

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA  
E SUSTENTABILIDADE

**AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE  
BAIXO CUSTO BASEADO EM DADOS CLIMÁTICOS E  
NA UMIDADE DO SOLO**

Autora: Camila Dias de Jesus  
Orientador: Márcio da Silva Vilela  
Coorientador: Leonardo Nazário Silva dos Santos

Rio Verde - GO  
Agosto - 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO,  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA  
E SUSTENTABILIDADE

**AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE  
BAIXO CUSTO BASEADO EM DADOS CLIMÁTICOS E  
NA UMIDADE DO SOLO**

Autora: Camila Dias de Jesus  
Orientador: Márcio da Silva Vilela  
Coorientador: Leonardo Nazário Silva dos Santos

“Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade”

Rio Verde - GO  
Agosto – 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

JJ58a Jesus, Camila Dias de  
Automação de sistema de irrigação de baixo custo baseado em dados climáticos e na umidade do solo / Camila Dias de Jesus; orientador Márcio da Silva Vilela; co-orientador Leonardo Nazário Silva dos Santos. -- Rio Verde, 2019.  
57 p.

Dissertação ( em Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. sensor capacitivo. 2. evapotranspiração. 3. microaspersão. 4. Penman-Monteith. I. da Silva Vilela, Márcio , orient. II. Nazário Silva dos Santos, Leonardo, co-orient. III. Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Camila Dias de Jesus

Matrícula: 2017202331440064

Título do Trabalho: Automação de sistema de irrigação de baixo custo baseado em dados climáticos e na umidade do solo.

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 26 / 11 / 19

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

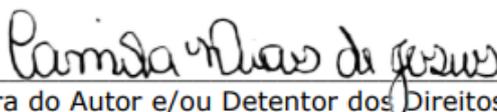
O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 25 / 11 / 19.  
Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE

**AUTOMAÇÃO  
DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO  
BASEADO EM DADOS CLIMÁTICOS E NA UMIDADE DO  
SOLO**

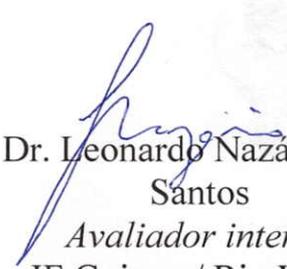
Autora: Camila Dias de Jesus  
Orientador: Márcio da Silva Vilela

*TITULAÇÃO:* Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade – Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

APROVADA em 30 de agosto de 2019.



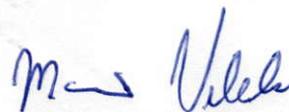
Prof. Dr. João Areis Ferreira  
Barbosa Junior  
*Avaliador interno*  
IF Goiano / Rio Verde



Prof. Dr. Leonardo Nazário Silva dos  
Santos  
*Avaliador interno*  
IF Goiano / Rio Verde



Prof. Dr. José Antônio Lambert  
*Avaliador externo*  
IFG / Jataí



Prof. Dr. Márcio da Silva Vilela  
*Presidente da Banca*  
IF Goiano / Rio Verde

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por sempre se fazer presente em minha vida. Algumas dificuldades foram encontradas pelo caminho, algumas relativas à distância entre a cidade onde moro e a instituição de ensino, mas a fé em Deus fez com que todos os problemas fossem superados.

Agradeço a minha mãe Aurelina Nere de Jesus pelo amor e incentivos constantes, agradeço por me proporcionar as oportunidades que ela não teve e acreditar no sucesso por meio dos estudos, do trabalho e dedicação.

Agradeço ao meu esposo Jheison Daradda, por sempre estar ao meu lado, me motivar e fazer por mim tudo que está ao seu alcance.

Agradeço a toda a minha família, por reconhecer o meu esforço e pelo amor apoio e incentivos constante para que eu permanecesse em busca dos meus objetivos. Em especial, à minha irmã Leidiane Dias de Jesus, por ser um exemplo de persistência e dedicação aos estudos.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano, pela oportunidade de cursar o Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, agradeço à instituição pela contribuição para meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Presidente Epitácio, pela disponibilização do laboratório de edificações e do espaço externo para a realização do experimento.

Aos professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica durante o período de curso, pois todos contribuíram grandemente para a minha formação.

Ao meu orientador Márcio da Silva Vilela e o coorientador Leonardo Nazário Silva dos Santos pelo auxílio e presteza no desenvolvimento deste trabalho, compartilhando comigo os seus conhecimentos, ideias e experiências.

Ao professor José Antônio Lambert, por contribuir com seus conhecimentos para meu ingresso no mestrado profissional.

Aos meus colegas de mestrado, pelo apoio prestado e troca de experiências voltadas à conclusão do curso e ao desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que reconheceram meus esforços, acreditaram na minha meta e, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, uma etapa muito importante em minha vida.

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

Camila Dias de Jesus, filha de Aurelina Nere de Jesus e Wilsom Jerônimo Dias, nascida em Jataí, Estado de Goiás, em 22 de março de 1992. Em 1999, iniciou a etapa da Educação infantil na Escola Municipal São João Batista, no município de Itiquira - Mato Grosso. No ano de 2003, iniciou o ensino fundamental na Escola Estadual Polivalente Dante Mosconi, na cidade de Jataí – Goiás. Coursou o Ensino Médio integrado ao curso Técnico em Agrimensura, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Jataí, iniciando essa etapa em 2007. Em 2011, deu início ao curso de graduação em Bacharelado em Engenharia Elétrica, também no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Jataí, finalizando-o em 2016. Em 2017, deu início à profissão de professora, sendo essa profissão admirada e almejada já no tempo de curso do Ensino Médio. Ministrando aulas no colégio professor Jobim, em Jataí – Goiás, além de aulas particulares, ambas pertinentes às disciplinas de exatas e fenômenos da natureza. Visando a uma futura carreira docente, em 2017, ingressou no então Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade. No ano de 2018, um sonho profissional foi realizado, a aprovação no concurso para professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal de São Paulo. Sabendo da importância do título de Mestre para a carreira docente, submeteu-se à defesa da dissertação, requisito indispensável para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, em agosto de 2019.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES .....	10
RESUMO GERAL .....	13
ABSTRACT .....	14
1. INTRODUÇÃO .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17
2. OBJETIVO GERAL .....	19
<b>2.1. Objetivo Geral</b> .....	19
<b>2.2. Objetivos específicos</b> .....	19
3.0 CAPÍTULO I .....	20
3.1. INTRODUÇÃO .....	21
3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	22
<b>3.2.1. Descrição do sistema</b> .....	23
<b>3.2.2. Manejo da irrigação</b> .....	26
<b>3.2.3. Dimensionamento do sistema de irrigação utilizando o software Scilab</b> 28	28
<b>3.2.4. Coeficiente de Uniformidade de distribuição</b> .....	32
<b>3.2.5. Software de controle do sistema de irrigação</b> .....	33
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34

3.4. CONCLUSÕES .....	37
AGRADECIMENTOS .....	37
LITERATURA CITADA .....	38
4.0 CAPÍTULO II.....	42
4.1. INTRODUÇÃO.....	43
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
<b>4.2.2. Calibração dos Sensores de Umidade do Solo</b> .....	46
<b>4.2.3. Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)</b> .....	48
4.3. RESULTADOS .....	50
AGRADECIMENTOS .....	53
LITERATURA CITADA .....	53
CONCLUSÃO GERAL .....	56

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Planilha de manejo da irrigação.....	35
Tabela 2: Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I.....	23
Figura 1:Diagrama representativo do sistema implementado .....	23
Figura 2: Descrição do funcionamento do sistema implementado.....	24
Figura 3: Estação meteorológica de baixo custo.....	25
Figura 4: Placa que simulou a estação meteorológica .....	25
Figura 5: Lógica do programa de dimensionamento do sistema de irrigação .....	30
Figura 6: Comunicação serial síncrona entre a estação e o Raspberry.....	33
Figura 7: Sistema de irrigação com as respectivas dimensões e bitolas .....	34
Figura 8: Dados de Pressão e Vazão nos microaspersores obtidos pelo Scilab.....	35
Figura 9: Interface web desenvolvida.....	37
CAPÍTULO II.....	42
Figura 1:Diagrama representativo do sistema implementado .....	45
Figura 2: Sensor de umidade do solo Sonbest SM3001V2 .....	47
Figura 3: Conjuntos 1 e 2 no interior da estufa .....	48
Figura 4: Disposição dos coletores na área irrigada .....	49
Figura 5: Coletores instalados em campo.....	49
Figura 6: Interface web desenvolvida.....	50
Figura 7: Umidade do solo (%) em função da tensão elétrica(V). Curvas respectivas ao sensor 1: 5A, 5B e 5C. Curvas respectivas ao sensor 2: 5D, 5E e 5F .....	51

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo	Elemento	Unidade de medida
$\eta_b$	Rendimento da bomba	Decimal
$\eta_m$	Rendimento do motor	Decimal
$\eta_p$	Rendimento das placas	
A	Área	m <sup>2</sup>
ANA	Agência Nacional de Águas	
$A_p$	Área dos painéis fotovoltaicos	m <sup>2</sup>
CUD	Coefficiente de uniformidade de distribuição	%
D	Diâmetro interno da tubulação	mm
DC	<i>Direct current</i>	V
E	Energia elétrica máxima gasta pela motobomba	kWh
$e_a$	Pressão parcial de vapor	kPa
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory	
$E_g$	Energia elétrica média diária produzida pelos painéis fotovoltaicos	
Ei	Eficiência da irrigação pelo método de microaspersão	%

EPE	Empresa de pesquisas energéticas	
$e_s$	Pressão de vapor de saturação para a temperatura média	kPa
ETc	Evapotranspiração da cultura	Mmd <sup>-1</sup>
ETca	Evapotranspiração acumulada	
ETo	Evapotranspiração de referência	mm
F	Fator de atrito	
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura	
G	Densidade de fluxo de calor do solo	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
GHI	Global horizontal irradiance	
$h_L$	Perda de carga da tubulação	mm <sup>-1</sup>
$H_{man}$	Altura manométrica	mca
IHM	Interface homem máquina	
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia	
$K_c$	Coefficiente da cultura	
L	Comprimento	m
$L_m$	Lâmina média de todas as observações	mm
$L_{q25\%}$	Média de 25% dos menores valores de lâminas observadas nos coletores	mm
MPPT -	Maximum power point tracking	
$P_{ativa}$	Potência elétrica ativa fornecida ao motor	kW
$P_B$	Potência absorvida na bomba	cv
PVC	Policloreto de vinila	
Q	Vazão	m <sup>3</sup> /s
$Q_g$	Radiação solar global	MJ/m <sup>2</sup>

Re	Reynolds	
Rn	Saldo de radiação incidente na superfície da cultura	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
RR	Read request	
SCL	Serial clock	
SD	<i>Secure Digital</i>	
SDA	Serial data	
T	Temperatura média do ar	°C
T	Tempo de duração da irrigação	h
u <sub>2</sub>	Velocidade média do vento a 2m de altura	m s <sup>-1</sup>
V	Volume	m <sup>3</sup>
γ	Coefficiente psicrométrico	kPa °C <sup>-1</sup>
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor de saturação	kPa °C <sup>-1</sup>

---

## RESUMO GERAL

JESUS, CAMILA DIAS DE. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2019. Protótipo de sistema de irrigação inteligente utilizando energia solar fotovoltaica. Orientador: Márcio da Silva Vilela. Coorientador: Leonardo Nazário Silva dos Santos.

A irrigação é responsável por fazer do setor agrícola o maior consumidor de água doce do planeta. Diante disso, é essencial determinar com precisão os níveis de irrigação e a forma de manejo correta para cada tipo de cultivo, de acordo com o tipo de solo e as condições climáticas. Assim, este trabalho tem como objetivo promover a gestão de água no processo de irrigação por meio da automação, baseando-se em dados climáticos e na umidade do solo. Foi implementada uma unidade de processamento e controle no Raspberry PI, objetivando a automação da irrigação por microaspersão em uma pequena área. Para isso, foram utilizados dados meteorológicos de uma estação automática para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman Monteith (FAO). O sistema também comporta sensores capacitivos para o fornecimento de dados de umidade do solo da área de cultivo. Através de uma interface web, acessada por um dispositivo qualquer com capacidade de acesso à internet, o usuário detém o controle e o monitoramento de informações do sistema irrigado.

**PALAVRAS-CHAVE:** sensor capacitivo, evapotranspiração, microaspersão, Penman-Monteith.

## **ABSTRACT**

JESUS, CAMILA DIAS DE. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2019. Protótipo de sistema de irrigação inteligente utilizando energia solar fotovoltaica. Orientador: Márcio da Silva Vilela. Coorientador: Leonardo Nazário Silva dos Santos.

Irrigation is responsible for making the agricultural sector the largest consumer of freshwater on the planet. Given this, it is essential to accurately determine the irrigation levels and the correct management for each type of crop, according to soil type and climatic conditions. Thus, this work aims to promote water management in the irrigation process through automation, based on climate data and soil moisture. A Raspberry PI processing and control unit was implemented to automate micro sprinkler irrigation in a small area. For this, meteorological data from an automatic station were used to calculate evapotranspiration by the Penman Monteith (FAO) method. The system also features capacitive sensors for providing soil moisture data from the crop area. Through a web interface, accessed by any device with internet access capability, the user has control and monitoring of irrigated system information.

**KEYWORDS:** capacitive sensors, evapotranspiration, micro sprinkler, Penman-Monteith.

## 1. INTRODUÇÃO

Algumas regiões do Brasil são extremamente afetadas pela escassez de água, isso influencia negativamente a utilização dos recursos hídricos na região para os mais variados fins, entre os quais pode ser citada a irrigação (ANA, 2017). Até mesmo regiões que não são marcadas pela escassez de água podem ter os ciclos agrícolas comprometidos por conta das mudanças climáticas (Gonçalves & Back, 2018).

A irrigação consiste em um processo de custo elevado, que exige uma grande disponibilidade de água, e não dispor desta alternativa pode ser um risco considerável ou até mesmo inviável em certas regiões. Caso a irrigação seja necessária, é importante que ocorra na medida certa, sem desperdícios de recursos hídricos. Para tanto, o processo de irrigação deve ser acompanhado de um estudo ou medição das necessidades hídricas do solo, de acordo com a cultura utilizada (Carvalho et al., 2013).

A avaliação das necessidades hídricas do solo pode ser de forma direta, por exemplo, com a utilização de lisímetro, ou através de métodos indiretos, usando sensores de umidade do solo, dados climáticos para o cálculo da taxa de evapotranspiração, entre outros (Ramadan et al., 2018).

Os sensores de umidade do solo auxiliam na irrigação fornecendo informações que serão úteis na determinação do momento adequado para a irrigação. Entre os mais utilizados, podem ser citados os sensores capacitivos, cujo método de medição é não destrutivo e fornece medições quase instantâneas, podendo permanecer no solo por um longo período, sendo capazes de fornecer leituras contínuas, não utilizando radiação e ainda permitindo medições precisas próximas à superfície do solo (Barroca et al., 2018).

Por sua vez, a estimativa precisa da evapotranspiração permite uma melhor gestão nos processos de irrigação e alocação dos recursos hídricos (Ortega-Farias et al., 2009). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) tem recomendado o método Penman –Monteith como método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) por apresentar menor erro médio, considerando diversas condições climáticas em diferentes regiões (Smith et al., 1991). Pelo cálculo da evapotranspiração, é possível determinar a taxa de irrigação a ser empregada sem desperdício de água ou sua falta.

A automação vem se tornando presente nos processos de irrigação. Automatizar o processo de irrigação, utilizando a programação para que ela corra de forma eficiente e eficaz, é uma ótima alternativa para melhorar a prática e a produção agrícola em todo o mundo (Ramadan et al., 2018). Porém tornar a irrigação automática é um procedimento que contribui para o aumento do custo de implantação de um sistema de irrigação. Na tentativa de reduzir esse custo, alguns estudos apontam a vantagem e a eficiência da utilização de dispositivos específicos, voltados ao controle do sistema, que apresentam custo reduzido no mercado. O intuito é facilitar o acionamento de equipamentos remotamente e incentivar a implantação de projetos de monitoramento ambiental para a coleta de dados (Ferdoush & Li, 2014).

O processo de automação de um sistema de irrigação pode levar ao uso eficiente da água, com determinação coerente do momento adequado para a irrigação e em quantidade necessária de água para o cultivo, isso com base, por exemplo, na utilização de sensores de umidade do solo e cálculo da evapotranspiração.

Diante do elevado consumo de água pelo setor agrícola, este trabalho trata da implementação de uma unidade de processamento e controle no Raspberry PI, objetivando a automação da irrigação e, por sua vez, a gestão da água. O cálculo da evapotranspiração é feito pela leitura de dados meteorológicos, provenientes de uma estação meteorológica artesanal, desenvolvida em um trabalho anterior. Por meio de cálculos, o Raspberry PI determina o momento e a taxa de irrigação adequados. Por meio de uma página web, acessada através de dispositivo com capacidade de acesso à internet, o usuário verifica informações pertinentes à área de cultivo, como informações meteorológicas e umidade do solo. Na página web, o usuário detém ainda o controle da ativação e a desativação do sistema de irrigação automático.

Por meio do código da unidade de processamento e controle, implementada neste trabalho, é possível determinar a taxa de irrigação e os momentos adequados, de acordo

com o tipo de cultivo. A interface web fornece comodidade e praticidade ao usuário do sistema, já que o monitoramento e o controle do sistema são obtidos pela interface.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, 2017.

BARROCA, Mariana Vasconcelos; JERSZURKI, Daniela; LAZAROVITCH, Naftali; SOUZA, Jorge Luiz Moretti de; OLIVEIRA, Sisara Rocha. **Efeito da salinidade do solo nas leituras de umidade realizadas com sensor capacitivo**. VI Congresso Online – Agronomia, 2018. Anais.

CARVALHO, I. R.; KORCELSKI, C.; PELISSARI, G.; HANUS, A. D.; ROSA, G. M. **Demanda hídrica das culturas de interesse agrônômico**. Enciclopédia Biosfera, v.9, n.17; p.969-985, 2013.

FERDOUSH, Sheikh; LI, Xinrong.. **Wireless Sensor Network System Design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications**. Procedia Computer Science, v. 34, p. 103-110, 2014.

GONÇALVES, Fabiane N.; BACK, Álvaro J. **Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil**. Revista de Ciências Agrárias, v. 41, n. 3, p. 11-20, 2018.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENCA, R. **Special issue on evapotranspiration measurement and modeling**. Irrigation Science, v. 28, p. 1–3, 2009.

RAMADAN, Khaled Mohamed; OATES, Martin John; MOLINA-MARTINEZ, José Miguel; RUIZ-CANALES, Antonio. **Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with**

**different frequency domain analysis probe structures.** Computers and Electronics in Agriculture, v.148, p. 148-159, 2018.

SMITH, M.; Segeren, A.; SANTOS PEREIRA, L.; PERRIER, A.; ALLEN, R. **Report on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements.** Rome: FAO, p. 28-31, 1991.

## **2. OBJETIVO GERAL**

### **2.1. Objetivo Geral**

A pesquisa proposta objetiva a gestão de água no processo de irrigação, por meio da automação.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Fazer o manejo inteligente da irrigação por meio do cálculo da evapotranspiração de referência, empregando o método de Penman-Monteith.
- Fazer o manejo da irrigação com base nos dados de umidade do solo fornecidos por sensores capacitivos.

### 3.0 CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Agriambi)

#### **Automação de sistema de irrigação de baixo custo baseado em dados climáticos**

##### **Resumo**

No que se refere à prática da irrigação, a água deve ser utilizada racionalmente por meio de um manejo correto para cada tipo de cultivo e de acordo com o tipo de solo e condições climáticas locais. Este trabalho tem como objetivo fazer o manejo inteligente da irrigação por meio do cálculo da evapotranspiração de referência, empregando o método de Penman-Monteith. Para isso, foi construído um sistema de irrigação por microaspersão e utilizados dados meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman Monteith (FAO). Uma página web permite sua supervisão a distância através de qualquer dispositivo móvel, como celulares e tablets. O sistema foi implementado no Instituto Federal de São Paulo – Presidente Epitácio (21°47'05"S 52°06'41"W). Após o funcionamento do sistema, foi verificada a eficácia na determinação da taxa de irrigação necessária, com base nos resultados de cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman Monteith (FAO). A interface web desenvolvida promoveu comodidade e praticidade ao usuário do sistema de irrigação pelo controle e supervisão do sistema de forma remota.

**Palavras-chave:** automação na agricultura, evapotranspiração, microaspersão

#### **Development of an intelligent automatic irrigation system**

##### **Abstract**

Regarding the practice of irrigation, water should be used rationally, through proper management for each type of crop and according to the type of soil and local climatic

conditions. This work aims to perform the intelligent management of irrigation by calculating reference evapotranspiration using the Penman-Monteith method. For this, a micro sprinkler irrigation system was built, meteorological data were used for the calculation of evapotranspiration by the Penman Monteith (FAO) method. A web page allows you to remotely supervise it from any mobile device such as mobile phones and tablets. The system was implemented at the Federal Institute of São Paulo - Presidente Epitácio (21 ° 47'05 "S 52 ° 06'41" W). After system operation, the effectiveness in determining the required irrigation rate was verified based on the results of the calculation of evapotranspiration by the Penman Monteith (FAO) method. The web interface developed, promoted convenience and practicality to the user of the irrigation system, through remote control and supervision of the system.

**Keyword:** agricultural automation, evapotranspiration, micro sprinkler

### 3.1. INTRODUÇÃO

Em algumas regiões do Brasil, como parte da região nordeste, a agricultura irrigada é a única forma de suprir as necessidades hídricas das culturas (ANA, 2017). Mesmo em regiões onde as condições meteorológicas são relativamente favoráveis, não há garantia de que o ciclo de chuvas seja suficiente em todas as safras, podendo haver consideráveis perdas na produção causadas pelo atraso das chuvas ou sua falta em determinados momentos do período de safra (INMET, 2009).

O uso da agricultura irrigada é normalmente um processo caro, que exige grande disponibilidade de água (Haguenauer, 2016), porém o risco de não se dispor desta alternativa pode ser algo demasiadamente arriscado ou totalmente inviável em certas regiões. O ideal é que, caso seja necessário o uso da irrigação, ela seja feita na medida certa, sem desperdícios de recursos hídricos. Para tanto, o processo de irrigação deve ser acompanhado de um estudo ou medição das necessidades hídricas do solo, de acordo com a cultura utilizada (Carvalho et al., 2013).

A forma de avaliar as necessidades hídricas do solo é feita por medições diretas, usando lisímetro ou procedimentos similares, ou por métodos indiretos, que utilizam sensores de umidade do solo, ou por cálculo da taxa de evapotranspiração.

A estimativa precisa da evapotranspiração permite a gestão nos processos de irrigação e alocação dos recursos hídricos (Oliveira et al., 2014). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) tem recomendado o método

Penman-Monteith como método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), por apresentar menor erro médio, considerando diversas condições climáticas em diferentes regiões (Allen et al., 1998; Gavilan et al., 2007; Smith et al., 1991; Xing et al., 2008). Este método utiliza como principais variáveis climáticas a radiação solar global, velocidade do vento, umidade e temperatura, além da densidade do fluxo de calor do solo. Outras variáveis podem ser estimadas tendo como referência estas informações (Conceição, 2006).

No Brasil, há alguns órgãos, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que disponibilizam dados climáticos, mas essas informações, muitas vezes, não são suficientes para estimar com precisão as variáveis climáticas necessárias à determinação da taxa de evapotranspiração em razão da distância entre o ponto de coleta de dados e o local considerado (Vianna et al., 2017). O ideal é que sejam feitas medidas destas variáveis nos próprios locais através de estações meteorológicas de baixo custo, que sejam acessíveis aos agricultores.

Uma vez determinada a taxa de evapotranspiração, considerando a cultura e seu estágio de desenvolvimento, pode-se estabelecer a taxa de irrigação a ser usada, sem desperdício de água ou sua falta. O desejável é que o procedimento de irrigação possa ser automatizado, junto com o método de cálculo da taxa de irrigação e leitura das variáveis climáticas, com possibilidade de intervenção do operador, caso seja necessária alguma mudança nas diretrizes, como, por exemplo, uma previsão de chuva a ser considerada.

Este trabalho tem por objetivo o manejo inteligente da irrigação pelo cálculo da evapotranspiração de referência, empregando o método de Penman-Monteith. Uma unidade de processamento e controle foi implementada no Raspberry PI. Assim, o cálculo da taxa de evapotranspiração é feito com base nos dados coletados por uma estação meteorológica de baixo custo, desenvolvida no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A unidade de processamento e controle também comporta uma interface web, que permite ao usuário o controle e o monitoramento do sistema de irrigação.

### **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

O sistema de irrigação apresentado neste trabalho foi construído no Instituto Federal de São Paulo – Campus Presidente Epitácio (21 ° 47'05.3 "S 52 ° 06'41.7" W). Para sua

execução, foram feitos os dimensionamentos do sistema de irrigação e de geração de energia fotovoltaica, conforme apresentados nos itens subsequentes.

### 3.2.1. Descrição do sistema

Este trabalho teve como objetivo automatizar o processo de irrigação, em que as condições de irrigação são determinadas com base em um conjunto de regras e parâmetros fornecidos pelo supervisor, e a taxa de irrigação, calculada pelos dados de uma estação meteorológica.

Este sistema foi projetado para operar com linhas de microaspersores ligados em paralelo. O controle é feito por um Raspberry PI, que faz a leitura dos dados da estação meteorológica para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith – FAO. Outros elementos presentes no sistema são o circuito de acionamento da bomba e a válvula de fluxo, que podem ser expandidos conforme o número de linhas de derivação interligadas à motobomba. O sistema também tem interface web para seu gerenciamento e supervisão através de um dispositivo remoto (Figura 1).

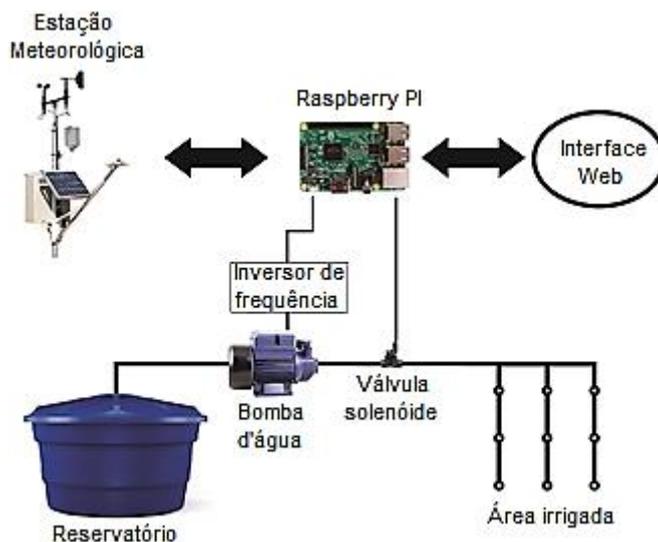


Figura 1. Diagrama representativo do sistema implementado

O fluxograma apresentado na Figura 2 ilustra o funcionamento do sistema implementado. Dados meteorológicos são lidos pelo Raspberry PI em um intervalo de 24 horas e utilizados para o cálculo da evapotranspiração diária. Os valores de evapotranspiração diária são armazenados em um banco de dados, para que seja feito o cálculo da evapotranspiração acumulada. Quando o valor de evapotranspiração

acumulada atingir o valor de setpoint, deve ser feita a irrigação. Assim, por meio de um sinal digital, a bomba d'água inicia seu funcionamento. O usuário do sistema de irrigação detém a supervisão e o controle do sistema de irrigação por meio de uma interface web. Na página web, são informados dados meteorológicos, sendo ainda possível ao usuário habilitar ou desabilitar a irrigação de forma automática.

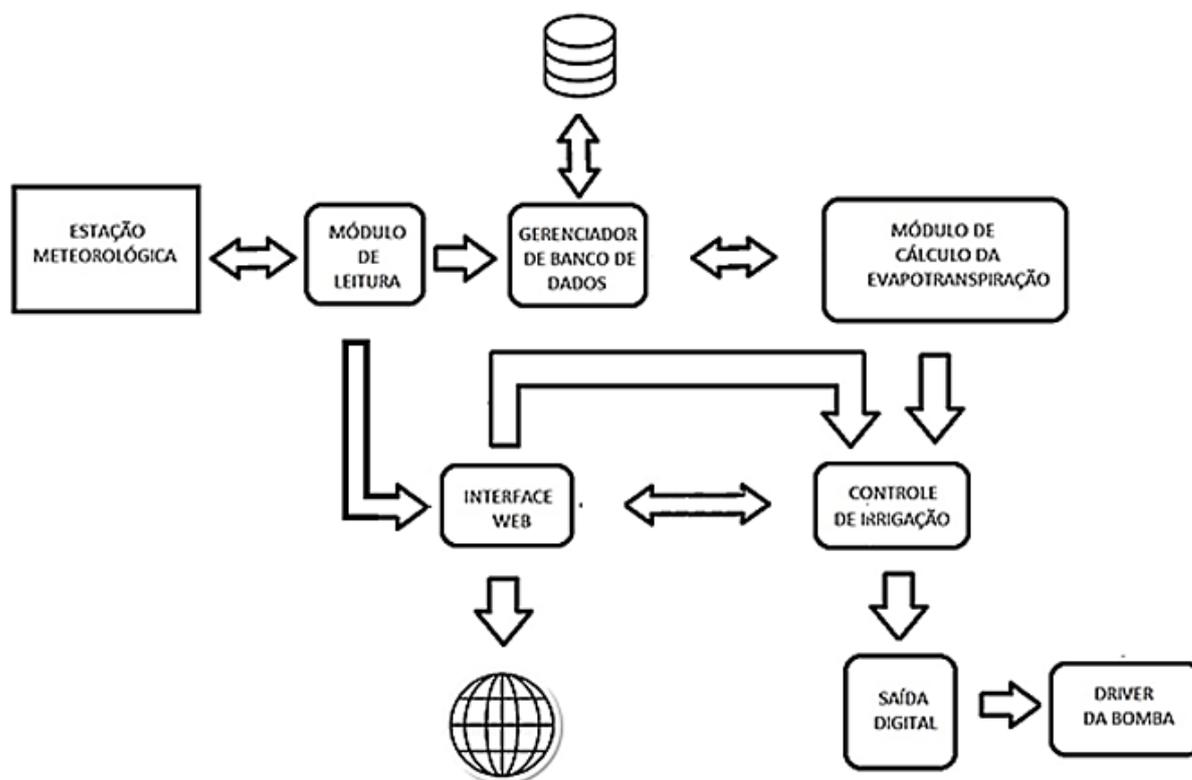


Figura 2. Descrição do funcionamento do sistema implementado

Os dados climáticos utilizados neste trabalho para o cálculo da evapotranspiração são provenientes da estação meteorológica de baixo custo apresentada na Figura 3, desenvolvida em um trabalho anterior no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde.



Figura 3. Estação meteorológica de baixo custo

Uma placa, contendo os dados meteorológicos coletados pela estação, foi construída para simular a estação meteorológica e vir a ser utilizada em Presidente Epitácio-São Paulo, onde este trabalho foi desenvolvido. A placa construída é verificada na Figura 4. O Raspberry faz a leitura dos dados meteorológicos gravados no PIC, microcontrolador presente na placa, sendo, assim, possível calcular a evapotranspiração de referência.

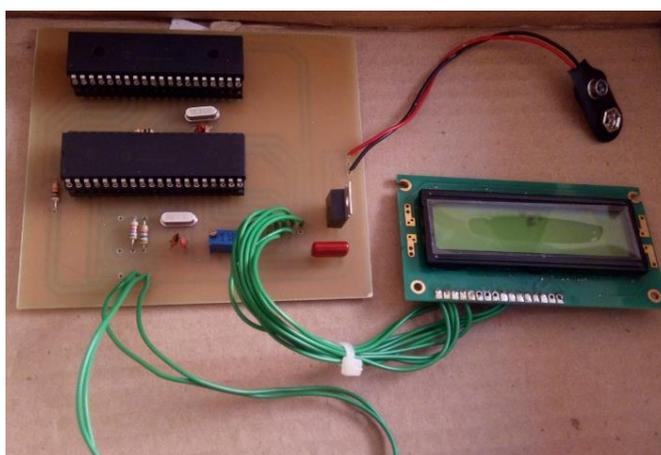


Figura 4. Placa que simulou a estação meteorológica

Nesta estação, foi inserida uma porta de comunicação serial síncrona para transferência de dados para o Raspberry. Em sua concepção anterior, antes das modificações introduzidas neste trabalho, ela operava como uma estação meteorológica

convencional, onde os dados eram primeiramente gravados em uma memória EEPROM e depois transferidos para um cartão SD.

Os itens descritos a seguir detalham os principais aspectos do projeto e a forma como foi feito o dimensionamento do sistema.

### 3.2.2. Manejo da irrigação

O manejo da irrigação, considerando o monitoramento das condições climáticas, é um dos métodos mais utilizados em sistemas de irrigação por microaspersão (Camargo, 2016). Este método exige a realização do balanço hídrico, em que são considerados todos os fluxos de água que entram e saem do volume de controle. A entrada de água ocorre através das precipitações e do processo de irrigação, e a saída ocorre, normalmente, através da evapotranspiração, cuja determinação indireta requer o cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Entre os métodos disponíveis, o mais recomendado é o método de Penman-Monteith-FAO, conforme indicação de muitos trabalhos científicos (Souza et al., 2010; Oliveira et al., 2013; Lopes & Leal, 2016). Neste método, a taxa de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub> - mm/dia) é calculada conforme descrito na equação 1, apresentada a seguir.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Em que:

R<sub>n</sub> - saldo de radiação incidente na superfície da cultura (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>);

G - densidade de fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>);

u<sub>2</sub> - velocidade média do vento a 2m de altura (m s<sup>-1</sup>);

T - temperatura média do ar (°C);

e<sub>s</sub> - pressão de vapor de saturação para a temperatura média (kPa);

e<sub>a</sub> - pressão parcial de vapor (kPa);

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>); e

γ - coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>).

A densidade de fluxo de calor (G) normalmente pode ser desprezada sem afetar significativamente os resultados (Allen et al., 1998). Os cálculos dos demais parâmetros podem ser feitos tendo como referência dados de temperatura, umidade, taxa de

radiação global, velocidade do vento e pressão atmosférica, que pode ser calculada com base na altura do local em relação ao nível do mar (Allen et al., 1998).

O saldo de radiação incidente na superfície ( $R_n$ ) é considerado um dos parâmetros mais difíceis de calcular por envolver a energia eletromagnética incidente na forma de ondas curtas e longas e a energia irradiada na superfície da cultura. Entretanto, diversos trabalhos têm contribuído para sua determinação com base na radiação solar global ( $Q_g$ ) e nos valores máximos e mínimos da temperatura de pressão de vapor médio.

A evapotranspiração real da cultura depende da umidade do solo e do coeficiente de cultura ( $K_c$ ). Considerando que não há restrição hídrica, a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) pode ser determinada conforme a equação 2.

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2)$$

Os valores de  $K_c$  indicam o quanto a cultura de interesse necessita de água a mais que a cultura de referência e dependem do tipo de cultura e de sua fase de desenvolvimento (Adorian et al., 2015). Tendo como base o cálculo da  $ET_c$ , podem-se determinar a quantidade de água perdida durante um ciclo diário e, conseqüentemente, a quantidade de água necessária na irrigação, considerando as outras possíveis entradas de água no sistema.

O volume total de água a ser restabelecido no solo, dentro de uma área, por dia, pode ser calculado pela equação 3.

$$V = \frac{1000 \times A \times ET_c}{E_i} \quad (3)$$

Em que:

$V$  - volume total de água a ser reestabelecido no solo,  $m^3$ ;

$A$  - Área irrigada,  $m^2$ ;

$ET_c$  - Evapotranspiração da cultura,  $mm.dia^{-1}$ ; e

$E_i$  - Eficiência da irrigação pelo método de microaspersão, decimal.

A eficiência da irrigação por microaspersão está em torno de 85% a 95% (Biscaro, 2014). Entre os fatores que influenciam o rendimento, estão o vento, a temperatura e a umidade relativa do ar (Abreu, 1987). Caso haja irrigação excessiva, o rendimento tende a se reduzir ainda mais pela perda por percolação quando a água infiltrada no solo

supera sua capacidade de retenção, ocorrendo, conseqüentemente, infiltração profunda.

Neste trabalho, utilizou-se a técnica de irrigação por microaspersores. Como estratégias de irrigação, foram consideradas certas regras a serem seguidas pelo sistema autônomo, ou seja, a irrigação deve ocorrer sempre que a necessidade hídrica atingir um valor predefinido, e o operador do sistema pode interromper ou adiar a irrigação, caso ocorra alguma previsão de chuva.

### 3.2.3. Dimensionamento do sistema de irrigação utilizando o software Scilab

Um projeto de irrigação por microaspersão deve considerar primeiramente a máxima lâmina de água a ser aplicada no solo e, em seguida, definir o modelo de microaspersor a ser utilizado, considerando sua vazão, raio de alcance e pressão de serviço (Biscaro, 2014). Após isto, é determinado o melhor arranjo e disposição dos microaspersores para garantir o máximo de uniformidade no espalhamento da lâmina de água. Para garantir a uniformidade da irrigação, também é necessário que os microaspersores funcionem dentro dos limites de pressão especificados pelo fabricante (Silva & Silva, 2005). Os dimensionamentos do diâmetro da tubulação, perda de carga e pressão manométrica requerida na bomba levam em consideração vários fatores, tais como: vazão, tipo de tubulação, comprimento da linha, desnível do terreno e pressão de sucção da bomba (Miranda, 2016).

Conhecendo o número de microaspersores acionados conjuntamente e a pressão manométrica requerida pela bomba, podem ser calculadas a vazão da linha e a potência mecânica requerida pela bomba, conforme as equações 4 e 5, respectivamente:

$$Q = Q_m \times n \quad (4)$$

Em que:

Q - vazão bombeada,  $m^3h^{-1}$ ;

$Q_m$  – Vazão de cada microaspersor,  $m^3h^{-1}$ ; e

n – Quantidade de microaspersor por linha.

$$P_{B(CV)} = \frac{QH_{man}}{270 \eta_b} \quad (5)$$

em que:

$P_B$  - potência absorvida na bomba, cv;

$Q$  - vazão bombeada,  $m^3h^{-1}$ ;

$H_{man}$  - altura manométrica, mca; e

$\eta_b$  - rendimento da bomba, em decimal.

A potência elétrica a ser fornecida ao motor acoplado à bomba é calculada pela equação 6. O rendimento dos motores de indução está dentro da faixa de operação de 80% a 110% da carga nominal, sendo assim, casos em que o motor funciona sob carga muito inferior à sua potência nominal devem ser evitados (Thies & Zanoni, 2016). Caso o motor esteja superdimensionado além deste valor, é necessário verificar a curva do seu rendimento para o cálculo correto da potência ativa fornecida pela rede elétrica.

$$P = \frac{P_B}{1,36 \eta_m} \quad (6)$$

Em que:

$P$  - potência elétrica ativa fornecida ao motor, kW;

$P_B$  - potência absorvida na bomba, cv; e

$\eta_m$  - rendimento do motor, em decimal.

O motor usado neste cálculo deve ter potência mecânica superior à potência  $P_B$  para se ajustar a algumas possíveis indeterminações no sistema (Filho et al., 2010). Vale ressaltar que os motores elétricos podem operar com potência superior à potência nominal, de acordo com o fator de serviço (FS) especificado pelo fabricante. Porém, no caso do uso de inversores de frequência ou alimentação através de um sistema off grid, como ocorre neste trabalho, não se deve considerar este acréscimo de potência em razão dos harmônicos de tensão, que aumentam o aquecimento do motor.

Neste trabalho, o sistema de irrigação foi dimensionado de acordo com as equações Darcy-Weisbach. Foi desenvolvido um programa de simulação usando o software Scilab para a determinação das vazões em cada microaspersor e a pressão manométrica da bomba, sem o uso de reguladores de pressão. A lógica do programa elaborado é descrita pelo fluxograma apresentado na Figura 5.

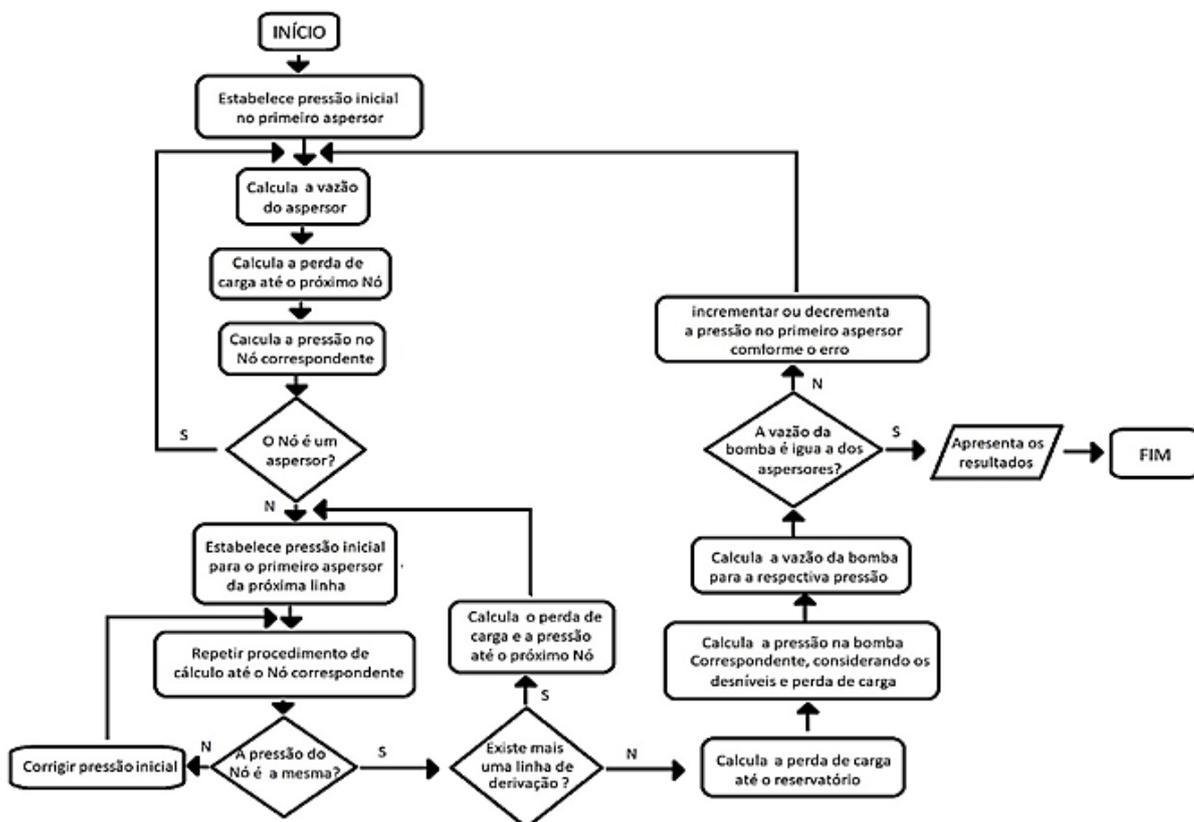


Figura 5. Lógica do programa de dimensionamento do sistema de irrigação

Por meio de um equacionamento convencional, normalmente não seriam utilizadas as curvas de vazão versus pressão dos microaspersores e da bomba para o dimensionamento do sistema. Também não é comum calcular a vazão de cada aspersor de forma individual. O programa elaborado no software Scilab permite que os cálculos da vazão e pressão em cada nó do sistema sejam feitos de forma interativa, partindo do aspersor mais distante até obter a pressão na bomba para a condição de pressão considerada. Se a vazão da bomba para a pressão calculada não for a mesma dos aspersores, o programa faz novos cálculos até que haja convergência dos valores. O programa permite ainda obter a pressão em cada elemento do sistema, considerando as equações de perda de carga de Darcy-Weibach em função de vários parâmetros, e as curvas de operação da bomba e dos microaspersores.

Para estes cálculos, o programa utiliza as curvas de vazão versus altura monométrica da bomba e dos microaspersores e as perdas de carga em cada trecho do sistema, calculadas de acordo com a equação 7. Estas operações de cálculo são feitas de forma interativa até que haja uma convergência entre a vazão da bomba e a vazão total nos microaspersores.

$$h_L = \frac{8fQ^2}{gD^5\pi^2} \quad (7)$$

Em que:

$h_L$  - perda de carga da tubulação,  $\text{mm}^{-1}$ ;

$f$  - fator de atrito;

$Q$  - vazão,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ;

$g$  – aceleração da gravidade  $\text{ms}^{-2}$ ; e

$D$  - diâmetro interno da tubulação.

O fator de atrito foi calculado de acordo com a equação de Blasius (Bernuth, 1990), equação 8, que permite calcular o fator de atrito com base apenas no número de Reynolds ( $Re$ ), quando  $2000 < Re < 100000$ , onde o escoamento é turbulento.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (8)$$

O número de Reynolds é função da velocidade no interior da tubulação ( $V$ ), do diâmetro do tubo ( $D$ ) e da viscosidade cinemática da água ( $\nu$ ) na temperatura de escoamento, conforme mostrado na equação 9.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (9)$$

O volume máximo de água a ser usado para irrigar uma determinada área é calculado de acordo com a equação 10.

$$V_m = \frac{A \times L}{1000} \quad (10)$$

Em que:

$V_m$  – volume máximo de água a ser irrigado,  $\text{m}^3$ ;

$A$  – área irrigada,  $\text{m}^2$ ; e

$L$  – lâmina máxima de água a ser usada na irrigação,  $\text{mm}$ .

Considerando a vazão da bomba, o tempo de duração da irrigação pode ser calculado de acordo com a equação 11.

$$T = \frac{V}{Q} \quad (11)$$

Em que:

T – tempo de irrigação, h;

V – **fazer esta anotação; e**

Q – **fazer esta anotação.**

A energia elétrica máxima gasta pela motobomba para irrigar o cultivo é calculada de acordo com a equação 12.

$$E = P \times T \quad (12)$$

Em que:

E – energia elétrica máxima gasta pela motobomba, kWh;

P – Potência ativa, kW; e

T - Tempo máximo necessário para irrigar o cultivo, h.

### 3.2.4. Coeficiente de Uniformidade de distribuição

O Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) foi empregado neste trabalho para a determinação da uniformidade de aplicação de água pelo sistema implementado. O CUD foi determinado pela equação 14.

$$CUD = 100 \left( \frac{Lq25\%}{Lm} \right) \quad (14)$$

Em que;

CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (%);

Lq25% - Média de 25% dos menores valores de lâminas observadas nos coletores (mm); e

Lm - lâmina média de todas as observações (mm).

A metodologia utilizada foi estabelecida por Bernardo et al. (2006). Foram utilizados 100 coletores (copos plásticos descartáveis) com diâmetro de 7,0 cm, dispostos 80 cm entre si. De acordo com Silva & Silva, (2005), o funcionamento do sistema por duas horas é considerado adequado.

A interpretação dos valores do coeficiente de uniformidade de distribuição baseou-se na metodologia apresentada por Mantovani (2001)

### 3.2.5. Software de controle do sistema de irrigação

A transferência de dados provenientes da estação meteorológica para o Raspberry é feita por meio de uma comunicação a três fios (Figura 6).

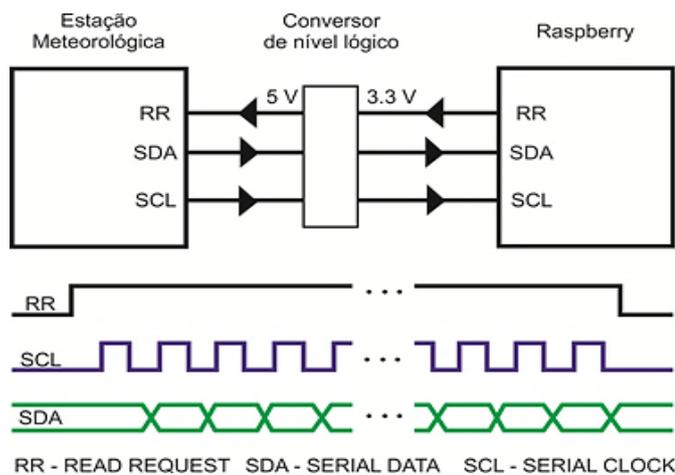


Figura 6. Comunicação serial síncrona entre a estação e o Raspberry

A cada cinco minutos, o Raspberry faz uma requisição de transferência de dados através do canal RR. Após esta requisição, os dados são transferidos de forma serial através do canal SDA, utilizando o canal SCL para informar o momento da leitura, que deve ocorrer na transição positiva deste sinal de sincronismo. São transferidos sequencialmente a temperatura, umidade, velocidade do vento, precipitação pluviométrica e radiação solar global. Os valores transferidos representam os valores médios destas variáveis dentro do intervalo de tempo das transmissões, com exceção da precipitação pluviométrica, cujo valor é acumulativo. Conforme já mencionado, estes dados são usados para o cálculo da evapotranspiração.

Foi desenvolvida uma página web, hospedada em um servidor Apache para gerenciamento e supervisão do sistema de forma remota, utilizando as linguagens Python, PHP, HTML, CSS e JavaScript. No Raspberry, o programa de controle foi desenvolvido utilizando a linguagem Python, junto com o banco de dados MySQL para a gravação dos dados da estação meteorológica. O sistema se conecta à web, utilizando os protocolos HTTP e TCP/IP, de forma a permitir que o administrador do sistema

tenha acesso remoto aos dados do sistema, possa definir alguns parâmetros e intervir em algumas ações do controle.

Os principais dados informados ao sistema de controle pelo administrador são área do cultivo, número de linhas de irrigação de igual número de microaspersores, vazão de referência da bomba (apenas para aferição), coeficiente da cultura, rendimento da irrigação e condição inicial de umidade do solo. Além destas informações, o administrador pode habilitar ou desabilitar a irrigação, caso considere necessário, como, por exemplo, no caso de uma chuva iminente prevista pelo sistema meteorológica, mas não detectada pelos dados meteorológicos.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os testes e a avaliação do controle proposto, foi dimensionado um sistema de irrigação de pequeno porte formado por três linhas laterais com três microaspersores (Figura 7). O experimento foi montado nas instalações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Presidente Epitácio, localizado no município de Presidente Epitácio – São Paulo.

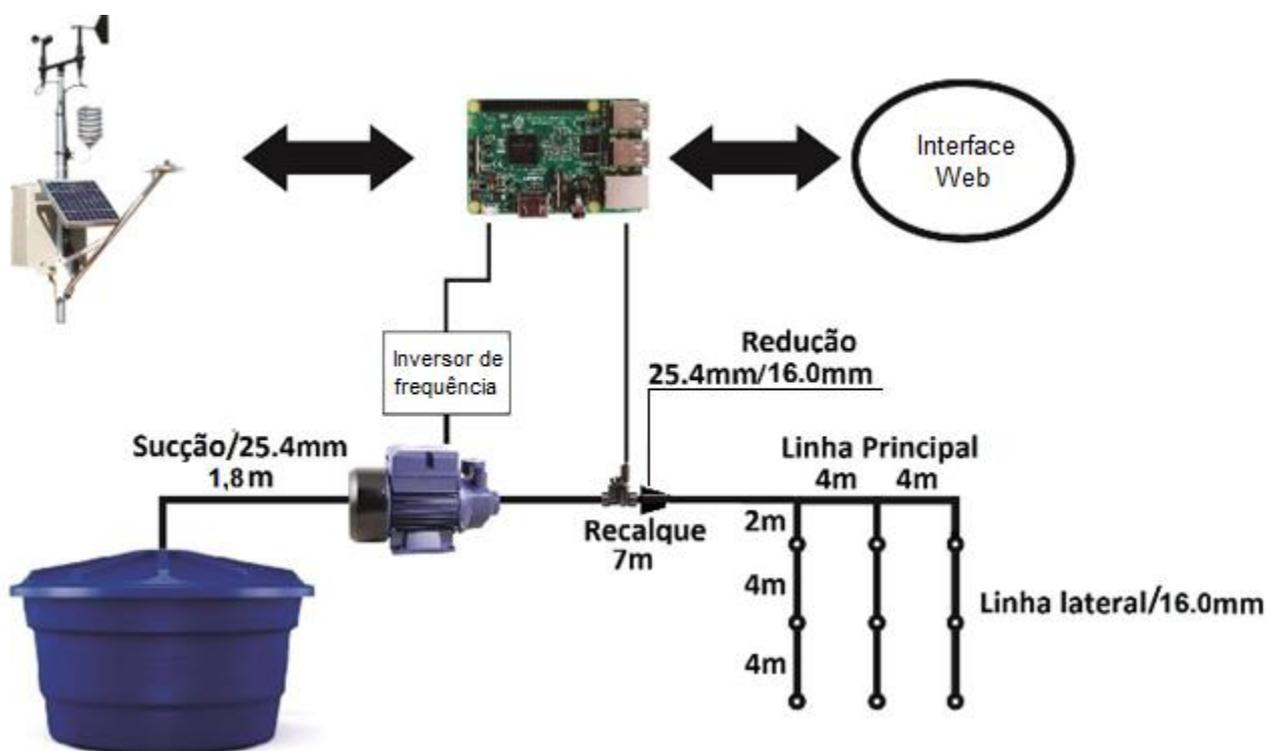


Figura 7. Sistema de irrigação com as respectivas dimensões e bitolas

Para o bombeamento da água no sistema, foi utilizada uma motobomba de  $\frac{1}{2}$  cv, modelo P500, trifásica, da marca KSB Hidroblock, ligada a um reservatório de mil litros de água. O inversor de frequência CFW08 – WEG foi utilizado para o acionamento da motobomba. Os microaspersores utilizados são da marca Twister, com vazão de 74 L/h na pressão de 20 mca. Para o cálculo das pressões em cada microaspersor, foi utilizado o programa que foi desenvolvido neste projeto, conforme mencionando no tópico 3.2.3. Os resultados sobre a pressão e a vazão em cada microaspersor são apresentados nas Figuras 8 (A) e 5 (B), respectivamente.

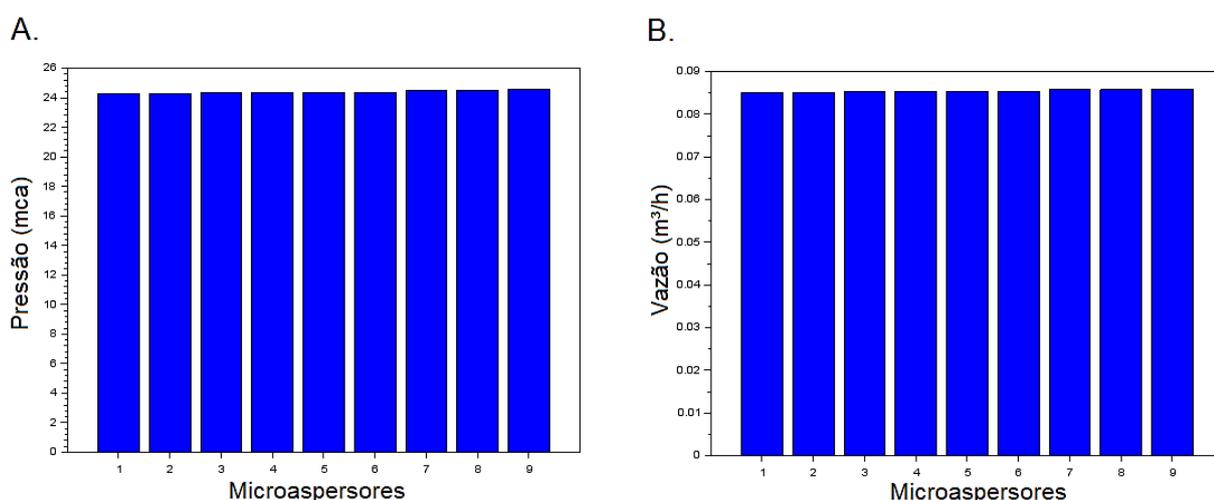


Figura 8. Dados de Pressão e vazão nos microaspersores obtidos pelo Scilab

De acordo com a simulação, as variações máximas de pressão e vazão entre os microaspersores foram de, aproximadamente, 1,14 e 0,8% , respectivamente.

Neste trabalho, foi adotado o método de manejo pela evapotranspiração acumulada (ETca) e utilizado um valor de referência de 17 mm para iniciar a irrigação. Para um rendimento da irrigação igual a 85%, a lâmina de água necessária é de 20 mm, com tempo estimado de irrigação de 3,75 horas e volume de 2,88 m<sup>3</sup> para o número de microaspersores utilizados. Considerando que a taxa de evapotranspiração máxima diária seja de, aproximadamente, 5 mm.dia<sup>-1</sup>, o menor turno de rega esperado é de 4 dias. A Tabela 1 apresenta uma planilha com o resultado dos cálculos feitos pelo Raspberry. Foi considerada a cultura da abóbora em sua fase II de desenvolvimento, sendo assim, atribuiu-se um Kc igual a 0,7.

Dia	ETo (mm)	ETc (mm)	P (mm)	ETca (mm)	Irrigação
1	3,46	2,42	0	2,42	
2	3,32	2,32	0	4,74	

3	2,82	1,97	0	6,71	
4	3,56	2,49	0	9,20	
5	4,25	2,97	0	12,17	
6	4,42	3,09	0	15,26	
7	3,42	2,39	0	19,65	IRRIGAR

Tabela 1. Planilha de manejo da irrigação

Conforme a Tabela 1, no sétimo dia o programa verificou que a evapotranspiração acumulada estava acima do valor de referência para uma evapotranspiração acumulada de 17 mm, a bomba d'água foi então acionada automaticamente por um comando enviado pelo Raspberry PI.

De acordo com a simulação, a vazão e a pressão monométrica da bomba foram de  $768\text{Lh}^{-1}$  e 27,2 mca, respectivamente.

Foram feitas medições da precipitação dos microaspersores nas condições de vento em torno de 2m/s. Foram feitas coletas de água em quatro subáreas do sistema, localizadas na área de influência de quatro microaspersores. A área de irrigação foi dividida em quatro subáreas, tendo cada uma delas apresentado os seguintes resultados para o CUD: subárea 1 igual a 63,28%; subárea 2 igual a 68,84%; subárea 3 igual a 60,54%; e subárea 4 igual a 68,62%. Segundo Mantovani (2001), os valores encontrados para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) são considerados bons para as subáreas 2 e 4, já para as subáreas 1 e 3, são considerados razoáveis.

No sistema de irrigação implementado, foi considerada uma válvula eletromecânica que permite o fluxo de água durante a irrigação, permanecendo, no momento em que a irrigação não está ocorrendo, na posição fechada, impedindo o fluxo de água. Em um sistema de irrigação de maior porte, este tipo de válvula pode exercer um papel muito importante, promovendo a alternância da irrigação em diferentes locais da área de plantio.

A interface web desenvolvida neste trabalho, Figura 9, apresenta as informações climáticas provenientes da estação meteorológica, permitindo ao operador fornecer alguns parâmetros necessários ao cálculo da taxa de irrigação. Também permite ao operador habilitar e desabilitar a irrigação pelo tempo que desejar. Esta função é importante para que o operador possa adiar uma irrigação caso haja uma grande possibilidade de chuva. Esta interface está em processo de aperfeiçoamento e, em breve, irá apresentar a taxa de evapotranspiração acumulada e o tempo previsto para a nova irrigação.



Figura 9. Interface web desenvolvida

O acesso à interface ocorreu conforme esperado, sendo acessada por dispositivos conectados à internet, situados em diferentes locais. Para isso, foi contratado junto ao provedor de internet um IP fixo para possibilitar a conexão ao sistema de irrigação pela internet. O IP fixo torna viável o acesso à interface web do sistema, neste caso em que o Raspberry atua como servidor.

A função responsável por desabilitar o sistema de irrigação foi testada e verificada a sua funcionalidade remotamente, para isso foi necessário que o inversor de frequência operasse no modo de controle remoto. Para tal, foi feita a parametrização do inversor, via IHM (Interface Homem Máquina).

### 3.4. CONCLUSÕES

1. Os cálculos que determinam a taxa da irrigação necessária foram feitos por meio de programação.
2. O monitoramento e o controle do sistema de irrigação ocorreram a partir de um dispositivo móvel.
3. O dimensionamento do sistema de irrigação pelo software Scilab mostrou-se eficiente e versátil.
4. O tipo de funcionamento do sistema desenvolvido pode ser estendido a projetos de escala maior.

### AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao Instituto Federal Goiano, Instituto Federal de São Paulo, CNPq e Capes, pelo apoio na realização deste trabalho.

### LITERATURA CITADA

Abreu, J.M.H.; Lopez, J.R.; Regalado, A.P.; Hernandez, J.F.G. El riego localizado. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987, 317p.

Adorian, G. C.; Lorençoni, R.; Neto, D. D; Reichardt, K. Evapotranspiração potencial e coeficiente da cultura de dois genótipos de arroz de terras altas. Brazilian Journal of Agriculture-Revista de Agricultura, v. 90, n. 2, p. 128-140, 2015.

ANA - Agência Nacional de Águas. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, 2017.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

Bernardo, S; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. Viçosa: UFV, p.625, 2006.

Bernuth, R. D von. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v.116, n.2, p.294-298, 1990.

Biscaro, Guilherme Augusto. Sistema de irrigação localizada. Ed. UFGD, Dourados - MS, p. 12, 2014.

Camargo, Débora Costa. Manejo da Irrigação: como, quando e quanto irrigar?. INOVAGRI, Fortaleza: IFCE , p.23, 2016.

Carvalho, I. R.; Korcelski, C.; Pelissari, G.; Hanus, A. D.; Rosa, G. M. Demanda hídrica das culturas de interesse agrônômico. *Enciclopédia Biosfera*, v.9, n.17; p.969-985, 2013.

Conceição, M. A. F.; Mandelli, F.; Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 13, n. 2, p.303-307, 2005.

Filho, Delly Oliveira; Ribeiro, Marcos C.; Mantovani, Everardo C.; Soares, Antônio A.; Fernandes, Haroldo C. Dimensionamento de motores para o bombeamento de água. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1012-1022, 2010.

Gavilan, P.; Berengena, J.; Allen, R.G. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on Penman–Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, n. 89 n. 3, p. 275–286, 2007.

Getrotech. Energia Solar. 2016. Disponível em:  
<<https://www.getrotech.com.br/Artigos/energia-solar/>>. Acesso em: Jun. 2019.

Haguenauer, Guilherme de Moura. Tecnologias de irrigação e o uso eficiente da água: o caso do gotejamento subsuperficial. Rio de Janeiro. p.64, 2016. Dissertação.

INMET. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília DF, 2009.

IPEA. Sobre a Agricultura Irrigada no Semiárido: uma análise histórica e atual de diferentes opções de política: Texto para Discussão: 2369. Rio de Janeiro. 2018.

Lopes, Iug; Leal, Brauliro Gonçalves. Evapotranspiração horária x diária utilizando Penman-Monteith para o polo de desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.10, n°.5, p. 914 - 924, 2016.

Miranda, Eugenio Paceli de. Programa computacional para dimensionamento e determinação dos custos de energia elétrica consumida por um sistema de irrigação localizada. UNESP, Botucatu-SP, 2016. Tese.

Mantovani, E. C. Avalia: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.

Oliveira, Gertrudes M. de; Leitão, Mário M. V. B. R.; Bispo, Regiane de C.; Santos, Irai M. S.; Lima, Caio B. de A.; Carvalho, Adheilton R. P. de. Coeficiente de cultura e produtividade da cebola submetida a diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.9, p.969-974, 2013.

Oliveira, Leidjane M. M. de; Montenegro, Suzana M. G. L.; SILVA, Bernardo B. da; Antonino, Antonio C. D.; Moura, Albert E. S. S. de. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.10, p.1039–1046, 2014.

Silva, César Antônio da; Silva, Cícero José da. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, Garça, n.8, dez. 2005.

Smith, M.; Segeren, A.; Santos Pereira, L.; Perrier, A.; Allen, R.. Report on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. Rome: FAO, p. 28-31, 1991.

Thies, Eduardo; Zanoni, Cícero. Eficiência energética em sistema eletromotriz de ventilação: uma análise comparativa entre motor de indução trifásico x motor de ímã permanente. *Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada*, v.2, n.2, 2016.

Vianna, Luiz Fernando de Novaes; Perin, Edénir Bagio; Ricce, Wilian da Silva; Massignan, Angelo Mendes; Pandolfo, Cristina. Bancos de Dados Meteorológicos: Análise dos Metadados das Estações Meteorológicas no Estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 53-64, 2017.

Xing, Z.; Chow, L.; Meng, F.R.; Rees, H.W.; Stevens, L.; Monteith, J., Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick. Maritime Canada. Sensors, Lausanne, n. 8. p.412–428, 2008.

## 4.0 CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a revista Agriambi)

### **Automação de sistema de irrigação de baixo custo baseado na umidade do solo**

#### **Resumo**

Entre os setores da economia, o setor agrícola é responsável pelo maior consumo de água doce, pois necessita de grande quantidade de água no processo de irrigação. Para minimizar esse consumo, o processo de irrigação exige estudo ou medição das necessidades hídricas do solo de acordo com a cultura utilizada. Diante disso, este trabalho tem por objetivo o manejo da irrigação com base nos dados de umidade do solo fornecida por sensores capacitivos. Foi elaborada uma interface web, possibilitando, ao usuário do sistema de irrigação, monitorar a umidade do solo e habilitar ou desabilitar a irrigação automática do sistema. O sistema foi implementado no Instituto Federal de São Paulo – Presidente Epitácio (21°47'05"S 52°06'41"W) e os sensores instalados na área de cultivo, determinando o momento adequado para a irrigação. **Palavras-chave:** microaspersão, umidade do solo

#### **Utilization of capacitive soil moisture sensors for The irrigation process automation**

#### **Abstract**

Among the sectors of the economy, the agricultural sector is responsible for the largest consumption of fresh water, as it needs a large amount of water in the irrigation process. To minimize this consumption, the irrigation process requires a study or measurement of soil water requirements according to the crop used. Therefore, this work aims to perform irrigation management based on soil moisture data provided by capacitive sensors. A web interface has been designed, enabling the irrigation system user to

monitor soil moisture and enable or disable automatic irrigation of the system. The system was implemented at the Federal Institute of São Paulo - Presidente Epitácio (21 ° 47'05 "S 52 ° 06'41" W), the sensors were installed in the cultivation area, determining the appropriate time for irrigation.

**Keyword:** micro sprinkler, soil moisture

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Em algumas regiões do Brasil, como o Semiárido brasileiro, a irrigação é fundamental, pois viabiliza o fornecimento de água para diversas culturas (ANA, 2017). Mesmo em regiões que não apresentam característica marcante de escassez de água, as mudanças climáticas podem interferir significativamente nos ciclos agrícolas (Gonçalves & Back, 2018).

A implantação de sistemas de irrigação requer uma quantidade significativa de água disponível e apresenta custo elevado (Haguenauer, 2016). Por isso, um projeto bem elaborado, anteriormente à fase de implantação do sistema de irrigação, é essencial para evitar desperdícios de recursos hídricos, além de gastos desnecessários com equipamentos, decorrentes, por exemplo, de um dimensionamento indevido. O projeto deve considerar um estudo ou uma medição das necessidades hídricas do solo de acordo com a cultura utilizada, de modo a evitar o aumento do custo de implantação e a operação inadequada do sistema de irrigação (Junior et al., 2017).

Entre as formas de avaliar as necessidades hídricas do solo, podem ser usados os sensores de umidade do solo ou utilizados os dados das estações meteorológicas próximas ao local de cultivo. Os sensores de umidade do solo são responsáveis por verificar a umidade do solo, variável comumente utilizada para a determinação do momento adequado para a irrigação (MATOS, 2017). O desejável é que a irrigação seja automática, levando em conta o momento adequado e o fornecimento de recursos hídricos em quantidade necessária para o cultivo. Diante disso, este trabalho tem por objetivo automatizar o processo de irrigação pelo uso de sensores de umidade do solo.

O sistema é composto essencialmente por uma unidade de processamento e controle, implementada no Raspberry PI, uma interface de comunicação, que apresenta os dados de umidade do solo, detectada por sensores instalados em campo. A integração a uma página web permite a supervisão e o controle do sistema a distância por qualquer dispositivo móvel, como celulares e tablets.

## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O sistema foi implementado no Instituto Federal de São Paulo – Presidente Epitácio (21°47'05"S 52°06'41"W), onde também foi feita a calibração dos sensores de umidade do solo, processo descrito nos tópicos seguintes.

### 4.2.1. Descrição do sistema de irrigação automático

O sistema de irrigação foi implementado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus – Presidente Epitácio, em uma área experimental.

Optou-se pela implementação de um sistema de irrigação por microaspersão. Segundo autores como Liao et al. (2019) e Mesquita et. al (2018), a irrigação por microaspersão promove rendimento da produção com eficiência e redução da utilização da água. A eficiência se situa em torno de 85% a 95% (Biscaro, 2014).

O microaspersor utilizado foi da marca Ede, modelo Twister, do tipo normal, de cor verde, 1,2 mm de diâmetro de bocal, que, de acordo com informações técnicas obtidas em catálogo do fabricante, emite 74L/h sob uma pressão de serviço de 20mca. Os microaspersores foram instalados em haste de sustentação de 40 cm, com microtubo e conector.

O dimensionamento do sistema de irrigação foi feito empregando as equações de Darcy-Weisbach, comumente utilizadas por projetistas (Coelho et al., 2018). Foi utilizado o software Scilab para a elaboração de um programa de simulação para determinar as vazões em cada microaspersor e a pressão manométrica da bomba, sem o uso de reguladores de pressão. Para estes cálculos, o programa utiliza curvas de vazão versus altura monométrica da bomba e dos microaspersores, além das perdas de carga em cada trecho do sistema. Estas operações de cálculo são feitas de forma interativa, até que haja convergência entre a vazão da bomba e a vazão total nos microaspersores.

O sistema dimensionado é constituído por três linhas laterais, espaçadas de quatro metros de distância entre si, cada uma apresenta três microaspersores a uma distância de quatro metros um do outro. A Figura 1 detalha o sistema de irrigação.

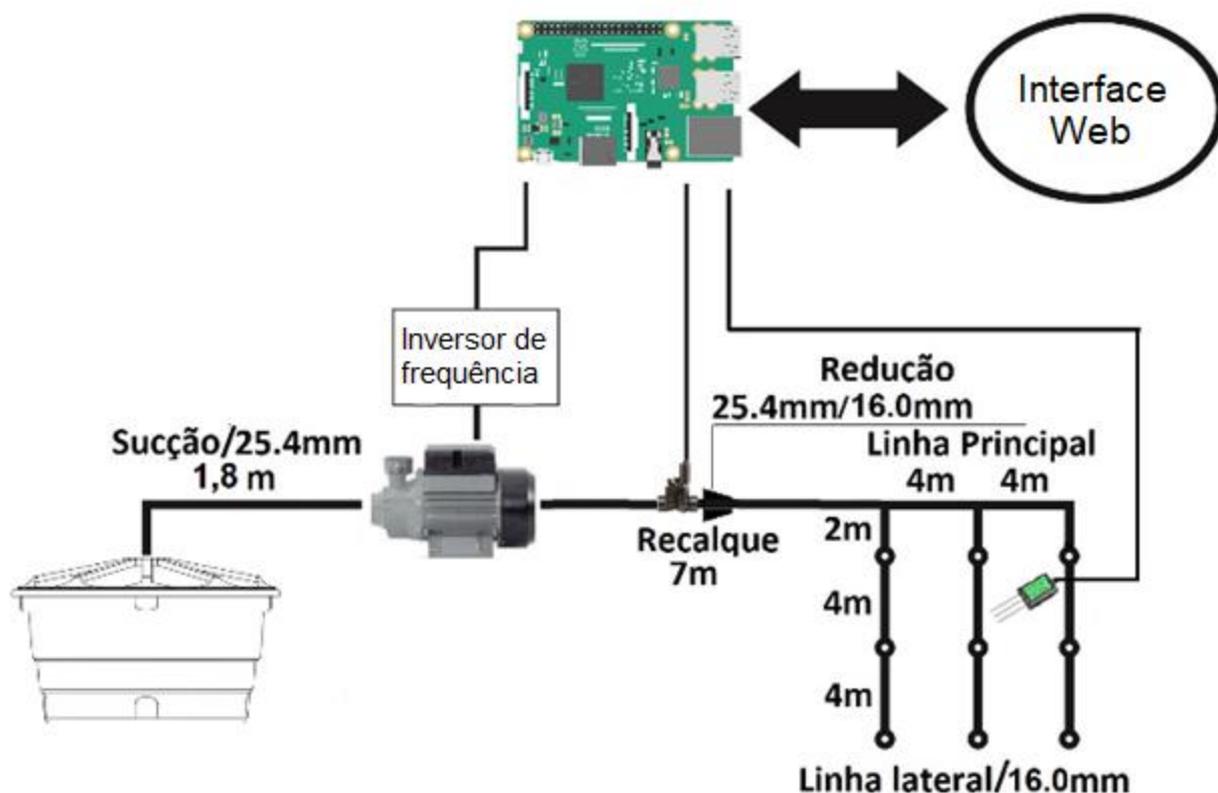


Figura 1. Diagrama representativo do sistema implementado

A água foi bombeada, partindo de um reservatório de 1000L até os microaspersores, por meio da Bomba Periférica Ksb Hydrobloc - P 500, trifásica 220V/380V de 1/2 CV. Para o fornecimento de energia elétrica para a motobomba, foi utilizado um inversor de frequência CFW08 da WEG.

Uma válvula solenoide de uma polegada, 12V, foi instalada no início da linha principal, e sua abertura ou fechamento ocorrendo conforme os comandos enviados pela a unidade de processamento e controle.

Foram utilizados dois sensores capacitivos para estimativa da umidade do solo, ambos importados da China, a marca e o modelo dos sensores são, respectivamente, Sonbest SM3001V2.

As unidades de processamento e controle do sistema de irrigação foram implementadas no Raspberry PI. Este dispositivo é responsável pela leitura da umidade do solo, detectada pelos sensores, e por apresentar essa informação na interface Web.

O Raspberry PI não apresenta um conversor digital/analógico integrado, por conta disso, foi necessário utilizar o MCP3008, que consiste em um conversor analógico-digital de 10 bits e 8 canais. Com a utilização desse conversor, foi possível

proceder à leitura dos dados de umidade do solo fornecida pelos sensores instalados na área de cultivo.

A interface Web implementada permite o gerenciamento e a supervisão do sistema de irrigação remotamente, sendo nela verificados os dados da umidade do solo detectada pelos sensores e os dados provenientes da estação meteorológica. Na programação, foram consideradas as equações obtidas na calibração dos sensores de umidade do solo.

Por meio dos protocolos HTTP e TCP/IP, o sistema é conectado à web, permitindo, assim, que o operador do sistema acesse remotamente dados do sistema, defina alguns parâmetros e possa controlar certas funções.

O sistema de irrigação desenvolvido funciona de modo que a irrigação deverá ocorrer sempre que os sensores detectarem que valor da umidade do solo é inferior ao valor mínimo de umidade estabelecida em programação, então, nesse momento, o sistema de irrigação deve entrar em funcionamento. Na prática da irrigação, esse valor mínimo corresponde ao teor de umidade no qual a planta não consegue mais retirar água do solo, denominado ponto de murcha permanente.

No sistema implementado, caso a umidade do solo detectada pelos sensores esteja acima do valor máximo de umidade estabelecida em programação, a irrigação deve parar. Esse valor máximo de umidade do solo é denominado capacidade de campo e corresponde à capacidade máxima de o solo reter água, acima da qual, ocorrem perdas por percolação de água no perfil ou por escoamento superficial.

Neste trabalho, a irrigação pode ocorrer automaticamente, com base nos dados de umidade do solo, ou por meio de comandos enviados pelo operador do sistema. O operador pode, por exemplo, interromper ou adiar a irrigação, caso ocorra alguma previsão de chuva.

#### **4.2.2. Calibração dos Sensores de Umidade do Solo**

Foram utilizados dois sensores de umidade do solo capacitivos da marca Sonbest, modelo SM3001V2, adquiridos por importação da China. O tipo de sensor utilizado é apresentado na Figura 2.



Figura 2. Sensor de umidade do solo Sonbest SM3001V2

Sensores de umidade do solo capacitivos fazem medições quase instantâneas, de forma não destrutiva, podendo permanecer no solo por um longo período, são capazes de fornecer leituras contínuas, não utilizam radiação e ainda permitem medições precisas próximo à superfície do solo (Barroca et al., 2018).

Para uma maior confiabilidade na leitura da umidade do solo fornecida pelos sensores, ambos foram calibrados, empregando o método gravimétrico padrão. Amostras de solo deformadas foram coletadas no IFSP- Campus de Presidente Epitácio a uma profundidade de 30 cm, sendo que o método que utiliza amostras deformadas é imensamente preciso (Gava et al., 2016). O solo é classificado como Latossolo Vermelho (Fushimi, 2017). A calibração dos sensores de umidade do solo foi feita no Laboratório de edificações da mesma instituição.

As amostras de solo foram condicionadas em colunas confeccionadas de tubos de PVC com 150 mm de diâmetro e 220 mm de altura, tendo sido utilizados dois tubos de PVC. Em seguida, foi inserido um sensor de umidade do solo em cada um dos tubos. É importante destacar que as hastes dos sensores foram inseridas no solo, enquanto os cabos ocuparam a parte externa do recipiente. Assim, obtemos dois conjuntos formados por tubo de PVC, amostra de solo e sensor de umidade do solo, denominados conjunto 1 e conjunto 2. Cada um dos conjuntos foi então inserido em um recipiente de plástico com água para passarem pelo processo de saturação, que durou 48 horas.

Após a saturação do solo, procedeu-se ao processo de secagem das amostras. Para dar início a esta etapa, as amostras foram retiradas do balde e acondicionadas em pratos plásticos. Foi então feita a pesagem de cada conjunto, formado agora por tubo de PVC, amostra de solo, sensor de umidade e prato plástico. Além da pesagem, foi feita a leitura do valor de tensão no terminal de sinal dos sensores de umidade do solo.

Os conjuntos 1 e 2 foram acondicionados em uma estufa a uma temperatura constante de 45°C (figura), tendo esta temperatura sido adotada visando aos possíveis danos causados aos sensores quando submetidos a uma temperatura maior. A Figura 3 mostra os conjuntos no interior da estufa.



Figura 3. Conjuntos 1 e 2 no interior da estufa

O processo de secagem durou, em média, 9 a 12 dias, tendo a pesagem e a leitura da tensão fornecida por cada um dos sensores sido feitas a cada 24 horas. O processo descrito foi repetido três vezes para conjuntos 1 e 2.

#### **4.2.3. Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)**

A avaliação da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação por microaspersão foi feita empregando a metodologia do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD). Foram distribuídos na área de cultivo implementada 100 coletores (copos plásticos descartáveis), quantidade adequada, segundo Bernardo (1995). Os coletores apresentavam diâmetro de 7,0 cm, o que corresponde a uma área de 38,48 cm<sup>2</sup>, foram dispostos 80 cm entre si. A disposição dos coletores na área irrigada pode ser verificada na Figura 4, já a instalação dos coletores em campo é verificada na Figura 5. O sistema funcionou por um tempo de duas horas, tempo considerado mínimo para a avaliação (Silva & Silva, 2005).

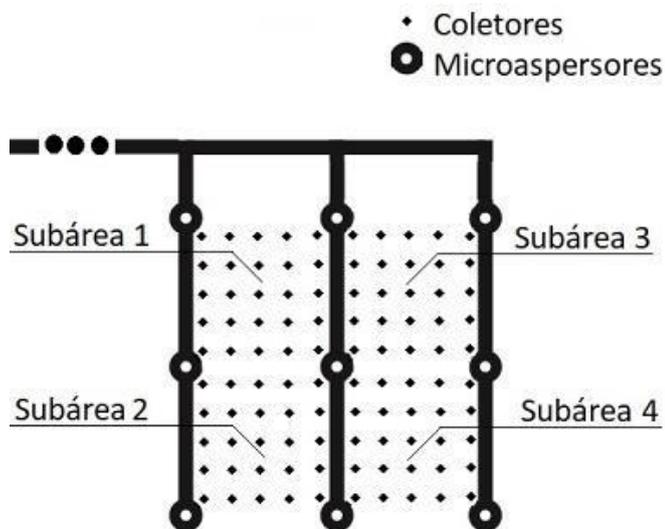


Figura 4. Disposição dos coletores na área irrigada



Figura 5. Coletores instalados em campo

A avaliação da uniformidade foi feita considerando quatro subáreas na área irrigada, cada uma delas influenciadas por quatro microaspersores. A consideração das subáreas para a avaliação da uniformidade de aplicação de água no sistema leva em conta o fato de cada subárea ser atingida por lâminas d'água de microaspersores que operam em vazões e pressões de serviço diferentes.

O CUD é calculado pela equação 1:

$$CUD = 100 \left( \frac{L_{q25\%}}{L_m} \right) \quad (1)$$

Em que:

CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (%);

$L_{q25\%}$  - Média de 25% dos menores valores de lâminas observados nos coletores (mm); e

Lm - lâmina média de todas as observações (mm).

A interpretação dos valores do coeficiente de uniformidade de distribuição baseou-se na metodologia apresentada por Mantovani (2001)(Tabela 2).

Classificação	CUD (%)
Excelente	>84
Bom	68-84
Razoável	52-68
Ruim	36-52
Inaceitável	<36

Tabela 2: Classificação do coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

### 4.3. RESULTADOS

O testes e os experimentos forma feitos nas instalações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Presidente Epitácio, localizado no município de Presidente Epitácio – São Paulo.

A interface web pode ser verificada na Figura 6. Nesta página, destacados em cor azul, estão os dados da umidade do solo detectada pelo sensor 1 (umidade 2) e pelo sensor 2 (umidade 3), além disso, um botão que permite habilitar ou desabilitar a irrigação também compõe a página, e para essa função, o inversor de frequência operou no modo de controle remoto.

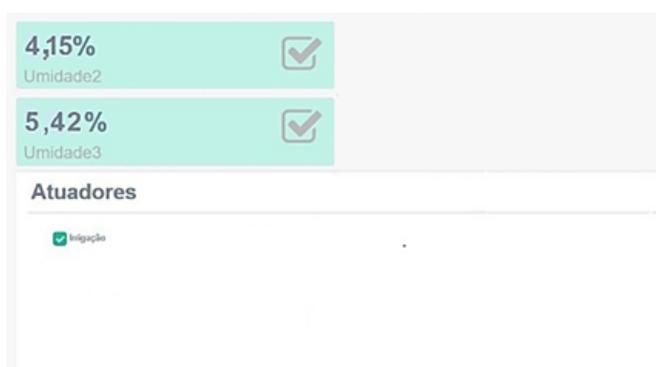


Figura 6. Interface web desenvolvida

A interface web foi acessada por dispositivos conectados à internet, situados em diferentes locais. A função responsável por desabilitar o sistema de irrigação foi testada e verificada sua funcionalidade remotamente. Esse controle foi possível mediante a comunicação do Raspberry PI com o inversor de frequência operando no modo remoto.

A Figura 7 apresenta as curvas de calibração dos dois sensores, podendo ser observada a linha de tendência exponencial dos dados de umidade do solo (%) e de

tensão elétrica (V), coletados durante os testes. Ao todo foram feitos seis testes, sendo três testes respectivos a cada um dos sensores.

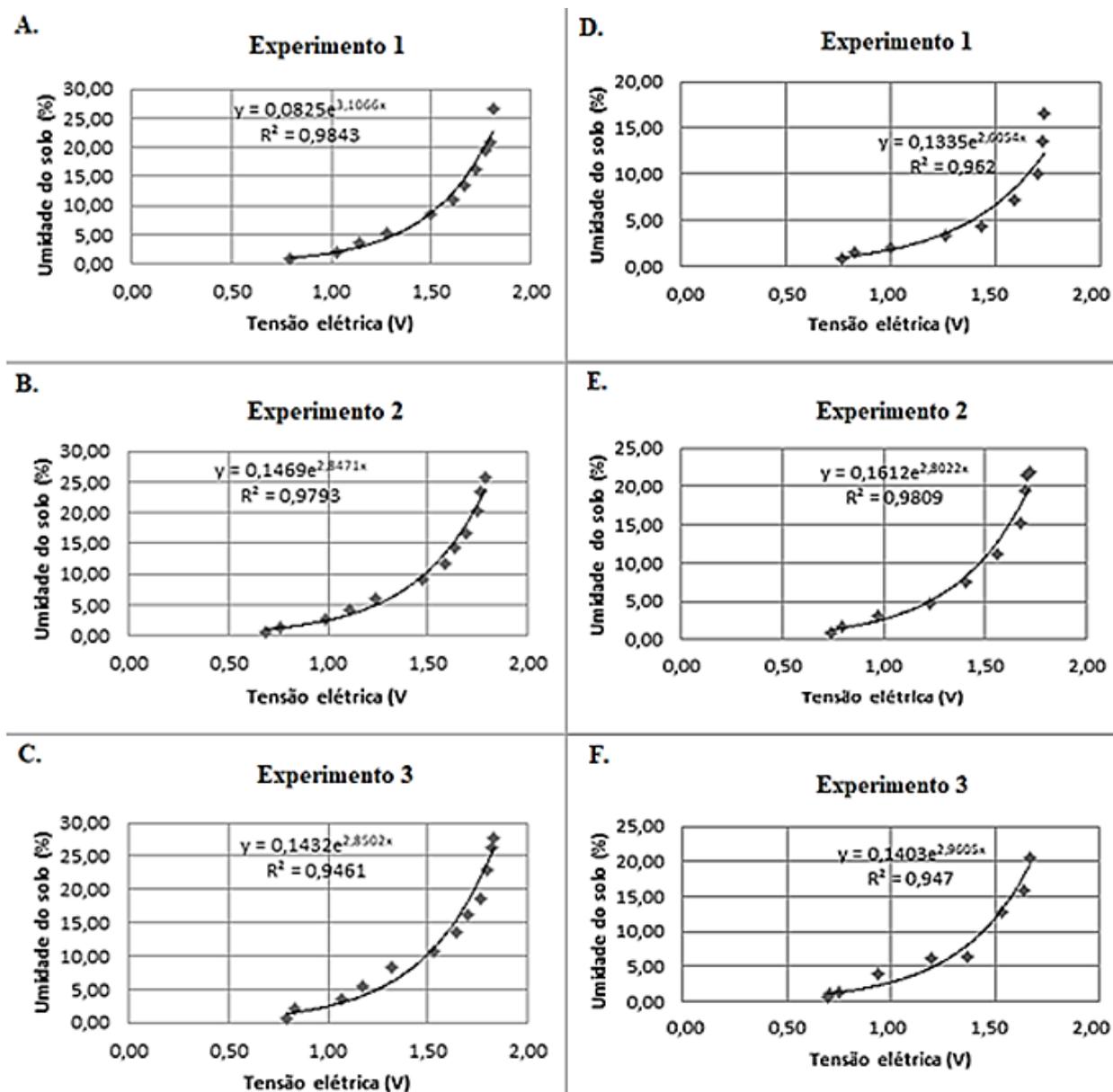


Figura 7. Umidade do solo (%) em função da tensão elétrica(V). Curvas respectivas ao sensor 1: 5A, 5B e 5C. Curvas respectivas ao sensor 2: 5D, 5E e 5F.

Os gráficos mostram que as equações de ajuste apresentam forte correlação, pois os coeficientes de correlação são próximos de 1 (Figueiredo Filho & Silva Júnior, 2009). As equações de ajuste são fundamentais para o conhecimento da umidade do solo em função da tensão elétrica. Ao observarmos as curvas de calibração dos sensores 1 e 2, notamos similaridade no comportamento da umidade do solo em função da tensão

elétrica, porém os comportamentos são distintos, o que mostra a importância da calibração individual dos sensores (Fagundes, 2011).

Considerando o conjunto 1, o procedimento 1 foi o que melhor se ajustou, apresentando o modelo exponencial quadrático com coeficiente de correlação  $R^2=0,9843$ , sendo este o modelo utilizado para fazer as leituras de umidade do solo pelo sensor 1. A equação 1 define a curva de calibração para o sensor 1:

$$y = 0,0825.e^{3,1066x} \quad (1)$$

Considerando o conjunto 2, o procedimento 2 foi o que melhor se ajustou, apresentando o modelo exponencial quadrático com coeficiente de correlação  $R^2=0,9809$ , sendo este o modelo utilizado para fazer as leituras de umidade do solo pelo sensor 2. A equação 2 define a curva de calibração para o sensor 2:

$$y = 0,1612.e^{2,8022x} \quad (2)$$

Foram verificados os seguintes coeficientes de uniformidade de distribuição: subárea 1 igual a 63,28%, subárea 2 igual a 68,84%, subárea 3 igual a 60,54% e subárea 4 igual a 68,62%. De acordo com a metodologia de Mantovani (2001), os valores encontrados para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) são considerados bons para as subáreas 2 e 4, já para as subáreas 1 e 3, são considerados razoáveis.

Após a calibração dos sensores de umidade, eles integraram o sistema de irrigação, a equação de ajuste de cada sensor foi considerada em programação e estabelecido um valor mínimo e máximo de umidade do solo a ser detectada pelos sensores. Quando foi verificado que a umidade detectada estava abaixo da estabelecida, a motobomba foi ativada automaticamente até que o valor máximo de umidade fosse detectado.

#### 4.4. CONCLUSÕES

1. A irrigação pode ocorrer automaticamente, conforme o valor de referência da umidade do solo estabelecido em programação.

2. A calibração dos sensores Sonbest SM3001V2, instalados em Latossolo Vermelho, favoreceu a obtenção dos dados de umidade do solo, com maior nível de confiabilidade.
3. Por meio da interface web, o usuário obteve o monitoramento de dados pertinentes ao sistema de irrigação e seu controle.
4. O sistema de irrigação implantado apresentou subáreas com boa uniformidade de aplicação de água e subáreas com regular uniformidade de aplicação de água, ambas consideradas aceitáveis para o sistema de irrigação por microaspersão.

### **AGRADECIMENTOS**

A autora agradece ao Instituto Federal Goiano, Instituto Federal de São Paulo, CNPq e Capes, pelo apoio na realização deste trabalho.

### **LITERATURA CITADA**

ANA - Agência Nacional de Águas. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, 2017.

Barroca, Mariana Vasconcelos; Jerszurki, Daniela; Lazarovitch, Naftali; Souza, Jorge Luiz Moretti de; Oliveira, Sisara Rocha. Efeito da salinidade do solo nas leituras de umidade realizadas com sensor capacitivo. VI Congresso Online – Agronomia, 2018. Anais.

Bernardo, S. Manual de irrigação. 6ª ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, p.657, 1995.

Biscaro, Guilherme Augusto. Sistema de irrigação localizada. Ed. UFGD, Dourados - MS, p. 12, 2014.

Coelho, A. P; Zanini, J. R; Faria, R. T. de; Dalri, A. B; Palaretti, L. F. Comparação de equações para estimativa da perda de carga em tubulação de polietileno. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, Guarapuava-PR, v.11, n.1, p.25-31, 2018.

Fagundes, Minéia Capellari; Moraes, Marcelo Oliveira; Schaffer, Decio; Queiroz, Tadeu Miranda De. Calibração de sensores para determinação do teor de água do solo. *Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta*, v.9, n.1, p.53-58, 2011.

Figueiredo Filho, Dalson Britto; Silva Júnior, José Alexandre da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ). *Revista Política Hoje*, v. 18, n. 1, 2009.

Fushimi, Melina; Nunes, João Osvaldo Rodrigues; Castoldi, Robson Chacon. Caracterização dos solos de parte dos municípios de Marabá Paulista-SP e Presidente Epitácio-SP. *Revista FORMAÇÃO (ON-LINE)*, v. 1; n. 24, p.114-135, 2017.

Gava, R.; Silva, E. E. da; Baio, F.H.R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 10(2), p.154-162, 2016.

Gonçalves, Fabiane N.; Back, Álvaro J. Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, n. 3, p. 11-20, 2018.

Haugenauer, Guilherme de Moura. Tecnologias de irrigação e o uso eficiente da água: o caso do gotejamento subsuperficial. Rio de Janeiro. p.64, 2016. Dissertação.

Junior, José Alves Júnior; Sales, Déborah Lídyia Alves; Pereira, Rodrigo Moura; Rodriguez, Walter Danilo Maradiaga; Casaroli, Derblai; Evangelista, Adão Wagner Pego. Viabilidade econômica da irrigação por pivô central nas culturas de soja, milho e tomate. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, v. 22, n. u, 2017.

Liao, Renkuan; Wu, Wenyong; Hu, Yaqi.; Xu, Di; Huang, Qiannan; Wang, Shiyu. Micro-irrigation strategies to improve water-use efficiency of cherry trees in Northern China. *Agricultural Water Management*, v. 221, p. 388-396, 2019.

Mantovani, E. C. *Avaliação: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada*. Viçosa, MG: UFV. 2001.

Matos, Rigoberto Moreira de; Neto, José Dantas; Lima, Antônio Suassuna de; Silva, Patrícia Ferreira da; Borges, Vitória Ediclécia; Sobrinho, Thiago Galvão. Teor de umidade por diferentes métodos em neossolo do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.11, n.4, p. 1588 - 1597, 2017.

Mesquita, Luís Fabio Gonçalves; Lindoso, Diego; Rodrigues Filho, Saulo. Crise hídrica no distrito federal: o caso da bacia do Rio Preto. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano 14, v. 23, 2018.

Silva, César Antônio da; Silva, Cícero José da. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia, Garça*, n.8, dez. 2005.

## CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho abordou vários aspectos da construção de um sistema de controle automático de irrigação, pois, para cumprir com o propósito de aumentar eficiência da irrigação, devem ser considerados tanto o bom dimensionamento do sistema de irrigação como a boa gestão dos recursos hídricos.

Neste trabalho, foram usados métodos convencionais para o cálculo da evapotranspiração e a determinação do nível de irrigação necessário ao plantio. A calibração dos sensores de umidade do solo ocorreu pelo método gravimétrico padrão, com o intuito de obter informações corretas de umidade de acordo com o tipo de solo. O principal objetivo deste trabalho foi permitir que o sistema de irrigação funcionasse de forma automática, com o sistema supervisorio operando a partir de um dispositivo móvel.

O sistema testado, embora de pequeno porte, serviu para mostrar sua funcionalidade, cujos resultados poderiam ser estendidos a uma escala maior. O dimensionamento do sistema de irrigação, através do programa de simulação desenvolvido neste trabalho, mostrou-se eficiente e versátil. Este programa permitiu calcular as pressões e as vazões em cada microaspersor, considerando as curvas de vazão dos microaspersores e da bomba em função de suas respectivas pressões manométricas, algo que não poderia ser feito por um cálculo não recursivo ou interativo.

Em trabalhos futuros, pretende-se melhorar a segurança no acesso remoto ao sistema para evitar possíveis invasões e implementar a comunicação com a internet pela radiofrequência. Também se pretende desenvolver um módulo de inteligência

artificial que permita ao sistema tomar decisões baseadas não somente nos dados da estação meteorológica, mas também na previsão do tempo fornecida pelo INMET. Isto tornaria o sistema mais independente e capaz de tomar decisões assertivas, evitando situações em que a irrigação pudesse ocorrer na iminência de uma chuva.