DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR RESISTIVO PARA MONITORAMENTO DO NÍVEL DA LÂMINA DE ÁGUA EM LAVOURAS DE ARROZ

JONATHAN BEHRENS, JUMAR L. RUSSI, NIWTON G. F. DOS SANTOS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Campus Alegrete – CTA Av. Tiarajú, n° 810, CEP 97546-550, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil E-mails: jonathanbehrens21@gmail.com, jrussi@gmail.com, niwtonfeliciani@gmail.com

Abstract — This paper proposes a strategy for the development of a sensor capable of monitoring the level of water in rice crops. Through a bibliographical review is possible to verify that, although there is a growth of research focused on technologies for the agricultural sector, there are no projects of level sensors in development for this specific application. The proposed sensor is electronic resistive, with conductivity measurement cells arranged in parallel arrays in the analysed topology, which also allows the acquisition of water quality data through to the salinity indices. The comparison with other methods of electronic level measurement, such as capacitive and ultrasonic, is presented and demonstrates that the equipments are equivalent considering their advantages and disadvantages, and that the application really defines which the best choice is. The main design equations, prototype development, tests and experimental results are presented in order to validate this work.

Keywords - Agriculture, Controlled Irrigation, Monitoring, Level Sensors, Resistive Sensor.

Resumo — Neste artigo é proposta uma estratégia de desenvolvimento de um sensor capaz de realizar o monitoramento do nível da lâmina de água em lavouras de arroz. Através de uma revisão bibliográfica é possível verificar que, apesar de existir um crescimento das pesquisas concentradas em tecnologias para o setor agrícola, não há projetos de sensores de nível em desenvolvimento para essa aplicação específica. O tipo de sensor proposto é eletrônico resistivo, com células de medição de condutividade dispostas em arranjos paralelos na topologia analisada, fato que também permite a aquisição de dados referentes à qualidade da água através dos índices de salinidade. A comparação com outros métodos de medição eletrônica de nível, como capacitivo e ultrassônico, é apresentada e demonstra que os equipamentos se equivalem considerando suas vantagens e desvantagens e que a aplicação é quem define realmente qual é a melhor escolha. As principais equações do projeto, desenvolvimento do protótipo, testes e resultados experimentais são apresentados a fim de validar este trabalho.

Palavras-chave — Agricultura, Irrigação Controlada, Monitoramento, Sensor Resistivo, Sensores de Nível.

1 Introdução

O arroz é a base alimentar de mais de três bilhões de pessoas ao redor do mundo, sendo um dos alimentos mais importantes para a nutrição humana. No Brasil, nono maior produtor mundial e maior da América Latina, com 10,65 milhões de toneladas colhidas na safra 2015/16, o consumo médio é de 45 kg/pessoa ao ano (SOSBAI, 2016). O cultivo do arroz irrigado está entre as culturas mais exigentes em termos de recursos hídricos e energéticos.

Em média, para produzir um quilograma de grãos com casca, são necessários dois mil litros de água, considerando a cultivação por inundação do solo em um período de 100 dias (EMBRAPA, 2005). Ao ser adotado este tipo de irrigação, normalmente deve-se manter uma lâmina de água que varie de 2,5 a 10 cm ao longo dos períodos de crescimento e maturação da planta.

Além disso, na grande maioria das plantações, a lavoura está localizada em cotas superiores do terreno em relação ao nível dos reservatórios naturais. Neste caso, a água necessária deve ser previamente elevada de maneira mecânica, através de sistemas de bombeamento, o que demanda uma enorme quantidade de energia do Sistema Elétrico de Potência (SEP). De acordo com o último censo do Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA), a carga total destes sistemas representa mais de 600 MW de potência no que diz respeito à irrigação, somando as unidades eletromecânicas e a diesel (IRGA, 2006), estando normalmente localizados no final de alimentadores de redes rurais, além de funcionar em regimes contínuos devido aos períodos de safra, o que aumenta o impacto deste tipo de carga (Pfitscher et al., 2012).

Diante disso, pesquisas de eficiência energética e de uso racional da água, voltadas principalmente ao cultivo do arroz, tornam-se fundamentais e indispensáveis. Uma alternativa para reduzir o impacto deste tipo de cultura é a automação dos sistemas de irrigação, que têm evoluído continuamente ao longo das décadas. Atualmente, isto pode ser feito através da substituição dos equipamentos eletromecânicos convencionais por sistemas de acionamento eletrônico, o que deve permitir a redução dos consumos de água e energia elétrica e ainda aumentar a vida útil de todas as partes do processo sujeitas a desgaste.

Uma estratégia de automação passível de ser analisada e adotada em culturas de produção por submersão é o monitoramento da água através do desenvolvimento de sistemas de controle eletrônico baseados na utilização de sensores de umidade, de nível ou comerciais de uso geral, os quais possuem um elevado custo de mercado e invariavelmente não atendem a robustez e autonomia necessárias.

Nesse contexto, este artigo apresenta o estudo e desenvolvido de um sensor resistivo para realizar o monitoramento do nível da lâmina de água em lavouras de arroz, bem como de um sistema de *hardware* modular e de um controlador em baixo nível (*fir-mware*) de baixo custo e consumo, visando corrigir as ineficiências técnicas e otimizar o modo com o qual a água e a energia elétrica são utilizadas.

Ou seja, pretende-se atuar remotamente e/ou de maneira automática nos sistemas de bombeamento, controlando o acionamento dos equipamentos para estabelecer a altura da lâmina de água conforme o período da safra. Resultados promissores utilizando sensores ultrassônicos comerciais e um sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) revelaram uma redução de 70,7% no uso da água e 64,4% no consumo de energia elétrica (Behrens, 2013).

O presente trabalho contém cinco seções. A seção 1 é destinada à introdução ao tema, a qual abrange as informações acerca da cultura de irrigação em lavouras de arroz. A seção 2 apresenta uma revisão do estado da arte referente aos tipos de sensores de nível em geral. A seção 3 fornece uma descrição geral acerca da topologia do sensor de nível resistivo proposto. Na seção 4 são apresentados os resultados preliminares obtidos através de testes de aplicação do dispositivo. Por fim, a seção 5 destina-se às considerações finais decorrentes das atividades, analisando a validade do protótipo e sugerindo temas para trabalhos futuros.

2 Sensores de Nível

Em termos de conceituação, pode-se afirmar que os sensores de nível são dispositivos responsáveis por efetuar a medição do nível de sólidos e líquidos em reservatórios para a indústria de transformação, realizar o monitoramento da altura de água em barragens de usinas de geração hidrelétrica e dos níveis de rios e lagos para prever enchentes e outros desastres ambientais, entre outras aplicações possíveis.

Atualmente, o desenvolvimento de sensores para o setor agrícola é um tema amplamente abordado na literatura mundial, no entanto não foram encontrados estudos diretos à pesquisa de sensores de nível resistivos e circuitos de aquisição de dados para aplicação em sistemas de irrigação de lavouras de arroz, o que torna este artigo uma contribuição de grande valor técnico-científico.

Em aplicações que devem ser submetidas a algumas condições ambientais severas de funcionamento, como é o caso do monitoramento da lâmina de água em lavouras de arroz, os sensores de nível mais indicados são os eletrônicos, pois estes têm uma maior capacidade de adaptação às restrições ambientais e de medição. As estratégias para o desenvolvimento destes dispositivos abordam diversas topologias e princípios físicos e elétricos diferentes, todavia os tipos mais comuns são o capacitivo, o ultrassônico e o resistivo.

As principais vantagens dos sensores capacitivos são a alta imunidade à variação de temperatura, o baixo custo e reduzido consumo, porém suas respos-



Figura 1. Sensor de nível capacitivo.

tas são não lineares e possuem sensibilidade às descargas eletrostáticas, entre outros.

Para exemplificar, um sensor de nível capacitivo para uso em um reservatório de água é demonstrado na Figura 1. Sua operação é baseada na variação da capacitância pela mudanca do dielétrico entre duas placas paralelas concebidas em cobre, as quais formam oito capacitores. O dielétrico, por sua vez, varia de acordo com o nível da interface entre água e ar. Este equipamento possui baixo custo e um erro de 5 mm quando os resultados obtidos são comparados com aqueles verificados com o auxílio de uma régua (Bande; Pitica; Ciascai, 2012). Para o projeto do sensor capacitivo tubular, os princípios físicos são os mesmos apresentados, porém com eletrodos curvos. Sua aplicação também se destina à mensuração do nível de água de um reservatório, com a diferenca de que é incluída a capacidade de medição da espessura de gelo (Yinke; Qin; Chang, 2009).

Baseados no princípio da reflexão de ondas sonoras, os sensores ultrassônicos têm como principal aplicação o monitoramento de nível não intrusivo, em que não pode haver contato entre o dispositivo e o mensurando, o que não é obrigatório para a aplicação proposta neste trabalho. Suas principais vantagens são a inexistência de partes móveis e instalação simples. Porém, é um dispositivo altamente sensível às variações de temperatura e necessita de um sistema de condicionamento de sinais complexo, fato que eleva muito o custo do arranjo.



Figura 2. Sensor resistivo segmentado para medição de nível de lençóis freáticos.

A grande vantagem da utilização de sensores resistivos para esta aplicação específica é a fácil manipulação da eletricidade, além do baixo custo e robustez atribuídos de forma intrínseca. Em contrapartida, suas desvantagens são a sensibilidade às variações climáticas e uma pequena perda de precisão devido à deposição de íons e lacunas nos eletrodos, que será abordada na seção 3.1, as quais podem ser atenuadas através da discretização das amostras medidas.

Um exemplo de aplicação desse último é apresentado na Figura 2, a qual traz a estrutura de um sensor resistivo que realiza a medição do nível de água de lençóis freáticos. A impedância mútua entre os eletrodos segmentados é a variável a ser medida, o que permite a identificação das interfaces entre ar, terra seca e terra úmida pelas suas diferentes resistividades (Yao et al., 2009). Os resultados foram obtidos utilizando um modelo de simulação baseado em elementos finitos e divulgam a convergência das medições, cujo erro máximo é da ordem de 5%.

No estado da arte também foram encontrados sensores de nível de água do tipo indutivo, sendo este sem fio e com monitoramento via software em tempo real (Li et al., 2013); uma proposta altamente complexa utilizando um sensor *chipless* RFID (*Radio Frequency Identification*) em uma largura de banda limitada em 2,5 e 4 GHz, o qual realiza as medições com base na permeabilidade do meio (Guillet et al., 2012); um sensor de fibra óptica dobrável que opera de acordo com a pressão exercida pela água, visando à utilização em barragens e reservatórios (Rosolem et al., 2013); entre outros.

Dessa forma, os equipamentos se equivalem considerando suas vantagens e desvantagens, então a aplicação é quem definirá realmente qual é a melhor escolha para cada caso.

3 Sensor Resistivo Desenvolvido

Neste trabalho, há a submersão do equipamento juntamente com o solo cultivado, por isso foi definido e desenvolvido um sensor eletrônico do tipo resistivo, devido às características solicitadas, similaridade das aplicações encontradas na literatura e principalmente pelo baixo custo e utilização de uma lógica relativamente simples.

3.1 Princípios elétricos e físicos

Os sensores de nível resistivos geralmente têm seus princípios práticos baseados na condutividade elétrica da água, a qual depende da temperatura, características físicas dos eletrodos e concentrações iônicas, variável esta última que indica modificações na composição da água, especialmente a quantidade de sais existentes no meio, pois esta aumenta à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados. Valores elevados podem atribuir características corrosivas à água, enquanto uma baixa concentração indica a falta de minerais necessários à maturação da planta, podendo causar prejuízos à quantidade e qualidade da produção.

Nesse caso, a medição da condutividade segue o princípio da Lei de Ohm, em que a condutividade entre dois eletrodos é representada pelo inverso da resistência, conforme (1).

$$Y = \frac{1}{R} = \frac{i}{v} \tag{1}$$

em que i é a corrente elétrica medida e v é a tensão aplicada nos terminais dos eletrodos.

Ou seja, na prática os sensores são constituídos por dois ou mais eletrodos dispostos em paralelo em duas placas com células de condutividade, as quais são parcialmente submersas na água. Uma diferença de potencial é aplicada nos terminais do dispositivo, medindo-se a corrente eletrolítica que é transportada pelos íons dissolvidos na solução. Isto ocorre porque o potencial aplicando cria um movimento ordenado de íons, com aqueles positivos migrando para o eletrodo carregado negativamente e os negativos migrando para o eletrodo positivo, como pode ser observado na Figura 3 (a).

A partir disso, pode-se deduzir que, quanto mais íons diluídos existirem na solução, maior será sua condutividade elétrica. No entanto, a habilidade de condução também depende da mobilidade de cada íon, que neste caso é representada pela capacidade dos íons de se movimentar devido à excitação de tensão aplicada. Assim, a condutância eletrolítica de uma solução pode ser representada pelo somatório das contribuições de cada íon diluído multiplicado pela mobilidade de cada um, conforme (2).

$$\Lambda_m^0 = \lambda_+^0 \cdot u_+^0 + \lambda_-^0 \cdot u_-^0 \tag{2}$$

em que λ^0_+ e λ^0_- representam as condutividades dos cátions e ânions, respectivamente, enquanto u^0_+ e u^0_- designam a quantidade de íons por fórmula unitária do eletrólito.

Finalmente, é importante definir a expressão que



Figura 3. Célula de medição de condutividade. (a) Movimento ordenado dos íons. (b) Concentração de cátions, ânions e lacunas nos eletrodos.

relaciona a variação da condutividade de acordo com as dimensões da amostra estudada. Neste trabalho, a determinação desta grandeza é efetuada considerando um cubo de volume V, cujas dimensões dos eletrodos representam uma área A, em que a distância entre as extremidades opostas do cubo é d, como pode ser verificado na Figura 3 (a).

Considerando as condições descritas no parágrafo anterior, obtém-se a condutância específica (k) de um meio, de acordo com (3).

$$k = \frac{1}{R} \cdot \frac{d}{A} \tag{3}$$

em que R é a resistência eletrolítica medida.

Visto que o ar não é um condutor, sua resistência pode ser considerada infinita, então o valor da resistência equivalente a ser verificada pelo sensor varia de acordo com a altura da interface entre a água e o ar. Logo, quanto maior a porção submersa dos eletrodos em relação àquela exposta ao ar livre, maior será a condutividade.

É importante salientar que pode ocorrer um fenômeno denominado *efeito de polarização*, devido à aplicação de uma tensão em Corrente Contínua (CC) nos terminais dos eletrodos, o que gera um acúmulo de cargas positivas e negativas em torno das faces polarizadas. Este efeito pode gerar a formação de uma nuvem de íons nas superfícies do cubo, como é mostrado na Figura 3 (b). Com o tempo, esta nuvem cria uma camada de gases e reduz a capacidade de leitura de condutividade. Basicamente, é possível atenuar o impacto disto através da utilização de tensão em Corrente Alternada (CA) com frequência de operação fixada entre 60 e 3000 Hz ou construindo os eletrodos com ligas de titânio, grafite ou platina.

3.2 Topologia e princípio de funcionamento

A Figura 4 apresenta a topologia básica do sensor de nível resistivo proposto. Conforme pode ser observado, os eletrodos são dispostos aos pares, criando células idênticas de medição de condutividade. Isto é, as células $A_1 e A_2$ são conectadas de modo a formar um arranjo paralelo. Por outro lado, as células $A_3 e A_4$ formam o outro arranjo da representação fornecida. O segundo índice de cada célula representa os eletrodos, os quais são alocados frente a frente e conectados pela linha de alimentação. Partindo do



Figura 4. Topologia básica do sensor proposto.



Figura 5. Sensor de nível resistivo em um reservatório.

princípio exposto na seção 3.1, cada arranjo deve ser excitado individualmente e de cima para baixo por meio de uma fonte CC, de maneira a fazer uma varredura global nas células de medição.

Nesse esquema, as resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 representam a resistência do meio em que se encontram as células e são vistas pelo sensor através dos conjuntos paralelos $R_1 || R_3$ e $R_2 || R_4$. No protótipo final desenvolvido, os arranjos contêm três células de medição alocadas em paralelo.

A Figura 5 demonstra um exemplo prático de aplicação em que o sensor deve identificar o nível da água, neste caso em um reservatório qualquer. Ao habilitar o arranjo $A_1 || A_2$ por meio da excitação de tensão, a resistência indicada será a resistência equivalente do paralelo entre $R_1 \, e \, R_3$. Como estes parâmetros teoricamente são iguais, o resultado da simplificação é $R_{eq} = 0.5 \cdot R_1 = 0.5 \cdot R_3$. Quando o arranjo $A_3 || A_4$ é habilitado, a medição irá identificar somente R_2 , pois R_4 representa a resistência do ar, que é muito maior que a da água. Desta forma, conclui-se que o nível do líquido estaria abaixo de A_4 e acima de A_3 .

Conhecendo previamente a disposição dos arranjos do sensor, é possível determinar o nível e a altura da coluna de água.

3.3 Protótipo

O design do protótipo do sensor de nível proposto foi elaborado com o auxílio das ferramentas *Isis* e *Ares* do software *Proteus*, cujo leiaute é apresentado na Figura 6. Como se pode perceber, foram definidos oito arranjos com três células de condutividade dis-



Figura 6. Leiaute proposto em 2D e 3D.

postas em cada um. Logo, é possível dividir o sensor em 24 níveis. A nomenclatura adotada é apresentada na Tabela 1, em que a sigla "A" representa o arranjo e "C" a célula do nível em questão.

Arranjos	Células			
	C1	C_2	C ₃	
A ₁	Nível = 1	Nível = 9	Nível = 17	
A_2	Nível = 2	Nível = 10	Nível = 18	
A ₃	Nível = 3	Nível = 11	Nível = 19	
A_4	Nível = 4	Nível = 12	Nível = 20	
A ₅	Nível = 5	Nível = 13	Nível = 21	
A ₆	Nível = 6	Nível = 14	Nível = 22	
A ₇	Nível = 7	Nível = 15	Nível = 23	
A ₈	Nível = 8	Nível = 16	Nível = 24	

Por conseguinte, as duas placas idênticas foram impressas, resultando em um circuito de fibra de vidro (FR-4) com materiais condutivos em cobre.

As Figuras 7 (a) e (b) ilustram as faces laterais esquerda (E) e direita (D) do dispositivo confeccionado, respectivamente, disponibilizando também uma medição da altura total do mesmo através de uma régua, já que este deve ser alocado em pé nas lavouras. Idealmente, o alcance de medição que o equipamento pode detectar, o qual é comumente chamado de *range* na literatura, varia de zero até aproximadamente 24 cm.

Na realização dos testes, os quais serão abordados na seção 4, foram posicionados módulos de 5 e 10 mm de largura entre as placas para variar a distância (d) e, consequentemente, o volume (V) dos cubos, assim é possível verificar e analisar qual o impacto disto nos resultados e qual a melhor escolha.

A utilização do *FR-4*, em detrimento do laminado plástico denominado fenolite (*FR-2*), ocorreu por conta da maior imunidade deste quando se leva em consideração os efeitos causados pelas intempéries as quais a placa deverá ficar exposta, principalmente calor, umidade, vento e sujeira.

A conexão e disposição física dos 16 circuitos individuais de medição que compõem cada uma das



Figura 7. Detalhes do sensor resistivo desenvolvido. (a) Face esquerda e (b) face direita.



Figura 8. Representação dos arranjos.

faces do sensor são baseadas na tríade de eletrodos que formam cada arranjo. Em outras palavras, cada arranjo possui três eletrodos conectados em paralelo, bem como já havia sido mencionado. Na Figura 8 é demonstrada a representação disto quando observado apenas dois arranjos da face direita do sensor.

Tanto nas Figuras 7 (a) e (b) como na Figura 8 percebe-se que os eletrodos de cobre estão dispostos em duas colunas que estão deslocadas entre si por uma distância equivalente à altura h do cubo, permitindo que seja possível medir o nível do líquido quando o mesmo estiver entre duas faces adjacentes.

3.4 Topologia e lógica de controle

O controle lógico das atribuições do sensor foi elaborado por meio da placa de desenvolvimento modelo XMEGA-A3BU Xplained, fabricada pela Atmel Corporation. Este equipamento contém um microcontrolador modelo ATxmega256 de 8 bits e opera com uma frequência máxima de 32 MHz. Suas principais características são o baixo custo, alto desempenho e reduzido consumo de potência.

Em uma lavoura de arroz, o processo de variação da altura da lâmina de água é bastante lento, chegando a ser insignificante em um intervalo de 15 a 30 minutos. Além disto, como cada arranjo pode ser excitado individualmente, sem simultaneidade, podese aumentar a autonomia do sistema de controle ao reduzir seu consumo de potência. As opções para realizar isto são o aumento do intervalo entre as medições e também chavear igualmente a excitação de tensão entre os 16 circuitos.

Neste trabalho, propõe-se a utilização de dois dispositivos de chaveamento analógico modelo CD74HC4067E, da *Texas Instruments*, que são controlados digitalmente e cuja lógica booleana aplicada nos pinos de controle $\{S_0, S_1, S_2 \in S_3\}$ resulta em uma multiplexação máxima de 2^4 possibilidades, isto é, 16 saídas possíveis para um dado sinal de entrada, que neste caso é a excitação proveniente de uma fonte de tensão externa.

Foram utilizadas as portas A e B da placa mencionada, sendo o pino P_{B0} referente ao canal C_{H0} de conversão analógico-digital para medição da corrente eletrolítica através da medição direta de tensão em um potenciômetro de 4,7 k Ω , enquanto o conjunto $\{P_{A5}, P_{B1}, P_{B2} e P_{B3}\}$ corresponde às saídas que são conectadas nos pinos de controle dos dispositivos de chaveamento analógico.



Figura 9. Representação do arranjo completo estudado.

Após a mensuração e manipulação dos dados recolhidos, o nível da lâmina de água deve ser exposto no *display* LCD da placa, em milímetros. Todavia, espera-se que futuramente seja possível e viável adicionar um sistema autônomo de radiofrequência para transmitir as informações até um computador ou celular, para serem monitoradas mesmo à distância e em tempo real pelo agricultor. Além do acompanhamento da altura da lâmina, as informações devem servir como base para realimentar um sistema de controle em malha fechada que será responsável por reduzir o consumo de água e de energia elétrica ao atuar de maneira automática nos sistemas de bombeamento rurais.

O arranjo completo da topologia proposta e utilizada é demonstrado na Figura 9. Por outro lado, a representação e prototipação dos circuitos desenvolvidos para o controle e chaveamento da excitação V_{CC} são apresentadas na Figura 10.

Diante do exposto, pode-se afirmar que, por definição, o sensor proposto é paramétrico, pois funciona através do método de medição ativa, necessitando de uma fonte externa para medir e produzir sinais de saída analógicos, uma vez que a informação é obtida a partir da amplitude do sinal. Esta última pode ser averiguada pela necessidade que se tem em utilizar um conversor analógico-digital de 12 bits para manipulação dos dados.

Outra vantagem não mencionada anteriormente é a não necessidade de extrair energia do processo que se deseja medir, então neste caso o sinal elétrico medido age como modulador do sinal a ser processado pelo sistema de medição.

4 Testes e Resultados Experimentais

Para realizar os testes práticos de validação do sensor proposto, foram desenvolvidos cinco protótipos, com diferentes tamanhos e formatações. Todos os dispositivos foram levados a campo e testados de



Figura 10. Circuitos de controle e chaveamento.



Figura 1 Isquemático para medição da resistência.

acordo com o esquemático apresentado na Figura 11, em que se aplica uma diferença de potencial nos terminais das placas e a partir disto mede-se a corrente série do circuito. O valor da resistência equivalente (R_e) do meio é calculado através da Lei de Ohm apresentada em (1), na seção 3.1.

As configurações escolhidas para cada protótipo desenvolvido são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Configuração das células dos protótipos.

Protótipo	Altura do eletrodo (h) (cm)	Largura do eletrodo (l) (cm)	Distância do eletrodo (d) (cm)
1	0,10	0,10	0,10
2	0,05	0,20	0,10
3	0,08	0,125	0,10
4	0,10	0,10	0,05
5	0,08	0,125	0,05

Assim, a área dos eletrodos é obtida segundo (4) e o volume dos cubos eletrolíticos conforme (5).

$$A = h \cdot l \tag{4}$$

$$V = A \cdot d \tag{5}$$

Independentemente das dimensões atribuídas aos eletrodos em cada teste, a área A se manteve a mesma em todos os casos, no valor de $0,01 \text{ cm}^2$.

Em cada protótipo foram testados apenas um dos arranjos, em que cada um destes possuía três células de condutividade dispostas em paralelo, totalizando três níveis da seguinte forma: C_1 , $C_1||C_2$, $C_1||C_2||C_3$, de acordo com a Figura 8.

Tendo posse e tomando como referência a resistência medida no primeiro nível (C₁), é possível estimar os valores teóricos de resistência equivalente dos arranjos C₁ $||C_2 e C_1||C_2||C_3$.

A partir das medições feitas em campo e das premissas apresentadas, foram obtidos os resultados expostos na Tabela 3, sendo $V_{CC} = 5 V$.

Esses resultados comprovam que é possível monitorar a altura da lâmina de água através de células de medição de resistividade. No entanto, houve certa instabilidade na medição e nos cálculos posteriores, mesmo com a realização dos testes em condições controladas semelhantes.

Tabela 3. Resultados das medições com $V_{CC} = 5 V$.

Protótipo	Célula de Nível	Resistência medida (kΩ)	Erro estimado (%)
1	C1	3,99	-
	$C_1 \ C_2$	2,19	9,1
	$C_1\ C_2\ C_3$	1,4	1,2
2	C_1	3,78	-
	$C_1 \ C_2$	1,87	0,8
	$C_1\ C_2\ C_3$	1,27	1,7
3	C1	4,02	-
	$C_1 \ C_2$	2,25	10,8
	$C_1\ C_2\ C_3$	1,33	7,9
4	C_1	2,71	-
	$C_1 \ C_2$	1,39	2,9
	$C_1\ C_2\ C_3$	0,858	7,5
5	C1	2,91	-
	$C_1 \ C_2$	1,45	0,1
	$C_1 \ C_2 \ C_3$	0,934	3,7

Como pode ser verificada na Tabela 3, a distância entre os eletrodos é fundamental na obtenção de resultados consistentes quando são realizados inúmeros testes. Através disto, percebeu-se que o formato das células possui pouca influência sobre a resistência eletrolítica do meio, desde que sejam mantidas as características de área e distância.

Ao analisar o impacto da variação da distância entre os eletrodos, nota-se que R_e varia proporcionalmente com o aumento de d, como pode ser observado na Figura 12, considerando apenas o protótipo 1. Isto acontece porque, quanto maior for a distância, maior será o caminho a ser percorrido pelas partículas minerais existentes na água, então maior será a dispersão das mesmas.

O erro máximo estimado entre $R_{teórica}$ e R_{medida} foi de 10,8%, sendo o mesmo averiguado para a combinação $C_1 || C_2$ do protótipo 3. Considerando todos os testes, o erro médio global foi de 4,57%.

Por conseguinte, no teste prático de aplicação do protótipo 1 a linha de alimentação foi energizada de maneira independente com outros dois níveis de tensão: 3,3 V e 15 V. O comportamento da resistência equivalente em relação à diferença de potencial aplicada é apresentado na Figura 13.

Visando garantir que a corrente eletrolítica não fosse truncada, caso o recipiente de validação fosse



Figura 12. Influência da distância d sobre Re.



Figura 13. Influência da tensão V_{CC} sobre R_e .

muito pequeno, os primeiros ensaios foram realizados com dois receptáculos de tamanhos distintos. Após comparar os resultados aferidos, constatou-se que a condução de elétrons se concentra junto às células, ou seja, o tamanho do recipiente de água não tem influência, desde que contenha todo o sensor.

Finalmente, observa-se que o comportamento da resistência equivalente em cada nível é inversamente proporcional à tensão aplicada no protótipo 1. Isto ocorre devido à maior excitação das partículas minerais existentes na água, em resposta à maior diferença de potencial utilizada.

4 Conclusão

Bem como foram apresentados e analisados, os resultados preliminares demonstram que é possível realizar o monitoramento do nível de água por meio do sensor resistivo proposto, mesmo com a presença de certa instabilidade em algumas medições.

Os valores de resistência aferidos são semelhantes àqueles encontrados na literatura, embora a cultura de irrigação por submersão do solo não seja uma alternativa muito comum fora do Brasil.

A modificação das características do protótipo, como tensão, distância e formato, possibilita a determinação da corrente eletrolítica e perdas de potência as quais o sensor deverá suportar e permite melhorar sua precisão.

O erro médio entre a resistência medida e a resistência equivalente teórica foi de 4,57%, o que é considerado aceitável para o objetivo do projeto, visto que pode ser absorvido na discretização do sinal.

Em uma lavoura de médio a grande porte é inviável disponibilizar sistemas de alimentação e comunicação via cabos para os dispositivos em campo. Portanto, os equipamentos de armazenamento de energia devem possuir uma autonomia mínima de uma safra, e também utilizar sistemas de transmissão de dados sem fios, via radiofrequência.

Lembrando que a quantidade de sensores necessários em campo deve ser levada em consideração, pois o custo elevado pode impedir a aplicação em larga escala (Behrens, 2013).

Neste trabalho ainda não foram inseridas as soluções para amenizar os problemas decorrentes da deposição de elétrons devido à polarização, que deverão ser desenvolvidas juntamente com o *hardware* de controle do mensurando, tudo isto visando contribuir com o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem reduzir os custos referentes ao consumo hídrico e de energia elétrica de agricultores que têm seu principal sustento baseado na plantação de arroz.

Finalmente, como sugestão para trabalhos futuros pode-se destacar a aplicação de um dispositivo de radiofrequência integrado ao sensor para transmissão de dados à distância, a disponibilização de entradas específicas em *hardware* para a inserção de sensores de temperatura e luminosidade, além de realizar um levantamento referente ao consumo de energia e duração necessária à autonomia do sistema completo de medição e atuação no processo do mensurando.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Esco-GD Tecnologia em Energia Ltda. e sua equipe, por fornecer o aparato necessário para o desenvolvimento dos testes e validação do protótipo, e a Universidade Federal do Pampa, pelos ensinamentos teóricos e práticos e por apoiar esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ARROZ IRRIGADO: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. Bento Gonçalves -RS: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado – SOSBAI, ago. 2016. 200 p. XXXI Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado.
- Bande, V.; Pitica, D. and Ciascai, I. (2012). Multi-Capacitor Sensor Algorithm for Water Level Measurement. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bad Aussee, pp. 286-291.
- Behrens, J. (2013). Automação da Irrigação de Lavouras de Arroz para Melhoria da Eficiência Energética. Monografia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete – RS.
- Censo da Lavoura de Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul – Safra 2004/5. Porto Alegre – RS: Instituto Rio-Grandense do Arroz – IRGA, 2006. 122 p. 1. Ed.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA. Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil. **Net**, Brasília, 2005. Seção Sistemas de Produção Embrapa. Disponível em: <www.spo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 18 dez. 2013.
- Guillet, A.; Vena, A.; Perret, E. and Tedjini, S. (2012). Design of a Chipless RFID Sensor for Water Level Detection. 15th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, Toulouse, pp. 1-4.
- Li, H. P.; Liu, H. I.; Ma, F. C.; Wang, W. and Lv, T. (2013). Wireless Digital Water Level Sensor Smart Transmitter Based on Wap300c. Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Qingdao, pp. 1647-1650.

- Pfitscher, L. L. et al. (2012). Automatic Control of Irrigation Systems Aiming at High Energy Efficiency in Rice Crops. 8th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS), Playa del Carmen, pp. 1-4.
- Rosolem, J. B. et al. (2013). Fiber Optic Bending Sensor for Water Level Monitoring: Development and Field Test: A Review. IEEE Sensors Journal, Vol. 13, No. 11, pp. 4113-4120.
- Yao, X.; Zhang, Y.; Gao, L.; Yin, W.; Yang, J. and Wang, C. (2009). Ground Water Level Measurements Using a Segmented Resistance Sensor. 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Singapore, pp. 1357-1360.
- Yinke, D.; Qin, J. and Chang, X. (2009). The Study of a Capacitance Sensor and its System Used in Measuring Ice Thickness, Sedimentation and Water Level of a Reservoir. 2009 International Forum on Information Technology and Applications, Chengdu, pp. 616-619.