32
Figura 11- Modelo de tensiômetro com sensor em contato com água (A); Modelo de tensiômetro com sensor sem contato com água (B).....	34
Figura 12 - Modelo de tensiômetro para leitura e reposição de água automáticas ...	35
Figura 13- Fluxograma da lógica de funcionamento do tensiômetro autônomo	35
Figura 14 - Tensiômetro autônomo	36
Figura 15 - Montagem do circuito eletrônico em protoboard	37
Figura 16 - Montagem final do tensímetro.....	38
Figura 17 – Sistema para comparação da leitura de dois tensímetros comerciais....	38
Figura 18 - Placa eletrônica Arduino Mega	39
Figura 19 - Display LCD (A); Módulo RTC 1307 (B); Módulo SD CARD (C)	39
Figura 20 - Módulo de rádio ESP32 LoRa.....	41
Figura 21 - Ethernet Shield W5100	42
Figura 22 - Fluxograma de funcionamento do sistema	43
Figura 23 – Sensor para indicação do nível de dos tensiômetros.....	48

Figura 24 – Solução aquosa para funcionamento do sensor de nível (A) e rótulo da solução (B).....	49
Figura 25 – Produto final, sensor de pressão negativa.....	50
Figura 26 - Análise de regressão da tensão (kPa) em função da tensão (volts).....	53
Figura 27 - Análise de regressão da tensão (kPa) em função da tensão (volts).....	54
Figura 28 - Análise de regressão da tensão na coluna de mercúrio (kPa) em	55
Figura 29 - Resposta dos sensores em diferentes temperaturas do ar	56
Figura 30 - Modelo de tensiômetro com sensor em contato com água (A); Modelo de tensiômetro com sensor sem contato com água (B).....	66
Figura 31 - Curva de calibração da entrada analógica do microcontrolador.....	68
Figura 32 - Curva de calibração do sensor para o tensímetro	69
Figura 33 - Comparação entre as leituras do tensímetro desenvolvido com o comercial.....	70
Figura 34 - Caminho percorrido com módulo de rádio e linha de visada em área de campo.....	72
Figura 35 - Caminho percorrido com módulo de rádio e linha de visada em área urbana.....	73
Figura 36 - Plataforma ThingSpeak para exibição dos dados online.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do coeficiente de correlação (r).....	45
Tabela 2 - Classificação do coeficiente de desempenho (c).....	45
Tabela 3 - Custo para produção do sensor eletrônico para indicação do nível . de água dos tensiômetros.....	50
Tabela 4 - Características físicas e eletrônicas do sensor	51
Tabela 5 - Sensibilidade média do sensor de pressão.....	52
Tabela 6 - Resolução média do sensor de pressão	52
Tabela 7 - Resposta do sensor com temperatura do ar à 20°C	57
Tabela 8 - Resposta do sensor com temperatura do ar à 25°C	57
Tabela 9 - Resposta do sensor com temperatura do ar à 30°C	57
Tabela 10 - Métricas para avaliação de desempenho de dois sensores . comerciais.....	58
Tabela 11 - Métricas para avaliação de desempenho do sensor desenvolvido	59
Tabela 12 - Valores de tensão de água no solo (kPa) para o tensímetro . comercial em comparação com os sensores desenvolvidos.....	60
Tabela 13 - Métricas para avaliação de desempenho do sensor desenvolvido	61
Tabela 14 - Valores de tensão de água no solo (kPa) para a coluna de mercúrio . em comparação com os sensores desenvolvidos.....	61
Tabela 15 - Métricas para comparação entre o tensiômetro sem modificação e o . tensiômetro com o sensor desenvolvido.....	62
Tabela 16 - Valores de tensão de água no solo (kPa) dos tensiômetros	63
Tabela 17 - Métricas para avaliação de desempenho do sensor desenvolvido . após um mês de uso.....	64
Tabela 18 - Diferença entre as leituras anterior e posterior inserção do . tensímetro.....	65
Tabela 19 - Médias das leituras anterior e posterior inserção do tensímetro	65
Tabela 20 - Custo de produção do sensor proposto	67

Tabela 21 - Métricas para avaliação de desempenho do tensiômetro autônomo.....	67
Tabela 22 - Indicadores de desempenho para avaliação do tensímetro desenvolvido.....	70
Tabela 23 - Indicadores de desempenho comparando o tensímetro desenvolvido com o sensor SPN apresentado neste trabalho.....	71
Tabela 24 - Custo de produção do tensímetro proposto.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Umidade do solo.....	21
2.2	Tensiometria	21
2.3	Microcontroladores	23
2.4	Comunicação via rádio	24
2.5	Atributos de sensores.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1	Localização	26
3.2	Desenvolvimento do sistema eletrônico para indicação do nível de água	26
3.2.1	Solução para funcionamento do sensor	28
3.2.2	Teste de corrosão do sensor.....	28
3.3	Desenvolvimento do sensor de pressão negativa.....	28
3.3.1	Calibração dos sensores desenvolvidos e software específico	29
3.3.2	Avaliação de desempenho do sensor.....	30
3.3.2.1	Ensaio oscilação de temperatura.....	33
3.3.3	Modelos de tensiômetros testados.....	33
3.4	Desenvolvimento do tensiômetro autônomo	34
3.5	Desenvolvimento do tensímetro digital.....	36
3.6	Sistema de aquisição e processamento de dados	38
3.6.1	Hardware	38
3.6.2	Calibração e Software do sistema de aquisição de dados	39
3.6.2.1	Calibração do microcontrolador e software específico	40
3.6.2.2	Software para leitura dos sensores após as calibrações	40
3.7	Sistema de comunicação via rádio - Telemetria	40
3.8	Plataforma para acesso remoto dos dados e banco de dados online Integração Internet das Coisas (IoT).....	42
3.9	Proposta de funcionamento final	42
3.10	Métricas para avaliação de desempenho dos sensores e do tensímetro..	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.2	Sistema eletrônico para indicação do nível de água dos tensiômetros	48
4.2.1	Solução aquosa para funcionamento do sensor de nível.....	48

4.2.2	Teste de corrosão do sensor de nível.....	49
4.2.3	Custo final sensor eletrônico de indicação de nível.....	49
4.3	Desenvolvimento do sensor de pressão	50
4.3.1	Produto Final	50
4.3.2	Características do sensor desenvolvido	50
4.3.3	Calibrações.....	52
4.3.3.1	Calibração dos sensores com tensímetro comercial	52
4.3.3.2	Calibração com sistema de medição com coluna de mercúrio	54
4.3.4	Avaliações de desempenho	56
4.3.4.1	Resposta em diferentes temperaturas do ar	56
4.3.4.2	Comparação entre as leituras de dois sensores comerciais	58
4.3.4.3	Comparação entre as leituras do sensor desenvolvido com as leituras do tensímetro comercial.....	58
4.3.4.4	Comparação entre as leituras do sensor desenvolvido com as leituras da coluna de mercúrio.....	60
4.3.4.5	Comparação entre as leituras dos tensiômetros com o sensor desenvolvido e dos tensiômetros sem modificação.....	62
4.3.4.6	Comparação entre as leituras do sensor desenvolvido com as leituras do tensímetro comercial, após um mês de uso.....	63
4.3.5	Comparação entre as leituras anterior e posterior à inserção do tensímetro no tensiômetro	64
4.3.6	Modelos de tensiômetros testados	66
4.3.7	Custo de produção do sensor	66
4.4	Tensiômetro autônomo	67
4.5	Desenvolvimento do tensímetro.....	68
4.5.1	Produto final	68
4.5.2	Calibração do microcontrolador	68
4.5.3	Calibração do sensor.....	69
4.5.4	Avaliação de desempenho	69
4.5.5	Custo de fabricação.....	71
4.6	Teste de alcance sistema de comunicação via rádio	72
4.7	Plataforma para acesso remoto dos dados – Integração IoT.....	73
5	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A demanda por alimentos é proporcional ao crescimento populacional, o que exige maior produção agrícola e maior eficiência na cadeia produtiva. Nesse contexto está a agricultura irrigada, como uma das principais alternativas para aumentar a produtividade das culturas por unidade de área. No entanto, o uso da irrigação sem um manejo adequado pode aumentar os custos de produção e degradar os recursos naturais, já que a água é um dos recursos mais valiosos por ser limitada. Azevedo Netto et al. (2000) relatam que o mais preocupante na agricultura irrigada é o uso incorreto da técnica. Uma alternativa para elevar a eficiência do manejo da irrigação e evitar o desperdício de água é realizar o monitoramento do conteúdo de água no solo por meio de recursos tecnológicos, que informam ao produtor a umidade em tempo real auxiliando na tomada de decisão para realizar a irrigação.

Existem vários métodos para estimativa da umidade do solo, sendo que os principais são: padrão estufa que indica de forma direta o valor de umidade do solo; e de forma indireta sonda de nêutrons, sonda TDR, sonda capacitiva FDR e tensão da água no solo (TEIXEIRA; COELHO, 2005).

O tensiômetro, desenvolvido por Livingston (1908), é muito empregado para monitoramento da umidade do solo de forma indireta e manejo da irrigação, devido à sua facilidade de uso (OR, 2001; OR; WRAITH, 2002). É composto por uma capsula porosa de cerâmica, unido por um tubo de pvc ou acrílico e um vacuômetro para leitura da tensão de água (REICHARDT; TIMM, 2004), ou através de um sensor de pressão (TEIXEIRA; COELHO, 2005).

No passado os tensiômetros eram utilizados com uma coluna de mercúrio para realizar a medição da tensão. Apesar de ter uma limitação de funcionamento de até 85kPa (BRITO et al. 2009; SAAD & LIBARDI, 1992; LIBARDI, 1999), estes tensiômetros apresentavam uma ótima adaptação para o manejo da irrigação uma vez que a faixa de interesse se encontra de 0 a -100 kPa (REICHARDT, 1990).

O tensiômetro convencional além de ser um equipamento simples, possui baixo custo de aquisição comparado com outros métodos indiretos de medição de umidade (MORAES et al., 2006), entretanto esses equipamentos não permitem armazenar as leituras (ARRUDA et al., 2017), não possuem uma leitura automatizada e envio de informações via rádio.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo elaborar um conjunto soluções tecnológicas para a tensiometria e que sejam viáveis, técnica e economicamente, abrangendo desde o sensor até o sistema de telemetria e aquisição de dados, constituindo um sistema eletrônico inteligente de baixo investimento baseado na internet das coisas, podendo contribuir com um manejo da irrigação de maior qualidade, mais eficiente e sustentável.

.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões foram estabelecidas:

- O sensor para indicação do nível de água nos tensiômetros foi capaz de realizar a tarefa com eficiência, mediante o uso da solução aquosa em conjunto;
- O sensor de pressão (tensão de água) desenvolvido permitiu a leitura da tensão de água no solo como planejado, com erros inferiores a 0,95kPa;
- Os indicadores de desempenho mostraram-se satisfatórios em todas as avaliações realizadas. As leituras foram classificadas como ótimas segundo o coeficiente de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997);
- Os modelos de tensiômetro utilizados apresentaram pequena interferência na leitura do sensor, sendo o modelo A mais adequado;
- A presença da água no tensiômetro modelo A não danificou o sensor;
- O tensiômetro autônomo desenvolvido foi capaz de realizar as leituras de tensão de água e repor a solução interna do tensiômetro;
- O tensiômetro proposto atendeu aos requisitos mínimos para uso em campo e apresentou erro inferior a 0,3kPa comparado ao comercial;
- Os sistemas de comunicação via rádio e aquisição de dados e a plataforma para acesso remoto realizaram todas as atividades previstas, sem perda de dados e com custo de aquisição reduzido;
- Levando-se em consideração a importância do monitoramento da umidade do solo para o manejo da irrigação, todos os dispositivos apresentados contribuem para um manejo mais simples, eficiente, com reduzida mão de obra e de qualidade, sendo uma alternativa viável economicamente e tecnicamente;
- O sistema final é flexível de acordo com a demanda do usuário, possui baixo investimento e incentiva a adoção de técnicas para monitoramento da umidade do solo, já que praticamente todo o processo é automatizado.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO INC. **Arduino Reference**. Disponível em <https://www.arduino.cc/reference/en/>. Acesso em: 15 dezembro 2021.
- ARRUDA, L.E.deV.; FIGUEIREDO, V.B.; LEVIEN, S.L.A.; MEDEIROS, J.de F. Desenvolvimento de um tensiômetro digital com sistema de aquisição e armazenamento de dados. **Irriga**, Botucatu, Edição especial, IRRIGA & INOVAGRI, p. 11-20, 2017.
- AZEVEDO NETTO, J. M. et al. Manual de hidráulica. São Paulo: Edgard Blucher, 669 p. 2000.
- AZEVEDO, J. A., SILVA, E.M. **Tensiômetro: Dispositivo prático para controle da irrigação**. EMBRAPA circular técnica nº 001, 1999
- AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A. Laboratory calibration of pressure transducer-tensiometer system for hydraulic studies. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 74, p.315-319, 1994.
- BANZI, M.; SHILOH, M. **Make: getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform**. Maker Media, 2014
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, 625 p., 2006.
- BRAGA, M. B.; CALGARO, M. Uso da tensiometria no manejo da irrigação. Petrolina: Embrapa Semiarido, 30p., 2010.
- BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 17-24, 2009.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, D. F. D., ROCHA, H. S. D., BONOMO, R., & SOUZA, A. P. D. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.
- CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Planejamento e manejo da água na gricultura irrigada. 1. Ed. Viçosa- MG: Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2012.
- CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016

- COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. dos S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p.536-545, 2004.
- CORREIA, G. R.; ROCHA, H. R. de O.; RISSINO, S. das D. Automação de sistema de irrigação com monitoramento via aplicativo WEB. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v.24, n.4, 2016.
- CUNHA, P. C. R. D., NASCIMENTO, J. L. D., SILVEIRA, P. M. D., & ALVES JÚNIOR, J. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 114-122, 2013.
- DIENE, A. A.; MAHLER, C. F. Um instrumento para medida de potencial matricial nos solos sem ocorrência de cavitação. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1261-1270, 2007.
- ELIAS, A.A.A.; SILVA, J.C.P.; GONÇALVES, R.N.; SILVA, T.S. ArdWeather: Uma estação meteorológica baseada no Arduino e em Web Services RESTful. In: Safety Health and Environment World Congress, 14, 2014, CubatãoSP. **Anais...** Cubatão-SP, p.44-48, 2014.
- EVETT, S.R., LAURENT, J.P., CEPUDER, P., HIGNETT, C. Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents. In: **WATER CONSERVATION SOIL SOCIETY SYMPOSIUM**, 17., Thailand, p.1021-1–1021-10, 2002.
- GALANTE, A.C.; GARCIA, R.F. Sistema de aquisição de dados de sensores de baixo custo baseado no Arduino. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 6, 2014, São Pedro-SP. **Anais...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014.
- GARCIA, R.F.; LIMA, R.C.; COIMBRA, C.M.M. Avaliação de um sensor de fluxo utilizando placa microcontroladora Arduino. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.23, n.1, p.162-168, 2015.
- GOLDHAMER, D.A.; FERERES, E.; MATA, M., GIRONA, J.; COHEN, M. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 124, p. 437–444. 1999
- GRESWELL, R.; ELLIS, P.; CUTHBERT, M.; WHITE, R. DURAND, V. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v. 373, p.416-425, 2009.
- HOPKINS, W. G. *Correlation coefficient: a new view of statistics*. 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 05 dez. 2021.
- HUBBELL, J.M.; SISSON, J.B. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. *Soil Science*, Baltimore, v.163, n.4, p.271-7, 1998.

HUTCHINSON, P.A.; BOND, W. J. Routine measurement of soil water potential gradient near saturation using a pair of tube tensiometers. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.39, p.1147-1156, 2001

INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados - VIM, 2012. Duque de Caxias. Rio de Janeiro, 2012.

KLUTE, A.; PETERS, D. B. A recording tensiometer with a short response time. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v. 26, n.1, p. 87-88, 1962.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. 2ª ed. O autor. Piracicaba. 1999. 497p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. São Paulo, SP – Brasil: Ed. USP, 2018.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 335 p., 2005.

LIVINGSTON, B. E. A method for controlling plant moisture, **The Plant World**, Tucson, v. 11, n. 2, p.39–40, 1908.

MARTHALER, H. P.; VOGERSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P. J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.47, n. 4, p. 624-627, 1983.

MORAES, N. B.; MEDEIROS, J. F.; LEVIEN, S. L. A.; OLIVEIRA, A. M. S. Avaliação de cápsulas de cerâmica e instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 58-63, 2006.

MORAES, N.B.; MEDEIROS, J.F.; LEVIEN, S.L.A. & OLIVEIRA, A.M.S. Avaliação de cápsulas de cerâmica de instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:58-63, 2006.

OR, D. Who invented the tensiometer? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 1-3, 2001.

OR, D.; WRAITH, J. M. Soil water content and water potential relationships. In.: WARRICK, A. W. (ed). **Soil physics companion**. New York: CRC Press, p. 49-84, 2002.

PELLICCIA, L.; SCHUMANN, M.; DUDCZIG, M.; LAMONACA, M.; KLIMANT, P.; GIRONIMO, G. Implementation of tactile sensors on a 3-Fingers Robotiq® adaptive gripper and visualization in VR using Arduino controller. **Procedia CIRP**, v. 67, n. 1, p. 250-255, 2018

PEREIRA, D. D. R., YANAGI, S. D. N. M., MELLO, C. R. D., SILVA, A. M. D., & SILVA, L. A. D. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v. 39, p. 2488-2493, 2009.

PORTELA, J. C.; LIBARDI, P. L.; VAN LIER, Q. de J. Retenção da água no solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 49-54, 2001.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Barueri: Editora Manole Ltda, 188p., 1990.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Editora Manole Ltda, 478p., 2004.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Editora Manole, p.478, 2004

REYNDERS, B.; POLLIN, S. Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. In: 2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT). [S.l.: s.n.], p. 1–5., 2016

SAAD, A.M. & LIBARDI, P.L. **Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante**. IPT 2002. São Paulo, 27p., 1992.

SELLER, O. B. A. Wireless communication method. Depositante: Semtech Corporation. US n. 9647718B2. Depósito: 9 set. 2015. Concessão: 9 mai. 2017.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de; GUERRA, A. F.; FIGUEIREDO, S. F.; ANDRADE, L. M. de; ANTONINI, J. C. dos A. Manejo de irrigação por tensiometria para culturas de grãos na região do Cerrado. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, n. 6, p. 1-60, 1999.

SILVA, J. L. S.; MELO, M. C.; CAMILO, R. S.; GALINDO, A. L.; E VIANA, E. C. 2014. Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: **Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35**. XIV Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe (ERBASE). Feira de Santana, BA. 2014

SOUSA, F.H.F.; OLIVEIRA, B.R.A.; VIANA, T.P.; ESTÁCIO, P.M.; FREIRE, F.J.L. Sistema de produção agrometeorológico portátil utilizando a plataforma Uno. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 72, 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2015.

STARR, J.L., PALTINEANU, I.C. Capacitance devices. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Madison. Part 4, v. 5, p. 463–471, 2002.

SUNDARAM, J. P. Shanmuga; DU, W.; ZHAO, Z. A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions, and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 22, n. 1, p. 371–388, 2020

TANAKA, A. A., SOUZA, A. P. D., KLAR, A. E., SILVA, A. C. D., & GOMES, A. W. A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 91-104, 2016.

TEIXEIRA, A. S.; COELHO, S. L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 367-376, 2005.

TEIXEIRA, A.S.; COELHO S.L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. *Anais...* Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, CD ROM, 2003.

THIEL, T.J. Electrical water pressure transducers for field and laboratory use. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.27, n.5, p.601-2, 1963.

WATSON, K. K.; JACKSON, R. D. Temperature effects in a tensiometer-pressure transducer system. **Soil Sci. Soc. Amr. Proc.**, v. 31, p. 156-160, 1967.