

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM INTERNET DAS COISAS

ÉRITON FERNANDO CORDEIRO MANTOVANELI

**SOLUÇÃO DE IRRIGAÇÃO BASEADA EM INTERNET  
DAS COISAS PARA PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

ÉRITON FERNANDO CORDEIRO MANTOVANELI

**SOLUÇÃO DE IRRIGAÇÃO BASEADA EM INTERNET  
DAS COISAS PARA PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS**

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Internet das Coisas, do Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Ohara Kerusauskas  
Rayel

CURITIBA  
2018



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Curso de Especialização em Internet das Coisas



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **SOLUÇÃO DE IRRIGAÇÃO BASEADA EM INTERNET DAS COISAS PARA PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS**

por

**ÉRITON FERNANDO CORDEIRO MANTOVANELI**

Esta monografia foi apresentada em 23 de Novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Internet das Coisas. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Ohara Kerusauskas Rayel  
Orientador

---

Prof. M.Sc. Danillo Leal Belmonte  
Membro titular

---

Prof. M.Sc. Omero Francisco Bertol  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Às minhas meninas Karem e Júlia.

## AGRADECIMENTOS

À toda minha família pelo incentivo e compreensão pela minha ausência durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ohara Kerusauskas Rayel pela paciência e tempo dedicado na orientação deste trabalho.

Aos professores e colegas de turma pela troca de conhecimentos muito enriquecedora.

O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar de novo com mais inteligência.

(Henry Ford)

## RESUMO

MANTOVANELI, Ériton Fernando Cordeiro. **Solução de irrigação baseada em Internet das Coisas para pequenas propriedades rurais**. 2018. 66 f. Monografia de Especialização em Internet das Coisas, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O crescimento populacional previsto para as próximas décadas aumentará significativamente a demanda por alimentos no mundo. Para que esta demanda seja atendida, será necessário que as propriedades rurais melhorem a eficiência de seus processos produtivos. Um dos fatores que prejudicam as produções agrícolas de serem mais eficientes são os longos períodos de estiagem que as atingem em algum momento do seu processo produtivo, ou até mesmo mesmo a precipitação abaixo da necessidade do perfil da cultura, ocasionando perdas na produção. Irrigar artificialmente estas áreas produtivas torna-se necessário para suprir a deficiência hídrica no solo, porém a aplicação da água deve ser realizada de forma mais racional possível, devido ao problema de escassez hídrica em algumas regiões do planeta. A premissa da internet das coisas de adicionar habilidades extras para objetos comuns permite a criação de aplicações inteligentes na área da agricultura de precisão. O presente trabalho apresentou uma solução autônoma de irrigação do solo, parametrizável, monitorando a umidade do solo, variáveis do microclima local e, na disponibilidade de conectividade da rede de sensores sem fio da solução à internet, a integração com uma API de um centro meteorológico com o intuito de recuperar a previsão de chuva para a região da propriedade rural onde a solução estava implantada. A possibilidade de parametrização da solução permitiu que esta tornasse flexível para diferentes tipos de culturas com diferentes necessidades de umidade. O monitoramento da umidade solo permitiu que a solução, de acordo com a parametrização, acionasse e interrompesse a irrigação nos momentos adequados. O sensoriamento do microclima local e a integração ao centro meteorológico permitiu o uso mais racional da água, interrompendo a irrigação na presença de chuva e irrigando o mínimo possível quando era identificada previsão de chuva que atingiria a região da área agrícola em breve.

**Palavras-chave:** Irrigação. Agricultura de Precisão. Internet das Coisas. Sistemas Embarcados.

## ABSTRACT

MANTOVANELI, Ériton Fernando Cordeiro. **Internet of Things based irrigation solution for small rural properties.** 2018. 66 f. Monografia de Especialização em Internet das Coisas, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The expected population growth for the coming decades will significantly increase the demand for food in the world. For this demand to be met, it will be necessary for rural properties to improve the efficiency of their production processes. One of the factors that hinder agricultural productions from being more efficient are the long periods of drought that reach them at some point in their production process, or even the precipitation below the need of the crop profile, causing losses in production. Artificially irrigating these productive areas becomes necessary to supply water deficiency in the soil, but the application of water must be carried out in the most rational way possible, due to the problem of water scarcity in some regions of the planet. The Internet's premise of things adding extra skills to common objects allows the creation of smart applications in the field of precision farming. The present work presented an autonomous solution of soil irrigation, parametrizable, monitoring soil moisture, local microclimate variables and, in the connectivity availability of the wireless sensor network of the solution to the internet, integration with an API of a meteorological center with the intention of recovering the rain forecast for the region of the rural property where the solution was implanted. The possibility of parameterization of the solution allowed it to become flexible for different types of crops with different humidity requirements. Moisture monitoring alone allowed the solution, according to the parameterization, to trigger and interrupt irrigation at appropriate times. Sensitization of the local microclimate and integration with the meteorological center allowed for a more rational use of water, interrupting irrigation in the presence of rain and irrigating the possible minima when a rain forecast was identified that would reach the region of the agricultural area soon.

**Keywords:** Irrigation. Precision agriculture. Internet of Things. Embedded Systems.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Irrigação de superfície .....	17
Figura 2	– Irrigação por aspersão .....	18
Figura 3	– Irrigação localizada .....	19
Figura 4	– Evolução da internet .....	20
Figura 5	– Crescimento de dispositivos conectados à internet .....	20
Figura 6	– Estrutura do objeto inteligente .....	22
Figura 7	– Rede autônoma .....	25
Figura 8	– Rede internet das coisas .....	26
Figura 9	– Rede internet estendida .....	26
Figura 10	– Módulo embarcado sensor de umidade .....	39
Figura 11	– Módulo embarcado atuador de irrigação .....	39
Figura 12	– Módulo embarcado estação meteorológica .....	40
Figura 13	– Módulo web servidor central .....	40
Figura 14	– Solução com servidor central .....	41
Figura 15	– Solução sem servidor central .....	42
Figura 16	– Gráfico de controle da umidade com faixa crítica - cenário 1 .....	43
Figura 17	– Gráfico de controle da umidade com faixa crítica - cenário 2 .....	44
Figura 18	– Gráfico de controle da umidade sem faixa crítica .....	44
Figura 19	– Fluxo para configuração dos módulos embarcados .....	48
Figura 20	– Fluxo de responsabilidades do módulo embarcado sensor de umidade do solo .....	49
Figura 21	– Fluxo de responsabilidades do módulo embarcado atuador de irrigação .....	50
Figura 22	– Fluxo de responsabilidades do módulo embarcado estação meteorológica .....	51
Figura 23	– Fluxo de responsabilidades do módulo web servidor central .....	53
Figura 24	– Irrigação desligada até umidade mínima .....	55
Figura 25	– Irrigação desligada até tempo de tolerância .....	56
Figura 26	– Irrigação desligada até umidade crítica .....	57
Figura 27	– Irrigação ligada até umidade máxima .....	57
Figura 28	– Irrigação ligada até início da chuva .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de materiais .....	31
Tabela 2 – Previsão de chuva .....	59

## LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	<i>IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CCSA	<i>China Communication Standard Association</i>
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
CPU	Unidade Central de Processamento
DODAG	<i>Destination Oriented Directed Acyclic Graph</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IoT	Internet das Coisas
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
JVM	<i>Java Virtual Machine</i>
LoRaWan	<i>Long Range Wide Area Network</i>
MQTT-SN	<i>Message Queuing Telemetry Transport for Sensors Networks</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MTU	<i>Maximum Transmission Unit</i>
NDP	<i>Neighbor Discovery Proxies</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RPL	<i>IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks</i>
SQL	<i>Structure Query Language</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TI	<i>Texas Instruments</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	13
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	14
1.2.3 Justificativa .....	14
1.2.4 Organização do Texto .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
2.1 IRRIGAÇÃO .....	16
2.2 INTERNET DAS COISAS .....	19
2.2.1 Estrutura dos Objetos Inteligentes .....	22
2.2.2 Comunicação .....	23
2.2.3 Modelos de Conectividade .....	25
2.2.4 Protocolos e Padrões .....	26
2.2.5 Sistemas Operacionais .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1 MATERIAIS .....	30
3.2 MÉTODOS .....	36
<b>4 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>37</b>
4.1 ESCOPO DA SOLUÇÃO .....	37
4.2 MODELAGEM DA SOLUÇÃO .....	38
4.3 CONTROLE DA UMIDADE DO SOLO .....	42
4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO .....	47
4.4.1 Módulo Embarcado Sensor de Umidade do Solo .....	48
4.4.2 Módulo Embarcado Atuador de Irrigação .....	50
4.4.3 Módulo Embarcado Estação Meteorológica .....	51
4.4.4 Módulo Web Servidor Central .....	52
4.4.5 Módulo Mobile .....	54
4.5 RESULTADOS .....	54
4.5.1 Cenário 1 - Irrigação Desligada até Umidade Mínima .....	55
4.5.2 Cenário 2 - Irrigação Desligada até Tempo de Tolerância .....	55
4.5.3 Cenário 3 - Irrigação Desligada até Umidade Crítica .....	56
4.5.4 Cenário 4 - Irrigação Ligada até Umidade Máxima .....	56
4.5.5 Cenário 5 - Irrigação Ligada até Início da Chuva .....	57
4.5.6 Cenário 6 - Previsão de Chuva .....	58
4.5.7 Análise dos Resultados .....	59
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>62</b>
<b>Apêndice A – CIRCUITO DO MÓDULO EMBARCADO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO</b> .....	<b>64</b>
<b>Apêndice B – CIRCUITO DO MÓDULO EMBARCADO ATUADOR DE</b>	

IRRIGAÇÃO DO SOLO .....	65
Apêndice C – CIRCUITO DO MÓDULO EMBARCADO ESTAÇÃO METEOROLÓGICA .....	66

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar um dos principais problemas enfrentados pelo processo de produção agrícola, que é a necessidade da disponibilidade de quantidade adequada de água durante o cultivo agrícola, e apresentar uma proposta de solução para tentar sanar ou diminuir o máximo possível o impacto causado pelos longos períodos de estiagem nas propriedades rurais.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A sazonalidade pluviométrica tem grande influência nos resultados das produções de culturas agrícolas. Propriedades agrícolas que estão em regiões que passam por longos períodos de estiagem podem ter perdas consideráveis na sua produção e conseqüentemente perdas financeiras para o produtor rural. Diante da necessidade destes produtores de manter um ambiente propício para o cultivo de determinadas culturas em suas propriedades e conseqüentemente garantir a melhor produção possível, estes têm adotado alguma estratégia de irrigação em suas plantações. Porém na maioria das vezes esta estratégia não é a mais adequada, causando grande desperdício da água, este que é um recurso bastante escasso atualmente.

No mundo todo, 70% do consumo de água é utilizado pela irrigação de culturas agrícolas. No Brasil, o uso da água pela irrigação chega a 72% do total consumido. Mundialmente, apenas 40% da água aplicada no solo pela irrigação é realmente aproveitada pelas culturas (FAONOBASIL, 2017). Todo este desperdício de água é consequência de alguns fatores como por exemplo, o planejamento da irrigação das culturas baseada em conhecimentos empíricos dos agricultores ou utilização de simples temporizadores nos sistemas de irrigação sem um real controle da quantidade de água utilizada. A aplicação em quantidades excessivas da água também podem causar outros problemas no solo como por exemplo, a lixiviação de nutrientes, conseqüentemente diminuindo a quantidade de áreas produtivas no mundo.

### 1.2 OBJETIVOS

Esta seção irá apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos a ser atingidos com o desenvolvimento deste trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Implementar um sistema de irrigação inteligente, parametrizável, utilizando conceitos da Internet das Coisas (IoT), com o intuito de propiciar um cenário mais adequado possível, no que se refere à umidade do solo, para que diferentes tipos de culturas agrícolas se desenvolvam, de acordo com as condições apropriadas para o seu perfil de cultura. A utilização deste sistema de irrigação tem como objetivo o uso racional da água pelas propriedades agrícolas, garantindo que toda ou maior parte do recurso hídrico utilizado seja realmente aproveitado pela cultura.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- A solução será capaz de analisar variáveis ambientais, do local em que a cultura está inserida, lidas por sensores espalhados pela propriedade agrícola e, quando tecnicamente possível do ponto de vista de comunicação, por integração a centros meteorológicos que forneçam informações ambientais relevantes para o uso mais racional possível de água e energia da propriedade agrícola para o processo de irrigação.
- Será importante que a solução se adapte facilmente a inclusão ou exclusão de nós sensores e atuadores da solução já em execução da forma mais transparente possível.
- A solução será modular de maneira que, de acordo como o nível de controle desejável pelo agricultor e viabilidade tecnológica do ponto de vista de comunicação, seja possível adicionar novos recursos/funcionalidades à solução para atender a diferentes necessidades referentes à gestão do sistema de irrigação.

### 1.2.3 Justificativa

Um dos grandes desafios do setor agrícola será o de alimentar entre 9.4 e 10.2 bilhões de pessoas que habitarão o mundo até 2050, conforme prevê a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO). Portanto a produção de alimentos deverá ter um aumento de até 70% até o ano de 2050 (UNESCO, 2018). A África e Ásia são os locais onde se prevê o maior crescimento populacional nas próximas décadas. Estas regiões não tem capacidade de produzir todo o alimento que terão necessidade. O Brasil, que é um produtor e exportador de alimentos agrícolas, poderá

ter um papel fundamental como fornecedor de alimentos para estas regiões, precisando portanto aumentar a sua capacidade de produção agrícola.

Grandes períodos de estiagem afetam diretamente a capacidade de produção das propriedades agrícolas. As constantes perdas nas produções agrícolas por conta da indisponibilidade da quantidade adequada de água em determinados momentos do desenvolvimento das culturas dificultará muito a busca deste objetivo de aumentar a produção agrícola mundial.

Sistemas de irrigação inteligentes surgem como ferramentas promissoras na tentativa de sanar o problema dos longos períodos de estiagem sofridos pelas culturas agrícolas.

#### 1.2.4 Organização do Texto

O segundo capítulo apresenta os conceitos necessários para o embasamento deste trabalho que são os sistemas de irrigação e sua importância durante o todo o processo produtivo de culturas agrícolas e a internet das coisas citando as principais tecnologias e padrões aplicados nas soluções que fazem uso deste conceito.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia e os recursos tecnológicos necessários para o desenvolvimento da solução de irrigação inteligente baseada em internet das coisas.

O quarto capítulo apresenta a solução desenvolvida para realização da irrigação do solo de forma inteligente. É apresentado o escopo da solução, como a solução foi modelada, descrição das responsabilidades de cada módulo envolvido na solução e como estas responsabilidades foram implementadas e os resultados obtidos com a utilização da solução implementada.

O quinto capítulo apresenta a conclusão do trabalho juntamente com propostas de trabalhos futuros para incrementar a solução atual.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente é apresentado o conceito de irrigação e principais métodos de irrigação. Na sequência é apresentada uma visão geral da internet das coisas, na qual se baseia a solução proposta.

### 2.1 IRRIGAÇÃO

A irrigação é uma técnica que tem como objetivo aplicar de forma artificial água em determinadas culturas agrícolas onde a precipitação natural é insuficiente para atender as necessidades mínimas de umidade do solo que a cultura precisa para se desenvolver de forma adequada (REZENDE; ANDRADE JUNIOR, 2018).

Como princípios básicos da irrigação podemos citar o estabelecimento do exato momento de se aplicar água de forma artificial, qual a quantidade adequada de água ideal para determinado tipo de cultura, conhecimento do tipo solo onde está sendo aplicada a água, fisiologia da cultura, quais são os períodos considerados críticos para o consumo de água pela cultura e quais serão os impactos na produtividade (BRAGA; CALGARO, 2010).

A sua utilização de forma adequada fará com que a água seja utilizada de forma mais racional possível, ajudando na redução dos custos da produção e aumentando o lucro dos produtores rurais.

A aplicação da água no solo pode ser realizada das seguintes formas: irrigação total, irrigação suplementar, irrigação com déficit e irrigação de salvação (REZENDE; ANDRADE JUNIOR, 2018).

A irrigação total é a forma de irrigação que aplica toda a água necessária para uma determinada cultura agrícola se desenvolver, pois a região onde esta se encontra possui precipitação natural quase nula. É muito comum em regiões áridas do planeta.

A irrigação suplementar é a forma de irrigação que apenas parte da água necessária para o desenvolvimento da cultura agrícola é aplicada de forma artificial. A parte complementar é oriunda da precipitação natural da região onde a cultura se encontra. Esta forma de irrigação visa apenas suplementar a água necessária entre os períodos de precipitação natural.

A irrigação com déficit é a forma de irrigação que tem o objetivo de suprir apenas uma parte da necessidade de água de uma cultura agrícola. Normalmente é aplicada em culturas que possuem fases do seu desenvolvimento que não são tão críticas à falta de água. Esta forma de irrigação reduz a quantidade de água aplicada na cultura de forma artificial, mantendo um nível aceitável de produtividade e qualidade do cultivo.

A irrigação de salvação é forma de irrigação que a água é aplicada de forma artificial apenas em um curto período do cultivo. Um exemplo seria a irrigação de apenas um curto período após o plantio da cultura.

As técnicas de irrigação foram evoluindo ao longo do tempo, sendo os principais métodos de irrigação a irrigação de superfície, irrigação por aspersão e a irrigação localizada (REZENDE; ANDRADE JUNIOR, 2018).

A irrigação de superfície é o método onde a água é aplicada diretamente no solo de forma concentrada para que esta atinja pontos de infiltração no solo. Ela é adequada para solos de textura médio-argilosa e que possua topografia plana. Como é aplicada uma grande quantidade de água no solo, este método é considerado de baixa eficiência. Este método de irrigação ainda pode ser dividido em irrigação por sulcos e irrigação por inundação. Na irrigação por sulcos, a água é depositada em sulcos criados paralelamente às linhas de plantas da cultura. Este tipo de técnica é muito comum em culturas de milho, soja e feijão. Já a irrigação por inundação, a água é aplicada no solo de maneira que forme uma lâmina de água sobre solo, para que esta se infiltre gradativamente. Normalmente utilizada na cultura de árvores frutíferas (REIS, 2015). A Figura 1 ilustra a irrigação de superfície por meio de sulcos.

**Figura 1 – Irrigação de superfície por meio de sulcos**



**Fonte: Rezende; Andrade Junior (2018).**

A irrigação por aspersão é o método onde a água é aplicada por aspersores, que sob pressão faz com que a água seja lançada ao solo em forma de chuva artificial. Estes

aspersores são conectados em magueiras de diversos diâmetros que são pressurizadas. Entre as vantagens deste método podemos citar a capacidade de se adaptar às topografia do solo e possui uma eficiência de aplicação da água em torno de 70% a 80% (REZENDE; ANDRADE JUNIOR, 2018). A Figura 2 ilustra a irrigação por aspersão por meio de um pivô-central.

**Figura 2 – Irrigação por aspersão por meio de pivô-central**



**Fonte: Rezende; Andrade Junior (2018).**

A irrigação localizada é o método onde a água é aplicada diretamente na região das raízes das plantas. A água chega até a planta por magueiras com baixa pressão. Este tipo de técnica permite a aplicação de fertilizantes diretamente pela água da irrigação. Ela apresenta uma eficiência de aplicação de água de 90% a 95%. Porém possui um custo inicial considerado alto para aquisição dos acessórios necessários para a sua implementação. Este método de irrigação pode ser dividido em irrigação por gotejamento e irrigação por migroaspersão (REIS, 2015). Na irrigação por gotejamento faz-se o uso de gotejadores, por onde a água escoar em pouca quantidade. Sua vantagem é a economia de água que proporciona. O maneira mais comum de instalação deste método é quando estas magueiras são enterradas a uma profundidade de 25 centímetros, sendo chamadas de gotejamento subsuperficial (REZENDE; ANDRADE JUNIOR, 2018). A irrigação por microaspersão é parecido com o método por aspersão, porém a água é direcionada pelos microaspersores para a região das raízes das plantas em pressões menores do que os sistemas de aspersão. A Figura 3 ilustra a irrigação localizada de gotejamento.

As técnicas de irrigação descritas possuem vantagem e desvantagem e a sua opção de escolha para um determinado tipo de cultura agrícola deve ser feita levando em consideração alguns fatores como condições do solo, o microclima da região, a topografia do solo, quantidade de água disponível e o valor financeiro que o agricultor está disposto em investir (CHRISTOFIDIS, 1999).

**Figura 3 – Irrigação localizada de gotejamento**



**Fonte: Ribeiro (2012).**

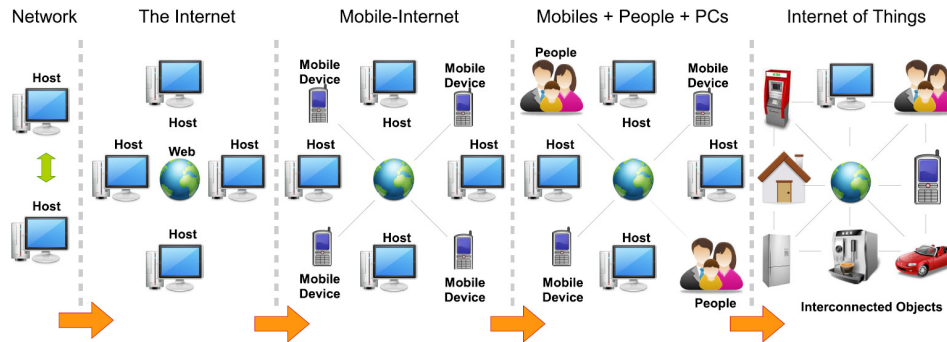
## 2.2 INTERNET DAS COISAS

A Internet das Coisas surgiu como uma evolução de diversas tecnologias como redes de sensores sem fio, sistemas embarcados, microcontroladores e padrões de comunicação de rede. Ela tem como principal objetivo interligar diversos tipos de coisas comuns do dia a dia com a internet para que estes possam compor uma das responsabilidades necessárias para atingir o propósito de uma possível aplicação baseada na internet das coisas.

A *International Telecommunication Union* (ITU) define a internet das coisas como uma estrutura global, que através da interconexão de coisas utilizando padrões de comunicações interoperáveis, é possível prover serviços diversos, baseados em informações produzidas ou controladas no mundo físico por estas coisas interconectadas (ITU, 2012). A *China Communication Standard Association* (CCSA) define estas coisas como objetos do mundo físico e pessoas que, através de dispositivos conectados a eles, podem ter informações coletadas ou até mesmo ser controladas. Estes dispositivos tem a capacidade de percepção, processamento de informações e comunicação entre si (CCSA, 2011). A *Internet Engineering Task Force* (IETF) acrescenta a este conceito que as coisas sejam unicamente endereçáveis (IETF, 2012).

Estas habilidades de percepção, processamento e comunicação adicionadas às coisas, e voltadas para um fim específico, permite qualificá-las como objetos inteligentes. A presença destes objetos inteligentes tem papel fundamental na evolução da internet, que já dispõe de uma grande diversidade de equipamentos conectados como notebooks, celulares, TVs, consoles, etc. Esta evolução é ilustrada pela Figura 4.

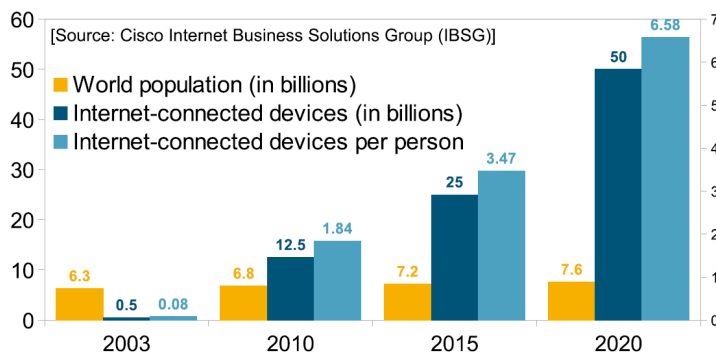
**Figura 4 – Evolução da internet**



Fonte: Perera et al. (2015).

Existe uma previsão de cerca de 50 bilhões de dispositivos conectados à internet até 2020. Considerando a projeção de 7.6 bilhões de habitantes no mundo neste mesmo ano de 2020, é possível estimar uma média de 6.58 dispositivos por pessoas conforme é ilustrada pela Figura 5.

**Figura 5 – Crescimento de dispositivos conectados à internet**



Fonte: Perera et al. (2015).

Com a adição de habilidades extras para objetos até então comuns, permitindo que estes monitorem e controlem o ambiente em que estão inseridos através de troca de informações entre si, proporciona a criação de inúmeras aplicações. Entre elas podemos citar cidades inteligentes, casas inteligentes, carros inteligentes, agricultura inteligente, vestuários inteligentes, dispositivos voltados para o cuidado da saúde das pessoas, entre outros.

Cidades inteligentes são cidades que fazem uso de tecnologias de informação e comunicação para utilizar da forma mais estratégica possível a infraestrutura e serviços disponíveis na cidade com o intuito melhorar os aspectos econômicos, qualidade de vida dos seus cidadãos e preservação ambiental. Um exemplo de solução IoT em cidades

inteligentes seria a realização do monitoramento adequado do tráfego urbano visando melhorar a mobilidade urbana (FGVPROJETOS, 2018).

Casas inteligentes são as que oferecem comodidades para seus moradores através da automação de alguns aspectos da residência, como por exemplo o controle automático de trancas de portas de janelas, iluminação e temperatura de acordo com um perfil pré-configurado.

Carros inteligentes são veículos que possuem diversos sensores acoplados ao mesmo com o intuito de proporcionar várias comodidades, como por exemplo a realização de uma locomoção mais segura tentando prever uma possível colisão e acionando os freios automaticamente, ou até mesmo fazer uma baliza de forma autônoma em uma vaga de estacionamento.

Agricultura inteligente utiliza de soluções de IoT com o intuito de se utilizar os recursos necessários para a atividade agrícola de forma mais racional possível e atingindo a maior produtividade possível. Como exemplo podemos citar sistemas de irrigação automatizados que garantem um uso racional da água ao mesmo tempo que propicia um ambiente mais adequado possível para o cultivo agrícola.

Vestuários inteligentes fazem uso de tecnologias acopladas em roupas e acessórios vestíveis que trazem alguma comodidade para as pessoas. Um exemplo poderia ser uma roupa que possua sensores que detectem movimento, velocidade, frequência cardíaca e sistema de posicionamento global (GPS) para atletas.

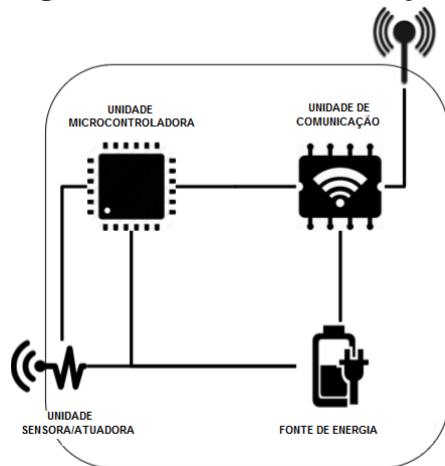
Cuidado da saúde são soluções que fazem uso de tecnologias para trazer benefícios em relação ao monitoramento da saúde das pessoas. Como por exemplo podemos citar soluções que monitoram os sinais vitais das pessoas através de sensores, informado em tempo real possíveis sintomas de doenças.

Com o aumento exponencial da quantidade de objetos inteligentes conectados uns com os outros, observa-se que um dos desafios da internet das coisas é que sua infraestrutura tenha habilidades para escalar a grandes quantidade de dispositivos conectados. Portanto a padronização de tecnologia a serem utilizadas por esta infraestrutura será um fator muito importante para o sucesso da internet das coisas.

### 2.2.1 Estrutura dos Objetos Inteligentes

Os objetos inteligentes são formados por 4 componentes: unidade microcontroladora, unidade de comunicação, unidade de sensor e/ou atuador e a fonte de energia). A estrutura de um objeto inteligente é ilustrada pela Figura 6.

**Figura 6 – Estrutura do objeto inteligente**



Fonte: Adaptado de Perera et al. (2015).

A unidade microcontroladora é formada por uma unidade central de processamento (CPU), memória interna e um conversor analógico digital. A CPU é responsável por executar as instruções lógicas e aritméticas, a memória interna é responsável por armazenar dados e os programas que serão executados, e o conversor analógico digital é responsável por criar uma interface com os sensores presentes no objeto inteligente. A principal característica das unidades microcontroladoras é que estas operam em baixas frequências aliado à habilidade de entrar em modo de espera aguardando eventos externos para realizar alguma tarefa, ajudando a consumir muito pouca energia.

A unidade de comunicação é responsável por permitir a comunicação do objeto inteligente com outros objetos. Ela dispõe de uma interface de comunicação que preferencialmente é sem fio, utilizando tecnologias de rádio de baixo custo, baixas potências e baixo consumo de energia. Estas características tornam a comunicação de alcance muito baixo e com grandes perdas de pacotes. Mas nada impede que a comunicação também seja cabeada.

A unidade de sensor e/ou atuador é responsável por sensoriar ou atuar no ambiente em que o objeto está inserido. Ela realiza esta tarefa com o auxílio de dispositivos sensores e atuadores que são conectados a esta unidade.

A fonte de energia é responsável por alimentar com energia o objeto inteligente e os dispositivos sensores e/ou atuadores conectados ao mesmo. Normalmente estas fontes de energia são pilhas e/ou baterias, mas também podem ser alimentadas por outras fontes como por exemplo, a captura de energia solar, mecânica, ou até mesmo energia elétrica cabeada fornecida por distribuidoras locais. Dependendo da solução de IoT definida, determinado tipo de fonte de energia pode ser mais adequado do que as outras. Se o objeto inteligente precisa de mobilidade por exemplo, a fonte de energia cabeada não deve ser utilizada. Se o objeto for inserido em um local de difícil acesso, pode ser necessária a extração de energia do ambiente, pois uma troca de bateria pode ser considerada inviável.

Como as soluções de IoT podem ter uma quantidade muito grande de objetos inteligentes presentes para resolver um problema específico, o custo dos dispositivos torna-se um fator importante para a criação de projetos destes objetos inteligentes. Um alto custo para a produção de um objeto inteligente pode inviabilizar uma solução IoT deste tipo. Neste aspecto as indústrias de dispositivos voltados para IoT já disponibilizam no mercado microcontroladores, sensores e atuadores a baixo custo, favorecendo o aumento de soluções de IoT.

### 2.2.2 Comunicação

Um dos fatores determinantes para o adequado funcionamento das soluções de IoT é a maneira que os objetos inteligentes irão se comunicar. Existem várias tecnologias de comunicação disponíveis e a sua opção de uso depende muito da finalidade e objetivos da solução IoT. Entre as principais tecnologias de comunicação podemos citar os padrões *Ethernet* IEEE 802.3, Wi-Fi IEEE 802.11, IEEE 802.15.4, *Bluetooth Low Energy* (BLE), 3G/4G, *Long Range Wide Area Network* (LoRaWan) e Sigfox.

O padrão *Ethernet* IEEE 802.3 utiliza cabos físicos que podem ser de cobre de par trançado, ou de fibra óptica para realizar a comunicação. Os cabos de par trançado podem atingir taxas de transmissão até 1 Gbps a uma distância máxima de 100 metros. Os cabos de fibra óptica podem alcançar taxas de transmissão de até 10 Gbps a uma distância máxima de 2000 metros (KUROSE; ROSS, 2010). Pela necessidade de se realizar todo um cabeamento físico para a interconexão das partes participantes da comunicação, a utilização deste padrão nas soluções de IoT ficam bem restritas, principalmente pela dificuldade de mobilidade dos objetos inteligentes.

O padrão Wi-Fi IEEE 802.11 é uma solução de comunicação sem fio. As novas



versões deste padrão permite taxas de transmissão de até 1300 Mbps a uma distância máxima de 50 metros (KUROSE; ROSS, 2010). Este padrão é bem mais atrativo em relação ao cabeado justamente por não ser necessário a presenta de cabos espalhados pelos locais de utilização. Porém este padrão ainda possui um consumo elevado de energia, dificultando o uso em algumas soluções de IoT que podem possuir um número muito grande de dispositivos e de grande dificuldade de troca de baterias. A sua utilização acaba sendo limitada a soluções onde os objetos possuem uma fonte de energia cabeada e fixa, não permitindo a mobilidade destes objetos.

O padrão IEEE 802.15.4 é uma solução de comunicação sem fio que permite taxas de transmissão de 250 kbps a uma distância máxima de 100 metros. Sua principal característica é que foi projetada para ter baixas taxas de transmissão, baixo consumo de energia e baixo custo, características muito apropriadas para soluções IoT. A capacidade de suportar topologia *mesh* pode aumentar em muito a área de cobertura da comunicação (IEEE-SA, 2016).

O padrão 3G/4G é uma solução de comunicação sem fio que faz uso da rede de operadoras de telefonia. Ela permite taxas de 1Mbps na 3G e 10Mbps na 4G e pode ser utilizada nos pontos cobertos pela rede das operadoras de telefonia. Este padrão possui um consumo de energia alto em relação a outros padrões de comunicação sem fio. Por esta característica pode não ser muito atrativa a sua adesão em soluções de IoT, mas a possibilidade de estarem presentes em locais remotos podem justificar a sua utilização.

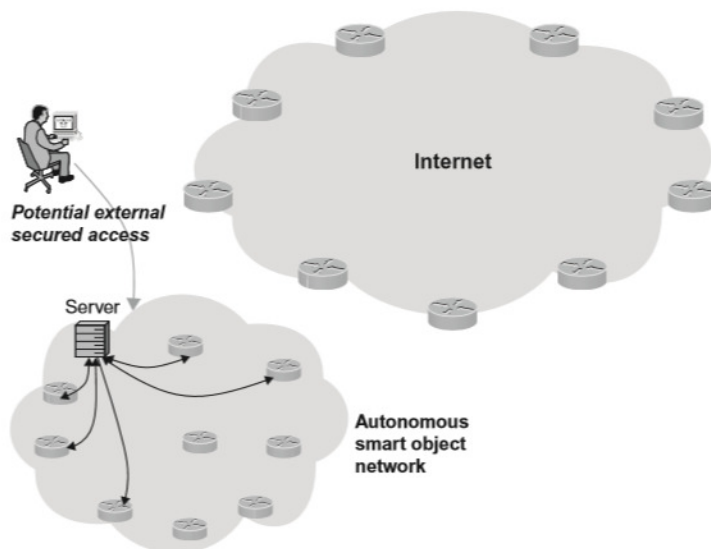
O padrão LoRaWan é uma solução de comunicação sem fio que permite taxas de transmissão entre 300 bps a 50 kbps a uma distância máxima de 5000 metros em áreas urbanas e 45000 metros em áreas rurais. Este padrão é muito atrativo para soluções IoT que necessitem de grandes áreas de cobertura.

A Sigfox é uma solução de comunicação sem fio que permite taxas de transmissão entre 10 bps e 1000 bps a uma distância que pode chegar a 10000 metros em áreas urbanas e 50000 metros em áreas rurais. Uma das características é o baixo consumo de energia, o que é um atrativo para as soluções de IoT, porém a Sigfox atua como uma operadora, portanto é necessário se conectar à rede Sigfox e sua disponibilidade depende da sua área de cobertura.

### 2.2.3 Modelos de Conectividade

Existem 3 modelos de conectividade de redes de objetos inteligentes: A rede autônoma, a internet estendida e a internet das coisas (VASSEUR; DUNKELS, 2010). Na rede autônoma de objetos inteligentes não existe conexão com a internet, podendo então ser considerada uma rede privada. Algumas soluções de IoT podem ser adequadas a este tipo de modelo, como por exemplo em indústrias que tenha interesse apenas no sensoriamento e atuação dos maquinários necessários para a sua produção sem a necessidade de expor informações dos objetos inteligentes para a internet pública. Outro cenário é quando não existe uma forma viável, seja tecnologicamente ou financeiramente, de conexão com a internet, forçando que a rede de objetos inteligentes seja privada. A Figura 7 ilustra uma rede autônoma de objetos inteligentes.

**Figura 7 – Rede autônoma**

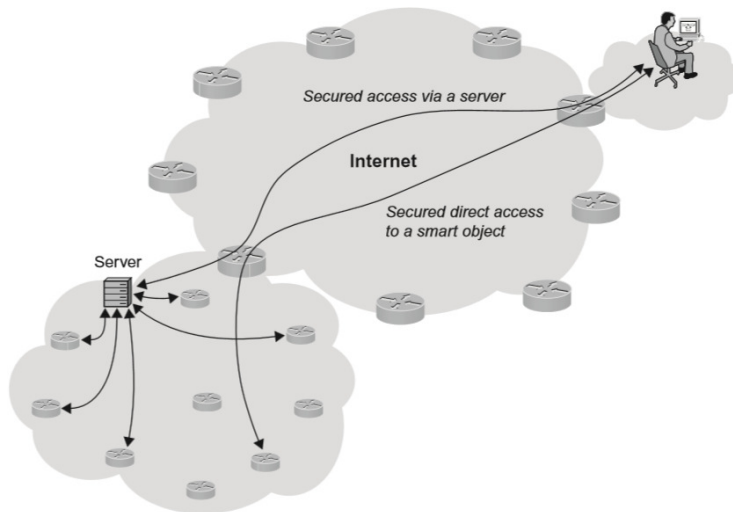


**Fonte: Vasseur; Dunkels (2010).**

A rede internet das coisas é quando a rede de objetos inteligentes está diretamente conectada à internet. Este tipo de modelo é o que torna as soluções de IoT muito interessantes pelo fato da possibilidade de se obter informações ou até mesmo controlar remotamente objetos de qualquer lugar que possua acesso à internet. A Figura 8 ilustra uma rede autêntica de internet das coisas.

Na rede internet estendida podemos dizer que é um meio termo entre a rede autônoma e a rede internet das coisas, pois os objetos inteligentes possuem um acesso controlado à internet conforme as necessidades de privacidade da solução IOT. Esta segurança normalmente é implementada como o uso de firewalls entre a rede autônoma de

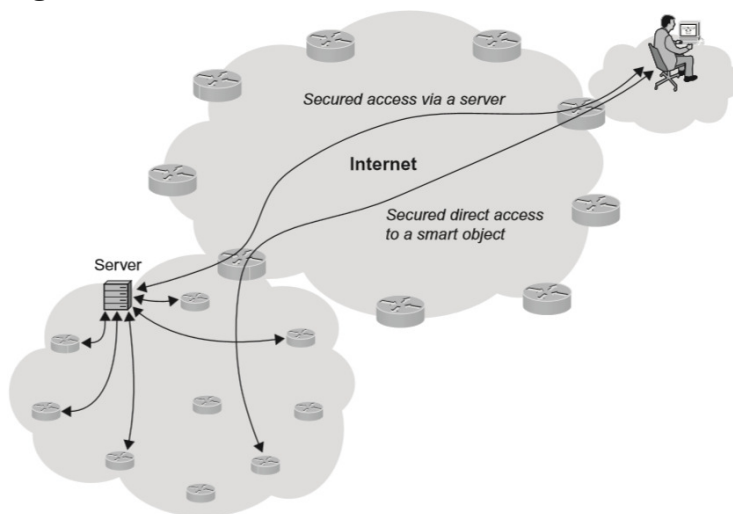
**Figura 8 – Rede internet das coisas**



**Fonte: Vasseur; Dunkels (2010).**

objetos inteligentes e a internet. A Figura 9 ilustra uma rede de internet estendida.

**Figura 9 – Rede internet estendida**



**Fonte: Vasseur; Dunkels (2010).**

#### 2.2.4 Protocolos e Padrões

Pela característica dos objetos inteligentes de possírem recursos limitados de processamento, economia de energia e baixa potência de transmissão foi necessário estabelecer padrões de comunicações específicos para este tipo de cenário, como por exemplo o padrão IEEE 803.15.4. Porém estes padrões não são totalmente compatíveis com os padrões da internet convêncional, como o TCP/IP. Para que as redes de objetos

inteligentes possam ter acesso à internet convencional é necessário adicionar na borda desta rede um gateway que seja responsável por tratar estas diferenças e servir de tradutor entre os protocolos de comunicação que atuam nos diferentes tipos de rede. Para tratar esta necessidade de comunicação das redes de baixa potência, a IETF criou grupos para estudo e definição de padrões. Os grupos são IPv6 in Low-Power Wireless Personal Area Networks Working Group e Routing over Low-Power and Lossy Links Working Group.

O IPv6 in Low-Power Wireless Personal Area Networks Working Group foi criado com o intuito de criar um padrão para que o protocolo IPv6 seja adaptado para uso em redes de baixa potência que fazem uso do padrão IEEE 802.15.4 nas camadas de enlace e física. Este grupo definiu o padrão IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (6LowPAN), que tem o objetivo de adaptar o *Maximum Transmission Unit* (MTU) de 1280 bytes do protocolo IPv6 para os limitados 127 bytes do padrão IEEE 802.15.4. O 6LowPAN faz esta adaptação provendo uma forma de fragmentar e depois remontar pacotes IPv6.

O Routing over Low-Power and Lossy Links Working Group foi criado com o intuito de criar um padrão para rotear pacotes IPv6 nas redes de baixa potência. Este grupo definiu o *IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks* (RPL) como protocolo de roteamento para redes de baixa potência. O RPL define uma árvore de roteamento utilizando o conceito de grafos acíclicos direcionados. Esta organização é orientada ao destino, sendo este destino o nó raiz que concentra o recebimento dos outros nós presentes na rede. Esta forma de organização é nomeada de *Destination Oriented Directed Acyclic Graph* (DODAG). A rede ainda pode conter mais de um DODAG, permitindo várias instâncias do RPL na mesma rede.

Assim como nas camadas inferiores do modelo *Open System Interconnection* (OSI), os padrões utilizados pela internet convencional não são adequados para as redes de baixa potência. O protocolo *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), por exemplo, que é utilizado para comunicações do tipo requisição/resposta entre hosts da internet, utiliza como protocolo de transporte o *Transmission Control Protocol* (TCP), que é orientado a conexão, causando maior processamento no host e overhead na rede. As soluções IoT são caracterizadas justamente pelo contrário, que é o mínimo de processamento possível e mínimo de overhead possível. Para este cenário de redes de baixa potência existe os protocolos IETF *Constrained Application Protocol* (CoAP) e o *Message Queuing Telemetry Transport for Sensors Networks* (MQTT-SN) que foram desenvolvidos para ambientes com restrições de memória, processamento e consumo de energia.

O protocolo IETF CoAP foi projetado para realizar a interoperabilidade com a web. Ele faz a transferência de documentos, assim como o HTTP, porém para dispositivos com restrições de processamento, memória e consumo de energia. A comunicação é baseada no *Representational State Transfer* (REST) do HTTP, a qual utiliza um arquitetura *stateless*, portanto sendo necessário informar todas os dados necessários na requisição para que esta seja processada. Esta característica permite uma maior escalabilidade em relação a protocolos *statefull*. A diferença em relação ao HTTP é que o CoAP utiliza o *User Datagram Protocol* (UDP) na camada de transporte, tornando mais adequado para soluções IoT. Para que seja possível a interoperabilidade do CoAP com um servidor HTTP é necessária a presença de um proxy para fazer a tradução necessária entre o protocolo HTTP e o CoAP.

O protocolo MQTT-SN foi projetado para que a troca de mensagens seja realizada no modelo *publish/subscribe*, fazendo o uso de um *broker* para gerenciar os tópicos necessários para solução. Assim como o CoAP, o MQTT-SN utiliza o UDP na camada de transporte, que o torna mais atrativo para restrições existentes nas soluções IoT. Ele é uma adaptação do protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) que utiliza o TCP como protocolo na camada de transporte. A presença de um *broker* na comunicação proporciona o desacoplamento entre os *hosts* que participam da comunicação, pois todos estes *hosts* são clientes do *broker*. Quando um *host* deseja receber determinada informação publicada em um tópico, basta que este o sobrecreva. Desta forma toda nova mensagem postada neste tópico, o *host* será notificado com o conteúdo da mensagem. Conseqüentemente, para enviar informações para os *hosts* interessados, basta que mensagens sejam publicadas nos tópicos específicos para o propósito da solução.

### 2.2.5 Sistemas Operacionais

Para que um objeto inteligente possa operar de acordo com o propósito a que lhe foi estabelecido é necessário o uso de um sistema operacional. Porém, diferentemente dos sistemas operacionais convencionais presentes em PCs, os objetos inteligentes precisam de sistemas operacionais que sejam menores e que façam uso de muito poucos recursos de processamento e memória. Entre os sistemas operacionais com estas características podemos citar o Contiki, TinyOS e RIOT.

O Contiki é um sistema operacional aberto projetado para internet das coisas, ajudando microcontroladores de baixo custo se conectarem à internet por implementar diversos padrões para internet das coisas. O Contiki é implementado na linguagem C e as

aplicações de IoT destinadas a serem executadas nele também devem ser implementadas na mesma linguagem.

O TinyOS também é um sistema operacional aberto criado para uso em redes de sensores. Ele usa uma arquitetura baseada em componentes que se comunicam através de interfaces, um modelo de execução baseado em eventos e tarefas. A implementação das aplicações é realizada na linguagem NesC, que é baseada na linguagem C.

O RIOT é um sistema operacional gratuito e de código aberto voltado para internet das coisas desenvolvido por uma comunidade que reúne empresas, acadêmicos e entusiastas, distribuídos em todo o mundo. Ele suporta a maioria dos dispositivos para soluções IoT, implementando padrões com por exemplo 6LoWPAN, RPL, e UDP (RIOT-OS, 2018).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo descrever os recursos de *hardware* e *software* que foram utilizados para o desenvolvimento da solução de irrigação do solo, juntamente com as etapas executadas para que fosse atingido o objetivo final do projeto.

Inicialmente serão relacionados os componentes de *hardware*, programas, ferramentas e tecnologias elencadas como necessárias para ser executar a inteligência específica de cada módulo definido pelo projeto. A seção é finalizada com a apresentação das etapas executadas para o desenvolvimento da solução.

#### 3.1 MATERIAIS

A Tabela 1 ilustra a relação de componentes de *hardware* e *software* necessários para o desenvolvimento do trabalho.

LAUNCHXL-CC2650 é um kit de desenvolvimento da *Texas Instruments* (TI) para a criação de sistemas embarcados. Possui como características (TEXAS INSTRUMENTS, 2018b):

- processador de 32 bits ARM Cortex M3 que executa a uma frequência de 48 MHz.
- 128KB de Flash / 28KB SRAM.
- Conversor analógico/digital de 12 bits.
- interfaces GPIO, I2C, SPI, UART, USB.
- Transceptor de RF 2.4GHz, compatível com Bluetooth, IEEE 802.15.4 PHY, e MAC.
- controle ultra low power para criar interface com sensores externos, coletando informações digitais e analógicas de forma autônoma enquanto o resto do sistema está em modo *sleep mode*.
- suporte a Bluetooth Low Energy Wireless.
- suporte a ZigBee Wireless.
- suporte a 6LoWPAN Wireless.

**Tabela 1 – Relação de materiais**

<b>Material</b>	<b>Tipo do Material</b>
LAUNCHXL-CC2650	Hardware
Shield Sensor Umidade Solo Higrômetro	Hardware
Shield Válvula Solenoide Água 12V	Hardware
Shield Sensor Fluxo de Água 1/2- YF-S201	Hardware
Shield Sensor de Umidade e Temperatura DHT-22	Hardware
Shield Sensor de Chuva	Hardware
Sensor de Luminosidade LDR 5mm	Hardware
Shield Sensor de Temperatura e Pressão do Ar BMP 280	Hardware
Raspberry PI 3 Model B	Hardware
Contiki	Software
Linguagem de Programação C	Software
6LBR	Software
Mosquito.rsmb	Software
Linguagem de Programação Java	Software
Tomcat	Software
MySql	Software
Code Composer Studio	Software
Draw.io	Software
Eclipse	Software
Advisor API	API

**Fonte: Autoria própria.**

Shield Sensor Umidade Solo Higrômetro é um sensor que tem o objetivo de ler as variações da umidade do solo. Ele possui duas saídas: uma digital e outra analógica. Pela digital, quando o sensor estiver seco, a saída do sensor ficará em estado alto e quando úmido, em estado baixo. Já pela analógica, é possível obter uma maior precisão do nível da umidade do solo, conectando a saída à um conversor analógico/digital. Ele precisa de uma fonte de tensão entre 3.3V e 5V (BETA COMERCIAL, 2018). Para a solução deste trabalho foi estabelecida a utilização da saída analógica, pois como os valores de referências são parametrizados em tempo de execução, o valor lido pelo sensor pode ser facilmente comparado aos valores de referência.

Shield Válvula Solenóide Água 12V é uma válvula que tem o objetivo de acionar ou interromper o fluxo do líquido que passa por seu interior. Quando ela recebe uma corrente elétrica, o êmbolo interno é acionado e conseqüentemente o fluxo do líquido interno é liberado. Na falta da corrente elétrica o fluxo é interrompido. Ele necessita de uma fonte de tensão de 12V para operar (USINAINFO, 2018).

Shield Sensor Fluxo de Água YF-S201 é um sensor que tem o objetivo de medir a



quantidade de água que passa pelo seu interior. Mede vazão de 1 a 30 litros por minuto, enviando pulsos ao microcontrolador. Ele necessita de uma tensão entre 4.5V e 18V para operar (USINAINFO, 2018).

Shield Sensor de Umidade e Temperatura DHT-22 é um sensor que tem o objetivo de ler as variações de temperatura e umidade do ar. As temperaturas registradas variam entre -40 e 80 graus Celsius. Os valores das umidades do ar registradas variam entre 0 e 100%. Ele possui uma saída digital, por onde é possível realizar as leituras da temperatura e umidade do ar (BETA COMERCIAL, 2018).

Shield Sensor de Chuva é um sensor que tem o objetivo de ler as variações de chuva do ambiente. Ele possui duas saídas: uma digital e outra analógica. Pela digital, quando o sensor estiver seco, a saída do sensor ficará em estado alto e quando úmido, em estado baixo. Já pela analógica, é possível obter uma maior precisão do nível da chuva, conectando a saída à um conversor analógico/digital. Ele precisa de uma fonte de tensão entre 3.3V e 5V (BETA COMERCIAL, 2018).

Sensor de Luminosidade LDR 5mm é um sensor que tem o objetivo de ler a variação da luminosidade do ambiente. O valor da luminosidade é convertido em valor de resistência. Quanto maior a luminosidade, maior a resistência e quanto menor a luminosidade, maior a resistência (USINAINFO, 2018).

Shield Sensor de Temperatura e Pressao de Ar BMP 280 é um sensor que tem o objetivo de ler variações da temperatura e pressão atmosférica. Seu padrão de conexão é o I2C. Ele necessita de uma tensão de 3.3V para operar (USINAINFO, 2018).

O Raspberry PI 3 Model B é um mini computador de baixo custo do tamanho de um cartão de crédito, concebido com o intuito principal para ser utilizado em projetos de programação, automação, robótica, internet das coisas entre outros. Ele tem como sistema operacional oficial o Raspbian, porém também permite a execuções de algumas distribuições linux e o windows 10 IoT. Para a excução do sistema operacional é necessário a utilização de um cartão de memória microSD, pois ele não possui dispositivo de armazenamento acoplado à sua placa. O modelo 3 Raspberry PI 3 Model B possui a seguinte especificação (THE RASPBERRY PI FOUNDATION, 2018):

- Processador Broadcom BCM2837 64bit ARMv8 Cortex-A53 Quad-Core.
- Clock de 1.2 GHz, Memória RAM de 1GB.
- Adaptador Wifi 802.11n integrado.

- Bluetooth 4.1 BLE integrado.
- Conector de vídeo HDMI.
- 4 portas USB 2.0.
- Conector Ethernet.
- Interface para câmera (CSI).
- Interface para display (DSI).
- Slot para cartão microSD.
- Conector de áudio e vídeo e GPIO de 40 pinos.

Para este projeto, o Raspberry PI 3 model B foi utilizado como roteador de borda entre a rede de sensores sem fio e a rede externa/internet, através da execução do programa 6LBR e também como broker MQTT-SN, através da execução do programa Mosquito.rsmb. O Raspbian foi utilizado como sistema operacional.

O Contiki é um sistema operacional open source para internet das coisas. Ele foi concebido com o intuito de operar em microcontroladores de baixa complexidade, baixo consumo de energia e com baixas taxas de transmissão de dados. Ele implementa diversos padrões para internet das coisas. Entre estes padrões estão: CoAP, MQTT, MQTT-SN, RPL, 6LoWPAN, IPV6, IEEE 802.15.4 entre outros (CONTIKI-OS.ORG, 2018). Portanto, possui características ideais para o desenvolvimento de soluções baseadas em internet das coisas. O Contiki será o sistema operacional a ser executado nos microcontroladores definidos para este projeto.

A linguagem de programação C foi criada nos anos 70 por Dennis Ritchie e Ken Thompson no AT&T Bell Labs e posteriormente utilizada para implementar o núcleo do sistema operacional Unix. É considerada uma linguagem de nível médio, pois combina aspectos de linguagens de alto nível com a funcionalidade da linguagem assembly (SHILDT, 1996). A linguagem C é amplamente utilizada, principalmente para a programação de sistemas embarcados. Neste quesito é a uma das linguagens mais utilizadas segundo o IEEE Spectrum, 2018 (IEEESPECTRUM, 2018). A linguagem C é utilizada para a programação das aplicações embarcadas no Contiki e foi utilizada para implementar os módulos embarcados deste projeto.

6LBR é uma solução de roteador de borda 6LoWPAN/RPL, que faz a ligação de redes de sensores sem fio com redes IP. Ele pode ser executando tanto em *hardwares*

embarcados como e máquinas linux. Entre os modos de operação possíveis estão: *smart bridge*, *router* e *transparent bridge* (CETIC, 2018). No modo *smart bridge* ocorre a ligação de redes IPv6 com redes RPL de sensores sem fio *mesh*, agindo como um *proxy Neighbor Discovery Proxies* (NDP) no lado *Ethernet* da rede e usa os parâmetros NDP para a configurar a rede de sensores sem fio *mesh*. No modo *router* ele age como um roteador IPv6 interconectando duas sub-redes. A rede de sensores sem fio é gerenciada pelo RPL, enquanto que a rede Ethernet é gerenciada pelo NDP. No modo *transparent bridge* ele age como se fosse um switch, desta maneira, todos os pacotes que são destinados para a interface IEEE 802.15.4 são direcionados para o segmento da rede de sensores sem fio e os pacotes destinados para a *interface Ethernet* são direcionados para a interface Ethernet. O 6LBR foi utilizado como roteador de borda entre a rede criada pelos módulos embarcados e a internet. O modo de operação utilizado foi o *smart bridge*.

Mosquito.rsmb é uma implementação servidora dos protocolos MQTT e MQTT-SN. Inicialmente criado em código proprietário pela IBM, era uma implementação minimalista do protocolo MQTT. Posteriormente teve seu código aberto sendo disponibilizado em várias distribuições linux (MQTT.ORG, 2018). Mosquito.rsmb será utilizado como *broker* MQTT-SN para que seja possível a utilização do protocolo MQTT-SN para a troca de mensagens entre os módulos deste projeto. Ele será instalado no Raspberry PI 3 Model B.

Java é uma linguagem orientada a objetos criada pela Sun Microsystems na década de 90. Entre as principais características estão:

- sintaxe similar a C e C++.
- a portabilidade, pois o código gerado é compilado para um bytecode e posteriormente interpretado por uma máquina virtual conhecida como *Java Virtual Machine* (JVM).
- é distribuída com grande variedade de bibliotecas e APIs.
- possui desalocação automática de memória.
- possui uma comunidade ativa de usuários.

Em 2008 a Sun Microsystems, criadora da linguagem, é adquirida pela Oracle Corporation por US\$ 7,4 bilhões. A linguagem de programação Java foi utilizada para a implementação da aplicação web deste projeto.

Tomcat é um servidor web Java de código aberto que implementada as especificações Java Servlet, JavaServer Pages, Java Expression Language e Java WebSocket definidas pela Java Community Process (APACHE SOFTWARE FOUNDATION, 2018). O Tomcat foi utilizado como servidor web para a execução da aplicação web Java deste projeto.

MySQL é um sistema gerenciador de banco de dados relacional de código aberto que faz uso da linguagem *Structure Query Language* (SQL) para a manipulação dos dados. Foi criada em 1995 pela MySQL AB (ORACLE, 2018). O MySQL será o banco de dados para armazenar as leituras das diversas variáveis tratadas pelos sensores e atuadores da solução.

Code Composer Studio é uma IDE de desenvolvimento compatível com microcontroladores e processadores embarcados da TI utilizada para a criação de aplicações embarcadas. Entre os principais recursos estão um compilador C/C++, editor de código, depurador de código e ambiente para a contração de builds (TEXAS INSTRUMENTS, 2018a). A IDE Code Composer Studio foi utilizada para implementar os módulos embarcados deste projeto.

Draw.io é um editor gráfico para a criação de diversos tipos de desenhos, gráficos, fluxogramas e diagramas que funciona *online*, portanto sem a necessidade de instalação de programas. Porém também possui a opção *offline*, permitindo a sua instalação na máquina física. Ele permite salvar os desenhos em diversos formatos e guardá-los de forma integrada com ferramentas como o Google Drive, OneDrive, Dropbox, GitHub entre outros (JGRAPH LTD, 2018). O Draw.io foi utilizado para elaborar os diagramas de fluxogramas da modelagem deste projeto.

Eclipse é uma IDE de desenvolvimento Java de código livre, e também compatível com diversas linguagens de programação como por exemplo C, C++, Python, PHP entre outras. Foi desenvolvida inicialmente pela IBM que posteriormente abriu o código e disponibilizou para a contribuição da comunidade de desenvolvedores. Ela permite também a instalação de plugins com o intuito de personalizar o desenvolvimento com ferramentas que de alguma forma adicione mais facilidades no momento da codificação (ECLIPSE FOUNDATION, 2018). O Eclipse foi utilizado para implementar a aplicação web Java deste projeto.

Advisor API é uma API REST disponibilizada na internet pela empresa brasileira Climatempo, que oferece serviços de meteorologia. Ela disponibiliza a previsão do tempo e outro dados meteorológicos em tempo real. Esta API foi utilizada para recuperar a

previsão de chuva prevista para os próximo 7 dias e também nas próximas 72 horas.

## 3.2 MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho inicialmente foi definido o escopo da solução, identificando as funcionalidades necessárias para atender este escopo.

Com as funcionalidades definidas, foi realizada a modelagem da solução, identificando os módulos embarcados, web e mobile necessários, suas respectivas responsabilidades para o adequado atendimento do escopo da solução e protocolos de comunicação necessários para a troca de informações entre os módulos.

Na sequência foi realizado um levantamento dos recursos de *hardware* necessários para o desenvolvimento dos módulos embarcados. Neste levantamento foi definido o microcontrolador a ser utilizado pelos módulos embarcados. Em consequência da definição do microcontrolador, foi definido o sistema operacional, a IDE e linguagem de programação a ser utilizada para codificar as funcionalidades designadas para cada módulo embarcado da solução. Ainda no levantamento de *hardware* foram definidos os sensores e atuadores a serem acoplados em cada módulo embarcado da solução e *hardware* e *software* necessário para servir de roteador de borda para a rede de sensores.

Em seguida foi definida a tecnologia para implementação do módulo web, englobando IDE, linguagem para a programação do módulo web, servidor web para executar o módulo web e sistema gerenciador de banco de dados para armazenamento das informações geridas pela solução.

Com a modelagem e requisitos de *hardware* e *software* definidos, foi realizada a implementação de fato de cada módulo definido para atender a solução.

Com a solução em funcionamento foi possível acompanhar a troca de informações entre os módulos da solução e observar como cada módulo atuava para atender os requisitos da solução.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo tem como objetivo descrever o sistema proposto para realizar o controle e automação da irrigação de culturas agrícolas durante todo o seu ciclo de produção. Serão abordados o escopo do sistema, a modelagem e a implementada a solução.

### 4.1 ESCOPO DA SOLUÇÃO

Este trabalho consiste em desenvolver uma solução de irrigação inteligente, que irá monitorar a umidade do solo de culturas agrícolas, acionando o fluxo de água até a plantação quando a umidade do solo estiver em um nível considerado baixo ou interrompendo este mesmo fluxo de água quando a umidade do solo estiver em um nível adequado, segundo os critérios para a determinada cultura que está sendo monitorada.

A solução é implementada baseada em conceitos de internet das coisas, sendo constituída por módulos embarcados equipados com sensores e/ou atuadores que se comunicam através de uma rede de sensores sem fio endereçados por IPv6. Portanto, os módulos embarcados são alimentados por bateria, com baixa capacidade de processamento e disponibilidade de memória, baixa taxa de transmissão e com uma topologia dinâmica. Os módulos embarcados de sensores e atuadores utilizarão como protocolo de comunicação na camada de aplicação o MQTT-SN, que faz uso do protocolo UDP na camada de transporte. Para o roteamento das mensagens trocadas entre os módulos será utilizado o RPL. Nas camadas de enlace e física será utilizado o padrão IEEE 802.15.4.

Como principais características e funcionalidades estão:

- funcionalidade para a parametrização da faixa de umidade adequada para um determinado tipo de cultura.
- leitura, de tempos em tempos, da umidade atual do solo da propriedade rural.
- acionamento e interrupção da irrigação das plantações monitoradas de acordo com a umidade atual do solo e a parametrização da cultura monitorada.
- leitura da presença ou não de chuva na propriedade rural, para interromper a irrigação na presença de chuva.
- leitura de variáveis atmosféricas do microclima da propriedade rural para determinar um coeficiente de perda de umidade do solo.

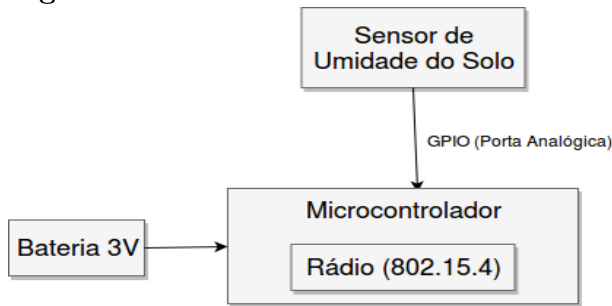
- funcionalidade para parametrização de previsões de chuva para a propriedade rural, que junto com o coeficiente de perda de umidade do solo atual será possível realizar uma projeção da quantidade de umidade do solo necessária para que a irrigação seja interrompida e permaneça desta maneira até a chegada da chuva, garantindo que a umidade do solo não atinja o limite mínimo de umidade do solo previsto para o tipo de cultura monitorada.
- integração a centros meteorológicos para que informações de previsão de chuva para a propriedade rural sejam recuperadas automaticamente desses centros meteorológicos, sem a necessidade de informar manualmente a previsão.
- funcionalidade para consultar o histórico de umidades do solo da propriedade rural.
- funcionalidade para consultar o histórico de acionamentos da irrigação da propriedade rural.
- funcionalidade para consultar o histórico de consumo de água pela irrigação da propriedade rural.
- funcionalidade para consultar o histórico das variáveis atmosféricas na propriedade rural.

## 4.2 MODELAGEM DA SOLUÇÃO

A solução fará uso de 5 tipos de módulos. São eles: módulo embarcado sensor da umidade do solo, módulo embarcado atuador da irrigação do solo, módulo embarcado estação meteorológica, módulo web servidor central e módulo mobile.

O módulo embarcado sensor da umidade do solo tem como principal responsabilidade ler a umidade atual do solo em que este estiver inserido e transmitir o valor da umidade lida para outros módulos da solução, que farão uso desta para tomada de decisão no que diz respeito ao acionamento ou interrupção da irrigação e geração de base histórica para a realização de consultas. Este módulo é composto por um sistema embarcado, que executará as funcionalidades designadas ao módulo, um microcontrolador, onde será executado o sistema embarcado desenvolvido, um sensor de umidade do solo, o qual será lido pelo microcontrolador para monitoramento da umidade de momento do solo e uma bateria de 3 volts que servirá de fonte de alimentação para o microcontrolador. A Figura 10 ilustra o módulo embarcado sensor de umidade.

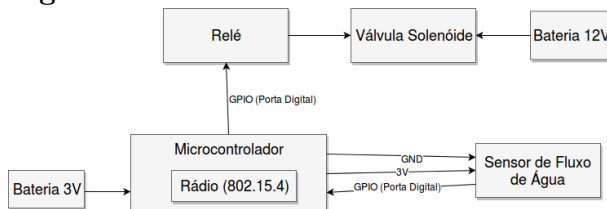
**Figura 10 – Módulo embarcado sensor de umidade**



**Fonte: Autoria própria.**

O módulo embarcado atuador de irrigação é responsável principalmente por acionar ou interromper fisicamente o fluxo de água da irrigação e transmitir a situação atual da irrigação para outros módulos da solução, que farão uso desta para tomada de decisão no que diz respeito ao seu funcionamento e geração de base histórica para a realização de consultas. Este módulo é composto por: um sistema embarcado, que executará as funcionalidades designadas ao módulo, um microcontrolador, onde será executado o sistema embarcado desenvolvido, uma válvula solenóide responsável por permitir ou interromper o fluxo de água da irrigação, um relé que irá acionar quando necessário a válvula solenóide, um sensor de fluxo de água, para monitoramento da quantidade de água utilizada pela irrigação, uma bateria de 3 volts que servirá de fonte de alimentação para o microcontrolador, uma bateria de 12 volts que servirá de fonte de alimentação para a válvula solenóide. A Figura 11 ilustra a o módulo embarcado atuador de irrigação.

**Figura 11 – Módulo embarcado atuador de irrigação**



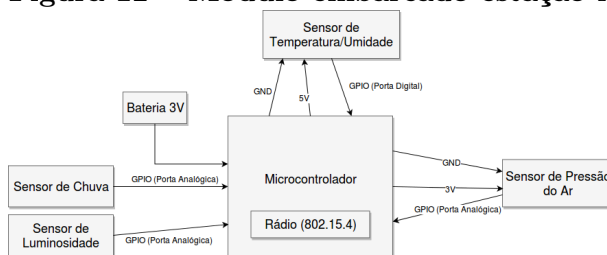
**Fonte: Autoria própria.**

O módulo embarcado estação meteorológica é responsável principalmente por ler variáveis atmosféricas do microclima da propriedade rural onde a solução está implantada e transmití-las para outros módulos da solução, que farão uso desta para tomada de decisão no que diz respeito ao acionamento ou interrupção da irrigação e geração de base histórica para a realização de consultas. Este módulo é composto por: um sistema embarcado, que executará as funcionalidades designadas ao módulo, um microcontrolador, onde será



executado o sistema embarcado desenvolvido, um sensor de chuva, para identificar a presença ou não de chuva na propriedade rural, um sensor de temperatura e umidade do ar, para identificar a temperatura e umidade relativa do ar na propriedade rural, um sensor de pressão atmosférica, para identificar a pressão do ar na propriedade rural, um sensor de luminosidade, para identificar a incidência de sol/luz na propriedade rural e uma bateria de 3 volts que servirá de fonte de alimentação para o microcontrolador. A Figura 12 ilustra a o módulo embarcado estação meteorológica.

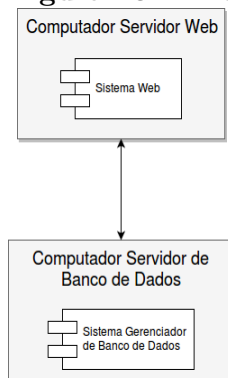
**Figura 12 – Módulo embarcado estação meteorológica**



**Fonte: Autoria própria.**

O módulo web servidor central é responsável principalmente por receber e armazenar todas as informações geradas pelos módulos embarcados sensor de umidade do solo, atuador de irrigação e estação meteorológica. As informações armazenadas servirão de insumo para a geração de consultas históricas e consultas da situação atual de funcionamento da solução de irrigação. Este módulo é composto por: um sistema web, que executará as funcionalidades designadas ao módulo, um computador servidor, onde será executado o sistema web desenvolvido e um sistema gerenciador de banco de dados e um computador servidor, onde será executado um sistema gerenciador de banco de dados. A Figura 13 ilustra a o módulo web servidor central.

**Figura 13 – Módulo web servidor central**

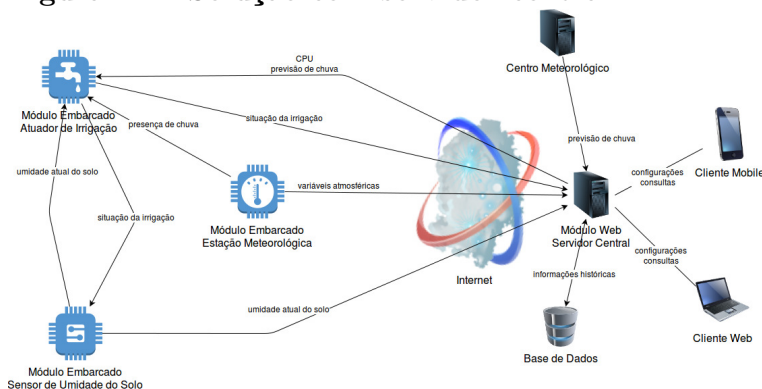


**Fonte: Autoria própria.**

O módulo mobile é responsável principalmente por fornecer funcionalidades para a parametrização da solução de irrigação. Este módulo é composto por: um sistema mobile, que executará as funcionalidades designadas ao módulo e um dispositivo mobile onde será executado este sistema.

A solução permite também dois cenários de funcionamento. Um em que a propriedade rural fará uso do módulo web servidor central, para armazenameto do histórico das leituras das diversas variáveis tratadas pela solução, e outro em que não existirá a presença deste módulo web servidor central. Neste primeiro cenário, a presença ou não de internet na propriedade rural poderá determinar se o módulo web servidor central estará na rede interna ou em algum centro de dados externo à propriedade rural. A presença da internet também permitirá que este mesmo módulo web servidor central seja integrado à centros meteorológicos externos com o intuito de recuperar a previsão de chuvas para a região da propriedade rural. A Figura 14 ilustra a solução de irrigação nas propriedades que fazem uso do módulo web servidor central.

**Figura 14 – Solução com servidor central**

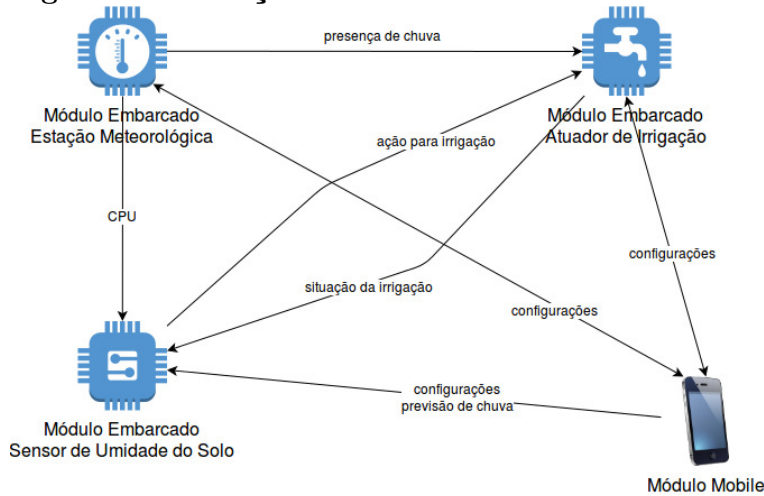


**Fonte: Autoria própria.**

No cenário que não existir a presença do módulo web servidor central, não ocorrerá o armazenamento dos históricos das diversas variáveis tratadas pela solução, impedindo a realização de consultas históricas sobre a atuação da irrigação na propriedade rural. A Figura 15 ilustra a solução de irrigação nas propriedades que não fazem uso do módulo web servidor central.

A decisão de utilizar ou não um módulo web servidor central terá influência no custo da solução, sendo necessário realizar uma análise do custo x benefício em manter um servidor web para a geração de consultas históricas sobre o controle da irrigação da propriedade rural.

**Figura 15 – Solução sem servidor central**



**Fonte: Autoria própria.**

### 4.3 CONTROLE DA UMIDADE DO SOLO

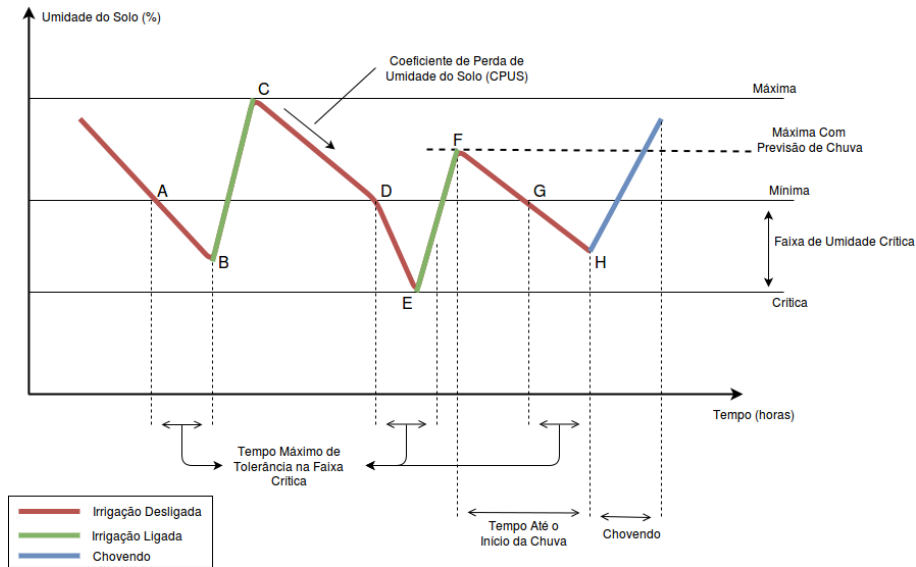
Para que seja possível controlar a umidade do solo da propriedade rural alvo da solução, será necessário que a mesma seja parametrizada com valores que serão utilizados como referência para tomada de decisão no que se refere ao acionamento ou interrupção do fluxo da irrigação. Os valores necessários para realizar este controle são: umidade máxima, umidade mínima, umidade crítica e tempo de tolerância da umidade na faixa crítica.

A Figura 16 ilustra os valores da parametrização da solução, para o controle da umidade a ser realizado pela solução de irrigação do solo, dispostos em um gráfico mostrando a variação da umidade ao longo do tempo.

Quando o fluxo de irrigação estiver acionado, com o intuito de aumentar o valor da umidade do solo da propriedade rural, e o valor da umidade do solo atingir o valor máximo da umidade parametrizado, a solução tomará a decisão de interromper o fluxo de irrigação. Este momento é sinalizado no ponto C da Figura 16.

Quando o fluxo de irrigação estiver interrompido, fazendo com que gradativamente o valor da umidade do solo diminua, e o valor da umidade do solo atingir o valor mínimo de umidade parametrizado, a solução iniciará uma contagem de tempo, com o intuito de determinar a quantidade de tempo que o valor da umidade do solo está na faixa crítica. Este momento é sinalizado no ponto A da Figura 16. Se o tempo, de permanência da umidade nesta faixa crítica, atingir o tempo parametrizado pelo valor do tempo de tolerância da umidade na faixa crítica, o fluxo da irrigação será acionado. Este

**Figura 16 – Gráfico de controle da umidade com faixa crítica - cenário 1**



**Fonte: Autoria própria.**

momento é sinalizado pelo ponto B da Figura 16.

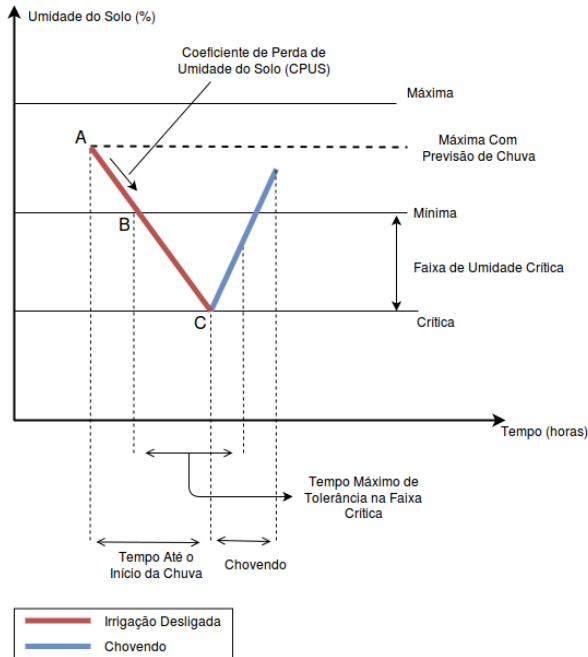
Quando o fluxo de irrigação estiver interrompido e o valor da umidade do solo atingir o valor crítico de umidade parametrizado antes que o tempo de tolerância da umidade na faixa crítica seja atingido, o fluxo de irrigação também será imediatamente acionado. O ponto D da Figura 16 sinaliza o momento do início do tempo da permanência da umidade na faixa crítica e o ponto E, o momento em que o valor da umidade atinge o valor crítico antes do fim do tempo de tolerância nesta faixa crítica.

Quando a solução receber uma notificação de previsão de tempo até o início da chuva, esta irá calcular uma nova umidade máxima de forma que, de acordo com o coeficiente atual de perda de umidade do solo e o tempo de tolerância da umidade na faixa crítica, o momento em que a umidade do solo irá atingir o tempo máximo de tolerância na faixa crítica seja exatamente o mesmo do previsto para o início da chuva. A nova umidade máxima é sinalizada na Figura 16 pelo ponto F, e o ponto H sinaliza o tempo previsto para início da chuva e limite máximo de permanência da umidade na faixa crítica.

Outra situação possível é quando o coeficiente da perda de umidade do solo está muito acentuado, e fazendo-se uma projeção da variação da umidade do solo ao longo do tempo, é identificado que o valor da umidade atingirá o valor crítico antes do tempo de tolerância máximo na faixa crítica. Este momento é sinalizado pelo ponto C da Figura 17. Nesta situação a nova umidade máxima também será calculada de forma que o momento em que a umidade atingirá o valor crítico seja exatamente o mesmo previsto para o início

da chuva.

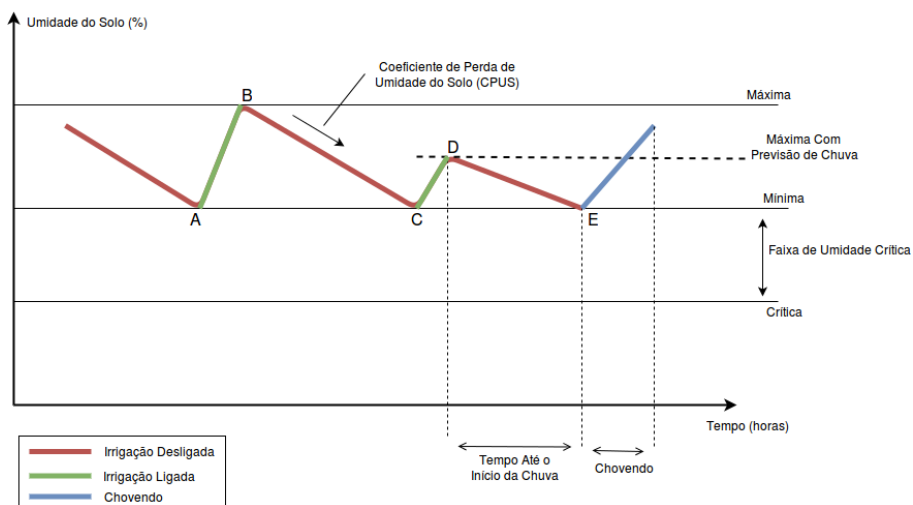
**Figura 17 – Gráfico de controle da umidade com faixa crítica - cenário 2**



Fonte: Autoria própria.

A solução também pode estar parametrizada de forma que não exista tempo de tolerância máxima na faixa crítica. A Figura 18 ilustra o controle da umidade do solo nesta situação.

**Figura 18 – Gráfico de controle da umidade sem faixa crítica**



Fonte: Autoria própria.

Nesta situação, quando o fluxo de irrigação estiver interrompido e não existir tempo de tolerância da umidade na faixa crítica (tempo de tolerância da umidade

parametrizado com o valor zero), sempre que a umidade do solo atingir o valor mínimo de umidade parametrizado, o fluxo da irrigação será acionado, sendo desnecessário acionar contadores de tempo e validação da umidade crítica parametrizada. Este momento é sinalizado pelo ponto A da Figura 18. Quando a solução receber uma notificação de previsão de tempo até o início da chuva, esta irá calcular uma nova umidade máxima considerando apenas o valor da umidade mínima parametrizado. Portanto será estabelecido um novo valor máximo de modo que fazendo-se uma projeção da variação da umidade do solo ao longo do tempo, esta irá atingir o valor mínimo exatamente no mesmo momento do início da chuva. Este momento é sinalizado pelo ponto E na Figura 18.

Para realizar o cálculo da nova umidade máxima quando ocorrer uma notificação de previsão de tempo até o início da chuva, é considerado como premissa de que o coeficiente de perda de umidade do solo é calculado pela relação entre a variação da umidade do solo pelo tempo. Como o objetivo principal deste trabalho não é determinar um cálculo mais fiel possível deste coeficiente de perda de umidade do solo, será considerado que a relação entre a variação da umidade e o tempo seja linear. Com esta premissa, pode-se determinar o cálculo do coeficiente de perda de umidade do solo pela equação (1):

$$cpus = \frac{ui - uf}{t} \quad (1)$$

Onde  $cpus$  é o coeficiente de perda de umidade do solo,  $ui$  é a umidade do solo inicial,  $uf$  é umidade final do solo e  $t$  o tempo de variação entre a umidade inicial e final.

Para a situação em que não exista a parametrização do tempo máximo de permanência da umidade na faixa crítica, o valor da umidade poderá diminuir até o limite estipulado pelo valor da umidade mínima parametrizada. Portanto, para calcular o valor da nova umidade máxima, as variáveis da equação (1) devem ser substituídas da seguinte forma:  $cpus$  pelo coeficiente de perda de umidade do solo atual ( $cpusa$ ),  $ui$  será a nova umidade máxima do solo a ser calculada ( $umidMax$ ),  $uf$  pela umidade mínima do solo parametrizada ( $umidMin$ ) e  $t$  pelo tempo até o início da chuva ( $tic$ ). Logo a equação (2) demonstra o cálculo da nova umidade máximo do solo para este cenário.

$$umidMax = umidMin + (cpusa * tic) \quad (2)$$

Para o cenário em que exista a parametrização do tempo máximo de permanência

da umidade na faixa crítica, é possível ocorrer duas situações conforme já ilustrados nas figuras 16 e 17. A Figura 16 demonstra a situação em que o tempo de permanência da umidade na faixa crítica é atingido antes que seja atingido o valor da umidade crítica parametrizada. Já a Figura 17 demonstra a situação em que o valor da umidade do solo atinge o valor da umidade crítica parametrizada antes do tempo de permanência da umidade na faixa crítica seja atingido. Portanto para calcular o valor da nova umidade máxima, será necessário determinar primeiramente qual o valor da umidade final que será atingido após o tempo de tolerância máximo da permanência da umidade na faixa crítica. Se este valor previamente calculado for menor do que o valor da umidade crítica parametrizada, então este valor da umidade crítica é que será considerada a umidade final na equação para cálculo da nova umidade máxima. E se este valor previamente calculado for maior do que o valor da umidade crítica parametrizada, então este valor previamente calculado será considerado o valor da umidade final na equação para cálculo da nova umidade máxima. Para calcular o valor da umidade final após o tempo de tolerância máximo da permanência da umidade na faixa crítica, as variáveis da equação (1) devem ser substituídas da seguinte forma:  $c_{pus}$  pelo coeficiente de perda de umidade do solo atual ( $c_{pusa}$ ),  $u_i$  pela umidade mínima parametrizada ( $umidMin$ ),  $u_f$  será a umidade final atingida após o tempo de tolerância ( $umidFim$ ) e  $t$  o tempo de tolerância máximo da permanência da umidade na faixa crítica ( $tmc$ ). Logo a equação (3) demonstra o cálculo da umidade final prévia.

$$umidFim = umidMin - (c_{pusa} * tmc) \quad (3)$$

Conforme já descrito, se a umidade final após o término do tempo de tolerância máximo da umidade na faixa crítica for menor do que o valor da umidade crítica parametrizada, as variáveis da equação (1) devem ser substituídas da seguinte forma:  $c_{pus}$  pelo coeficiente de perda de umidade do solo atual ( $c_{pusa}$ ),  $u_i$  será a nova umidade máxima do solo a ser calculada ( $umidMax$ ),  $u_f$  pela umidade crítica do solo parametrizada ( $umidCrit$ ) e  $t$  pelo tempo até o início da chuva ( $tic$ ). Logo a equação (4) demonstra o cálculo da nova umidade máxima para este cenário:

$$umidMax = umidCrit + (c_{pusa} * tic) \quad (4)$$

Se a umidade final após o término do tempo de tolerância máximo da umidade na faixa crítica for maior do que o valor da umidade crítica parametrizada, as variáveis

da equação (1) devem ser substituídas da seguinte forma:  $cp$  pelo coeficiente de perda de umidade do solo atual ( $cp_{usa}$ ),  $u_i$  será a nova umidade máxima do solo a ser calculada ( $umidMax$ ),  $u_f$  pela umidade final após o término do tempo de tolerância máximo da umidade na faixa crítica ( $umidFim$ ) e  $t$  pelo tempo até o início da chuva ( $tic$ ). Logo a equação (5) demonstra o cálculo da nova umidade máxima para este cenário:

$$umidMax = umidFim + (cp_{usa} * tic) \quad (5)$$

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

Com a definição da utilização do MQTT-SN como protocolo de comunicação entre os módulos da solução, o primeiro passo a ser executado nos módulos embarcados, após estes serem ligados, é que seja estabelecida uma conexão com o broker MQTT-SN definido para a solução. Assim que esta conexão seja estabelecida, o módulo embarcado inicia os passos para realizar as configurações necessária para começar a operar de acordo com a sua responsabilidade dentro do contexto da solução de irrigação. Esta configuração consiste em sobrescrever tópicos do broker MQTT-SN, para o recebimento de mensagens, e se registrar em tópicos do mesmo broker MQTT-SN para enviar aos interessados mensagens produzidas pelo módulo embarcado. Portanto, para cada tipo de módulo embarcado da solução, boa parte dos tópicos a serem sobrescritos ou registrados como publicadores, serão diferentes. Dependendo se o módulo web servidor central estiver presente ou não na solução, o mesmo tipo de módulo embarcado também terá alguma diferença nos tópicos a serem configurados.

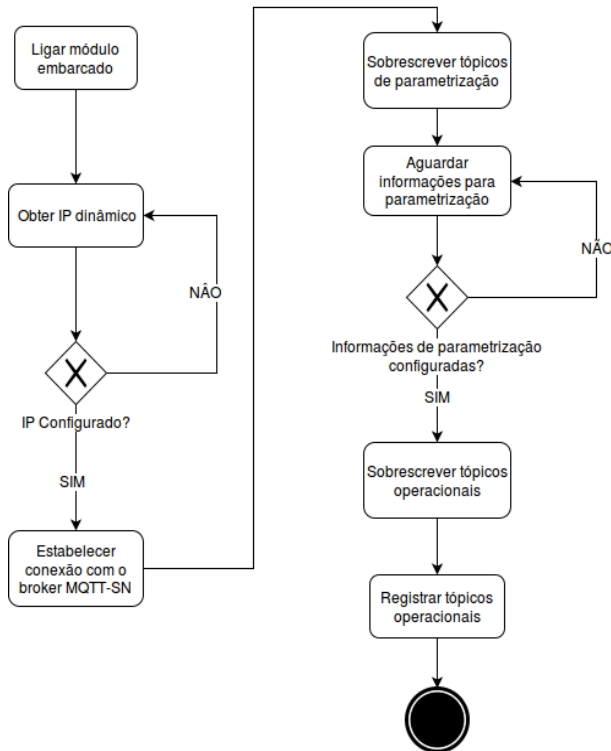
Após a realização das configurações dos tópicos necessários, os módulos embarcados passarão a operar de acordo com as suas respectivas responsabilidades, enviando e tratando o recebimentos de mensagens.

Para cada tópico sobrescrito no broker MQTT-SN pelo módulo embarcado, existirá um processo responsável associado para tratar o recebimento das mensagens publicadas neste tópico. Da mesma forma, para cada tópico registrado no broker MQTT-SN para a publicação de mensagens, existirá um processo responsável por produzir e publicar informações neste tópico.

A Figura 19 ilustra a solução de irrigação nas propriedades que fazem uso do módulo web servidor central.



**Figura 19 – Fluxo para configuração dos módulos embarcados**



**Fonte: Autoria própria.**

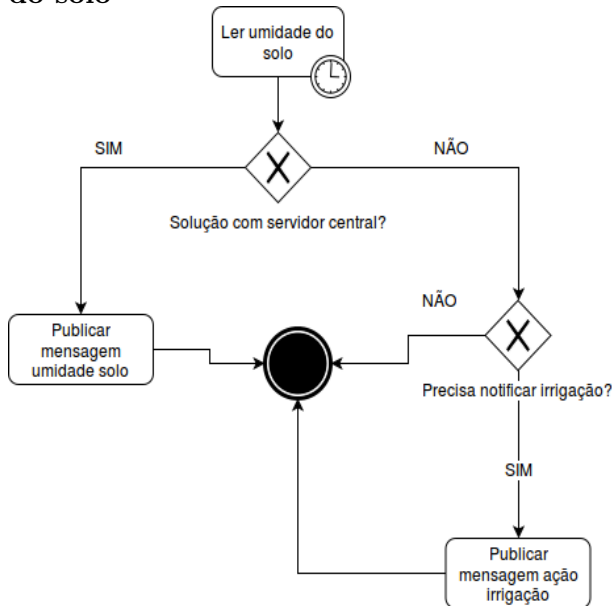
#### 4.4.1 Módulo Embarcado Sensor de Umidade do Solo

A Figura 20 ilustra os passos codificados para tratar as principais responsabilidades do módulo embarcado sensor de umidade do solo.

No passo ler umidade do solo é recuperado o valor da umidade atual do solo. Este passo é executado de 10 em 10 minutos quando a irrigação não estiver ligada e de 1 em 1 minuto quando esta mesma irrigação estiver ligada. O motivo da diminuição da frequência de leitura quando a irrigação estiver ligada é porque nesta situação a tendência é que o valor da umidade do solo mude mais rapidamente em relação à situação da irrigação desligada. Com o intuito de irrigar o mínimo possível, é necessário que a verificação do valor atual da umidade do solo seja realizada com maior frequência para que se este valor atinja a umidade máxima parametrizada, a irrigação seja interrompida.

Se a solução estiver configurada no cenário com a presença do servidor web central, o valor da umidade será enviado para o módulo embarcado atuador de irrigação e para o módulo web central, para que estes façam uso dessa informação. O módulo embarcado atuador de irrigação utilizará esta informação para tomar a decisão de acionar ou interromper a irrigação de acordo com a parametrização de umidade vigente no

**Figura 20 – Fluxo de responsabilidades do módulo embarcado sensor de umidade do solo**



**Fonte: Autoria própria.**

momento, pois neste cenário, ele será o responsável por realizar o controle da umidade do solo. O módulo web servidor central irá persistir o valor da umidade do solo no banco de dados para que este esteja disponível em consultas históricas das umidades do solo da propriedade rural.

Se a solução estiver configurada para o cenário sem a presença do servidor web central, na sequência é verificado se é necessário notificar o módulo atuador de irrigação quanto à necessidade de acionamento ou interrupção da irrigação. Se sim, a ação necessária será enviada para o módulo embarcado atuador de irrigação. Se não, não será tomada nenhuma ação. Esta decisão é tomada de acordo com a parametrização de umidade vigente no momento, pois neste cenário, o próprio módulo embarcado sensor de umidade será responsável por realizar o controle da umidade do solo. Isso ocorre porque como não será necessário persistir o valor da umidade do solo lida para fins de histórico, neste cenário o módulo embarcado poderá economizar a energia gasta para transmitir de tempos em tempos o valor da umidade, transmitindo somente quando existir a real necessidade de se tomar alguma ação em relação ao fluxo de irrigação.

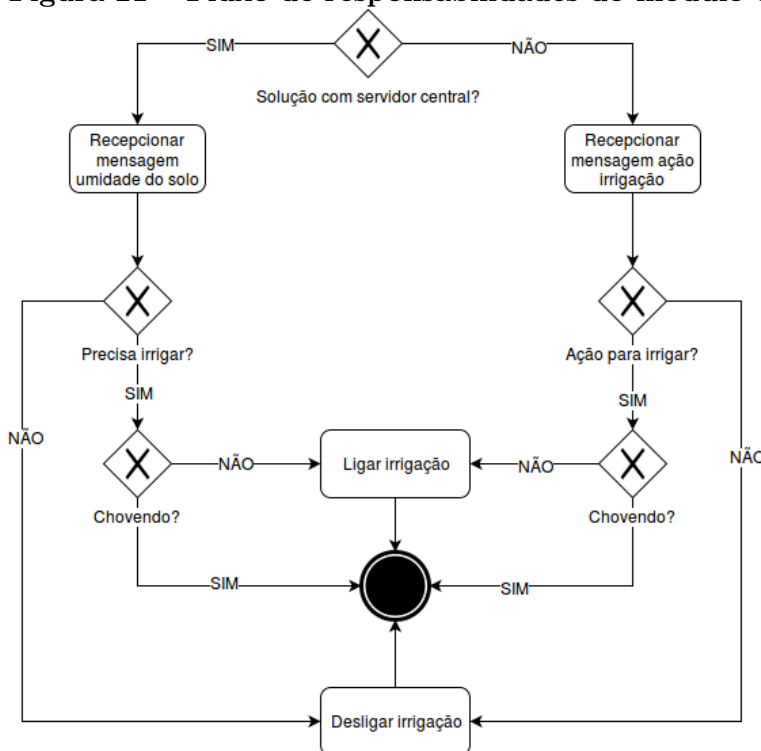
Ainda neste cenário sem a presença do módulo servidor web central e por consequência este módulo embarcado ficar com a responsabilidade de controlar a umidade do solo, ele ainda trata o recebimento de possíveis previsões de chuva para a propriedade rural e do coeficiente de perda de umidade do solo. Estas informações serão necessárias

para que seja determinado o valor da umidade máxima de momento, que será utilizado na tomada de decisão de interromper ou não o fluxo da irrigação.

#### 4.4.2 Módulo Embarcado Atuador de Irrigação

A Figura 21 ilustra os passos codificados para tratar as principais responsabilidades do módulo embarcado atuador de irrigação.

**Figura 21 – Fluxo de responsabilidades do módulo embarcado atuador de irrigação**



**Fonte: Autoria própria.**

Se a solução estiver configurada no cenário com a presença do servidor web central, este módulo embarcado ficará aguardando a chegada de mensagens contendo o valor da umidade do solo atual. De posse deste valor, será tomada a decisão de acionar ou interromper a irrigação de acordo com a parametrização de umidade vigente no momento, pois neste cenário, este módulo embarcado será o responsável por realizar o controle da umidade do solo. Se, baseado na parametrização de momento, for decidido pelo acionamento da irrigação, ainda é verificado se existe presença de chuva na propriedade rural. Na presença de chuva, a irrigação não será acionada, pois o solo já estará sendo irrigado naturalmente pela natureza e na ausência de chuva, a irrigação será acionada conforme a decisão. E se, baseado na mesma parametrização de momento, for decidido pela interrupção da irrigação, esta será realizada imediatamente.

Ainda neste cenário com a presença do módulo servidor web central e por consequência este módulo embarcado ficar com a responsabilidade de controlar a umidade do solo, ele ainda trata o recebimento de possíveis previsões de chuva para a propriedade rural e do coeficiente de perda de umidade do solo. Estas informações serão necessárias para que seja determinado o valor da umidade máxima de momento, que será utilizado na tomada de decisão de interromper ou não o fluxo da irrigação.

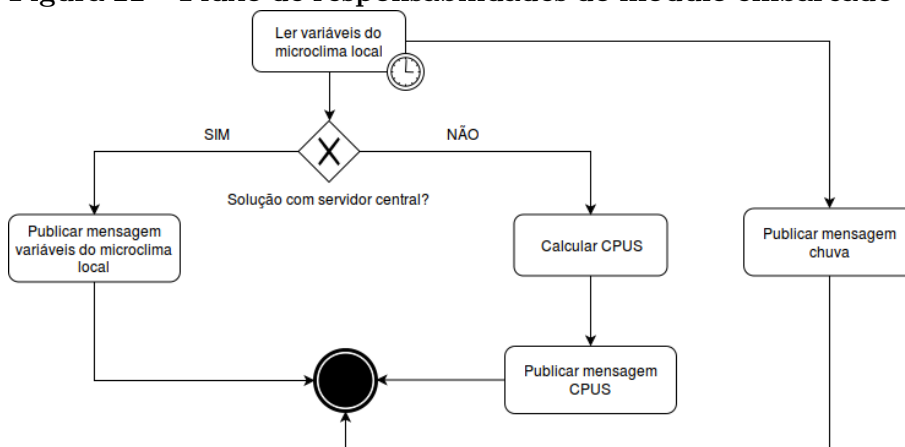
Se a solução estiver configurada no cenário sem a presença do servidor web central, este módulo embarcado ficará aguardando a chegada de mensagens contendo o valor da ação necessária a ser tomada em relação a irrigação. Portanto neste cenário a decisão de acionar ou interromper a irrigação não fica sob responsabilidade deste módulo embarcado, mas sim do módulo embarcado sensor de umidade. Mas chegando uma ação para que o fluxo de irrigação seja acionado, ainda é verificada a presença ou não de chuva. Sem a presença de chuva, a irrigação será imediatamente acionada. Caso contrário, não será necessário este acionamento.

Este módulo embarcado ainda trata o recebimento de mensagens indicando a presença ou não de chuva na propriedade rural. Quando este módulo é notificado com a informação da presença de chuva, se o fluxo de irrigação estiver ligado, este será imediatamente desligado.

#### 4.4.3 Módulo Embarcado Estação Meteorológica

A Figura 22 ilustra os passos codificados para tratar as principais responsabilidades do módulo embarcado estação meteorológica.

**Figura 22 – Fluxo de responsabilidades do módulo embarcado estação meteorológica**



Fonte: Autoria própria.

No passo ler variáveis do microclima local são recuperados os valores da temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica, luminosidade e presença de chuva na propriedade rural em que a solução está implantada. A leitura da presença de chuva é realizada de 1 em 1 minuto, enquanto que as demais variável do microclima local são lidas de 10 em 10 minutos. A frequência da leitura da precipitação é menor em relação às outras variáveis com o intuito de detectar da presença da chuva de forma mais rápida, para que a irrigação seja interrompida imediatamente.

Se a solução estiver configurada no cenário com a presença do módulo servidor web central, os valores de todas as variáveis do microclima local descritas anteriormente são enviadas para o módulo web servidor central. A informação da presença de chuva também é enviada para o módulo embarcado atuador de irrigação. O módulo web servidor central irá persistir os valores das variáveis recebidas para que estas estejam disponível em consultas históricas dos registros destas variáveis da propriedade rural. Além de persistir estas informações, elas também serão utilizadas como insumo para que seja determinado o coeficiente de perda da umidade do solo do momento. Assim que é calculado, este coeficiente será enviado para o módulo embarcado atuador de irrigação para que este, quando necessário, faça uso para determinar o valor da umidade máxima de momento para se necessário interromper o fluxo de irrigação. O módulo embarcado atuador de irrigação, ao receber a informação de presença de chuva, poderá tomar a decisão de interromper o fluxo de irrigação.

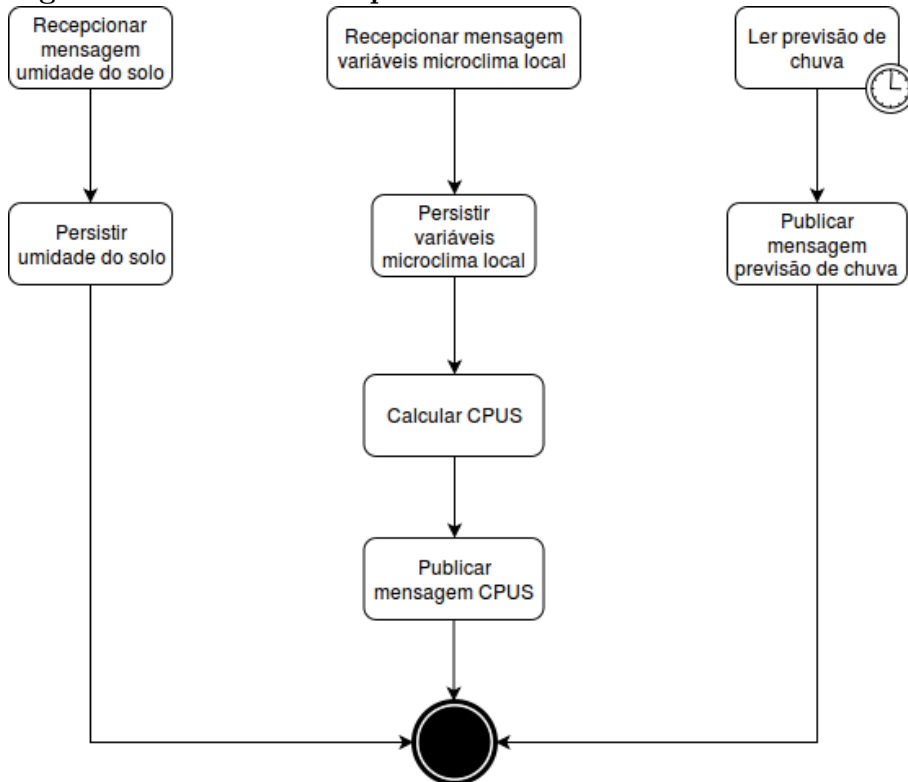
Se a solução estiver configurada sem a presença do módulo servidor web central, os valores, das variáveis do microclima local, da temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica e luminosidade serão utilizadas como insumo para calcular o coeficiente de perda de umidade do solo de momento. Assim como o módulo web servdor central, uma vez calculado este coeficiente, este mesmo valor calculado é enviado para o módulo embarcado atuador de irrigação, para que este faça o devido uso. Neste mesmo cenário, a presença ou não de chuva também é enviada para o módulo embarcado atuador de irrigação para que sejam tomadas as devidas providências.

#### 4.4.4 Módulo Web Servidor Central

A Figura 23 ilustra os passos codificados para tratar as principais responsabilidades do módulo web servidor central.

No passo recepcionar mensagem umidade do solo são recebidos os valores da

**Figura 23 – Fluxo de responsabilidades do módulo web servidor central**



**Fonte: Autoria própria.**

umidade do solo registrados pelos módulo embarcados sensores de umidade. Ao receber estes valores, este módulo web irá persistir os valores da umidade do solo no banco de dados para que estes estejam disponíveis em consultas históricas das umidades do solo da propriedade rural.

No passo recepcionar mensagem variáveis do microclima local são recebidos os valores da temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica, luminosidade e presença de chuva. Ao receber estes valores, este módulo web irá persistir os valores no banco de dados para que estes estejam disponíveis em consultas históricas das umidades do solo da propriedade rural e na sequência, utilizará também estes valores como insumo para realizar o cálculo do coeficiente de perda da umidade do solo. Assim que este coeficiente é calculado, o mesmo é enviado para o módulo embarcado atuador de irrigação para este, quando necessário, faça o devido uso.

No passo ler previsão de chuva é realizada uma requisição para uma api do centro meteorológico climatempo para que seja recuperada a previsão de chuva para a regio da propriedade rural onde a solução esteja implantada. Este passo é executado de 10 em 10 minutos. Ao acionar a API e for detectado a existência de previsão de chuva, este

processo irá enviar para o módulo embarcado atuador de irrigação o valor do tempo até o início previsto para a chuva, para que este, quando necessário, faça o devido uso desta informação.

Além das responsabilidades já descritas anteriormente, este módulo web também fornece formulários web para que seja possível realizar as configurações de identificação dos módulos embarcados e a parametrização de umidade, para que estes módulos embarcados possam realizar o controle da umidade do solo de acordo com o perfil de cultura informado em formulário específico. Ao serem persistidas estas configurações e parametrizações informadas nos formulários específicos, este módulo web inicia a comunicação com os módulos embarcados para que estes recebam as devidas configurações e iniciem suas operações.

#### 4.4.5 Módulo Mobile

O módulo mobile será uma aplicação mobile que será executada em dispositivos móveis. As funcionalidades deste módulo tem por objetivo configurar os módulos embarcados presentes na solução de irrigação para controle da umidade do solo da área rural e permitir que um usuário informe manualmente a previsão de tempo para o início da chuva na área rural onde a solução esteja implantada.

Com a definição da utilização do MQTT-SN como protocolo de comunicação entre os módulos da solução, assim como o módulo web, este módulo precisará estabelecer uma conexão com o broker MQTT-SN definido para a solução e ser utilizada nos momentos oportunos.

### 4.5 RESULTADOS

Esta seção irá apresentar os valores gerados pelo sensores e atuadores da solução durante uma simulação de uso e a relação entre esses valores.

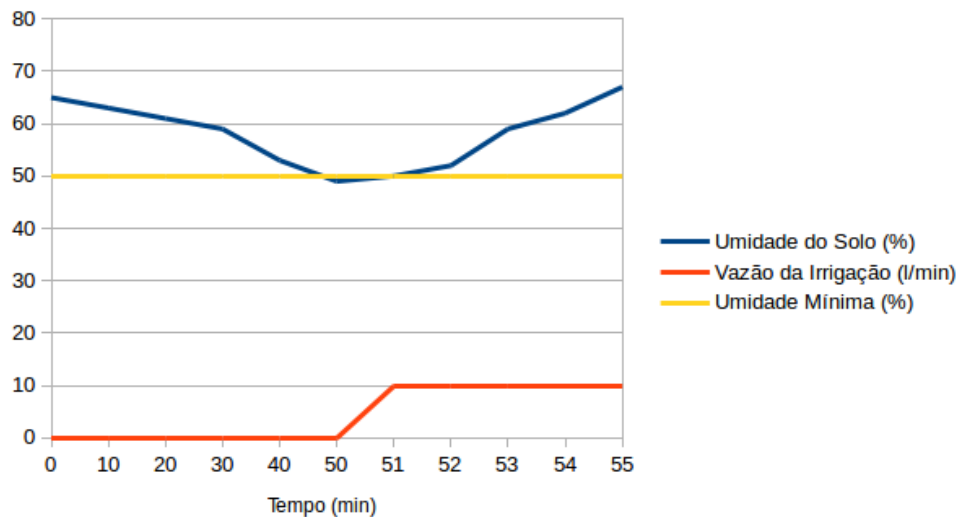
Para os cenário descritos, a solução foi parametrizada com os seguintes valores de umidade do solo: Umidade máxima de 80%, umidade mínima de 50%, umidade crítica de 45%.

#### 4.5.1 Cenário 1 - Irrigação Desligada até Umidade Mínima

Para este cenário, além da parametrização já descrita no início da seção, o tempo de tolerância da umidade do solo na faixa crítica foi parametrizado como zero.

A Figura 24 ilustra um gráfico que mostra inicialmente a irrigação desligada e conseqüentemente a ocorrência da perda da umidade do solo ao longo do tempo. Ao atingir um valor menor do que o da umidade mínima parametrizada, indicado no minuto 50 do gráfico, a irrigação é ligada pelo módulo atuador de irrigação e conseqüentemente a umidade do solo passa a aumentar ao longo do tempo. Como não foi definido o parâmetro de tempo de tolerância da umidade do solo na faixa crítica, a ação de irrigar o solo é iniciada ao se atingir o valor da umidade mínima parametrizada.

**Figura 24 – Irrigação desligada até umidade mínima**



**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.5.2 Cenário 2 - Irrigação Desligada até Tempo de Tolerância

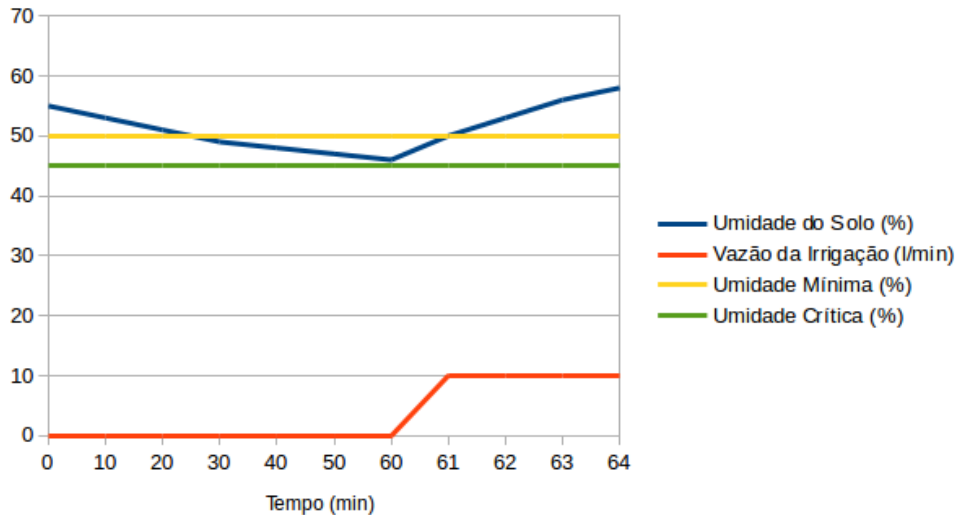
Para este cenário e todos os demais apresentados na sequência desta seção, além da parametrização de umidade já descrita, o tempo de tolerância da umidade do solo na faixa crítica foi parametrizado como 30 minutos.

A Figura 25 ilustra um gráfico que mostra inicialmente a irrigação desligada e conseqüentemente a ocorrência da perda da umidade do solo ao longo do tempo. Ao atingir o valor da umidade mínima parametrizada, o temporizador para controlar o tempo de tolerância da umidade do solo na faixa de umidade considerada crítica é iniciado. Este



momento é indicado no minuto 30 do gráfico. Quando este temporizador é zerado após 30 minutos, a irrigação é ligada e consequentemente a umidade do solo começa a aumentar ao longo do tempo. Este momento é indicado no minuto 60 do gráfico.

**Figura 25 – Irrigação desligada até tempo de tolerância**



**Fonte: Autoria própria.**

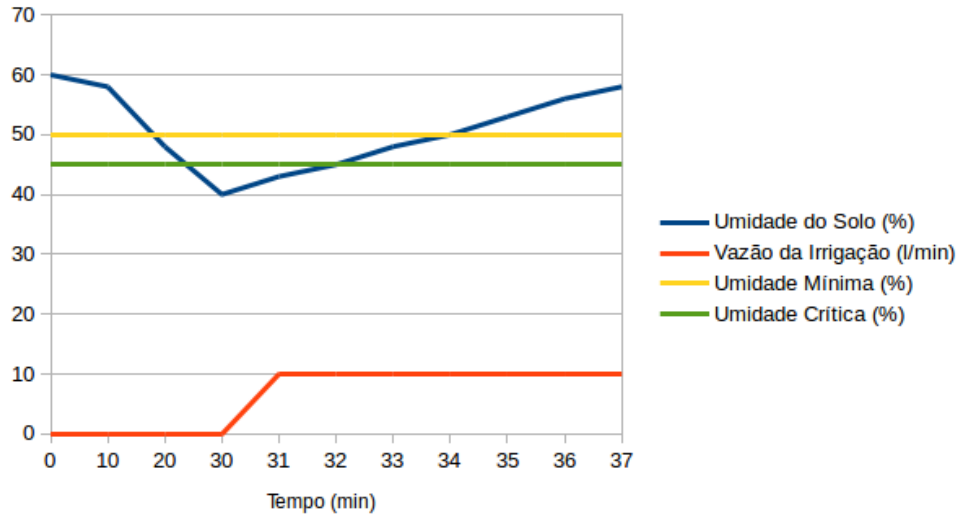
#### 4.5.3 Cenário 3 - Irrigação Desligada até Umidade Crítica

A Figura 26 ilustra um gráfico que mostra inicialmente a irrigação desligada e consequentemente a ocorrência da perda da umidade do solo ao longo do tempo. Ao atingir o valor da umidade mínima parametrizada, o temporizador para controlar o tempo de tolerância da umidade do solo na faixa de umidade considerada crítica é iniciado. Este momento é indicado no minuto 20 do gráfico. Neste cenário o valor da umidade atinge um valor abaixo do valor de umidade crítica parametrizada após 10 minutos, ou seja, antes de finalizar o temporizador. Portanto neste momento a irrigação é ligada, mesmo ainda restando 20 minutos para finalizar o temporizador, e consequentemente a umidade do solo começa a aumentar ao longo do tempo. Este momento é indicado no minuto 30 do gráfico.

#### 4.5.4 Cenário 4 - Irrigação Ligada até Umidade Máxima

A Figura 27 ilustra um gráfico que mostra inicialmente a irrigação ligada e consequentemente a umidade do solo aumentando ao longo do tempo. Ao atingir o valor da umidade máxima parametrizada a irrigação é desligada e consequentemente a umidade

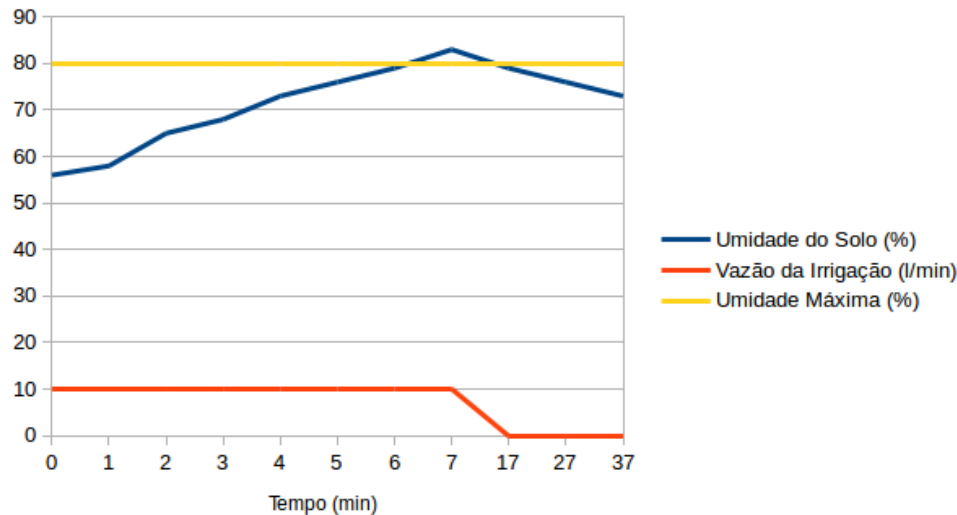
Figura 26 – Irrigação desligada até umidade crítica



Fonte: Autoria própria.

do solo começa a diminuir ao longo do tempo. Este momento é indicado no minuto 7 do gráfico.

Figura 27 – Irrigação ligada até umidade máxima



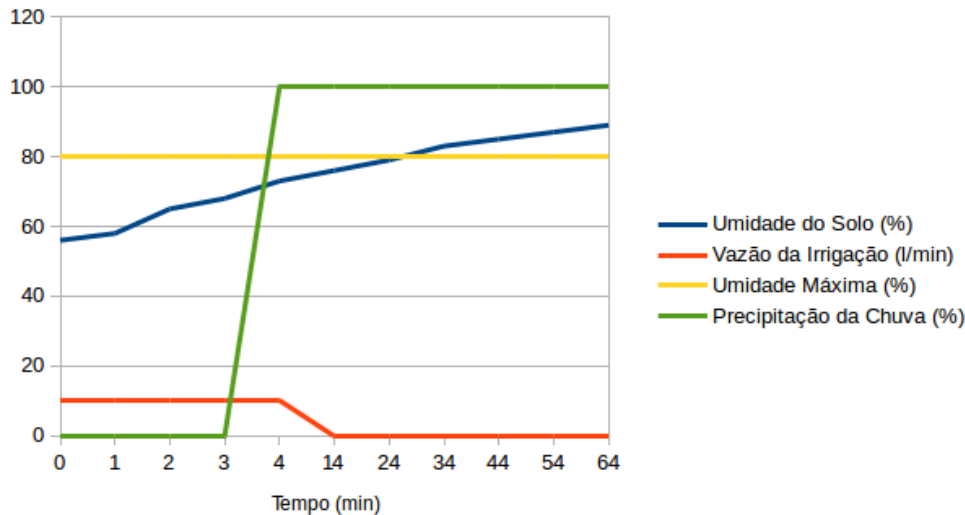
Fonte: Autoria própria.

#### 4.5.5 Cenário 5 - Irrigação Ligada até Início da Chuva

A Figura 28 ilustra um gráfico que mostra inicialmente a irrigação ligada e consequentemente a umidade do solo aumentando ao longo do tempo. Pertinente a este cenário é ilustrado também a situação da presença ou não da chuva, indicado pela linha

de precipitação da chuva. Ao ser detectado o início da chuva a irrigação é desligada e a umidade do solo permanece aumentando ao longo do tempo devido a irrigação natural do solo pela chuva. Este momento é indicado no minuto 4 do gráfico. Neste cenário é possível observar também que o valor da umidade do solo extrapola o valor da umidade máxima parametrizado devido a persistência da presença da chuva.

**Figura 28 – Irrigação ligada até início da chuva**



**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.5.6 Cenário 6 - Previsão de Chuva

A Tabela 2 ilustra inicialmente a irrigação ligada e conseqüentemente a umidade do solo aumenta ao longo do tempo. A tabela ilustra também o coeficiente de perda de umidade do solo calculado a partir das variáveis do microclima local, o tempo previsto até o início da chuva e o valor da umidade máxima considerada pela solução para desligar a irrigação. Ao ser detectada a previsão de chuva, é determinada a nova umidade máxima de acordo com o tempo até a chuva e o coeficiente de perda da umidade do solo atual, e iniciando também o temporizador para determinar o tempo até o início previsto da chuva. Este momento é indicado pela linha 3 da tabela. A cada atualização deste temporizador, é determinada uma nova umidade máxima. Quando a umidade do solo atinge o valor da nova umidade máxima a irrigação é desligada. Este momento é indicado pela linha 7 da tabela.

**Tabela 2 – Previsão de chuva**

<b>Linha</b>	<b>Umid. Solo(%)</b>	<b>Irrigação</b>	<b>Tempo até Chuva</b>	<b>Umid. Máx.</b>	<b>CPUS(%/h)</b>
1	50,00	Ligada	-	80,00	0,25
2	52,00	Ligada	-	80,00	0,25
3	54,00	Ligada	3 dias	67,16	0,25
4	56,00	Ligada	2 dias e 23 horas	66,92	0,25
5	60,00	Ligada	2 dias e 22 horas	66,68	0,25
6	65,00	Ligada	2 dias e 21 horas	66,44	0,25
7	68,00	Desligada	2 dias e 20 horas	66,20	0,25
8	67,75	Desligada	2 dias e 19 horas	65,96	0,25
9	67,50	Desligada	2 dias e 18 horas	65,72	0,25
10	67,25	Desligada	2 dias e 17 horas	65,48	0,25

**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.5.7 Análise dos Resultados

Com a coleta dos dados produzidos pela solução nos cenários propostos foi possível observar o correto controle da umidade do solo de acordo com a parametrização de umidade realizada, garantindo que a irrigação seja ligada e desligada nos momentos adequados

O monitoramento de variáveis do microclima local permitiu o aproveitando, quando possível, da irrigação natural proporcionada pela chuva e a mínima irrigação artificial possível da cultura quando existir previsão de chuva que irá atingir em breve a região da propriedade rural.

## 5 CONCLUSÃO

O princípio da IoT de adicionar habilidades extras para objetos comuns permite a criação de soluções inteligentes na área da agricultura de precisão.

Soluções de irrigação automatizadas e inteligentes surgem como opção para ajudar a manter condições mais ideais possível para o cultivo de plantações agrícolas mesmo em regiões onde ocorram longos períodos de estiagem.

Este trabalho teve como objetivo justamente criar uma solução na área de agricultura de precisão, mais especificamente no controle da umidade solo de culturas agrícolas, fazendo uso de sensores e atuadores com o objetivo de coletar informações do ambiente e microclima local onde uma determinada plantação esteja localizada e de posse dessas informações tomar decisões mais assertivas possíveis para atuar e fazer uso mais racional da água utilizada na irrigação.

Como pontos positivos da solução podemos citar:

- A possibilidade de parametrização do controle da umidade do solo torna a solução flexível, pois permite que a mesma seja aplicada a diferentes tipos de culturas e com necessidades diferentes de umidade do solo.
- A característica modular da solução permite adicionar, quando necessário, mais módulos sensores de umidade do solo e atuadores de irrigação de maneira transparente para que o monitoramento e controle da umidade tenha a maior cobertura possível da área agrícola alvo da solução.
- O monitoramento do microclima local ajuda a solução a utilizar a água de forma mais racional, como por exemplo a interrupção da irrigação quando detectado início de chuva na propriedade agrícola.
- Com a disponibilidade de conectividade à internet, além da possibilidade de acompanhar em tempo real os dados coletados pela solução, esta também permite a integração a centros meteorológicos, permitindo a obtenção de previsões de chuva e conseqüentemente ajustar os parâmetros de controle de umidade solo de modo a aproveitar a irrigação natural proporcionada pela chuva que atingirá a propriedade em breve. Com a indisponibilidade de conectividade à internet, a solução permite informar de forma manual a previsão de chuva por meio de funcionalidade mobile.

- A utilização de padrões de redes de sensores sem fio adequados a baixas taxas de transmissões, pouco consumo energético e suporte a topologia *mesh* é ideal para este tipo de solução, pois os módulos sensores e atuadores estarão espalhados por propriedades agrícolas, sendo muito atrativo a utilização de comunicação sem fio e alimentação destes módulos por pequenas baterias.

Como limitações da solução podemos citar:

- A solução atualmente não implementa mecanismos de segurança de forma a evitar acessos não autorizados às mensagens trocadas entre os módulos da solução.
- A conexão dos módulos embarcados ao broker MQTT é realizado via IP, pois a versão da biblioteca utilizada fazer uso do protocolo MQTT-SN não suporta o uso de mDNS para o estabelecimento de conexões ao broker. Portanto para situações em que o broker MQTT esteja na rede local, devido a indisponibilidade de conectividade à internet e para que o roteador desta rede local não mude o IP deste broker, este deverá ser configurado com IP fixo.
- A versão da biblioteca MQTT-SN utilizada pela solução não tem suporte ao nível de qualidade de serviço QoS 2, sendo necessário utilizar o nível QoS 1 e QoS 0 em algumas situações de comunicações.

Como sugestões de trabalhos futuros podemos citar:

- Adicionar mecanismos de segurança à solução a fim de garantir a segurança e integridade das informações trocadas entre os módulos da solução.
- Estudo e implementação mais detalhado do cálculo do coeficiente de perda da umidade do solo, adicionando, se necessário, novos sensores para a coleta de novas informações que sejam necessárias para determinar de forma mais assertiva a previsão de perda de umidade do solo ao longo do tempo para diferentes tipos de culturas.
- Permitir que a solução altere o modo de operação (com servidor central e sem servidor central) em tempo de execução através de parametrização dinâmica.
- Adicionar à solução novas funcionalidades para cobrir diferentes necessidades da agricultura de precisão, como por exemplo o monitoramento de animais e maquinários agrícolas com objetivo de uso mais racional de insumos agrícolas pela propriedade rural.

## REFERÊNCIAS

- APACHE SOFTWARE FOUNDATION. **Apache Tomcat**. ago. 2018. Disponível em: <<http://tomcat.apache.org/>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- BETA COMERCIAL. **Shield Sensor Umidade Solo Higrometro**. ago. 2018. Disponível em: <[www.betacomercial.com.br](http://www.betacomercial.com.br)>. Acesso em: Agosto de 2018.
- BRAGA, M. B.; CALGARO, M. **Sistema de produção de melancia**. Seminário EMBRAPA de Sistemas de Produção, v. 6, ago. 2010.
- CCSA. **Terms of the Ubiquitous Network**. mar. 2011.
- CETIC. **6LBR**. ago. 2018. Disponível em: <<https://github.com/cetic/6lbr/wiki>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- CHRISTOFIDIS, D. **Recursos hídricos e irrigação no brasil**. Centro de Desenvolvimento Sustentável UnB, 1999.
- CONTIKI-OS.ORG. **Contiki**. ago. 2018. Disponível em: <<http://www.contiki-os.org/>>.
- ECLIPSE FOUNDATION. **Eclipse**. ago. 2018. Disponível em: <<https://www.eclipse.org>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- FAONOBASIL. **Representante da fao brasil apresenta cenário da demanda por alimentos**. Notícias, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/901168/>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- FGVPROJETOS. **O que é uma cidade inteligente?** Artigos, ago. 2018. Disponível em: <<https://fgvprojetos.fgv.br/noticias/o-que-e-uma-cidade-inteligente>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- IEEESA. **IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks 802.15.4-2015**. 2016.
- IEEESPECTRUM. **The top programming languages 2018**. IEEESpectrum Magazine, ago. 2018. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/static/interactive-the-top-programming-languages-2018>>.
- IETF. **The iot-concept and problem statement**. IETF Std. draft-lee-iot-problem-statement-05, jul. 2012.
- ITU. **Overview of the internet of things**. ITU-T Std. Y.2060, n. Y.2060, jun. 2012.
- JGRAPH LTD. **Draw.io**. ago. 2018. Disponível em: <<https://www.draw.io/>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet, Uma Abordagem Top-Down**. Edição 5. Pearson, 2010.

MQTT.ORG. **Mosquito.rsmb**. ago. 2018. Disponível em: <<http://mqtt.org/tag/rsmb>>.

ORACLE. **MySQL**. ago. 2018. Disponível em: <<https://www.mysql.com/>>. Acesso em: Agosto de 2018.

PERERA, C.; LIU, C. H.; ARDENA, S. J.; CHIEN, M. **A survey on internet of things from industrial market perspective**. IEEE Access, jan. 2015.

REIS, J. S. d. **Sistema de controle aplicado à automação de irrigação agrícola**. 2015. 73 p. Monografia (Graduação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

REZENDE, R. S.; ANDRADE JUNIOR, A. S. d. **Cana de açúcar**. Agência EMBRAPA de Informação Tecnológica - Árvore do Conhecimento, 2018. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_56\\_711200516718.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_56_711200516718.html)>. Acesso em: Agosto de 2018.

RIBEIRO, M. **Planta de melão irrigada por um sistema de irrigação por gotejamento**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/semiarido/busca-de-imagens/-/midia/628001/irrigacao-por-gotejamento>>. Acesso em: Agosto de 2018.

RIOT-OS. **riot-os.org**. ago. 2018. Disponível em: <<http://www.riot-os.org>>. Acesso em: Agosto de 2018.

SHILDT, H. **C Completo e Total**. 3. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996.

TEXAS INSTRUMENTS. **Code Composer Studio**. ago. 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>>. Acesso em: Agosto de 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **LAUNCHXL-CC2650**. ago. 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-CC2650>>. Acesso em: Agosto de 2018.

THE RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry PI 3 Model B**. ago. 2018. Disponível em: <[www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)>. Acesso em: Agosto de 2018.

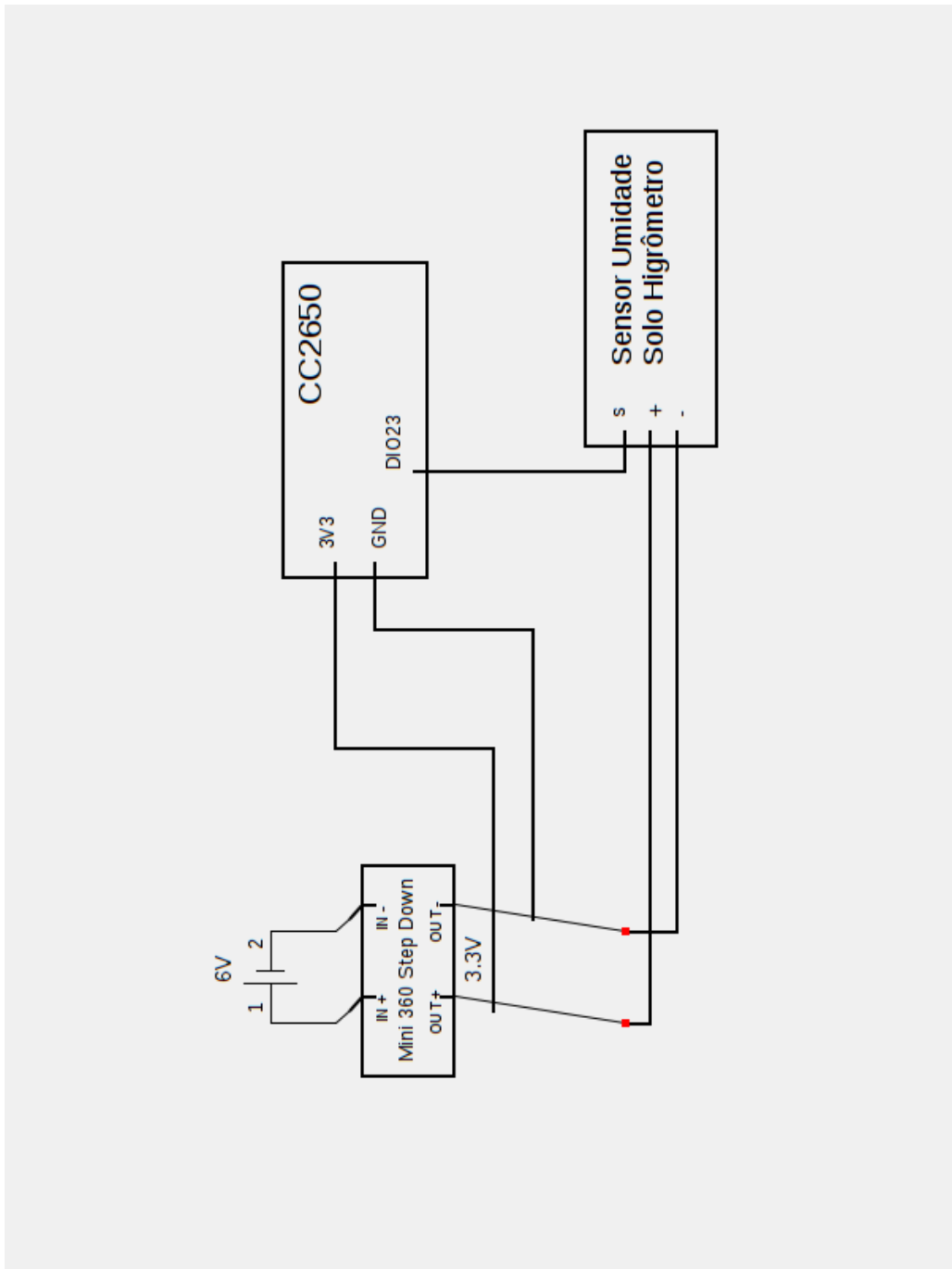
UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018**. 2018.

USINAINFO. **Shield Válvula Solenóide Água 12V**. ago. 2018. Disponível em: <[www.usinainfo.com.br](http://www.usinainfo.com.br)>. Acesso em: Agosto de 2018.

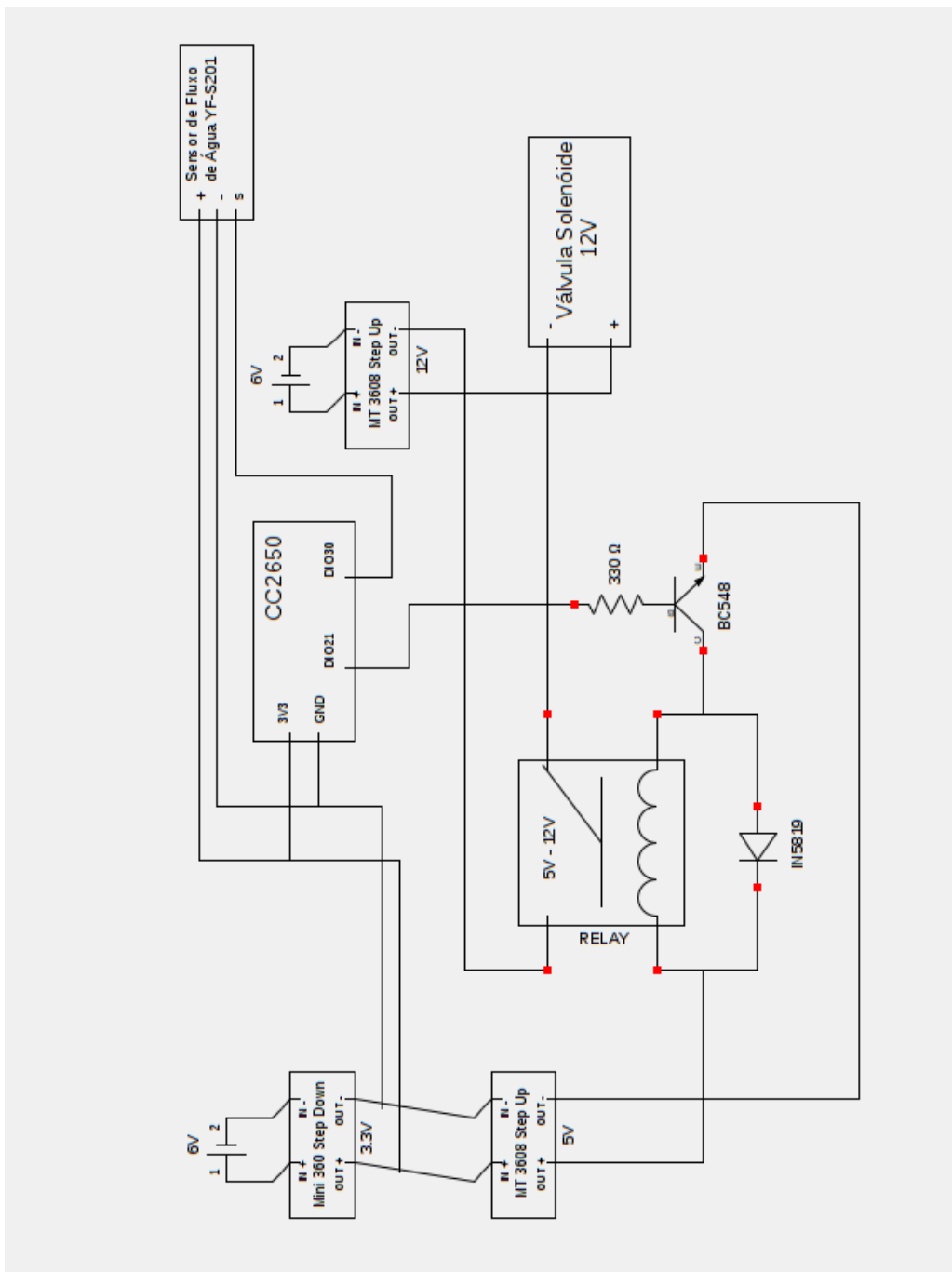
VASSEUR, J.-P.; DUNKELS, A. **Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet**. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2010.



### APÊNDICE A – CIRCUITO DO MÓDULO EMBARCADO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO



## APÊNDICE B – CIRCUITO DO MÓDULO EMBARCADO ATUADOR DE IRRIGAÇÃO DO SOLO



## APÊNDICE C – CIRCUITO DO MÓDULO EMBARCADO ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

