



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE DO CAMPUS ARARANGUÁ  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Pedro Thaines

Araranguá  
2022

Pedro Thaines

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Computação submetido ao Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientadora: Profa. Analúcia Schiaffino Morales, Dra.

Araranguá

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Thaines, Pedro

Sistema integrado com telemetria e mensageria para auxiliar o manejo de irrigação agrícola através do cálculo da evapotranspiração de referência / Pedro Thaines ; orientadora, Analúcia Schiaffino Morales, 2022.

24 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,  
Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Irrigação Agrícola. 3. Evapotranspiração. 4. Estação Meteorológica. 5. Internet das Coisas. I. Schiaffino Morales, Analúcia. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Computação. III. Título.

Pedro Thaines

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, 19 de Dezembro de 2022.

---

Profa. Analúcia Schiaffino Morales, Dra.  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Profa. Analúcia Schiaffino Morales, Dra.  
Orientadora

---

Prof. Fábio Rodrigues de La Rocha, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Jim Lau, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Fabrício de Oliveira Ourique, Dr.  
Avaliador Suplente  
Universidade Federal de Santa Catarina

# Sistema integrado com telemetria e mensageria para auxiliar o manejo de irrigação agrícola através do cálculo da evapotranspiração de referência

Pedro Thaines\*

Analucia Schiaffino Morales†

2022, DECEMBER

## Resumo

A utilização da água de forma consciente e sustentável é um tema que tem sido tratado com muita notoriedade nas últimas décadas. Este assunto se tornou ainda mais relevante após a publicação de pesquisas sobre o volume de recursos hídricos que são utilizados pelo setor agrícola para irrigação, que apontam para 70% da água ativamente consumida no mundo. A irrigação agrícola é muito importante para aumentar a produtividade dos cultivos e também viabiliza cultivos em áreas que, sem a irrigação, não seriam possíveis em algumas épocas do ano, principalmente nas regiões áridas e semiáridas. Com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio, o monitoramento de dados climáticos, através de estações meteorológicas automáticas, tem se tornado uma realidade cada vez mais presente no campo. Estes dados são fundamentais para estimar a quantidade de água transferida da região de cultivo para a atmosfera por evapotranspiração. O índice de evapotranspiração é utilizado para os cálculos de balanço hídrico, que serve de base para os agricultores estimarem a quantidade de água que precisa ser repostada no solo através de alguma técnica de irrigação. O mercado tecnológico voltado para o agronegócio, possui diversas soluções para monitoramento climático, porém possuem um custo relativamente alto. Para promover o uso consciente da água e melhorar a eficiência da irrigação agrícola, este trabalho tem o objetivo de arquitetar e implementar um sistema integrado, de baixo custo, para aquisição de dados climáticos de maneira remota e automática (telemetria). O sistema deve, também, realizar o cálculo da evapotranspiração de referência e disponibilizar estas informações na internet, através de um serviço de mensageria (*chatbot*) que seja acessível por *smartphones*.

**Palavras-chaves:** irrigação. agricultura. evapotranspiração. plantações. balanço hídrico. previsão climática. internet das coisas.

---

\*pedro.thaines@ufsc.br

†analucia.morales@ufsc.br

# Integrated system with telemetry and messaging to assist the management of agricultural irrigation by calculating reference evapotranspiration

Pedro Thaines\*

Analucia Schiaffino Morales†

2022, DECEMBER

## Abstract

The use of water in a conscious and sustainable way is a topic that has been treated with great notoriety in recent decades. This subject became even more relevant after the publication of researches on the volume of water resources that are used by the agricultural sector for irrigation, which point to 70% of the water actively consumed in the world. Agricultural irrigation is very important to increase the productivity of crops and also enable crops to be grown in areas that, without irrigation, would not be possible at certain times of the year, especially in arid and semi-arid regions. With the advancement of wireless communication technologies, the monitoring of climate data through automatic weather stations has become an increasingly reality in the countryside. These data are essential to estimate the amount of water transferred from the crop region to the atmosphere by evapotranspiration. The evapotranspiration index is used for water balance calculations, which serves as a basis for farmers to estimate the amount of water that needs to be replaced in the soil through some irrigation technique. The technological market focused on agribusiness has several solutions for climate monitoring, but they have a relatively high cost. To promote the conscious use of water and improve the efficiency of agricultural irrigation, this work aims to design and implement an integrated, low-cost system for remotely and automatically acquisition of climate data (telemetry). The system must also perform the calculation of the reference evapotranspiration and make this information available on the internet, through a messaging service (chatbot) that is accessible through smartphones.

**Key-words:** irrigation. agriculture. evapotranspiration. optimization. crops. water balance. weather forecast. internet of things.

---

\*pedro.thaines@ufsc.br

†analucia.morales@ufsc.br

# 1 Introdução

A produção de alimentos é um componente vital para a sociedade. De acordo com o departamento de assuntos econômicos e sociais da [ONU \(2021\)](#), a população mundial aumentou de, aproximadamente, 2.5 bilhões (1950) para 7.8 bilhões de pessoas (2020). As projeções apontam para as marcas de 8.5 bilhões em 2030 e 9.7 bilhões em 2050.

Para atender a alta demanda de alimentos gerada pela população, a produção em larga escala é necessária ([FAO, 2018](#)). Os cultivos de grande extensão devem ser acompanhados, idealmente, de soluções que otimizem o aproveitamento dos nutrientes e da água disponíveis no solo, potencializando o desenvolvimento das plantas e prevenindo a subutilização do espaço cultivado.

Dentre os cuidados necessários para alcançar bons índices de produção, o manejo da água nas plantações é de grande relevância para os produtores rurais ([WETSER et al., 2020](#)). Tanto a falta quanto o excesso de água podem trazer prejuízos para a saúde do cultivar, comprometendo a produtividade da lavoura. A escassez de água no solo cultivado provoca estresse hídrico por déficit de água nas plantas, situação em que a quantidade de água armazenada no solo não é suficiente para suprir a demanda do cultivar. Diversos efeitos danosos podem surgir a depender da espécie e da fase de desenvolvimento da planta, sumariamente ocasionando a estagnação do crescimento durante o estágio vegetativo, queda da produção durante o estágio reprodutivo e, em casos extremos, a morte da planta ([OSAKABE et al., 2014](#)). Por outro lado, o excesso de água pode ocasionar a lixiviação de nutrientes, interrupção do desenvolvimento das raízes por falta de aeração na zona radicular (asfixia do sistema radicular) e também pode resultar na perda do cultivar. Além disso, o excesso favorece o surgimento e proliferação de doenças, principalmente as causadas por fungos ([RAJANNA; DASS; VENKATESH, 2019](#)).

Com o objetivo de atenuar os efeitos da irregularidade do volume de chuvas devido a sazonalidade climática, a irrigação agrícola tem se tornado uma prática cada vez mais comum no Brasil, onde houve grande intensificação da irrigação a partir das décadas de 1970 e 1980. Dentre os métodos tradicionais de irrigação, destaca-se o pivô central que deve continuar liderando a expansão da área irrigada no país ([FONTENELLE et al., 2019](#)). Estima-se que o Brasil possuía, em 2015, 6.95 milhões de hectares irrigados, sendo que 19.9% destas áreas utilizavam pivô central. A projeção para 2030 é que o país alcance 10.09 milhões de hectares de área irrigada e que a utilização de pivôs centrais seja correspondente a 28.6% deste valor ([ANA, 2021](#)).

De acordo com as pesquisas realizadas por [Fontenelle et al. \(2019\)](#), a produtividade de uma lavoura irrigada é superior na ordem de duas a três vezes quando comparada à agricultura de sequeiro, onde a única fonte de água é a pluvial. Este aumento é significativo e impacta diretamente na oferta de alimentos. Diversos outros benefícios, decorrentes deste aumento de produtividade, são destacados na literatura. Em consonância com estes dados, [Rosegrant, Ringler e Zhu \(2009\)](#) constatam que sem o advento da irrigação o rápido aumento dos níveis de produção alcançados a partir da década de 1980 não seria possível e, além disso, que a prática favorece a operação de preços mais acessíveis para os consumidores.

Não obstante, as técnicas de irrigação trazem à tona questões sobre sustentabilidade, principalmente no que concerne a utilização dos recursos hídricos de forma racional. A agricultura é responsável, em média, pelo uso de aproximadamente 70% de água doce que é ativamente consumida no mundo ([FAO, 2017](#)). Neste contexto de zelo ambiental, algumas

técnicas para otimizar a irrigação das lavouras podem ser empregadas para dimensionar, eficientemente, a quantidade de água necessária para evitar que as plantas experimentem situações de estresse hídrico e também para atenuar a perda de nutrientes do solo por lixiviação.

Avanços envolvendo Internet das Coisas, têm explorado o uso de tecnologias de telemetria considerando a transmissão em longa distância na agricultura. De forma a promover, de maneira prática, o acompanhamento do clima local e seu impacto direto nos cultivos. Recentemente, [Simonet e Ali \(2022\)](#) desenvolveram um aplicativo para *smartphones* que realiza estimativas da quantidade de água necessária para irrigação de determinados cultivos. O desenvolvimento deste aplicativo foi baseado no método de análise do balanço hídrico (diferença entre as entradas e saídas de água de um sistema), aplicando técnicas semelhantes a do presente trabalho. Segundo os pesquisadores, o *software* implementado resulta em uma significativa economia de recursos hídricos. Além disso, proporciona a redução dos gastos com os sistemas de irrigação. A principal diferença entre o trabalho realizado pelos pesquisadores da Universidade de Sharjah e este, é a fonte dos dados climáticos. Este trabalho utiliza dados provindos de uma estação meteorológica desenvolvida pelo próprio autor, enquanto o outro utiliza informações de evapotranspiração de diversas bases de dados, como por exemplo, da *National Weather Service* (NWS). A desvantagem da segunda proposta é justamente utilizar uma estimativa de evapotranspiração de uma localidade que pode não refletir a realidade da região de cultivo em análise.

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma solução tecnológica de baixo custo operacional e também de implementação, que seja intuitiva e prática para auxiliar os agricultores no manejo da irrigação agrícola. A solução inclui a construção de uma estação meteorológica, com componentes que apresentem bom custo-benefício, para aquisição de variáveis climáticas utilizadas no cálculo da evapotranspiração de referência (telemetria). Este parâmetro é utilizado em alguns métodos que estimam a quantidade de água necessária a ser irrigada. O agricultor pode consultar os dados da estação e a evapotranspiração de referência diretamente através do celular, utilizando um aplicativo de mensageria (*Telegram*).

O artigo está organizado em 4 seções. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica com conceitos relacionados ao contexto da aplicação, com destaque para irrigação, evapotranspiração, balanço hídrico e variáveis climáticas. A Seção 3 traz o desenvolvimento e implementação da solução proposta. A Seção 4 demonstra os resultados e discussões relacionados à solução. Seguem as considerações finais, trabalhos futuros, e as referências bibliográficas.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Cenário da Irrigação Agrícola

Em um contexto rural, a irrigação pode ser definida como a prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para suprir a deficiência total ou parcial de água para as culturas ([FONTENELLE et al., 2019](#)). As regiões mais beneficiadas por esta prática são aquelas afetadas pela escassez de água durante algum período do ano. No Brasil, as regiões Sudeste e Centro-Oeste são algumas das que mais se beneficiam da prática. Se destaca, ainda, que o valor da produção irrigada atingiu cerca de R\$ 55 bilhões em 2019 e existem registros de, pelo menos, 70 tipos de culturas irrigadas no país ([ANA, 2021](#)).

Há diversos métodos para a aplicação de água em cultivos de pequena e grande escala, sendo os principais o pivô central, o gotejamento, a microaspersão, o carretel, a aspersão convencional, a inundação e através de sulcos (figura 1). Não existe um método de irrigação ideal, mas sim um método mais adequado a depender das taxas de infiltração do solo, relevo, frequência e intensidade de ventos, dentre alguns outros fatores geográficos e climáticos. Logo, a determinação do método deve ser precedida por um estudo ambiental sobre o local onde a técnica será implementada (FONTENELLE et al., 2019).

Figura 1 – Representação dos principais sistemas de irrigação.



Fonte: ANA (2021)

Além de aplicar a técnica mais apropriada ao local do cultivo, também é de grande relevância saber quando deve-se irrigar e qual a quantidade de água que deve ser fornecida à planta (ANDALES; CHÁVEZ; BAUDER, 2011). Segundo Silva e Neves (2020), alguns produtores rurais ainda se apoiam em métodos demasiadamente rudimentares e com pouca ou nenhuma base científica para decidir o momento de irrigação. Como, por exemplo, um teste tátil de verificação da umidade do solo em superfícies rasas que não correspondem a umidade na profundidade efetiva do sistema radicular das plantas. O fornecimento de água para o cultivo em períodos não necessários, acarreta em desperdício energético para o bombeamento de água, desgastes em toda a infraestrutura de irrigação e custos operacionais com mão de obra (MAROUELLI et al., 2011). Sumariamente, estes gastos desnecessários, que podem ocorrer pela ausência de uma tecnologia de apoio aos sistemas de irrigação, tem por consequência um aumento de custos de produção para os agricultores.

Para melhorar a eficiência e assertividade dos sistemas de irrigação, independentemente de qual seja o método, é necessário conhecer a demanda hídrica do cultivar em seus múltiplos estágios de desenvolvimento. Isto é, a quantidade de água necessária durante cada um dos ciclos fenológicos da planta (MENDONÇA et al., 2007). Além de conhecer a demanda hídrica de cultivo, é fundamental determinar a quantidade de água que as plantas liberam para a atmosfera durante o processo de transpiração e também a fração de água que é evaporada diretamente do solo. Estes dois parâmetros, dão origem ao termo evapotranspiração (*ET*), que nada mais é do que a quantidade total de água que é

*transferida* para a atmosfera através dos processos de transpiração e evaporação. Para fins de especificidade, este tipo de evapotranspiração é denominada de evapotranspiração de cultivo ou cultura ( $ET_c$ ).

## 2.2 Evapotranspiração de Cultivo ( $ET_c$ )

O cálculo da evapotranspiração de cultivo  $ET_c$  pode ser realizado com base em uma evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e o coeficiente da cultura em questão ( $K_c$ ), conforme a equação 1. O termo  $K_c$  é utilizado para ajustar as diferenças físicas e fisiológicas entre as culturas de base e referência (ALLEN et al., 1998).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

- $ET_c$ : evapotranspiração de cultivo/cultura [ $mm / dia$ ]
- $ET_0$ : evapotranspiração de referência [ $mm / dia$ ]
- $K_c$ : coeficiente de cultivo/cultura [adimensional]

## 2.3 Evapotranspiração de Referência ( $ET_0$ )

Existem alguns métodos estabelecidos para determinação da evapotranspiração de referência, sendo três destes o método de Makkink, Hargreaves e Penman-Monteith. O método padrão e oficialmente recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) é o Penman-Monteith, também denominado de FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Este método foi adotado e adaptado pela FAO em 1998, sendo publicado em seu boletim número 56 sobre irrigação e drenagem e apresenta estimativas muito adequadas da  $ET_0$  (equação 2). Outras denominações para este método podem ser encontrados na literatura, como FAO PM e FAO 56 PM. No Brasil, com o intuito de apoiar os agricultores no manejo da irrigação, a Embrapa disponibilizou um roteiro resumido e traduzido para português do cálculo da  $ET_0$  (CONCEIÇÃO, 2006).

A fim de determinar a evapotranspiração de referência, através do método FAO Penman-Monteith, alguns dados geológicos e climatológicos são requeridos: altitude, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. Todos estas variáveis são utilizadas para obter diversos coeficientes da equação de Penman-Monteith para o cálculo da  $ET_0$ . A cultura de referência, estabelecida pela FAO, é uma cultura hipotética de 0.12 metros de altura, com uma resistência de 70  $s/m$  e um coeficiente de reflexão (albedo) de 0.23. Estas características se assemelham muito a uma vegetação gramínea extensa, com altura uniforme, em crescimento ativo, com disponibilidade adequada de água e cobrindo todo o solo onde se encontra cultivada. (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

- $ET_0$ : evapotranspiração de referência [ $mm / dia$ ]
- $R_n$ : radiação solar líquida no topo da cultura [ $\frac{MJ}{m^2} / dia$ ]
- $G$ : densidade do fluxo de calor do solo [ $\frac{MJ}{m^2} / dia$ ]

- $T$ : temperatura do ar a 2 metros de altura (em relação ao solo) [ $^{\circ}C$ ]
- $u_2$ : velocidade do vento a 2 metros de altura (em relação ao solo) [ $\frac{m}{s}$ ]
- $e_s$ : pressão de vapor de saturação [ $kPa$ ]
- $e_a$ : pressão de vapor [ $kPa$ ]
- $(e_s - e_a)$ : déficit de pressão de vapor de saturação [ $kPa$ ]
- $\Delta$ : inclinação da curva de pressão de vapor [ $\frac{kPa}{^{\circ}C}$ ]
- $\gamma$ : constante psicrométrica [ $\frac{kPa}{^{\circ}C}$ ]

Conhecendo os valores da  $ET_0$  e do coeficiente da cultura ( $K_c$ ), é possível estimar a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) através da equação 1. É importante ressaltar que cada tipo de cultura apresenta diferentes coeficientes  $K_c$ , a depender da espécie, coeficiente de reflexão (albedo), altura da planta e, inclusive, o estágio de desenvolvimento da planta. Ou seja, o valor de  $K_c$  é dinâmico e sofre variações ao decorrer do processo de crescimento do cultivar. Logo, espera-se que o valor da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) também seja dinâmico por depender diretamente de  $K_c$ .

Todavia, nota-se que cálculo da  $ET_0$  não é tão trivial e exige o conhecimento de diversas variáveis climatológicas. Uma das maneiras de se obter estes dados é através de uma estação meteorológica instalada na região de interesse. Idealmente, a estação deve possuir sensores para aferição da temperatura, umidade relativa, velocidade do vento (anemômetro) e radiação solar (piranômetros, radiômetros ou solarímetros). Também é interessante que a estação possua um sensor para medir a precipitação pluviométrica (pluviômetro) com o intuito de realizar cálculos de balanço hídrico de cultivo.

## 2.4 Radiação Solar Líquida ( $R_n$ )

Muitas das estações disponíveis no mercado dispõem da maior parte dos sensores supracitados, exceto o de radiação solar (necessário para determinar o coeficiente  $R_n$ ). Este tipo de sensor, possui um custo relativo bastante elevado. Isso se deve a ausência de uma indústria nacional de sensores de radiação solar, fazendo com que estes sejam importados com um alto custo (VILELA, 2010). Em uma pesquisa feita pelo próprio autor no ano de 2022, verificou-se que um piranômetro de fotodiodo básico, modelo SP-214-SS (figura 2) da empresa *Apogee Instruments* (importado e vendido pela empresa *RoMiotto*) custa, aproximadamente, R\$3700,00.

Figura 2 – Piranômetro de fotodiodo básico SP-214-SS



**Fonte:** *Apogee Instruments*

Existem algumas pesquisas promissoras para a estimativa da radiação solar através da combinação de um *hardware* de baixo custo (composto de componentes básicos encontrados no mercado interno) e *softwares* que implementam alguma técnica de aprendizagem de máquina, em especial redes neurais artificiais (CAPO; RAMPINELLI, 2021; ROSSO; RAMPINELLI, 2021).

No entanto, existe uma outra alternativa para a estimativa da radiação solar, que pode ser implementada puramente em software e baseia-se na equação de radiação de Hargreaves (equação 3). Esta é a abordagem escolhida para os cálculos de radiação solar deste trabalho e é fundamental para a determinação da  $ET_0$ .

$$R_s = K_{Rs} \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \times R_a \quad (3)$$

- $R_s$ : radiação solar [ $\frac{MJ}{m^2} / dia$ ]
- $K_{Rs}$ : coeficiente de ajuste [ $^{\circ}C^{-0.5}$ ]
- $T_{max}$ : temperatura máxima do ar [ $^{\circ}C$ ]
- $T_{min}$ : temperatura mínima do ar [ $^{\circ}C$ ]
- $R_a$ : radiação solar extraterrestre [ $\frac{MJ}{m^2} / dia$ ]

O coeficiente  $K_{Rs}$  é empírico e varia entre regiões do interior e costeiras (litorâneas). Para as regiões do interior, o  $K_{Rs}$  é adotado como 0.16 e para regiões litorâneas 0.19 (ALLEN et al., 1998). As temperaturas mínima e máxima podem ser facilmente obtidas através de sensores de temperatura de baixo custo disponíveis na vasta maioria das estações meteorológicas. A radiação solar extraterrestre, por sua vez, apresenta maior nível de complexidade para ser calculada (equação 4).

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (4)$$

- $R_a$ : radiação solar extraterrestre [ $\frac{MJ}{m^2} / dia$ ]
- $G_{sc}$ : constante solar = 0.0820 [ $\frac{MJ}{m^2} / min$ ]
- $d_r$ : inverso da distância relativa entre o sol e a terra [adimensional]
- $\omega_s$ : ângulo horário do pôr do sol [ $rad$ ]
- $\varphi$ : latitude [ $rad$ ]
- $\delta$ : declinação solar [ $rad$ ]

O coeficiente  $d_r$  varia a cada dia do ano e pode ser calculado através da equação 5. A declinação solar ( $\delta$ ) é o ângulo formado entre o equador terrestre e a linha imaginária que contém o plano do sol, tal que  $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq +23.45^{\circ}$ . Por convenção,  $\delta$  é negativo para regiões do hemisfério sul e positivo para o hemisfério norte (MEDEIROS; MARTINS, 2020). A equação 6 define o valor de declinação solar e, assim como o coeficiente  $d_r$ , também varia a cada dia do ano. O ângulo horário do pôr do sol ( $\omega_s$ ) pode ser obtido através da equação 7.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (5)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (6)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (7)$$

- $J$ : dia do ano (valor entre 1 e 365 ou 366 se o ano for bissexto)

Para determinar a radiação líquida no topo da cultura ( $R_n$  na equação 2), além da radiação solar ( $R_s$ ), é preciso obter os valores de radiação de ondas curtas (equação 8) e radiação de ondas longas (equação 9).

$$R_{ns} = (1 - a)R_s \quad (8)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (9)$$

- $R_{ns}$ : radiação de ondas curtas  $\left[ \frac{MJ}{m^2} / dia \right]$
- $R_{nl}$ : radiação de ondas longas  $\left[ \frac{MJ}{m^2} / dia \right]$
- $a$ : albedo (coeficiente de reflexão), 0.23 para a cultura hipotética de referência [adimensional]
- $R_s$ : radiação solar  $\left[ \frac{MJ}{m^2} / dia \right]$
- $\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann  $\left[ 4.903 \times 10^{-9} \frac{MJ}{m^2} K^{-4} / dia \right]$
- $T_{max,K}$ : temperatura máxima absoluta durante um período de 24 horas  $[K]$
- $T_{min,K}$ : temperatura mínima absoluta durante um período de 24 horas  $[K]$
- $e_a$ : pressão de vapor  $[kPa]$
- $R_s$ : radiação solar  $\left[ \frac{MJ}{m^2} / dia \right]$
- $R_{so}$ : radiação solar de céu claro  $\left[ \frac{MJ}{m^2} / dia \right]$
- $R_s/R_{so}$ : radiação relativa de ondas curtas (limitado em 1.0) [adimensional]

A pressão de vapor ( $e_a$ ) pode ser calculada a partir dos valores das umidades relativas mínima e máxima, conforme equação 10.

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^\circ(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad (10)$$

- $e_a$ : pressão de vapor [ $kPa$ ]
- $e^\circ(T_{min})$ : pressão de vapor de saturação durante a menor temperatura diária [ $kPa$ ]
- $e^\circ(T_{max})$ : pressão de vapor de saturação durante a maior temperatura diária [ $kPa$ ]
- $RH_{max}$ : umidade relativa máxima [%]
- $RH_{min}$ : umidade relativa mínima [%]

A pressão de vapor de saturação,  $e^\circ(T)$ , está relacionada com a temperatura do ar e pode ser determinada a partir da equação 11.

$$e^\circ(T) = 0.6108e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} \quad (11)$$

- $e^\circ(T)$ : pressão de vapor de saturação para a temperatura  $T$  [ $kPa$ ]
- $T$ : temperatura do ar [ $^\circ C$ ]

A radiação solar de céu claro ( $R_{so}$ ), necessária para a determinação do valor de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ ), pode ser obtida através da equação 12.

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5}z)R_a \quad (12)$$

- $z$ : elevação da estação meteorológica em relação ao nível do mar [ $m$ ]
- $R_a$ : radiação solar extraterrestre [ $\frac{MJ}{m^2} / dia$ ]

Com os valores de  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$ , determina-se o valor da radiação solar líquida no topo da cultura ( $R_n$ ) através da equação 13.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (13)$$

## 2.5 Fluxo de Calor no Solo ( $G$ )

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) para períodos de 1 a 10 dias é muito sucinto se comparado com a quantidade de radiação líquida solar e pode ser negligenciado com pouco prejuízo para a estimativa diária final da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998).

## 2.6 Inclinação da Curva de Saturação de Vapor ( $\Delta$ )

A inclinação da curva de saturação de vapor ( $\Delta$ ) é estimada conforme a equação 14, onde  $T$  é a temperatura do ar em graus Celsius.

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (14)$$

## 2.7 Constante Psicrométrica ( $\gamma$ )

A constante psicrométrica ( $\gamma$ ) depende da pressão atmosférica local e pode ser calculada através da equação 15.

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (15)$$

- $\gamma$ : constante psicrométrica [ $\frac{kPa}{^\circ C}$ ]
- $P$ : pressão atmosférica [ $kPa$ ]
- $\lambda$ : calor latente de vaporização [ $2.45 \frac{MJ}{kg}$ ]
- $c_p$ : calor específico do ar sob pressão constante [ $1.013 \times 10^{-3} \frac{MJ}{kg \cdot ^\circ C}$ ]
- $\varepsilon$ : razão do peso molecular de vapor de água e ar seco [adimensional, 0.622]

Por fim, a pressão atmosférica local ( $P$ ), onde a estação meteorológica está instalada, pode ser aproximada pela equação 16, onde  $z$  é a altitude.

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (16)$$

## 2.8 Balanço Hídrico

Por meio de uma análise criteriosa das equações que envolvem o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), na forma que foram descritas nesta seção, nota-se que as variáveis climatológicas requeridas se resumem a: temperatura do ar ( $T_{min}$  e  $T_{max}$ ), umidade relativa do ar ( $RH_{min}$  e  $RH_{max}$ ), latitude ( $\varphi$ ), altitude ( $z$ ) e velocidade do vento ( $u_2$ ). Todos os outros coeficientes da equação para determinação da  $ET_0$  podem ser obtidos a partir destes parâmetros.

Para estimar a quantidade de água a ser aplicada por irrigação para suprir as necessidades do cultivo ao longo de todo o seu desenvolvimento, é preciso avaliar o volume de água que está disponível no solo para as plantas. Esta disponibilidade pode ser aproximada através de cálculos de balanço hídrico utilizando-se o método proposto por Reichardt (1985), que leva em consideração as entradas e saídas de água do solo (ciclo hidrológico, equação 17).

$$\Delta A = P + I - ET_c - R \pm D \quad (17)$$

- $\Delta A$ : variação da água armazenada no solo
- $P$ : precipitação
- $ET_c$ : evapotranspiração da cultura
- $I$ : irrigação
- $R$ : escoamento superficial da água

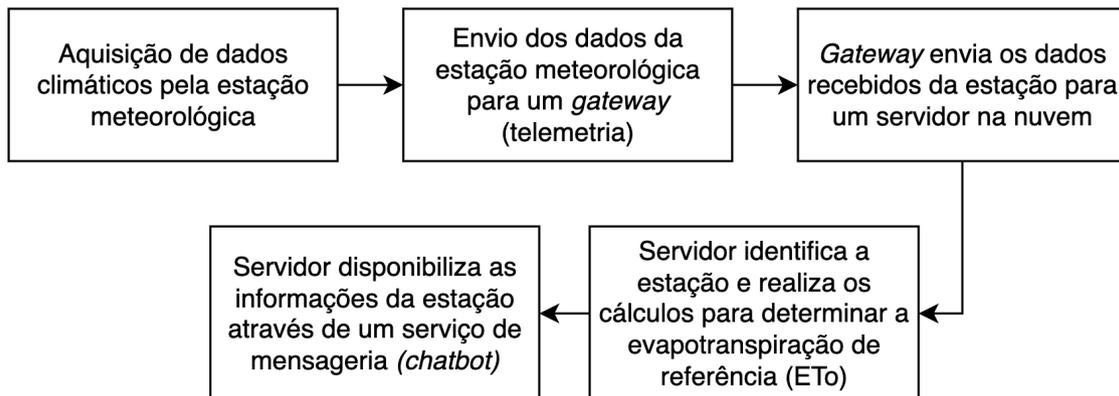
–  $D$ : drenagem profunda

O foco deste trabalho é apresentar uma solução de baixo custo para determinar a precipitação ( $P$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) que pode ser utilizada juntamente com um coeficiente de cultura ( $K_c$ ) para obter a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ). A quantidade de água irrigada é ajustada pelo próprio agricultor ou técnico responsável pela irrigação. A determinação do escoamento superficial da água ( $R$ ) e a drenagem profunda ( $D$ ) estão fora do escopo desta solução.

### 3 Metodologia e Desenvolvimento

Considerando a investigação sobre os conceitos de irrigação e evapotranspiração apresentados, a entrevista realizada com a engenheira agrônoma na EPAGRI, bem como a leitura dos trabalhos relacionados na área, foi proposto o seguinte diagrama para o desenvolvimento do trabalho. A figura 3 mostra a sequência dos blocos que definem as principais características e fluxo de informações do sistema integrado. Cada um dos blocos será explicado nas próximas subseções.

Figura 3 – Visão geral do sistema integrado.



Fonte: Próprio Autor

#### 3.1 Aquisição de variáveis climáticas

##### 3.1.1 Temperatura ( $T_{min}$ e $T_{max}$ ) e umidade do ar ( $RH_{min}$ e $RH_{max}$ )

A temperatura do ar, bem como a umidade relativa do mesmo, é aferida através de um sensor de temperatura e umidade da fabricante *TE Connectivity Sensors*, modelo HTU21D. A comunicação entre este sensor e o módulo LoRa32u4 II é realizada via protocolo I2C. Este módulo deve ser instalado a uma altura de 2 metros em relação ao solo para atender aos critérios da equação de Penman-Monteith adaptada pela FAO.

É importante ressaltar que este componente não é à prova de água e, portanto, exige algum tipo de proteção contra intempéries, as quais a estação meteorológica estará sujeita em campo. O alojamento (abrigo para o sensor) utilizado é o ASD22 (produto *OEM*), produzido totalmente em alumínio com pintura epóxi branca.

### 3.1.2 Velocidade do vento ( $u_2$ )

Registrar a velocidade média do vento, durante um período de 24 horas (1 dia), é obrigatório e de suma importância para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Esta variável climática possui influência muito significativa nas taxas de evaporação da água do solo e também na transpiração por parte das plantas.

Um anemômetro do tipo copo, modelo SV10, é utilizado para mensurar a velocidade do vento. Este modelo possui uma faixa de medição de  $0m/s$  até  $33.33m/s$ , ou ainda,  $0km/h$  a  $120km/h$ . A fim de respeitar a padronização imposta pela equação de Penman-Monteith adaptada pela FAO (equação 2), as medidas da velocidade do vento devem ser realizadas a uma altura de 2 metros em relação ao solo.

### 3.1.3 Latitude ( $\varphi$ ) e altitude ( $z$ )

As informações de latitude e altitude são registradas diretamente no sistema que é mantido pelo servidor na nuvem. Desta forma, não é necessário manter um sensor de altitude (altímetro) acoplado na estação meteorológica, tampouco um sensor GPS. Esta decisão diminui os custos e também elimina a necessidade de reposição destes sensores no futuro (levando em consideração o ambiente hostil em que a estação é instalada).

O usuário responsável pela instalação da estação meteorológica em campo, possui acesso a um *website* disponível na internet, hospedado no mesmo servidor que realiza os cálculos de evapotranspiração. Neste *website*, é feito o cadastro da estação, onde a latitude e a altitude são informadas.

### 3.1.4 Precipitação pluviométrica

Pluviômetros são instrumentos utilizados para medir o volume de chuva em uma região. A representação desta quantidade de chuva é dada em milímetros, com o seguinte significado: 1 *mm* de chuva representa uma lâmina d'água de 1 *mm* de altura em um espaço de 1 metro quadrado (BLAINSKI; GARBOSSA; ANTUNES, 2012). Esta altura pode ser encontrada a partir da equação 18:

$$H = 10 \times \frac{V}{A} \quad (18)$$

- $H$ : altura da lâmina d'água [*mm*]
- $V$ : volume de água coletado [*ml* ou  $cm^3$ ]
- $A$ : área de seção de captação de água [ $cm^2$ ]

Se o recipiente possuir a seção de captação em formato circular, que é o caso do pluviômetro utilizado neste protótipo, a área será dada pela equação 19:

$$A = \pi r^2 \quad (19)$$

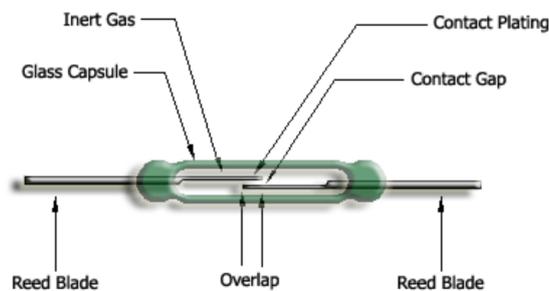
- $A$ : área de seção de captação de água [ $cm^2$ ]
- $r$ : raio da seção de captação [*cm*]

Existem pluviômetros manuais, onde um operador precisa realizar a leitura periodicamente e esvaziar o recipiente. Estes tipos de pluviômetro são de baixo custo porém precisam de mão de obra para o monitoramento, o que ao longo do tempo se torna caro e tedioso, ainda mais se existir uma grande quantidade de pluviômetros a serem analisados em áreas remotas.

Neste trabalho, a aferição do volume de chuvas é feita através de um pluviômetro digital automático. O pluviômetro utilizado neste protótipo é da fabricante nacional WRFCOMERCIAL, modelo PL2, e possui uma resolução de 0.25 mm de lâmina de água. Este modelo atende as normas da Agência Nacional de Águas (ANA).

O modelo supracitado utiliza um sistema basculante em conjunto com sensor magnético do tipo *reed switch* e um ímã permanente (figura 4). A balsa, segundo o fabricante, registra 0.25 mm de chuva a cada pulso. Um pulso ocorre a cada vez que a balsa tomba, fazendo com que o ímã feche brevemente o contato do *reed switch*.

Figura 4 – Detalhamento de um *reed switch*.



**Fonte:** *Reed Relays and Electronics India Limited*

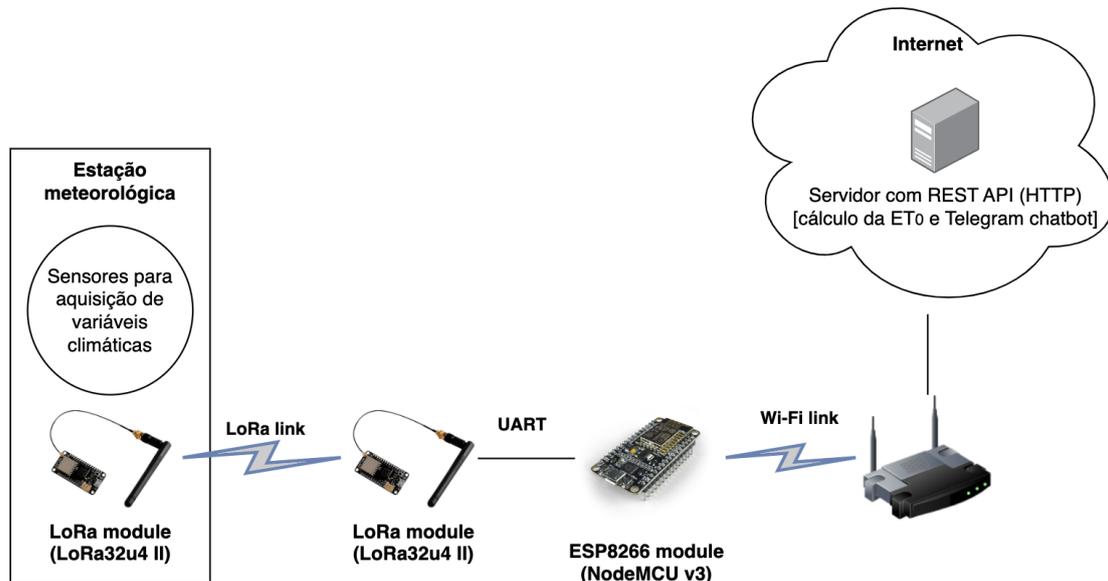
Os pulsos gerados pelo *reed switch* são detectados e registrados através do módulo LoRa32u4 II, onde são convertidos em altura pluviométrica.

### 3.2 Telemetria: comunicação de longa distância (LoRa) entre a estação meteorológica e o gateway

É importante ressaltar que, a solução apresentada, parte da premissa que existe algum meio de comunicação com a internet nas proximidades do cultivo (na sede da fazenda, por exemplo). De maneira mais específica, a implementação do protótipo, utiliza um sistema de comunicação via Wi-Fi para transmitir os dados recebidos pelo módulo LoRa para a nuvem. É possível, obviamente, adaptar a implementação para utilizar tecnologias de comunicação de telefonia celular e até mesmo via satélite.

Foram utilizados dois módulos LoRa32U4 II, operando na frequência de 868MHz e capazes de se comunicar a uma distância de até 4km (com poucas barreiras). O alcance pode variar bastante, pois depende da visada e também da antena utilizada. Em conjunto com um destes módulos LoRa, um módulo NodeMCU V3 (ESP8266-12E) é utilizado para transmitir os dados para a internet. O esquemático da figura 5 apresenta o modelo de comunicação.

Figura 5 – Arquitetura de comunicação dos nós.



Fonte: Próprio Autor

A estação meteorológica deve ser instalada nas proximidades da região cultivada a fim de obter dados climáticos mais condizentes com a realidade do local de cultura. A estação envia os dados através de um módulo LoRa para outro módulo LoRa (gateway) que está conectado à internet (figura 5)

Figura 6 – *JSON payload* do pacote enviado pelo nó de comunicação Wi-Fi para o servidor.

```
{
  "weather_station_id": 1,
  "air_temperature": 12.3,
  "air_relative_humidity": 71.4,
  "wind_speed": 5
}
```

Fonte: Próprio Autor

### 3.3 Processamento de dados em nuvem e serviço de mensageria com *Telegram*

Os dados climáticos enviados pelo *gateway* são recebidos por um servidor disponível na internet. Estes dados são utilizados para os cálculos que determinam a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) através da equação apresentada na seção de fundamentação teórica deste trabalho (equação 2).

O algoritmo que implementa as equações foi desenvolvido na linguagem de programação Python. O servidor dispõe de uma API REST (HTTP), desenvolvida em Python

com os módulos Django e Django REST Framework, que possui um *endpoint* para receber os dados enviados pelo *gateway* LoRa das estações meteorológicas. O servidor também possui um *chatbot* para interação com os usuários finais através do aplicativo Telegram, também implementado em Python com o módulo Telegram Bot.

### 3.4 Autonomia e sistema de alimentação da estação meteorológica

Normalmente, não existem fontes de energia elétrica diretamente disponíveis em uma lavoura. Logo, para que a estação meteorológica funcione, é necessária alguma solução de armazenamento de energia. Neste protótipo foi utilizada uma bateria selada estacionária *VRLA (Valve Regulated Lead Acid)*, modelo SP12-7S da marca SecPower. Esta bateria opera com tensão nominal de 12V e tem capacidade nominal de 7Ah. As baterias seladas podem ser posicionadas em qualquer orientação, facilitando sua acomodação.

Para tornar o sistema de alimentação autônomo e manter a bateria completamente carregada durante parte significativa do tempo, um painel solar foi utilizado em conjunto com um controlador de carga solar do tipo PWM. O painel solar utilizado é da fabricante Neosolar, modelo SA10-36P, e tem capacidade nominal de geração de 10 *watts*. O controlador de carga PWM é da fabricante *LandStar*, modelo LS0512E. Este controlador opera com uma tensão de 12V e pode fornecer uma corrente de até 5 amperes, sendo esta corrente mais do que suficiente para suprir a demanda de todo o circuito do protótipo.

### 3.5 Proteção dos sistemas de alimentação e comunicação (*housing*)

A bateria estacionária, o controlador de carga solar, os módulos conversores de tensão e o módulo de comunicação LoRa requerem proteção contra intempéries. Estes equipamentos não podem, em hipótese alguma, entrar em contato direto com água.

Para promover esta proteção, foi utilizada uma caixa de passagem para cabos com grau de proteção IP66, modelo KM03198 da marca Kraus Muller. Segundo as normas internacionais dispostas pela *IEC (International Electrotechnical Commission)*, o grau de proteção IP66, fornece proteção contra poeira (totalmente vedado) e contra jatos de água.

### 3.6 Protótipo

O protótipo, contendo os componentes citados previamente, está apresentado na figura 7.

Figura 7 – Protótipo da estação meteorológica.



Fonte: Próprio Autor

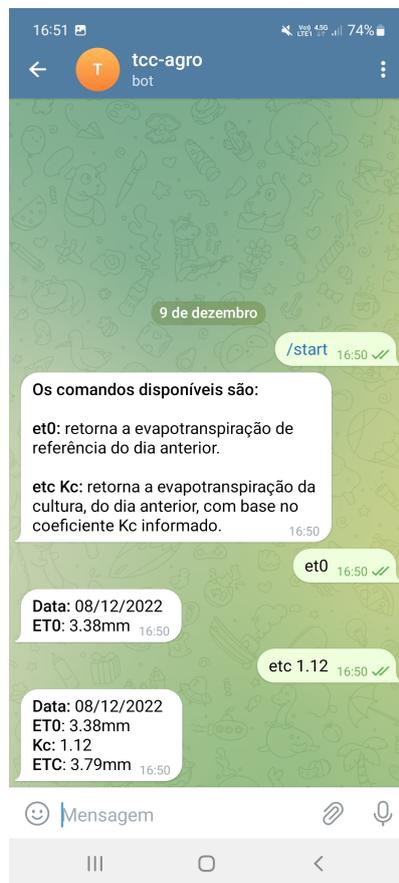
## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Requisição dos dados via serviço de mensageria (*chatbot*)

A requisição dos dados de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), através do *chatbot*, utilizando o aplicativo *Telegram* é simples e prática, exigindo poucos recursos e conhecimentos técnicos por parte do usuário. Todos os comandos possuem explicação para facilitar a interpretação dos dados. Na figura 8, é possível verificar um exemplo de interação real entre um usuário e o *chatbot*.

**Observação:** o comando inicial "`\start`" não precisa ser escrito pelo usuário, ele é enviado automaticamente ao iniciar uma conversa com o *chatbot*.

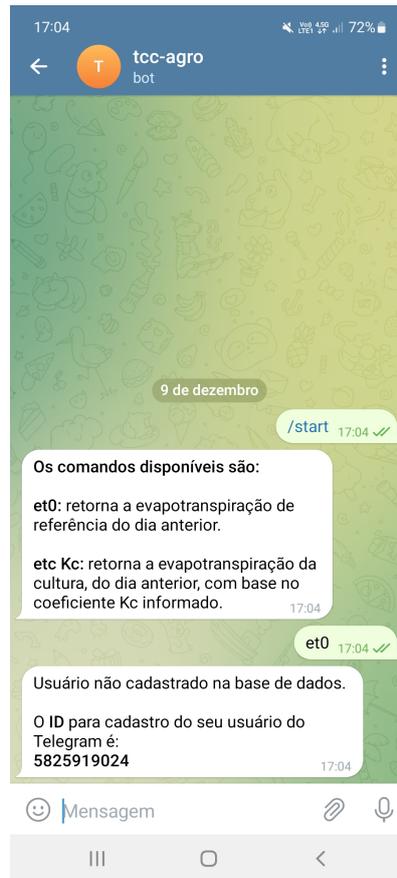
Figura 8 – Usuário consultando os valores de evapotranspiração de referência através do *chatbot* implementado no aplicativo Telegram.



**Fonte:** Próprio Autor

Caso o usuário do Telegram não esteja devidamente cadastrado no sistema, existe uma mensagem para tratamento de usuários não cadastrados, conforme demonstrado na figura 9.

Figura 9 – Interação com o *chatbot* via Telegram (usuário não cadastrado).



**Fonte:** Próprio Autor

## 4.2 Relação de custos do protótipo e comparações de mercado

O valor total do protótipo foi de R\$2.214,00 e os custos de todos os componentes estão dispostos na tabela 1.

Tabela 1 – Relação de componentes do protótipo

<b>Equipamento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Valor Un. (R\$)</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Total (R\$)</b>
Sensor de Temperatura	HTU21D	20,00	1	20,00
Anemômetro	SV10	370,00	1	370,00
Pluviômetro	PL-2	350,00	1	350,00
Alojamento	ASD22	450,00	1	450,00
Módulo LoRa	LoRa32u4 II	168,00	2	336,00
Módulo ESP8266	NodeMCU v3	40,00	1	40,00
Caixa de Passagem	KM03198	58,00	1	58,00
Painel Solar	SA10-36P	100,00	1	100,00
Controlador de Carga	LS0512E	110,00	1	110,00
Bateria	SP12-7S	80,00	1	80,00
Haste de Fixação	-	300,00	1	300,00
-	-	-	-	$\Sigma = 2.214,00$

**Fonte:** Próprio Autor.

Para verificar se a estação desenvolvida neste trabalho atende ao objetivo de se enquadrar em baixo-custo, é feita uma comparação de valores do protótipo com estações meteorológicas em circulação no mercado (tabela 2).

As características e capacidades das estações do mercado avaliadas nesta seção são muito semelhantes as do protótipo. O critério para seleção das estações é a presença das seguintes características e/ou componentes:

- sensores de temperatura e umidade relativa do ar
- anemômetro
- pluviômetro
- conjunto de painel solar, controlador de carga e bateria
- sistema de telemetria (envio de dados)

Tabela 2 – Comparação de preço com outras estações meteorológicas do mercado

Marca	Modelo	Tipo de Comunicação	Valor Un. (R\$)
Protótipo	Protótipo	LoRa, Wi-Fi	2.214,00
WRF	WR9	Wi-Fi, Bluetooth	5.890,00
B2K Tech	IC.EM.WG.BK.01	Wi-Fi, GSM	6.500,00
Davis	Vantage Vue K6250	Wireless (proprietário)	7.000,00
Plugfield	WS21	GSM, Wi-Fi	8.990,00
AgroMercador	Plugstation WS22	Wi-Fi, GSM	9.500,00
Plugfield	WS18	GSM, Wi-Fi	9.999,90
Davis	Vantage Pro 2	Wireless (proprietário)	13.000,00
Sigma Sensors	EMB-RX-300	Wi-Fi	23.275,63

**Fonte:** Próprio Autor.

O valor médio das estações meteorológicas do mercado, apresentadas na tabela 2 é de R\$ 9.731,94. Este valor é, aproximadamente, cinco vezes maior do que o valor do protótipo. Ressalta-se que não foi encontrada nenhuma estação meteorológica no mercado, que atendesse aos critérios de avaliação dispostos previamente e com um valor igual ou inferior ao do protótipo.

Outrossim, deve ser levado em consideração o fato de que nenhuma das estações do mercado, analisadas nesta seção, possui o envio de informações através de um serviço de mensageria que esteja disponível para qualquer *smartphone*. A maioria requer o acesso a um *website* ou possuem apenas visualizadores proprietários (*hardware*). Além disso, as estações pesquisadas (exceto os modelos Vantage Pro 2 e EMB-RX-300) não possuem as informações diretas da evapotranspiração de referência, apenas informam os dados climáticos primários ao usuário.

## 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

No âmbito do *software*, a arquitetura do sistema integrado proposto e implementado apresentou bom funcionamento e não foram detectados problemas de processamento ou lentidão. O tempo de resposta do *chatbot* é menor que 1 segundo, tornando a comunicação com o usuário fluida. O serviço de mensageria (*chatbot* via aplicativo *Telegram*) é intuitivo e fácil de utilizar. A implementação do *hardware* é bem satisfatória para um protótipo mas ainda pode ser aprimorada, pois este projeto utilizou alguns módulos prontos que podem ser enxugados com o objetivo de reduzir ainda mais os custos. Por exemplo, os módulos conversores de tensão, os módulos LoRa32u4 II e o módulo NodeMCU v3 (ESP8266).

Uma das evoluções que pode ser feita na atual arquitetura é implementar o suporte a outros serviços de mensageria, como o muito difundido *WhatsApp*. Também é conveniente evoluir o *chatbot* para que seja possível estimar a evapotranspiração de cultivo com base no coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), mas ao invés de informar o  $K_c$  diretamente, o usuário poderia informar qual o tipo de cultura e a data do plantio. Desta forma, remove-se do usuário final a necessidade de pesquisar qual o coeficiente do cultivo para uma dada fase fenológica, poupando tempo e esforço.

Existe uma melhoria significativa que pode ser feita para tratar dos casos em que o

gateway passe por períodos sem acesso à internet. Uma das possíveis soluções é, quando a conexão com a internet estiver comprometida, armazenar os dados localmente (em um cartão de memória, por exemplo) e implementar uma solução para o envio dos dados climáticos assim que a conexão for restabelecida.

Em um outro estudo, seria válido comparar os dados obtidos de outras estações meteorológicas do mercado com o protótipo apresentado neste trabalho, de preferência estações que possuem sensores de radiação solar (piranômetros, radiômetros ou solarímetros). Também seria interessante comparar os dados de radiação solar obtidos neste protótipo, através da equação de Hargreaves (equação 3) com estimativas de radiação solar feitas através de algoritmos de aprendizagem de máquina.

A escala da implementação, utilizando múltiplas estações meteorológicas em uma mesma área de cultivo, pode ser explorada em outras pesquisas, principalmente na parte de comunicação de longa distância utilizando a tecnologia LoRa.

## Referências

ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 5*. Rome: FAO, 1998. 333 p. ISBN 9251042195. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>>. Citado (3) vezes nas páginas [6, 8 e 10].

ANA. *Atlas Irrigação: Uso da Água Na Agricultura Irrigada*. 2. ed. Brasília, 2021. P. 14. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>>. Citado (3) vezes nas páginas [3, 4 e 5].

ANDALES, A. A.; CHÁVEZ, J. L.; BAUDER, T. A. *Irrigation Scheduling: The Water Balance Approach*. Tese (Doutorado) — Colorado State University. Libraries, 2011. Citado na página [5].

BLAINSKI Éverton; GARBOSSA, L. H. P.; ANTUNES, E. N. *Estações hidrometeorológicas automáticas: recomendações técnicas para instalação*. [S.l.]: Epagri, 2012. 43 p. Citado na página [13].

CAPO, P. Ícaro M.; RAMPINELLI, G. A. *Previsão de curto prazo da radiação solar por meio de redes neurais artificiais: um estudo de caso para Araranguá, Brasil*. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 6, p. 22, 2021. Citado na página [8].

CONCEIÇÃO, M. A. F. *Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith-FAO*. Brasil, 2006. 8 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPUV/8815/1/cir065.pdf>>. Citado na página [6].

FAO. *Water for Sustainable Food and Agriculture*. Rome: FAO, 2017. 33 p. ISBN 9789251099773. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>>. Citado na página [3].

FAO. *The future of food and agriculture. Alternative pathways to 2050*. Rome: FAO, 2018. 224 p. ISBN 9789251301586. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>>. Citado na página [3].

FONTENELLE, T. H. et al. *Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil*. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas, Embrapa, 2019. 47 p. ISBN 9788582100608. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1121226/levantamento-da-agricultura-irrigada-por-pivos-centrais-no-brasil>>. Citado (3) vezes nas páginas [3, 4 e 5].

MARQUELLI, W. A. et al. *Manejo da água de irrigação*. Campinas: Embrapa, 2011. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55931/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap5.pdf>>. Citado na página [5].

MEDEIROS, C. A. G.; MARTINS, A. M. **Geometria Sol-Terra: revisão didática com ênfase no hemisfério sul e direcionada pela ABNT NBR 10899:2013**. *Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)*, p. 11, 2020. Citado na página [8].

MENDONÇA, J. C. et al. **Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.), em Campos dos Goytacazes, RJ**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 5, 2007. Citado na página [5].

ONU. *Global Population Growth and Sustainable Development*. United Nations, New York, 2021. P. 5. Disponível em: <[https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undes\\_a\\_pd\\_2022\\_global\\_population\\_growth.pdf](https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undes_a_pd_2022_global_population_growth.pdf)>. Citado na página [3].

OSAKABE, Y. et al. **Response of plants to water stress**. *Frontiers in Plant Science*, v. 5, 2014. ISSN 1664-462X. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00086>>. Citado na página [3].

RAJANNA, G. A.; DASS, A.; VENKATESH, P. **Excess Water Stress: Effects on Crop and Soil, and Mitigation Strategies**. v. 6, p. 48–53, 01 2019. Citado na página [3].

REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445 p. Citado na página [11].

ROSEGRANT, M.; RINGLER, C.; ZHU, T. **Water for Agriculture: Maintaining Food Security Under Growing Scarcity**. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 34, 11 2009. Citado na página [3].

ROSSO, A. P.; RAMPINELLI, G. A. **Medição da radiação solar através de células de referência de baixo custo**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 12, p. 10, 07 2021. Citado na página [8].

SILVA, S.; NEVES, E. **Importância do manejo da irrigação**. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, v. 17, n. 34, 2020. Citado na página [5].

SIMONET, D.; ALI, T. **A smartphone evapotranspiration-based app for optimal irrigation scheduling for Thai crops**. *European Journal Of Horticultural Science*, Int Soc Horticultural Science-Ishs PO BOX 500, Leuven, 3001, Belgium, v. 87, n. 4, 2022. Citado na página [4].

VILELA, W. A. *Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas de radiação solar*. Tese (Doutorado) — INPE, São José dos Campos, 9 2010. Citado na página [7].

WETSER, K. et al. *What is the role of water in the global food challenge?* Wageningen Environmental Research, 2020. 40 p. Disponível em: <<https://edepot.wur.nl/538834>>. Citado na página [3].