



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



VICTOR RODRIGUES NASCIMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* E *HARDWARE* DE BAIXO CUSTO PARA
GERENCIAMENTO DA IRRIGAÇÃO**

RIO LARGO – AL

2022

VICTOR RODRIGUES NASCIMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* E *HARDWARE* DE BAIXO CUSTO PARA
GERENCIAMENTO DA IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Guilherme Bastos Lyra

Coorientador: André Luiz de Carvalho

RIO LARGO - AL

2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

N244d Nascimento, Victor Rodrigues.

Desenvolvimento de software e hardware de baixo custo para gerenciamento da irrigação. / Victor Rodrigues Nascimento. – 2022.

52f.: il.

Orientador: Guilherme Bastos Lyra.
Coorientador: André Luiz de Carvalho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Graduação em Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2022.

Inclui bibliografia

1. Internet das coisas. 2. Irrigação. 3. Automação. 4. Arduino. I. Título.

CDU: 631.67

Folha de aprovação

VICTOR RODRIGUES NASCIMENTO

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE E HARDWARE DE BAIXO CUSTO PARA GERENCIAMENTO DA IRRIGAÇÃO

Trabalho apresentado ao corpo docente do *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Agronomia apresentado em 30/11/2022.

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 GUILHERME BASTOS LYRA
Data: 08/02/2023 17:31:07-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Orientador: Guilherme Bastos Lyra
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 ANDRE LUIZ DE CARVALHO
Data: 10/02/2023 15:11:05-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Coorientador: André Luiz de Carvalho
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 ADOLPHO EMANUEL QUINTELA DA ROCHA
Data: 08/02/2023 11:03:24-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Examinador: Adolpho Emanuel Quintela da Rocha
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 IVOMBERG DOURADO MAGALHAES
Data: 14/02/2023 22:58:00-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Examinador: Ivomberg Dourado Magalhães
(Universidade Federal de Alagoas)

Dedico

A Deus, à minha família, em especial aos meus pais Viviane e Helvio, aos meus avós e a todos que de alguma forma contribuíram para com essa conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a Ele toda honra e toda glória!

Ao Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra, por todos os ensinamentos, conselhos e suporte durante a graduação.

Ao Prof. Dr. André Luiz de Carvalho, meu orientador durante toda graduação, pela orientação, ensinamentos e acompanhamento durante a jornada científica.

Ao meu pai, Helvio Nascimento Santos, minha fonte de inspiração constante, por todos os conselhos e suporte.

À minha mãe, Viviane da Silva Rodrigues, base da minha vida, por todo apoio e motivação e à minha avó Ester, minha segunda mãe.

Aos meus colegas de curso e do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA), pela troca de conhecimentos e aprendizados.

Aos meus amigos da vida, por toda motivação e apoio.

À banca examinadora.

E a todos que participaram para essa formação.

RESUMO

Definir quando e o quanto irrigar faz parte da eficiência da irrigação. Estimar a necessidade hídrica de cada cultura é uma das formas de gerenciamento da irrigação. A eficiência no uso da água se dá através dos investimentos em novas tecnologias que, principalmente economizem água. Com isso, tendo em vista a difusão da Internet das Coisas (*IoT*) a solução que este presente trabalho traz automatiza o gerenciamento da irrigação e facilita esta tarefa através do desenvolvimento de uma solução tecnológica multiplataforma capaz de monitorar o estado da umidade do solo, variáveis agrometeorológicas, além de integrar ferramentas que auxiliam o planejamento agrícola como a estimativa da evapotranspiração de referência (ETP) e a geração do balanço hídrico climatológico, visando o zoneamento agrícola. A frente física (*hardwares*) foi programada sobre a plataforma Arduino que integra os sensores de campo responsáveis por coletarem os dados de umidade do solo e temperatura e umidade relativa do ar e os atuadores (relés e válvulas solenoides), elementos responsáveis por realizarem os comandos enviados pelo *software*, programado em linguagem Python 3. Contudo, com base nos resultados, conclui-se que a plataforma desenvolvida apresenta-se viável operacional e financeiramente, os aplicativos são totalmente funcionais, os atuadores de campo funcionaram conforme programado. O desempenho do cálculo de estimativa da Evapotranspiração potencial mensal pelo método de Thornthwaite (1948) foi classificado, conforme Willmont (1985) como “Muito bom”, o que demonstra a viabilidade desta ferramenta.

Palavras-chave: Internet das coisas; Irrigação; Automação; Arduino.

ABSTRACT

Defining when and how much to irrigate is part of irrigation efficiency. Estimating the water requirement of each crop is one way of managing irrigation. Efficiency in water use is achieved through investments in new technologies that mainly save water. With that in mind, in view of the diffusion of the Internet of Things (IoT), the solution that this present work brings automates the management of irrigation and facilitates this task through the development of a multi-interface technological platform capable of monitoring the state of soil moisture, agrometeorological variables, in addition to integrating tools that help agricultural planning, such as estimating the reference evapotranspiration (ETP) and generating the climatological water balance, aiming at agricultural zoning. The physical front (hardware) was programmed on the Arduino platform that integrates the field sensors responsible for collecting data on soil moisture and temperature and relative humidity of the air, and the actuators (relays and solenoid valves), elements responsible for carrying out the commands sent by the software, programmed in Python 3 language. However, based on the results, it is concluded that the developed platform is operationally and financially viable, the applications are fully functional, the field actuators worked as programmed. The performance of the estimated monthly potential Evapotranspiration calculation using the Thornthwaite method (1948) was classified, according to Willmont (1985) as “Very good”, which demonstrates the viability of the tool.

Palavras-chaves: Internet of Things; Irrigation; Automation; Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Placa Arduino Uno R3 e IDE Arduino	20
Figura 2 - Diagrama de funcionamento da plataforma Blynk	21
Figura 3 - Arquitetura da solução	22
Figura 4 - Modulo ESP8266 NodeMCU e datasheet da placa	23
Figura 5 - Variáveis receptoras das configurações de rede Wi-Fi	23
Figura 6 - Sensor de temperatura e umidade (DHT11): (a) módulo sensor. (b) ligação do sensor ao Arduino Nano e NRF24101. (c) abrigo de baixo custo confeccionado manualmente	24
Figura 7 - Sensor higrômetro: (a) modelo utilizado no projeto. (b) esquema de ligação do sensor ao Arduino Nano e NRF24101	25
Figura 8 - Calibração do sensor higrômetro: (a) substrato seco (ponto de murcha). (b) substrato úmido (capacidade de campo). (c) situação de solo encharcado	26
Figura 9 - Modelo de válvula solenoide utilizada no projeto	27
Figura 10 - Módulo relé utilizado no projeto	28
Figura 11 - Script da IDE Arduino com Token de acesso	28
Figura 12 - Exemplo de conexão entre Python e BlynkAPI	29
Figura 13 - Tela inicial do <i>software</i> Satrun Agroanálises	36
Figura 14 - Visualização de dados de cada setor cadastrado no banco de dados	37
Figura 15 - Tela para inserção de novo setor irrigado	38
Figura 16 - Valores de ETP estimados através do método de Thornthwaite para o município de Rio Largo-AL, no ano de 2021	39
Figura 17 - Aba para estimar ETP através do Método de Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991)	40
Figura 18 – Interface do BHC – Dados climatológicos obtidos da estação meteorológica do CECA/UFAL, do ano de 2021, no município de Rio Largo – AL	42

Figura 19 – Extrato do BHC para dados do município de Rio Largo – AL no ano de 2021	42
Figura 20 – Arquitetura do hardware. (a) módulo de campo, (b) módulo receptor	43
Figura 21 - Interface gráfica da solução Blynk em funcionamento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência dos métodos de irrigação	18
Tabela 2 – Faixas de umidade do solo e calibração do sensor	27
Tabela 3 – Critério de interpretação do desempenho do método pelo índice “c”	33
Tabela 4 – Coeficientes de determinação (R^2), correlação (r), exatidão (d) e desempenho (c) para valores mensais de ETP calculados pelos métodos de Thornthwaite original e modificado, comparados ao método padrão de Penman-Monteith. Período de janeiro a dezembro de 2021, Rio Largo, AL	40
Tabela 5 – Custo do projeto	45

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1	Geral.....	16
2.2	Específicos.....	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Agricultura irrigada: história e importância.....	17
3.2	Irrigação.....	17
3.2.1	Método de irrigação por superfície.....	18
3.2.2	Método de irrigação por aspersão.....	19
3.2.3	Método de irrigação localizada.....	19
3.2.4	Método de irrigação subterrânea.....	20
3.3	Internet das Coisas (<i>IoT</i>).....	20
3.4	Arduino.....	21
3.5	Blynk.....	22
3.6	Python.....	23
4.	Material e Métodos.....	24
4.1.	Arquitetura da solução.....	24
4.2.	Desenvolvimento do hardware.....	25
4.2.1.	Microcontrolador.....	25
4.2.2.	Medição da temperatura e umidade do ar.....	26
4.2.3.	Medição da umidade do solo.....	27
4.2.4.	Controle de válvulas.....	29
4.2.4	Conexão: Software e Hardware.....	30
4.3.	Rotinas de cálculos para estimar a Evapotranspiração.....	31
4.4.	Rotina de cálculos para Balanço Hídrico Climatológico (BHC).....	34
4.4.1.	Precipitação (P) e Evapotranspiração de Referência (ETP).....	35

4.4.2.	Negativo acumulado (NAC) e armazenamento (ARM).....	35
4.4.3.	Alteração (ALT) e Evapotranspiração Real (ETR).....	36
4.4.4.	Excesso (EXC) e Déficit Hídrico (DEF).....	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Interface <i>desktop</i>	38
5.2	Estimativas de ETP	40
5.2.1	Simplificada	41
5.2.2	Avançada.....	42
5.3	Cálculo do balanço hídrico climatológico	43
5.4	<i>Hardware</i>	44
5.5	<i>Software mobile</i>	45
5.6	Custos dos equipamentos.....	45
6.	CONCLUSÃO.....	47
	Referências	48

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma área de 351.289.816 mil hectares divididos entre 5.073.324 estabelecimentos rurais (IBGE, 2017). Até a terceira semana de fevereiro de 2022, em comparação com o mesmo período de 2021, as exportações agrícolas tiveram incremento de 23,6% e somaram US\$ 15,74 bilhões (BRASIL, 2022).

Com safras recordes a cada ano, o setor do agronegócio carrega a missão de evoluir produtiva e sustentavelmente aliado aos avanços tecnológicos. Contudo, ainda há uma considerável resistência em se utilizar de tecnologias dentro da porteira. Além da resistência ao uso, grande parte dos produtores deparam-se com uma barreira entre o acesso às tecnologias e o uso delas no dia-a-dia da propriedade rural. No processo de produção agrícola, diversas variáveis devem ser geridas de forma eficaz e em tempo hábil, independentemente do tamanho da produção. A irrigação se destaca como um importante variável, que ao aplicar o manejo correto, traz ganhos consideráveis à produção.

Para o desenvolvimento da atividade agropecuária, a água é um fator essencial e seu uso otimizado na produção de agrícola constitui um dos principais desafios (SACCON, 2018). O manejo e planejamento da irrigação devem ser norteados pelo uso racional da água. Embora a irrigação esteja associada a níveis tecnológicos elevados (MAROUELLI et al., 2011) a irrigação no Brasil ainda é praticada de forma inadequada, o que resulta em grande desperdício de água.

Definir quando irrigar e o quanto de água aplicar, faz parte da eficiência da irrigação. O uso efetivo da água na irrigação é uma preocupação que caminha junto ao aumento da escassez de água adequada pra atividades agrícolas. A eficiência média da irrigação no Brasil é de, aproximadamente, 59%. Isso significa que, para cada 1 mm de irrigação são necessários 15.900 litros/hectare, desses, 5.900 litros são aplicados em demasia, conforme a eficiência média (COELHO, 2013).

Contudo, a tarefa de planejar, executar e monitorar um sistema de irrigação é de suma importância. Estimar a necessidade hídrica de cada cultura, é uma das formas de gerenciamento da irrigação. A eficiência no uso da água se dá através dos investimentos em novas tecnologias que, principalmente economizem água. A adoção de tecnologias permite reduzir o gasto de

água entre 10 e 50%, além de incrementar a produtividade (KONGYAN, 2005; LIMA et al., 1999)

Repor a quantidade certa de água e no momento certo assegura à cultura melhor desenvolvimento. A facilidade no monitoramento e o acesso às tecnologias fundamentais para manejo de dados agrometeorológicos são pontos limitantes para a implantação da agricultura irrigada em pequenas e médias áreas agrícolas.

A solução apresentada no desenvolvimento deste trabalho alia-se à utilização de tecnologias e sensores de baixo custo que, apesar de apresentarem menor precisão em relação aos comerciais, possuem funcionalidades proveitosas para o monitoramento dos dados, tornando-se uma alternativa viável para pesquisas e como ferramenta mais acessível para o manejo da produção na agricultura de precisão (Kizito et al., 2008; Kojima et al., 2016; González-Teruel et al., 2019).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver e entregar uma plataforma, *software e hardware*, capaz de gerenciar dados agrometeorológicos (direta e indiretamente), planejar e executar setores de irrigação de propriedades rurais, aliado a um estudo de água no solo.

2.2 Específicos

- Desenvolver a lógica de programação para *software e hardware*;
- Programar a rotina de cálculos para estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETP) e Balanço Hídrico Climatológico;
- Desenvolver interface gráfica intuitiva, em linguagem Python 3;
- Construir *hardware*, em plataforma Arduino, para leitura das variáveis em campo;
- Cadastrar no banco de dados do software dos aspectos das culturas de maior importância econômica e social;
- Desenvolver a integração *Software-Hardware*;
- Entregar plataforma dinâmica e de baixo custo de instalação e manutenção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agricultura irrigada: história e importância

A quantidade de água potável existente na natureza é esgotável e sua disponibilidade se limita em relação ao crescimento populacional, à expansão agrícola desordenada e a degradação do meio ambiente (LIMA et al., 1999). A água é um bem essencial à toda forma de vida existente no planeta trazendo, também, utilidades importantes em atividades como geração de energia, abastecimento residencial e industrial, irrigação e outros usos igualmente importantes.

O Brasil possui um dos maiores recursos hídricos renováveis do planeta, sediando a maior reserva de água doce da Terra (12% do total mundial) e encontra-se em uma posição favorável, junto a Rússia, Canadá, Estados Unidos, China e Índia, graças às suas expansões territoriais e as diversas condições climáticas (SHIKLOMANOV, 1998).

Entende-se que o manejo de uma significativa área irrigada e grande quantidade de água necessita da utilização de tecnologias para que seja possível obter uma uniformidade da água irrigada. Os avanços tecnológicos na área da agricultura possibilitam melhorias nas técnicas de produção e de qualidade do produto (DE OLIVEIRA et al., 2022).

3.2 Irrigação

Consiste em técnicas, formas ou meios utilizados para aplicar água artificialmente às plantas, procurando satisfazer suas necessidades e visando a produção ideal para seu usuário. Esta definição abrange todo tipo de irrigação, do menos ao mais tecnificado. Evidentemente, a irrigação deve ser tida como uma ciência e não simplesmente como um equipamento. Assim sendo, a irrigação deve ser realizada de maneira eficiente, evitando desperdícios ou perdas (TESTEZLAF, 2011).

Se utilizada da melhor forma, a técnica de irrigação pode gerar benefícios inúmeros ao produtor. Testezlaf (2011b) lista esses principais benefícios: garantia de produção, reduzindo os riscos de quebra de safra por seca; Aumento da produtividade das culturas; Incremento na

qualidade do produto final; Aumento do número de safras e colheitas entressafra; Criação e aumento na oferta de empregos; Redução de mecanização e outras oportunidades econômicas.

A eficiência de um sistema de irrigação relaciona-se diretamente com o uso racional da água ou de qualquer fluido e da energia utilizada. O manejo racional da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto. Ao não adotar um método de controle da irrigação, o produtor acaba excedendo o volume necessário, temendo uma quebra de safra por déficit hídrico, o que pode comprometer a produção, além de onerar custos (LIMA; FERREIRA; CHRISTOFIDIS, 1999).

Dentre os métodos de irrigação, o de irrigação localizada apresenta um maior percentual de eficiência (Tabela 1).

Tabela 1. Eficiência dos métodos de irrigação

Método	Eficiência (%)
Superfície	40 a 75
Aspersão	60 a 85
Localizada	80 a 95

Fonte: Marouelli; Silva (1998)

Apesar de se conhecer a eficiência dos métodos de irrigação, valores abaixo da faixa potencial de cada método são constatados em campo, devido ao inadequado manejo dos sistemas (Hutmacher et al., 1994).

De acordo com Bernardo (2008), os métodos de irrigação são basicamente divididos em quatro: Irrigação por superfície; por aspersão; Microirrigação ou irrigação localizada e subterrânea, descritos a seguir.

3.2.1 Método de irrigação por superfície

O método é considerado o mais antigo e utilizado em todo o mundo (Cuenca, 1989). também pode ser chamado de irrigação por gravidade, por aproveitar a declividade do terreno para molhar total ou parcialmente a área. Um dos maiores problemas desse método é a baixa eficiência.

3.2.2 Método de irrigação por aspersão

Consiste no método mais utilizado na agricultura irrigada, por ser multifacetado e apresentar alta versatilidade, porém, não é o mais eficaz. Este simula a ação da chuva na lavoura, com isso, as perdas acontecem, principalmente, por deriva causada pela ação do vento, além de realizar o molhamento das folhas das plantas, afetando diretamente sua fitossanidade.

Biscaro (2009) define que o método irrigação por aspersão convencional é dividido em dois sistemas, são eles:

Sistema Convencional Portátil: é possível movimentar o equipamento de um local para o outro, conforme a necessidade de irrigação, quando não há tubulações, acessórios e aspersores em quantidade e extensão suficientes para abranger toda a área irrigada.

Sistema Convencional Permanente: as tubulações são fixas e não movidas de um local para outro, cobrindo simultaneamente toda a área irrigada.

3.2.3 Método de irrigação localizada

A aplicação de água no método de irrigação localizada visa molhar especificamente a área de solo na qual se encontra o sistema radicular da cultura. A umidade do solo é mantida próxima à capacidade de campo, caracterizando assim uma irrigação de alta frequência. Os emissores são os mecanismos mais importantes desse método de irrigação (BISCARO, 2014).

Biscaro (2014b) ainda define que os emissores utilizados nesse método são: gotejadores, mangueiras gotejadoras, microtubos, mangueiras exudantes, difusores e microaspersores.

A irrigação por microaspersão é um sistema localizado, intermediário entre a aspersão convencional e o gotejamento, este sistema é indicado para o uso em diversas culturas e solos, principalmente nos solos de boa permeabilidade e plantas de grande porte e largos espaçamentos, visando à aplicação localizada da água diretamente na região do sistema radicular (GOMES, 2013).

3.2.4 Método de irrigação subterrânea

A irrigação subterrânea se caracteriza pela aplicação da água diretamente ou abaixo do sistema radicular das culturas. A elevação da água se dá contra a ação da gravidade, através do processo de capilaridade do solo ou substrato (FERRAREZI et al., 2015).

Conforme Testezlaf (2011c), o método de irrigação subterrânea em campo aberto é dividido em:

Gotejo subterrâneo: onde a água é aplicada através de gotejadores enterrado logo abaixo do sistema radicular da cultura.

Elevação do lençol freático: baseia-se na aplicação de água na superfície do solo, usando sulcos ou canais bem espaçados, que irão contribuir com a saturação do perfil do solo, elevando o lençol freático até a profundidade desejada.

3.3 Internet das Coisas (IoT)

A *Internet of Things (IoT)* permite que equipamentos (*Hardwares*), com capacidade computacional e de comunicação, se conectem a outros equipamentos e a serviços na *Web* através da *Internet* (SANTOS et al., 2016). Significa que é possível incluir recursos de computação e conectividade em nuvem a dispositivos anteriormente desconectados, permitindo a análise e o controle de qualquer aplicativo. O sistema *IoT* consiste em quatro componentes principais que são comuns à maioria das soluções: *gateways*, *endpoints*, plataformas de nuvem e aplicativos.

Em 1999, Kevin Ashton empregou pela primeira vez esse termo, a expressão ganhou vida quando Ashton realizou uma apresentação para Procter & Gamble (P&G) integrando o uso de tecnologias de endereçamento de dados e sinais com a Internet (COSTA; MOTA, 2018).

A *IoT* necessita do suporte de algumas tecnologias para desenvolver-se, como, a identificação de radiofrequência (RFID), sensores, atuadores, telefones celulares, arquitetura de redes, protocolos, interoperabilidade e conexão sem fio são algumas das pedras angulares mais citadas neste processo que evolui continuamente (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010; TAN, 2010).

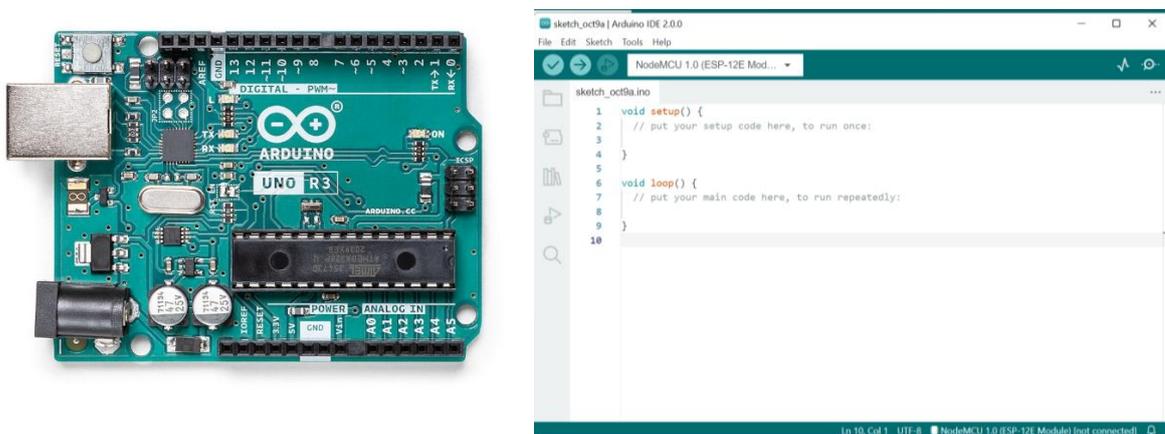
Para o setor do agronegócio, a *IoT* comporta-se como uma excelente ferramenta ao auxílio do controle de variáveis em todos os níveis da cadeia. Na agricultura, por exemplo, é possível conectar sensores de umidade do solo, assim é possível monitorar a irrigação de forma mais precisa, evitando desperdícios ou falta de água para a cultura.

3.4 Arduino

Souza et al. (2011) definem o Arduino como plataforma hardware de código aberto, de fácil utilização, ideal para a criação de dispositivos que permitam interação com o ambiente, dispositivos estes que utilizem dispositivos de entrada e saída LEDs, criando desta forma possibilidades ilimitadas.

Conforme Banzi e Shiloh (2014), o Arduino é composto por duas partes (Figura 1): a placa, que é a peça de hardware na qual trabalhamos; e a *IDE* (*Integrated Development Environment*), que é a parte de software executada através do computador. A *IDE* é utilizada para a criação de um *script* (programa de computador) que é enviada para a placa Arduino. Esse *script* é o que coordena o que a placa vai fazer.

Figura 1. Placa Arduino Uno R3 e IDE Arduino



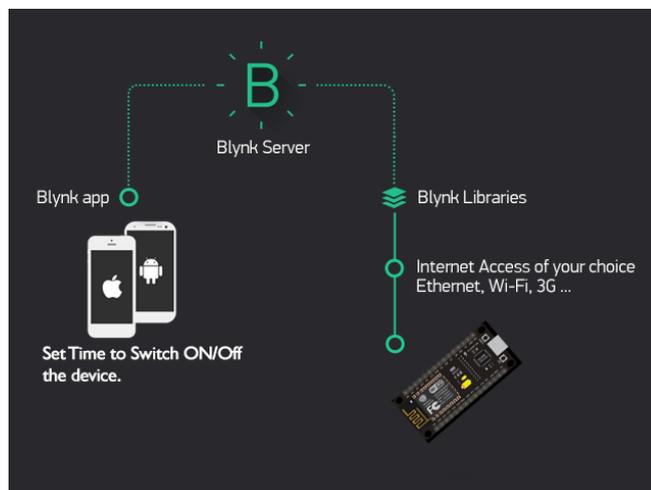
Fonte: Arduino (2022)

3.5 Blynk

Blynk é uma plataforma gratuita projetada para a *IoT*, que permite controlar remotamente um *hardware* programável, assim como receber, exibir e armazenar dados de sensores conectados ao *hardware*. Desta forma, é possível construir interfaces gráficas para projetos de maneira rápida e intuitiva, além de que não está vinculado somente a uma placa ou *shield* específica. Blynk suporta as plataformas: Arduino, Raspbery Pi, ESP8266 entre outros hardwares que possuem conexão à *Internet* (SERRANO; NUNEZ, 2018).

O Blynk é dividido em três partes (Figura 2), são elas:

Figura 2. Diagrama de funcionamento da plataforma Blynk.



Fonte: Instructables.com.

Blynk APP: é uma plataforma gratuita e disponível para Android e iOS que permite ao usuário criar interfaces de projetos de forma bastante simples, em que é necessário apenas arrastar os Widgets (botões, chaves, displays, joysticks) e realizar a configuração dos mesmos;

Servidor Blynk: é o responsável pela comunicação entre o smartphone e o hardware;

Bibliotecas Blynk: Do lado do hardware, o Blynk disponibiliza bibliotecas para as plataformas de desenvolvimento mais populares, que possibilitam a comunicação com o servidor e processam todos os comandos de entrada e saída.

3.6 Python

Python, criada em 1991 por Guido Van Rossum no Centro de Matemática Stichting na Holanda, é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada e orientada a objetos. Destaca-se pela simplicidade de trabalho e manutenções, além disso, é uma das linguagens que mais cresce devido sua alta compatibilidade com a maioria dos sistemas operacionais. Python também é popular na comunidade científica por apresentar grande poder de processamento e análise de dados (PYTHON, 2022).

A facilidade de aprender programar em Python e a fluidez de escrita do *script* é um dos principais atrativos da linguagem. Ao comparar com outras linguagens, os códigos em Python podem ser escritos em minutos, além de apresentar uma interface mais leve e simples, o que facilita o trabalho. A maior parte do *script* Python para computação científica é construída sobre um grupo de bibliotecas avançadas, neste trabalho, utilizou-se os seguintes pacotes: NumPy, Pandas, GeoPy, Matplotlib.

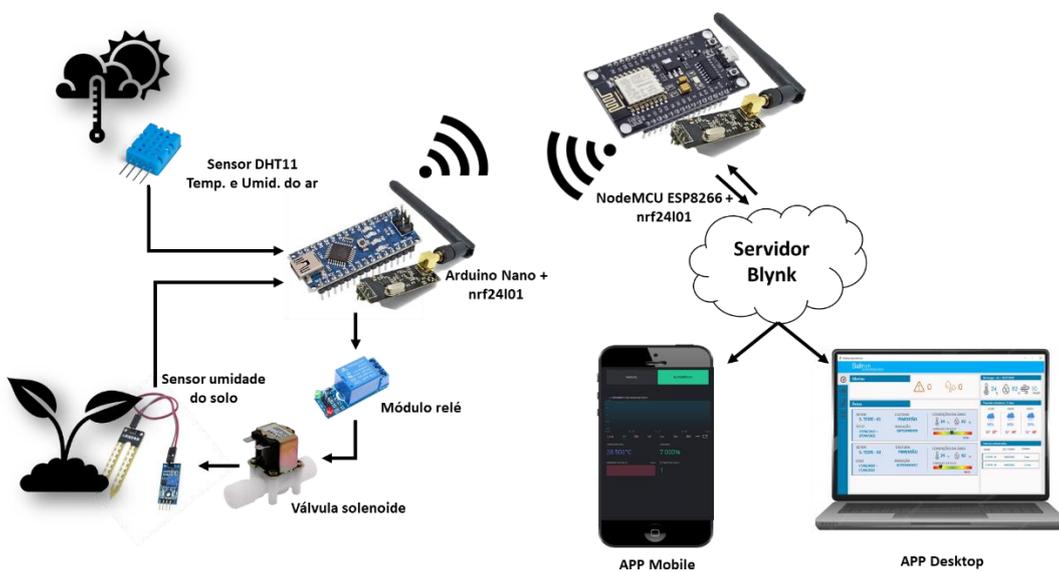
4. Material e Métodos

Como o objetivo deste trabalho é trazer um gerenciamento eficaz do sistema de irrigação através de plataformas digitais, é necessário o desenvolvimento de uma solução digital sólida, intuitiva e totalmente funcional, a fim de entregar um resultado positivo para quem a utiliza.

4.1. Arquitetura da solução

A primeira etapa se deu com a elaboração do diagrama esquemático do *hardware*. É possível executar a solução em qualquer sistema operacional e através de computadores de poder computacional inferior. Os sensores em campo são responsáveis por captar as variáveis necessárias para o funcionamento da solução e disponibilizá-las ao usuário. A figura 3 mostra a arquitetura da solução.

Figura 3. Arquitetura da solução.



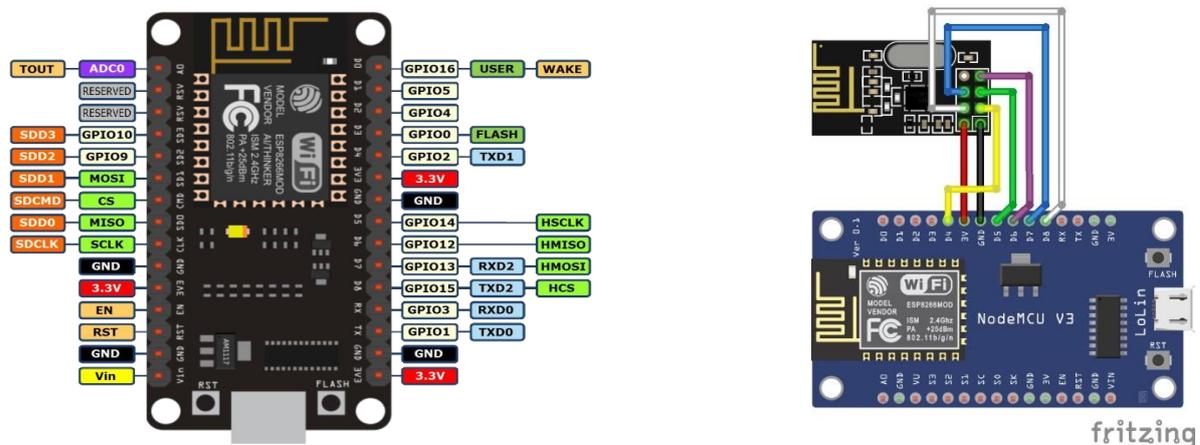
Fonte: Autor (2022)

4.2. Desenvolvimento do hardware

4.2.1. Microcontrolador

Para recebimento das variáveis agroclimáticas, foi utilizado um hardware em plataforma arduíno, baseado no microcontrolador NodeMCU composto por um módulo wifi capaz de conectar a placa à rede de internet. O módulo Wi-Fi ESP8266 é um módulo independente e que possui protocolo TCP/IP que pode acessar qualquer tipo de rede Wi-Fi. Permite integração de diferentes sensores através de pinos GPIO com tempo de execução mínimo (Figura 4). Os sensores posicionados em campo obtêm as variáveis fundamentais ao funcionamento da solução e essas variáveis serão transmitida por frequência de rádio até o NodeMCU o qual fará a conexão web.

Figura 4. Módulo ESP8266 NodeMCU e datasheet da placa



Fonte: Autor (2022).

Para que a conexão do ESP8266 com a internet seja executada é necessário fornecer as informações de: nome e senha da rede Wi-Fi (Figura 5).

Figura 5. Variáveis receptoras das configurações de rede Wi-Fi

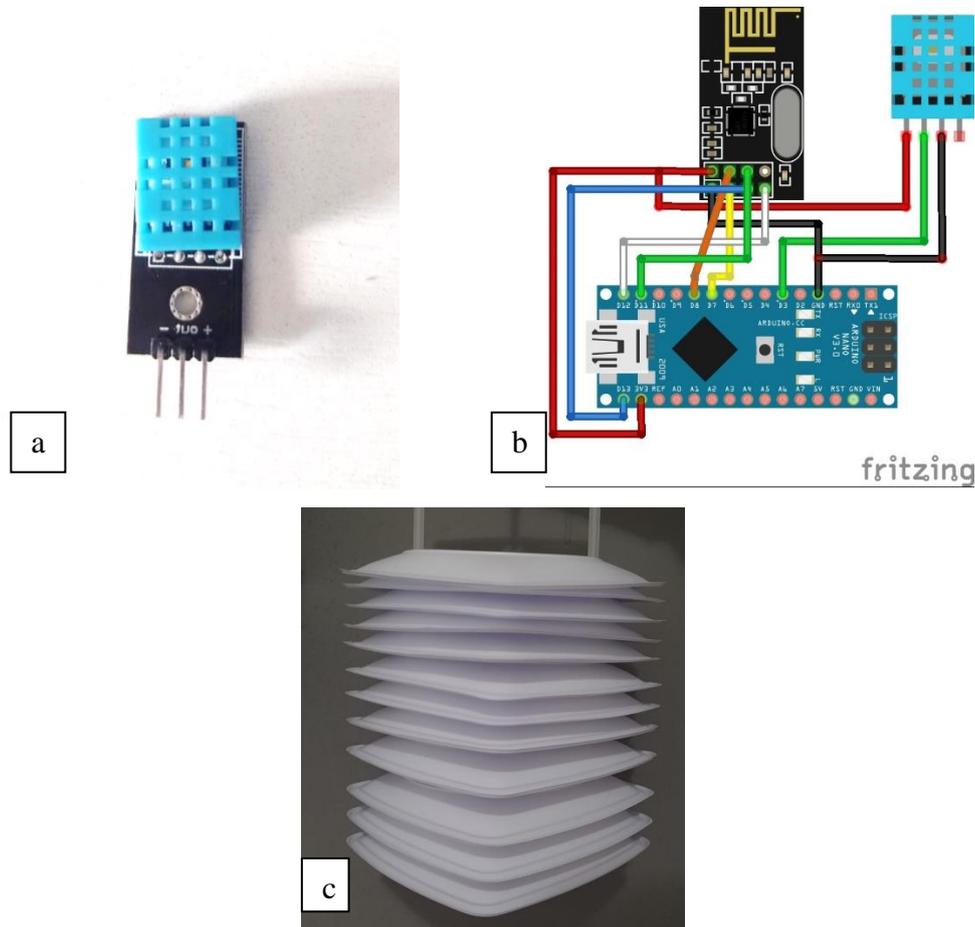
```
// Configurações da rede Wi-Fi
char ssid[] = "NOME";
char pass[] = "SENHA";
```

Fonte: Autor (2022)

4.4.2. Medição da temperatura e umidade do ar

O sensor DHT11 é responsável por fazer as medições diretas de temperatura e umidade relativa do ar. O sensor de umidade é capacitivo e o sensor de temperatura é um termistor NTC, ou seja, um resistor sensível às variações de temperatura. Sua precisão para temperatura é ± 2 % °C e de ± 5 % para a umidade (ABREU,2019). Para evitar que os raios solares incidam diretamente sobre o sensor e prejudique a precisão, foi desenvolvido um abrigo meteorológico para aloca-lo (Figura 6).

Figura 6. Sensor de temperatura e umidade (DHT11): (a) módulo sensor. (b) ligação do sensor ao Arduino Nano e NRF24101. (c) abrigo de baixo custo confeccionado manualmente



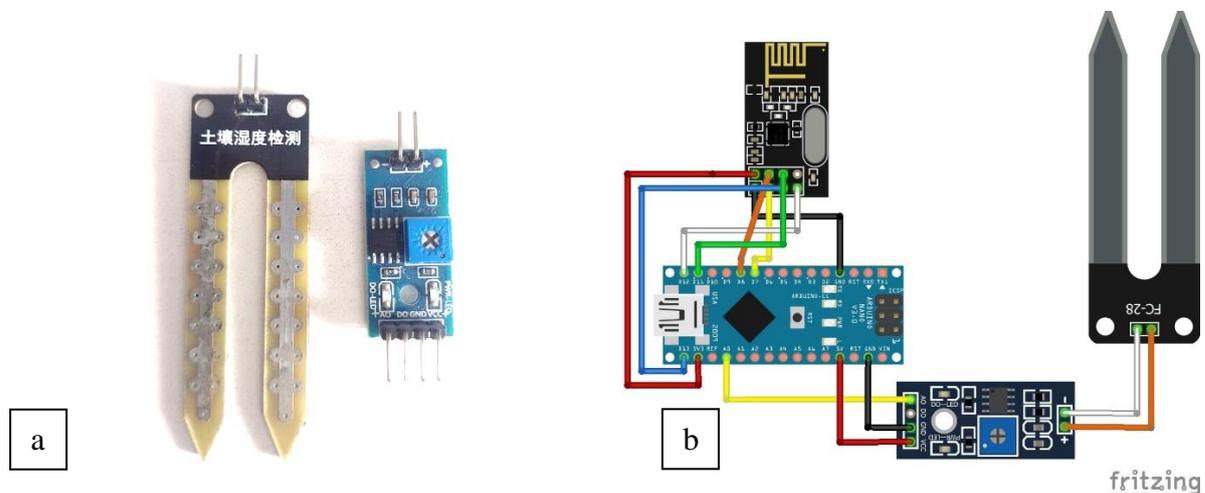
Fonte: Autor (2022)

4.2.4. Medição da umidade do solo

Para que a cultura apresente um excelente desenvolvimento é necessário que se faça um estudo da água no solo para que não haja déficit ou excesso hídrico. Com isso, para monitoramento de forma direta do nível de umidade do solo utilizou-se o sensor higrômetro (LM393). Trata-se de um sensor cuja resistência elétrica varia de acordo com a umidade do solo. Assim, quanto mais seco estiver o solo, maior a resistência e quanto mais úmido, menor é a resistência (VIDAL, 2017).

Este sensor é constituído em duas partes (Figura 7), são elas: a sonda, a qual vai diretamente ao solo e um módulo o qual encontra-se um chip comparador LM393, responsável por ler os dados coletados e enviá-los para o microcontrolador através de uma porta analógica (A0). O programa é condicionado a aferir leitura de dados do sensor em valores numéricos entre 0 e 1024, onde, quanto mais próximo a 0, maior o conteúdo de água no solo.

Figura 7. Sensor higrômetro: (a) modelo utilizado no projeto. (b) esquema de ligação do sensor ao Arduino Nano e NRF24I01



Fonte: Autor (2022)

A calibração dos sensores foi realizada em vasos contendo substrato para plantio (Figura 8). Foram estimadas 3 situações para o nível de umidade do substrato: substrato totalmente seco (ponto de murcha permanente); substrato úmido (capacidade de campo) e substrato encharcado, contudo, torna-se necessário a calibração em amostras de solo presente

no local de instalação do sistema de irrigação, a fim de tornar o sistema de gerenciamento mais eficaz e preciso.

Figura 8. Calibração do sensor higrômetro: (a) substrato seco (ponto de murcha). (b) substrato úmido (capacidade de campo). (c) situação de solo encharcado



Fonte: Autor (2022)

Diante dos valores obtidos, desenvolveu-se uma tabela com os valores de referência (Tabela 2) para cada situação de umidade do solo.

Tabela 2. Faixas de umidade do solo e calibração do sensor

Condição	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor de Saída
Solo seco	800	1024	"SECO"
Solo úmido	400	799	"BOM"
Solo encharcado	399	0	"ENCHARCADO"

Fonte: Autor (2022)

A etapa de calibração dos sensores é importante, pois o espectro de umidade do solo é o que vai comandar o acionamento das válvulas em campo. Quando o valor da umidade apresentado estiver na faixa que caracterize a umidade do solo como baixa, o microcontrolador acionará as válvulas, através dos relés, liberando o fluxo de água até que os sensores detectem um valor seguro, mantendo o solo na faixa "BOM". Deve ressaltar que esse espectro varia de acordo com as propriedades físicas do solo.

Para uma maior acurácia do manejo da irrigação, recomenda-se instalar duas sondas do sensor, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, a fim de obter-se um melhor aproveitamento da água aplicada, resultando em um desenvolvimento da cultura elevado.

4.2.3. Controle de válvulas

Para controle do fluxo da água, o projeto utiliza-se de válvulas solenoides. Trata-se de um equipamento para muitas utilizações e pode ser aproveitado em diversas áreas. A solenoide é uma válvula eletromecânica controlada, formada por duas partes principais: corpo da válvula e bobina solenoide.

O funcionamento da válvula ocorre por meio de uma bobina, que quando energizada, cria um campo magnético que implica no movimento do êmbolo que está dentro da bobina, fazendo com que a válvula se abra ou feche. Elas podem ser normalmente abertas (NA) ou normalmente fechadas (NF) (NASCIMENTO, 2021).

A utilizada no projeto foi a NF, que só permite a passagem de fluido se for energizada, enquanto estiver desenergizada ela bloqueará a passagem do fluido. A figura 9 mostra um modelo de válvula solenoide utilizado no projeto.

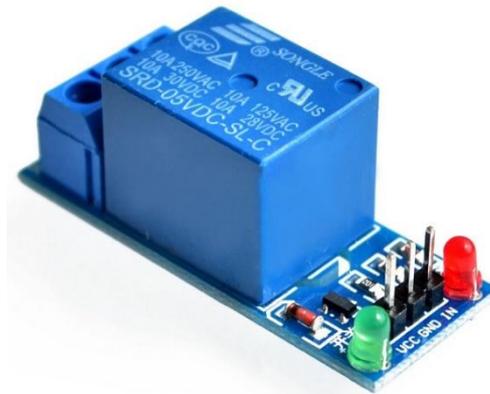
Figura 9. Modelo de válvula solenoide utilizada no projeto



Fonte: Eletrogate.com

Para acionar a válvula, é necessário a utilização de um módulo relé (Figura 10). Os relés são componentes eletromecânicos capazes de controlar circuitos externos de grandes correntes a partir de pequenas correntes ou tensões.

Figura 10. Módulo relé utilizado no projeto



Fonte: Eletrogate.com

4.2.4 Conexão: Software e Hardware

A comunicação entre o *software* e o *hardware* é realizada através da nuvem. O Blynk Server é responsável por transmitir os dados entre as soluções e armazená-los para que sejam acessados mesmo quando a aplicação for fechada ou interrompida por algum imprevisto.

Para cada setor cadastrado no sistema, é necessário a geração de uma *Token* (Figura 11), esta será responsável por consumir os dados da *API* (*Application Programming Interface*) correta, evitando o conflito de dados entre os setores irrigados. A *Token* poderá ser recebida por email ou localizada no próprio aplicativo, ao adicionar um novo setor.

Figura 11. Script da IDE Arduíno com Token de acesso

```
//Token de acesso - Setor 01

char token[] = "ZIpD_WiudVMoBQGvRbVP-UT4XWHYRihT";
```

Fonte: Autor (2022)

Os dados armazenados na nuvem são acessados por meio de *API's*, esta comunicação é feita através da biblioteca Blynkapi 0.1.8 (Figura 12), facilitando a comunicação entre *hardware* e *softwares* além do Blynk App.

Figura 12. Exemplo de conexão entre Python e BlynkAPI

```
# Importando a biblioteca blynkapi
from blynkapi import Blynk

# Token de acesso

auth_token = "chave_de_acesso"
```

Fonte: Autor (2022)

4.3. Rotinas de cálculos para estimar a Evapotranspiração

Por meio da interface intuitiva consegue-se, dentre as demais funções do aplicativo, ter acesso à automação do processo da estimativa da evapotranspiração de referência (ETP). A rotina de cálculos contempla dois tipos indiretos de estimativas. O primeiro se utiliza do método micrometeorológico descrito por Penman- Monteith (1965) e adaptado por Allen et al. (1989) eq. (1) parametrizado para uma cultura hipotética (Allen et al., 1998) (Padrão FAO):

$$ETP = \frac{0,408 s (R_n - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que: R_n = Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s = pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa); e_a = pressão do vapor d'água do ar (kPa); T = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); s = curva da pressão de vapor saturado versus temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ = coeficiente psicrométrico ($0,063 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A R_n foi estimada através do método empírico sugerido por Ometto (1981) eq. (2), o qual é indicado para locais onde só dispõe apenas de medidas de horas de brilho solar (n).

$$R_n = Q_g \left(a_n + b_n \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

Em que: R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Q_g é a irradiância solar global diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); a e b são os coeficientes da equação empírica; n é a insolação diária (h dia^{-1}); e N é o fotoperíodo (h dia^{-1}).

Nascimento et al., (2021) ao compararem o padrão FAO ao de Thornthwaite, concluíram que, para locais onde as variáveis agrometeorológicas são escassas, o uso do segundo método tornou-se eficaz para estimativa da ETP mensal. O método de Thornthwaite compõe a segunda rotina de cálculos para estimativa da ETP no software. A temperatura média mensal é a única variável de entrada nesse método.

$$ET_p = 16\left(10 \frac{T_n}{I}\right)^a \quad 0 \leq T_n \leq 26 \text{ °C} \quad (3)$$

$$ET_p = -415,85 + 32,24 T_n - 0,43 T_n^2 \quad T_n > 26 \text{ °C} \quad (4)$$

Em que:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 T_n)^{1,514} \quad (5)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (6)$$

Em que: ET_p é a evapotranspiração potencial (mm mês^{-1}); T_n é a temperatura média do mês ($^{\circ}\text{C}$); I é o índice que expressão nível de calor na região; a é o expoente função do índice.

Para obter-se a ETP do mês correspondente, o valor de ET_p é corrigido em função do fotoperíodo e do número de dias do mês, portanto:

$$ETP = ET_p \text{ Cor} \quad (7)$$

$$\text{Cor} = \left(\frac{ND}{30}\right) \left(\frac{N}{12}\right) \quad (8)$$

Em que: Cor é a correção; ND é o número de dias do mês (dia); N é o fotoperíodo médio daquele mês (h dia^{-1}).

Para maior acurácia dos dados de estimativa da ETP, o programa faz o uso do método de Thornthwaite modificado por Camargo et al. (1999), onde utiliza a temperatura efetiva (T_{ef}) em substituição à temperatura média nas equações originais do método, dado por:

$$T_{ef} = 0,5 k (3 T_{max} - T_{min}) \quad (9)$$

Em que: T_{ef} é a temperatura efetiva; $k = 0,69$ (Pereira & Pruitt, 2004);

Junior et al., (2017) ao avaliar métodos para estimativas da ETP para municípios do Piauí, constatou que, utilizando o modelo de Thornthwaite com temperatura efetiva, acrescentou melhoria na estimativa de ETP, em relação ao modelo de equação original, utilizando apenas a temperatura média, indicando, assim, a adoção deste método. Em Minas Gerais, Lima (2005) conclui que é recomendável o uso do método de amplitude de temperatura, para estimativa da ETP.

A entrada dos dados agrometeorológicos no aplicativo se dá através de uma interface intuitiva. Obrigatoriamente, para inicialização da estimativa, pede-se que o usuário insira alguns dados sobre a localização da qual ocorrerá a estimativa, como: município e estado.

Munido dessas informações, o script, por meio da biblioteca Geocoder v1.38.1, transforma o endereço em coordenadas geográficas (Latitude), variável obrigatória para a estimativa da ETP pelo método de Thornthwaite.

Ao realizar os testes do *software*, os resultados das estimativas de ETP simplificada obtidos a partir dos cálculos realizados pelo *software* foram submetidos à análise estatística. O coeficiente de determinação (R^2), da regressão linear entre ETP simplificada, composta pelo método de Thornthwaite e ETP avançada, composta pelo método de Penman- Monteith (1965) e adaptado por Allen et al. (1989), foi utilizado para avaliar a precisão do modelo utilizado pelo programa.

O índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985) foi usado para avaliar a exatidão do método de Thornthwaite modificado em relação ao padrão (ETPPM), dado por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (10)$$

Em que: P_i é a ETP_t (mm mês⁻¹); O_i é a ETP_{PM} (mm mês⁻¹); O é a média dos valores de ETP_{PM} (mm mês⁻¹).

O desempenho do método (ETP_t) foi avaliado através do índice de desempenho proposto por Camargo & Sentelhas (1997), denominado de índice de concordância (c) (Tabela 3), dado por:

$$C = d \cdot r \quad (11)$$

Em que: d é índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985); r é o coeficiente de correlação.

Tabela 3. Critério de interpretação do desempenho do método pelo índice “ c ”

Índice de desempenho (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 – 0,85	Muito bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61 – 0,65	Mediano
0,51 – 0,60	Sofrível
0,41 – 0,50	Mal
≤ 40	Péssimo

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997)

4.4. Rotina de cálculos para Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

A possibilidade de gerar o BHC dará ao usuário a opção de planejar e visualizar o zoneamento climático para determinada área. Para execução da rotina de cálculos do BHC o *software*, em linguagem Python 3, executa o script através das entradas de P , ETP e CAD fornecidas pelo usuário. As saídas são os dados de: negativo acumulado (NAC), armazenamento (ARM), alteração (ALT), evapotranspiração real (ETR), déficit e excesso hídrico (DEF) e (EXC).

No processamento das variáveis de entrada, o script do programa se utiliza de estruturas da linguagem do tipo: *For*, que se trata de um laço de repetição o qual percorre todos os dados, realizando a rotina de cálculos para cada mês ou dia e estruturas de decisão tipo *If...Elif...Else* as quais são responsáveis por tomadas de decisões mais assertivas.

As etapas da rotina de cálculos do BHC são descritas a seguir, conforme descrito por Thornthwaite & Mather (1955).

4.4.1. Precipitação (P) e Evapotranspiração de Referência (ETP)

A primeira etapa do BHC se dá pela diferença entre as entradas de água no sistema (P) e as saídas (ETP), dada pela eq. 12.

$$PETP = P - ETP \quad (12)$$

Em que: PETP é a diferença entre a precipitação e evapotranspiração potencial (mm); P é a precipitação (mm); ETP é a evapotranspiração potencial (mm).

4.4.2. Negativo acumulado (NAC) e armazenamento (ARM)

A segunda etapa da rotina consiste nos cálculos das colunas de NAC e ARM. Para identificar o mês de início do BHC foram utilizadas estruturas de decisões do tipo *If...Elif...Else...For* essas estruturas são responsáveis por comparar os valores de cada célula da coluna P-ETP e identificar, com maior acurácia, o mês de início.

As duas colunas devem ser preenchidas simultaneamente e o início do BHC se dá pelo preenchimento do NAC quando o mês apresenta um P-ETP negativo após um período chuvoso (série de P-ETP positivos) (PEREIRA, 2007).

Quando o valor de P-ETP ≥ 0 , o software se faz uso das Equações 13 e 14, simultaneamente, para preenchimento das duas colunas.

$$ARM = ARM_{ant} + P - ET_0 \quad (13)$$

$$NAC = CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad (14)$$

Em que: ARM_{ant} é o armazenamento do mês anterior (mm); CAD é a capacidade de água disponível no solo (mm).

Quando o valor de $P-ETP < 0$, o software se faz uso das Equações 15 e 16, simultaneamente, para preenchimento das duas colunas.

$$NAC = P - ETP_{atual} \quad (15)$$

$$ARM = CAD \cdot e^{-\frac{|NAC|}{CAD}} \quad (16)$$

4.4.3. Alteração (ALT) e Evapotranspiração Real (ETR)

Para cálculo da alteração (ALT), o script utiliza-se da Equação 17.

$$ALT = ARM_{atual} - ARM_{anterior} \quad (17)$$

De mesma forma, para preenchimento da ETR, o script se utiliza de estruturas dos tipos: *If...Elif...Else...For* para identificar diferentes condições de resultados e direcionar a rotina de cálculos adequada para cada situação.

Quando $P-ETP < 0$, o programa utiliza a Equação 18 para prosseguimento da rotina de cálculos para ETR.

$$ETR = P + |ALT| \quad (18)$$

Quando $P-ETP > 0$, o valor de ETR é igual ao de ETP, do mês de referência.

4.4.4. Excesso (EXC) e Déficit Hídrico (DEF)

Para obtenção dos valores de EXC, o software considera as seguintes condições: Quando $ARM < CAD$, $EXC = 0$; Quando $ARM = CAD$, faz-se uso da Equação 19.

$$EXC = (P - ET_0) - ALT \quad (19)$$

Para cálculo da DEF, utiliza-se a Equação 20:

$$DEF = ET_0 - ETR \quad (20)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interface desenvolvida para o projeto se fez eficaz ao integrar as soluções de *software* e *hardware*. A Figura 13 mostra a interface inicial do aplicativo *desktop* intitulado de Satrun Agroanálises, programado inteiramente em linguagem Python 3.

5.1 Interface *desktop*

A interface para *desktop* auxilia o produtor e usuário do programa a observar e analisar informações mais detalhadas sobre a área irrigada, sendo uma ferramenta eficaz para tomadas de decisões mais assertivas.

Figura 13. Tela inicial do *software* Satrun Agroanálises



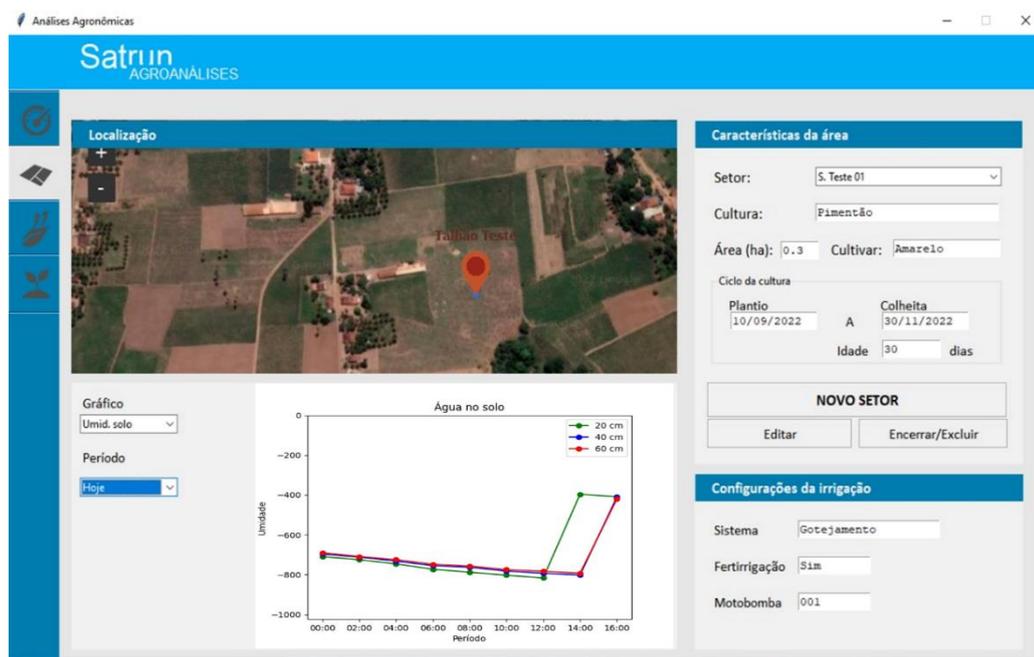
Fonte: Autor (2022)

A interface desenvolvida para o *software* se mostra bem intuitiva, a fim de que torne positiva a experiência do usuário. Na tela inicial do aplicativo é possível ter uma visão geral dos setores cadastrados no banco de dados do aplicativo. Na primeira aba, “Alertas” é possível acompanhar alguns alertas emitidos pelo módulo de campo. Através da aba “Áreas”, as informações que aparecem para cada área cadastrada são: Condições climáticas (temperatura e umidade do ar) e índice de umidade do solo, variáveis coletadas através do módulo de campo.

A aba “Setores Cadastrados” mostra, de forma rápida, a rotina de rega de cada setor cadastrado. Nesta aba, o usuário pode acompanhar quando houve o último turno de rega e a lâmina empregada.

A Figura 14 mostra a sessão dos setores cadastrados no banco de dados do aplicativo. Nessa, é possível observar detalhes de cada setor, como: nome, cultura e cultivar plantada, idade da cultura, localização no mapa, aspectos gerais do sistema de irrigação e a visualização de gráficos com temperaturas mínimas, médias e máximas e estimativa de ETP através do método de Thorntwaite, com dados obtidos a partir do módulo de campo.

Figura 14. Visualização de dados de cada setor cadastrado no banco de dados



Fonte: Autor (2022)

Também nessa aba, é possível editar as informações de cada setor através do botão “Editar”. De mesmo modo, é possível encerrar uma produção de um setor ou excluí-lo, através do botão “Encerrar/Excluir”.

Para inserção de um novo setor irrigado, o usuário tem a opção do botão “Novo setor”. Será direcionado para uma janela (Figura 15) onde serão solicitadas as informações necessárias para a inserção do setor. Nesta janela, se concentra a área de conexão com o servidor, através do frame “Válvula”, para que a comunicação entre *software* e *hardware* é necessário que o usuário insira a *Token* de acesso.

Nesse *frame* também se faz os ajustes da faixa de trabalho dos sensores, através da etapa de calibração dos mesmos é possível determinar os valores para a capacidade de campo e do ponto de murcha do solo.

Figura 15. Tela para inserção de novo setor irrigado

Fonte: Autor (2022)

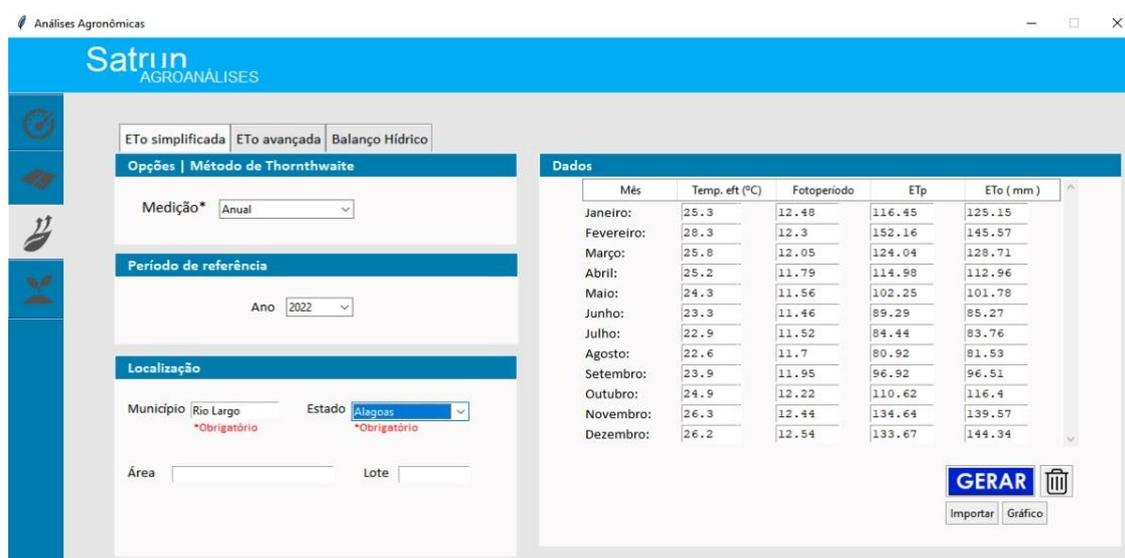
5.2 Estimativas de ETP

Além do gerenciamento em tempo real do estado de umidade do solo e do manejo da irrigação, o *software* Satrun dispõe de calculadoras de ETP, a qual estimam-se valores para a evapotranspiração através de dois métodos: Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991), sendo um para cada situação e disponibilidade de dados agrometeorológicos. Esta ferramenta traz um melhor complemento do programa e uma maior abrangência da utilização do mesmo.

5.2.1 Simplificada

Para locais escassos de dados agrometeorológicos avançados, convém utilizar o método de Thornthwaite (Figura 16), o qual só necessita dos valores de temperatura e coordenadas geográficas do local.

Figura 16. Valores de ETP estimados através do método de Thornthwaite para o município de Rio Largo-AL, no ano de 2021



Fonte: Autor (2022)

A tabela 3 apresenta os parâmetros estatísticos e os resultados do índice classificatório de desempenho da análise feita a partir da comparação dos resultados das estimativas de ETP, calculados pelos métodos de Thornthwaite e comparados ao método padrão FAO.

Tabela 4. Coeficientes de determinação (R^2), correlação (r), exatidão (d) e desempenho (c) para valores mensais de ETP calculados pelos métodos de Thornthwaite original e modificado, comparados ao método padrão de Penman-Monteith. Período de janeiro a dezembro de 2021, Rio Largo, AL

Método	R^2	r	d	c	Desempenho*
ETP simplificada	0,79	0,88	0,89	0,77	Muito bom

Nascimento e Carvalho (2021) ao compararem o padrão FAO, para estimativa da ETP ao de Thornthwaite, concluiu que, para locais onde as variáveis agrometeorológicas são escassas, o uso do segundo método tornou-se eficaz para estimativa da ETP. O método de Thornthwaite compõe uma rotina de cálculos para estimativa da ETP no software. A temperatura efetiva mensal é a única variável de entrada desse método.

5.2.2 Avançada

Para locais onde há disponibilidade das variáveis agrometeorológicas mais complexas, o usuário poderá optar por estimar a ETP através do método de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991), o qual apresenta uma maior acurácia dos dados, alavancando a precisão do planejamento da irrigação. A Figura 17 mostra a interface denominada de “ETP Avançada”, a qual utiliza do Padrão FAO para estimativa de ETP.

Figura 17. Aba para estimar ETP através do Método de Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991)

Data	Temp. média (°C)	Umidade Média (%)	U2	Rn	ETo (mm/dia)
02/11/2022	23.0	70	2	7.90	3.14

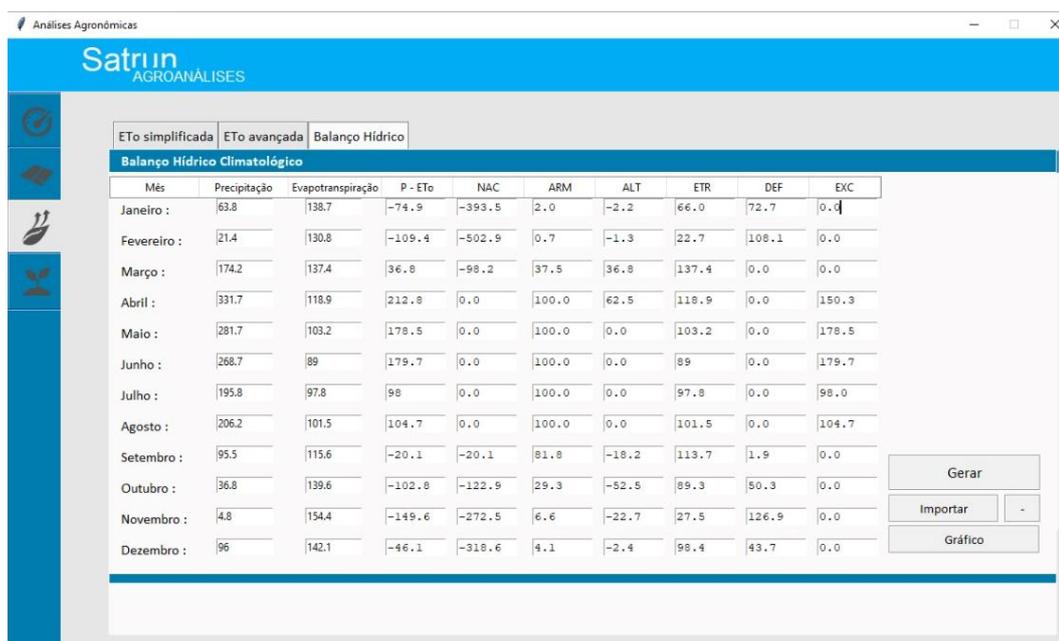
Fonte: Autor (2022)

Feitosa et al., (2014) ao desenvolverem um *software* para estimar a evapotranspiração através do método de Penman-Monteith, concluíram que é uma ferramenta extremamente útil para usuários de locais que disponham de informações climáticas, mas não da evapotranspiração de referência, e que poderá ser obtida de forma simplificada possibilitando o uso adequado da água para irrigação, sendo mais um recurso para o manejo da agricultura irrigada .

5.3 Cálculo do balanço hídrico climatológico

Além das estimativas de ETP, o *software* é capaz de calcular o balanço hídrico através dos dados de ETP obtidos no passo anterior. Além dos resultados em números (Figura 18), o usuário tem acesso ao gráfico do extrato do balanço hídrico.

Figura 18. Interface do BHC – Dados climatológicos obtidos da estação meteorológica do CECA/UFAL, do ano de 2021, no município de Rio Largo - AL

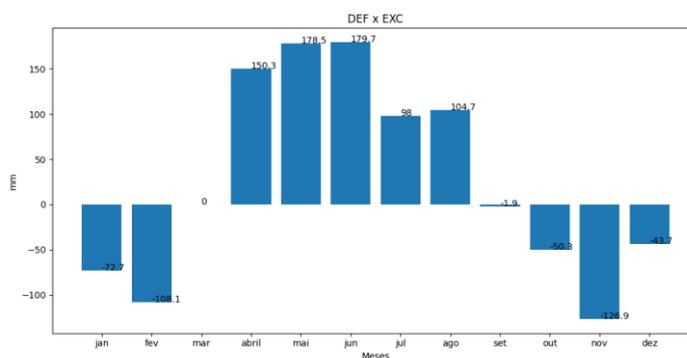


Mês	Precipitação	Evapotranspiração	P - ETO	NAC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
Janeiro :	63,8	138,7	-74,9	-393,5	2,0	-2,2	66,0	72,7	0,0
Fevereiro :	21,4	130,8	-109,4	-502,9	0,7	-1,3	22,7	108,1	0,0
Março :	174,2	137,4	36,8	-98,2	37,5	36,8	137,4	0,0	0,0
Abril :	331,7	118,9	212,8	0,0	100,0	62,5	118,9	0,0	150,3
Maió :	281,7	103,2	178,5	0,0	100,0	0,0	103,2	0,0	178,5
Junho :	268,7	89	179,7	0,0	100,0	0,0	89	0,0	179,7
Julho :	195,8	97,8	98	0,0	100,0	0,0	97,8	0,0	98,0
Agosto :	206,2	101,5	104,7	0,0	100,0	0,0	101,5	0,0	104,7
Setembro :	95,5	115,6	-20,1	-20,1	81,8	-18,2	113,7	1,9	0,0
Outubro :	36,8	139,6	-102,8	-122,9	29,3	-52,5	89,3	50,3	0,0
Novembro :	4,8	154,4	-149,6	-272,5	6,6	-22,7	27,5	126,9	0,0
Dezembro :	96	142,1	-46,1	-318,6	4,1	-2,4	98,4	43,7	0,0

Fonte: Autor (2022)

Ao final da rotina de cálculos do BHC, o software disponibiliza os dados por meio de gráficos (Figura 19). De modo a poder acompanhar de forma muito clara o comportamento climático da região.

Figura 19. Extrato do BHC para dados do município de Rio Largo – AL no ano de 2021

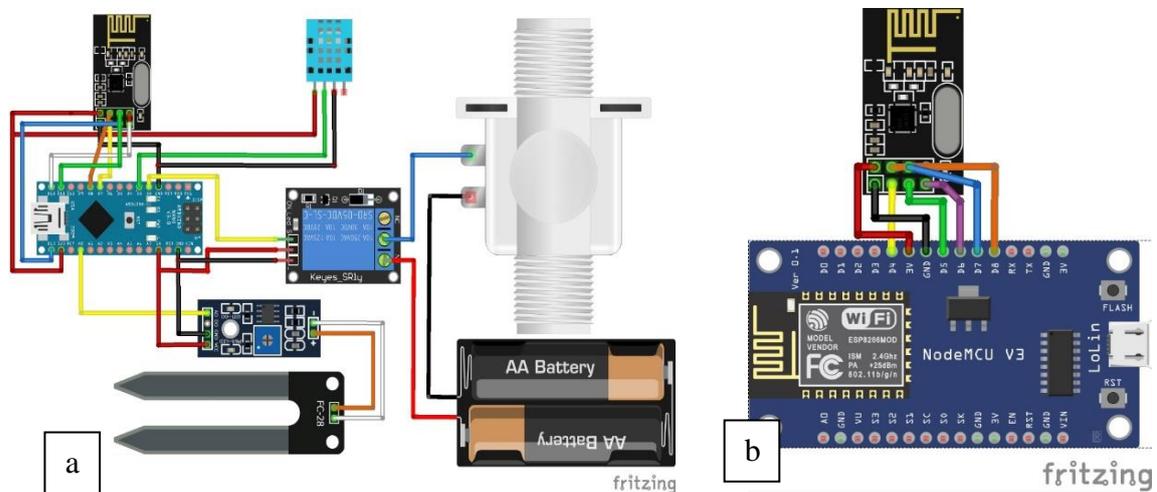


Fonte: Autor (2022)

5.4 Hardware

A Figura 20 mostra a arquitetura do *hardware*, denominado como módulo de campo, o qual obtém os dados de umidade do solo, temperatura e umidade do ar e controla a abertura e fechamento da válvula. Este, se comunica com o módulo receptor que está conectado à rede e é responsável pela integração entre os dados recebidos do campo e o lançamento deles no servidor *web*.

Figura 20. Arquitetura do hardware. (a) módulo de campo, (b) módulo receptor



Fonte: Autor (2022)

Ao realizar testes em pequena escala, em vasos, apenas para validar o funcionamento, as soluções mostraram-se capazes de cumprir suas funções com eficácia. O módulo de campo foi projetado para trabalhar em áreas remotas, as quais não existem possibilidades de conexão à *internet*, a conexão com o módulo receptor e à *internet*, respectivamente, se dá pelo módulo RFF24L01, o qual se utiliza de ondas de rádio e tem um alcance de, aproximadamente, 1.000 metros.

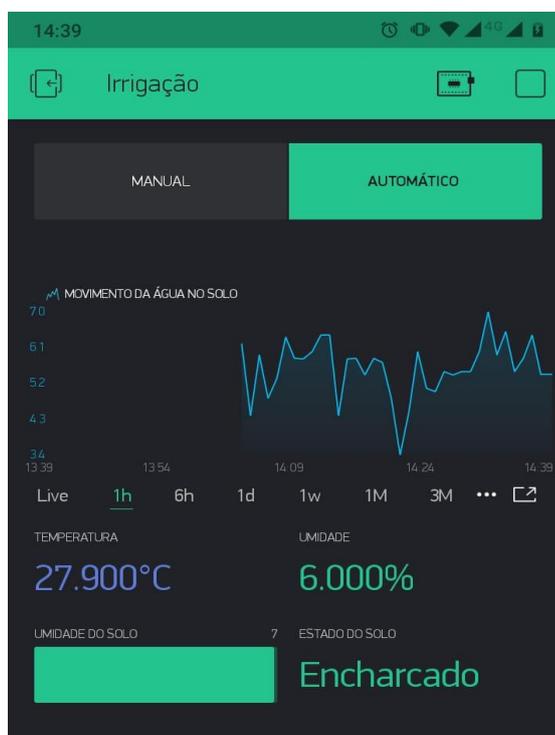
O módulo receptor é o responsável por receber os dados de campo e lançá-los no servidor *web* do Blynk, que por sua vez, apresenta os dados em uma interface gráfica através do aplicativo Blynk.

5.5 Software mobile

O *software* para aparelhos *mobile* possibilita uma usabilidade mais rápida e prática, tendo em vista que, facilmente, o produtor e usuário possui um *smartphone*.

Durante os testes, o aplicativo *mobile* se mostrou totalmente funcional e eficaz para o monitoramento e gerenciamento do sistema de irrigação. Com ele, o usuário pode escolher entre o manejo manual, onde o próprio produtor decide o momento de acionar as válvulas e irrigar determinada área e o manejo automático, onde as faixas críticas de umidade do solo é definida através da calibração dos sensores e pontuadas no aplicativo no ato de cadastramento do setor irrigado.

Figura 21. Interface gráfica da solução Blynk em funcionamento



Fonte: Autor (2022)

5.6 Custos dos equipamentos

Os equipamentos utilizados no desenvolvimento das soluções são de baixo custo (Tabela 5) e podem ser utilizadas em diversas propriedades rurais, compreendendo um sistema de gerenciamento da irrigação que opera de forma automatizada.

Tabela 5. Custo do projeto

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
NodeMCU ESP8266	1	29,99	29,99
Arduino Nano	1	54,99	54,99
Módulo nrf24l01	2	11,99	23,98
Sensor de umidade do solo	2	9,99	19,98
Sensor DHT11	1	17,99	17,99
Módulo relé	1	10,99	10,99
Válvula solenoide	1	56,99	56,99
Suporte para 4 pilhas AA	1	9,40	9,40
TOTAL			224,31

Fonte: casadarobotica.com (valores referentes ao período de novembro de 2022)

Albuquerque (2019) ao desenvolver um sistema de irrigação inteligente para agricultura familiar baseado em *IoT*, apenas para dispositivo *mobile*, orçou um custo de R\$231,00 para desenvolvimento do projeto, o que mostra que fica superior ao custo total de implantação apresentado neste trabalho.

6. CONCLUSÃO

Portanto, conclui-se que, através da análise dos resultados, a estimativa de ETP utilizando o método Thornthwaite, o índice utilizado para avaliar o desempenho classifica como “muito bom” a estimativa calculada por este método através do *software*, sendo viável a utilização do software para estimar a ETP em localidades onde as variáveis agrometeorológicas mais específicas são escassas.

O script para cálculo do balanço hídrico climatológico funcionou de modo satisfatório, atendeu as expectativas, realizou os cálculos de BHC corretamente através de uma interface intuitiva para entrada dos dados e exibição dos resultados, possibilita também a exibição dos resultados na forma de gráficos.

Quanto ao objetivo geral do trabalho, conclui-se que foi satisfatório o desenvolvimento do sistema de irrigação capaz de tomar a decisão automática de irrigar o solo baseado na umidade e também capaz de fornecer dados agroclimáticos fundamentais ao produtor rural. Além disso foi possível verificar a eficiência da placa NodeMCU e da utilização da Internet das Coisas para automatizar um sistema de irrigação.

Com o avanço da tecnologia, em especial a área de Internet das Coisas, e com o objetivo de não se limitar apenas a primeira versão, os trabalhos futuros contemplarão novas funcionalidades, como por exemplo: ampliar as alternativas de estimativa de ETP com mais métodos, criar mais possibilidades de cenários para o BHC, desenvolver interface para planejar melhor o zoneamento climático.

Referências

- ABREU, J. G. **Sensores DHT11 e DHT22: Guia básico dos sensores Umidade e temperatura.** Eletrogate. Disponível em < <https://blog.eletrogate.com/sensoresdht11-dht22/>.
- ALBUQUERQUE, R. S. de. **Sistema de irrigação inteligente para agricultura familiar baseado em IoT.** 2019.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements.** FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, Roma, p.300, 1998.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas irrigação.** Brasília, DF: ANA, 2021.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The Internet of Thinags: A survey.** Computer Networks, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BANZI, M.; SHILOH, M. **Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform.** [S.l.]: Maker Media, Inc., 2014.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação.** 8. Ed. Viçosa: UFV, 596 p, 2008.
- BISCARO, G. A. **Sistemas de irrigação por aspersão.** Universidade Federal da Grande Dourados, 2009.
- BISCARO, G. A. **Sistemas de irrigação localizada.** 2014.
- BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria de Comercio Exterior. **Balança Comercial Preliminar.** Brasília, 2022. Disponível em: https://balanca.economia.gov.br/balanca/pg_principal_bc/principais_resultados.html. Acesso em: 24 fev. 22.
- CAMARGO, A. P. de; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. **Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n.2, p.251-257, 1999.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P. da. **Manejo, eficiência e uso da água em sistemas de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2013.

COSTA, C. L.; OLIVEIRA, L.; MÓTA, L.S.M. **Internet das coisas (IOT): um estudo exploratório em agronegócios Internet das Coisas (IOT): um estudo exploratório no agronegócio**. VI Simpósio da Cienc. do Agronegócio, 2018.

CUENCA, H. R. **Irrigation system design: an engineering approach**. New Jersey: Prentice Hall, 552p, 1989.

DE OLIVEIRA, F.A.A. **Estudo da Tecnologia de Irrigação Automatizada pela Revisão de Patentes**. Cadernos de Prospecção, v. 15, n. 2, p. 494-506, 2022.

FENG, X.; LAURENCE, T. Y.; LIZHE, W. Internet of Things. International Journal of Communication Systems, v. 25, n. 9, p. 1101–1102, 2012.

FEITOSA, D. G. et al. **Software 2.0 para SM estimativa da evapotranspiração de referência diária e horária**. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. 2014. pág. 1-6.

GOMES, H. P.; **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética**. João Pessoa, PB: Editora da UFPB, p. 101-104, 2013.

GONZÁLEZ-TERUEL, J. D., TORRES-SÁNCHEZ, R., BLAYA-ROS, P. J., TOLEDO-MOREO, A. B., JIMÉNEZ-BUENDÍA, M.; SOTO-VALLES, F. **Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor**. Sensors, 19(3), 491. 2019

HUTMACHER, R. B.; NIGHTINGALE, H. I.; ROLSTON, D. E.; BIGGAR, J. W.; DALE, F.; VAIL, S. S.; PETER, D. **Growth and yield responses of almond (Prunus amygdalus) to trickle irrigation**. Irrig. Sci., v. 14, p.117-126. 1994.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **CensoAgro 2017: Resultados definitivos**. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/estabelecimentos.htm
1. Acesso em: 24 fev. 2022.

JUNIOR, A. S. A.; SILVA, C.O.; SOUSA, V.F.; RIBEIRO, V.Q. **Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Piauí**. Agrometeoros, Passo Fundo, v.25, n.1, p.181-190, 2017.

KIZITO, F., CAMPBELL, C. S., CAMPBELL, G. S., COBOS, D. R., TEARE, B. L., CARTER, B., & HOPMANS, J. W. **Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor**. Journal of Hydrology, California, 2008.

KOJIMA, Y.; SHIGETA, R.; MIYAMOTO, N.; SHIRAHAMA, Y.; NISHIOKA, K.; MIZOGUCHI, M.; KAWAHARA, Y. **Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor**. Sensors, 16(8), 1292. 2016.

KONGYAN, Y. **Water-saving farming technologies**. New AG International, Middlesex, p. 46-53, 2005.

LIMA, J.E.F.W; FERREIRA, R.S.A; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da irrigação no Brasil. O estado das águas no Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. CD-ROM, 1999.

LIMA, P. C. R. **O biodiesel e a inclusão social**. Consultorias Legislativa, 2004, p.33.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 1998. 15p. (Embrapa Hortaliças. Circular técnica, 11).

MAROUELLI, W.A.; OLIVEIRA, A.S.; COELHO, E.F.; NOGUEIRA, L.C.; SOUSA, V.F. **Manejo da água de irrigação**. In: SOUSA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Hortaliças; São Luís: Embrapa Cocais; Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.

NASCIMENTO, F. S. **Controle uma válvula solenoide com o Arduino**. Filipeflop, 2021. Disponível em: < <https://www.filipeflop.com/blog/controle-uma-valvula-solenoide-com-o-arduino/>>. Acesso em: 07 jun. 2022.

NASCIMENTO, V. R.; CARVALHO, A. L. de. **Desenvolvimento De Um Software Para Estimar A Evapotranspiração Potencial Através Do Método De Thornthwaite Ajustado.** Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campina Grande - PB, 2021.

OMETTO, J.C.; **Bioclimatologia Vegetal.** São Paulo: Ed. Ceres, 1981.

PEREIRA, A.R.; PRUITT, W.O. **Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration.** Agricultural Water Management, Amsterdam, Netherlands, v. 66, n. 2, p. 251-257, 2004.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia Agrícola.** DCE/ESALQ/USP, 2007.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Site: Documentation, 2022.** Disponível em: <<https://www.python.org/doc>>. Acesso em: 24 de fev. de 2022.

SHIKLOMANOV, I. A. **World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century.** Paris: UNESCO, 76 p, 1998.

SACCON, P. **Water for agriculture, irrigation management.** Applied Soil Ecology, v.123, p.793-796, 2018.

SANTOS, B. P. et al. **Internet das coisas: da teoria à prática.** Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016.

SEEDSTUDIO PRODUCTS. **Seedstudio products: grove system.** Disponível em: Acesso em: 07 jun. 2022.

SOUZA, A. R. de et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 01-05, 2011.

TAMAGI, J. T.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; VILAS BOAS, M. A. **UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSORES COMPENSANTES E NÃO COMPENSANTES EM DIFERENTES ALTURAS.** Irriga, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 631-647, outubro-dezembro, 2016.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações**. Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp-FEAGRI, 2011.

VIDAL, V. **Automação de sistema de irrigação: Sensor de umidade e válvula Solenoide**. Eletrogate. Disponível em < <https://blog.eletrogate.com/automacao-desistema-de-irrigacao-sensor-de-umidade-e-valvula-solenoide/>>. Acesso em: 06 jun. 2022.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DNNELL, J.; ROWE, C. M. **Statistics for the evaluation and comparison of models**. Journal of Geophysical Research, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.