CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

RAFAEL GOMES ALVES

FAZENDA INTELIGENTE: desenvolvimento de um gêmeo digital para um sistema de irrigação

São Bernardo do Campo

2021

RAFAEL GOMES ALVES

FAZENDA INTELIGENTE: desenvolvimento de um gêmeo digital para um sistema de irrigação

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Centro Universitário FEI para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof. Dr. Fábio Lima.

São Bernardo do Campo

2021

Gomes Alves, Rafael.
Fazenda Inteligente: desenvolvimento de um gêmeo digital para um sistema de irrigação / Rafael Gomes Alves. São Bernardo do Campo, 2020.
131 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Fabio Lima.

1. Internet das Coisas. 2. Gêmeo digital. 3. Fazenda inteligente. 4. Indústria 4.0. I. Lima, Fabio, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

Mestrado

PGM-10

Aluno: Rafael Gomes Alves **Matrícula:** 218309-3

Título do Trabalho: Fazenda inteligente: desenvolvimento de um gêmeo digital para um sistema de irrigação.

Área de Concentração: Produção

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lima

Data da realização da defesa: 16/12/2020

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

O trabalho traz contribuições teóricas e técnicas muito significativas. Foi consenso da banca que o trabalho tem potencial para pelo menos duas submissões e periódicos científicos qualificados.

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Prof. Dr. Fábio Lima	Ass.: _____
Prof. Dr. Rodrigo Filev Maia	Ass.: _____
Dr. André Torre Neto	Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho a todos aqueles que foram capazes de transformar, de alguma forma, a minha visão de mundo

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor doutor Fábio Lima pela orientação e o apoio no planejamento e na execução deste trabalho.

Ao professor doutor Rodrigo Filev Maia pelo apoio, o convite e a aceitação da minha participação no projeto SWAMP.

Ao Centro Universitário FEI pela oportunidade da bolsa de estudos concedida e a disponibilidade dos recursos materiais, humanos e didáticos presentes no campus.

À Comissão Europeia e a Rede Nacional de Pesquisa, pela oportunidade da bolsa de estudos concedida e a participação no projeto SWAMP.

Aos meus pais por me mostrarem que a educação é a melhor forma que temos para entender o passado, transformar o presente e criar o futuro.

À minha namorada por todo o suporte durante essa trajetória em que as vezes o progresso não é nítido mas o resultado final é recompensador.

À minha família pelo apoio e pelos momentos de descontração quando eu mais precisava.

Aos colegas de projeto, Gilberto Souza e Brenno Tondato de Faria, pelas incontáveis discussões sobre diversos projetos, sobre o futuro, e sobre o que podemos fazer para alcançar nossos objetivos.

Ao Alan Ferreira, mas conhecido como Alanzoka, por oferecer, com suas lives, o entretenimento que eu precisava para descontrair nos momentos difíceis e por me mostrar que não devemos desistir de nossos objetivos.

Agradeço também às pessoas que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho

“Os olhos de todas as futuras gerações estão sobre vocês”

Greta Thumberg

RESUMO

A agricultura mundial enfrenta o desafio de aumentar a sua produção agrícola em 50% de 2012 até 2050, ao mesmo tempo em que deve reduzir o consumo de água já que a agricultura corresponde a 69% de toda a água doce utilizada no planeta. Diante deste cenário, o uso de tecnologias com a Internet das Coisas, o Big Data, Sistemas ciberfísicos, entre outras, no ambiente agrícola é cada vez mais necessário para garantir um aumento de produtividade e uma diminuição no consumo de recursos naturais, surgindo assim o conceito de fazenda inteligente. Dentro deste contexto foi desenvolvido, neste trabalho, um gêmeo digital para um sistema de irrigação utilizando para isso o *software* de simulação por eventos discretos integrado a uma plataforma de Internet das Coisas. O gêmeo digital permite uma troca de informações entre o mundo físico e o mundo digital de maneira automática, habilitando o fazendeiro a avaliar o estado atual de seu sistema de irrigação, validar o comportamento do mesmo dado uma determinada recomendação de irrigação e executar esta recomendação de irrigação validada. A comunicação entre os diversos componentes da plataforma de Internet das Coisas e o *software* foi estabelecida para avaliar apenas o parte digital do gêmeo digital. Deste modo, é possível avaliar o correto funcionamento da plataforma e do sistema de irrigação através do modelo digital antes de implantar a plataforma e o sistema em campo. Estima-se que após a implantação da plataforma e do sistema em campo ainda seria possível acompanhar o comportamento do mesmo ao longo do tempo, permitindo assim que um gêmeo digital para um sistema de irrigação esteja funcional durante uma safra inteira.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Gêmeo Digital. Fazenda inteligente. Indústria 4.0.

ABSTRACT

World agriculture faces the challenge of increasing its agricultural production by 50% from 2012 to 2050, while reducing water consumption as agriculture accounts for 69% of all fresh water used on the planet. Given this scenario, the use of technologies such as the Internet of Things, Big Data, cyber-physical systems, among others, in the agricultural environment is increasingly necessary to ensure an increase in productivity and a decrease in the consumption of natural resources, thus the concept of smart farm emerges. Within this context, a digital twin for an irrigation system was developed in this work using the simulation software for discrete events integrated within an Internet of Things platform. The digital twin allows an exchange of information between the physical world and the digital world automatically, enabling the farmer to assess the current state of his irrigation system, validate the behavior of the given irrigation recommendation and execute this validated irrigation recommendation. The communication between the various components of the Internet of Things platform and the software was applied to evaluate only the digital part of the digital twin. In this way, it is possible to evaluate the correct functioning of the platform and the irrigation system through the digital model before implanting the platform and the system in the field. It is estimated that after the implantation of the platform and the system in the field it would still be possible to monitor its behavior over time, thus allowing a digital twin for an irrigation system to be functional during an entire harvest.

Keywords: Internet of Things. Digital Twin. Smart Farming. Industry 4.0.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – População rural, proporção da população total (2018) 22
Figura 2 – Valor adicionado na agricultura, parcela do PIB (2016-2017) 22
Figura 3 – Emprego na agricultura, parte do emprego total (2018) 23
Figura 4 – Valor adicionado na agricultura, silvicultura e pesca, indústria e serviços, participação no PIB, preços correntes (2018) 23
Figura 5 – Surgimento da agricultura pelo mundo 25
Figura 6 – Impacto da revolução verde 27
Figura 7 – Mapa de tecnologias da agricultura 4.0 28
Figura 8 – Pilares da Indústria 4.0 29
Figura 9 – Estágios do índice de maturidade da indústria 4.0 30
Figura 10 – Relações entre um sistema agrícola 32
Figura 11 – Dados sobre os métodos de irrigação aplicados no mundo 33
Figura 12 – Irrigação por aspersão 45
Figura 13 – Irrigação por superfície 46
Figura 14 – Irrigação localizada 47
Figura 15 – Subirrigação 47
Figura 16 – Representação da evapotranspiração 49
Figura 17 – Representação da evapotranspiração 50
Figura 18 – Arquitetura base disponibilizada pelo FIWARE 54
Figura 19 – Camadas da plataforma Smart Water Management Platform (SWAMP) . . 56
Figura 20 – Modelo, sombra e gêmeo digital 57
Figura 21 – Estrutura para o desenvolvimento de uma Sistema agricultural ciberfísico (CPAS) 60
Figura 22 – Elementos base da tecnologia Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) 62
Figura 23 – Relação entre cliente e servidor em diversas configurações 63
Figura 24 – Relação entre nós e referências entre nós. 63
Figura 25 – Protocolo de Revisão bibliográfica sistemática (RBS) 66
Figura 26 – Mapa de palavras-chave obtido através do *software* VosViewer 67
Figura 27 – Modelo de sistema de irrigação adotado 69
Figura 28 – Visão geral do experimento 71

Figura 29 – Arquitetura da plataforma 73
Figura 30 – Comunicação do servidor OPC UA com outros elementos da plataforma . 75
Figura 31 – Comunicação entre o *Weather Handler* e os outros componentes da plataforma 76
Figura 32 – Modelo de dados utilizado na plataforma de internet das coisas 76
Figura 33 – Comunicação do *Data Model* com os outros componentes da plataforma . 78
Figura 34 – Comunicação entre o componente *Probe* e outros elementos da plataforma 79
Figura 35 – Exemplo dos dados coletados pela sonda de solo 79
Figura 36 – Fluxo de informações entre o componente *Irrigation Recommendation* e a plataforma 80
Figura 37 – Diagrama da função *daily info* 81
Figura 38 – Diagrama da função *evapotranspiration* 81
Figura 39 – Diagrama da função *fao recommendation* 82
Figura 40 – Diagrama da função *fuzzy recommendation* 82
Figura 41 – Visualização da simulação no Plant Simulation 83
Figura 42 – Estado dos componentes durante a execução do experimento 85
Figura 43 – Visualização do painel personalizado com dados de umidade em dois níveis enviados pelo componente *Probe* 87
Figura 44 – Visualização do painel personalizado com dados de umidade do ar enviados pelo componente *Probe* 88
Figura 45 – Visualização do painel personalizado com dados de temperatura do ar e do solo enviados pelo componente *Probe* 89
Figura 46 – Parâmetros climáticos coletados através da Interface de Programação de Aplicativos (API) *Open Weather* 90
Figura 47 – Parâmetros climáticos coletados através da API *Weather Wunderground* . . 91
Figura 48 – Recomendação de irrigação obtida pela plataforma Internet das coisas (IoT) 91
Figura 49 – Inicio da simulação, após a simulação receber os comandos de irrigação . . 92
Figura 50 – Estado da simulação após uma das áreas ter sido irrigada 93
Figura 51 – Estado da simulação ao fim da irrigação das duas áreas 94
Figura 52 – Água das nuvens 126
Figura 53 – Água transfronteiriça 127
Figura 54 – Retirada de água 128
Figura 55 – Estresse hídrico 129

Figura 56 – Área equipada para irrigação 130
Figura 57 – Colheitas irrigadas 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias aplicadas na agricultura 35
Tabela 2 – Conceito de fazenda inteligente 41
Tabela 3 – Dados sobre os principais métodos de irrigação aplicados no mundo 44
Tabela 4 – Etapas de revisão sistemática 68
Tabela 5 – Elementos principais do servidor OPC UA 73
Tabela 6 – Tempos de início e finalização da irrigação de cada área 94
Tabela 7 – Descrição das variáveis, métodos e argumentos do servidor OPC UA . . . 111
Tabela 8 – Variáveis coletadas para o clima atual pela API do *OpenWeather* 113
Tabela 9 – Variáveis coletadas para a previsão do clima pela API do *OpenWeather* . . 113
Tabela 10 – Variáveis coletadas para o clima atual pela API do *Weather Wunderground* 113
Tabela 11 – Variáveis coletadas para a previsão do clima pela API do *Weather Wunderground* 114
Tabela 12 – Entidade *Soil Probe* 116
Tabela 13 – Entidade *Management Zone* 117
Tabela 14 – Entidade *Irrigation Recommendation* 117
Tabela 15 – Entidade *Fuzzy Needs* 118
Tabela 16 – Entidade *Crop Instance* 118
Tabela 17 – Entidade *Crop Type* 119
Tabela 18 – Entidade *Reference Evapotranspiration* 120
Tabela 19 – Entidade *Weather Forecast Wunder* 120
Tabela 20 – Entidade *Weather Forecast Open* 121
Tabela 21 – Entidade *Current Weather Wunder* 121
Tabela 22 – Entidade *Current Weather Open* 122
Tabela 23 – Validações executadas para o funcionamento da plataforma IoT 124

LISTA DE ABREVIATURAS

API	Interface de Programação de Aplicativos
CC	Computação na Nuvem
CLP	Controlador lógico programável
CPAS	Sistema agricultural ciberfísico
CPS	Sistemas cyber-físicos
DE	Entidade Digital
ETc	Evapotranspiração das culturas em condições padrão
ETc adj	Evapotranspiração das culturas em condições não padronizadas
ETo	Evapotranspiração de referência
FAO	Organização para a Alimentação e a Agricultura
FLAN	Fast Library for Approximate Nearest Neighbours
GEs	Generic Enablers
GIS	Sistema de Informação Geográfica
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis
HYCV	high-yielding crop varieties
IA	Inteligência Artificial
ICT	Tecnologia da informação e comunicação
IIoT	Internet Industrial das Coisas
IoT	Internet das coisas
Kc	Coeficiente da cultura
KNN	k-nearest neighbors
LoRaWAN	Rede de longa distância e de baixa potência
ONU	Organização das Nações Unidas
OPC	Open Platform Communications
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PMEs	Pequenas e Médias Empresas
RBS	Revisão bibliográfica sistemática
RFID	Identificação por Radiofrequência
SQL	Linguagem de Consulta Estruturada
SWAMP	Smart Water Management Platform

VANT	Veículos Aéreos não Tripulados
VE	Entidade Virtual
VPE	Entidade física virtualizada

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Inclinação da curva depressão de vapor
e_a	Pressão de vapor atual
e_s	Pressão de saturação do vapor
ET_o	Evapotranspiração de referência
G	Densidade do fluxo de calor do solo
γ	Constante psicométrica
R_n	Radiação efetiva na superfície do cultivo
T	Temperatura média diária do ar a 2 metros de altura
u_2	Velocidade do vento a dois métros de altura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 OBJETIVO 19
1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA 19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1 UM PANORAMA SOBRE AGRICULTURA 21
2.1.1 Revoluções agrícolas 24
2.1.1.1 Primeira revolução agrícola 24
2.1.1.2 Segunda revolução agrícola 25
2.1.1.3 Terceira revolução agrícola 26
2.1.1.4 Quarta revolução agrícola 27
2.2 UM PANORAMA DA INDúSTRIA 4.0 28
2.3 TECNOLOGIAS APLICADAS NA AGRICULTURA 31
2.3.1 Agricultura de precisão 31
2.3.2 Indústria 4.0 e agricultura de precisão 32
2.3.3 Tecnologias aplicadas na agricultura de precisão 34
2.4 BIG DATA NA AGRICULTURA 36
2.5 INTERNET DAS COISAS APLICADA NA AGRICULTURA 37
2.5.1 O conceito de fazenda inteligente 40
2.6 GESTÃO DE ÁGUA 42
2.6.1 Sistemas de irrigação 44
2.6.1.1 Irrigação por aspersão 44
2.6.1.2 Irrigação de superfície 45
2.6.1.3 Irrigação localizada 46
2.6.1.4 Subirrigação 46
2.6.2 Modelo de evapotranspiração 48
2.6.3 Software para gestão de água 50
2.7 PLATAFORMAS PARA COLETA DE DADOS NA AGRICULTURA 51
2.7.1 Plataforma FIWARE 52
2.7.2 Plataforma SWAMP 54
2.8 GÊMEOS DIGITAIS E SISTEMAS CIBERFÍSICOS 56
2.8.1 Gêmeos digitais 56

2.8.2 Sistemas ciberfísicos na agricultura 58
2.9 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZANDO O SOFTWARE PLANT SIMULATION 60
2.10 COMUNICAÇÃO DA PLATAFORMA IOT COM A SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO OPC UA 61
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA 65
3.1 PLANEJAMENTO DA REVISÃO 65
3.2 CONDUÇÃO DA REVISÃO 65
3.3 RELATÓRIO FINAL DA REVISÃO 68
4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL 69
4.1 PLATAFORMA DE INTERNET DAS COISAS 70
4.1.1 Servidor OPC UA 72
4.1.2 Componente Weather Handler 74
4.1.3 Componente Data Model 75
4.1.4 Componente Probe 77
4.1.5 Componente Irrigation recommendation 78
4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO 83
5 RESULTADOS OBTIDOS 85
5.1 RESULTADOS OBTIDOS PELOS COMPONENTES DA PLATAFORMA . . 86
5.2 RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NO SOFTWARE PLANT SIMULATION 90
6 CONCLUSÃO 97
REFERÊNCIAS 99
APÊNDICE A – Tabela com a descrição das variáveis, métodos e argumentos do servidor OPC UA 110
APÊNDICE B – Parâmetros coletados pelo componente Weather Handler 112
APÊNDICE C – Parâmetros e variáveis das entidades utilizadas nos componentes da plataforma de Internet das Coisas 115
APÊNDICE D – Testes de validação da plataforma IoT 123
ANEXO A – Dados sobre o uso de água e irrigação no mundo 125

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é parte integrante do desenvolvimento econômico do Brasil, sendo que em 2015 a produção total agrícola equivaleu a pouco mais de 30 bilhões de reais (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2015). A Organização para a Alimentação e a Agricultura (FAO) é uma agência da Organização das Nações Unidas (ONU) que visa combater principalmente a fome, através de ações em diversas áreas como agricultura, pesca, florestamento, dentre outros (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2018a). Segundo a organização, "alimentar a humanidade vai exigir um aumento de 50% na produção de alimentos e outros produtos agrícolas entre 2012 e o meio do século" (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2017). Vale ressaltar ainda que o consumo de água na agricultura equivale a aproximadamente 69% de toda a água consumida no mundo (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2016).

É importante destacar que a FAO realiza diversos relatórios para indicar o futuro da agricultura e quais os problemas que o mundo enfrentará em decorrência da escassez de alimentos e água. A FAO destaca 4 tendências essenciais para o futuro da agricultura (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2017), sendo elas: a agricultura tende a ser mais inclusiva com o aumento da produtividade das fazendas e dos agricultores; a mecanização pode aumentar a produtividade de pequenas fazendas perincipalmente se o aluguel ou compartilhamento de máquinas estiver disponível para os fazendeiros; o aumento do acesso a tecnologia da informação e comunicação permitindo que os fazendeiros escolham melhor como comprar, vender e obter informação sobre os produtos envolvidos na produção agrícola; e a necessidade de criar trabalhos para os jovens dentro e fora do regime agrícola, principalmente em países com rápido crescimento e pequenos índices de industrialização.

Nota-se, então, a importância de se aumentar a produtividade do setor agrícola para suprir as necessidades apontadas pela FAO. A literatura aponta que grandes ganhos de produtividade são alcançados utilizando-se de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 (SCHUH *et al.*, 2017), dentre elas destaca-se a IoT, o *Big Data* e os Sistemas cyber-físicos (CPS). Schwab (2016) define que a quarta revolução industrial é a união do do mundo físico, digital e biológico, através da fusão de diversas tecnologias como o sequenciamento genético, nanotecnologia, energias renováveis, computação quântica entre outros. Em seu livro, o autor argumenta que existem algumas tecnologias que já estão em uso na agricultura, como drones, análise de dados,

robôs, biologia sintética e impressão de alimentos, por exemplo. O impacto dessas tecnologias no domínio da agricultura ainda será evidenciado. No entanto, existem alguns artigos que demonstram o cenário atual de aplicação de tais tecnologias no campo (WOLFERT *et al.*, 2017; VERDOUW; WOLFERT; TEKINERDOGAN, 2016; BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018).

Wolfert *et al.* (2017) mostram que o uso do *Big Data* na agricultura terá influência direta não apenas na produção agrícola mas também em toda a cadeia de produção. O autor argumenta que o desenvolvimento das tecnologias de Big Data na agricultura ocorre devido as tendências globais do setor alimentício como aquelas aprontadas nos relatórios da FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2017). O *Big Data* é impulsionado por um crescente uso de dispositivos, como sensores e atuadores, que permitam a coleta de dados em tempo real de parâmetros do ambiente agrícola. Para tal fim, a aplicação da IoT é cada vez mais frequente pois permite conectar dispositivos à nuvem de forma a enviar dados e receber comandos de uma grande variedade quantidade de dispositivos.

Verdouw, Wolfert e Tekinerdogan (2016) mostram que o desenvolvimento da IoT na agricultura ainda está nos seus estágios inciais. No entanto, existe uma boa adoção de tal tecnologia na cadeia de suprimentos devido a necessidade de melhorar a segurança alimentar e a qualidade dos produtos ofertados. Os autores destacam ainda três barreiras que devem ser superadas para aumentar a penetração de tal tecnologia na agricultura, sendo elas: a integração das soluções IoT existentes; melhorar a usabilidade e interoperabilidade entre as diversas soluções IoT para torná-las mais acessíveis para os fazendeiros; e o maior desenvolvimento de soluções com usabilidade em diversos ambientes, plantações, tipos de solo, tipos de negócios etc.

Vale ressaltar que o desenvolvimento das tecnologias como o *Big Data* e a IoT não garante o correto uso das mesmas pelos fazendeiros pois é necessário ter uma infraestrutura adequada nas fazendas, um treinamento e qualificação dos fazendeiros concordantes com as soluções disponíveis e uma legislação condizente para o funcionamento correto dessas tecnologias (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018).

Dado este contexto, a literatura salienta para o surgimento do conceito de fazenda inteligente ou *smart farming*, que indica como uma fazenda pode se beneficiar das transformações digitais e tecnológicas que estão acontecendo na agricultura. Contudo, tal conceito ainda carece de uma definição consensual entre os diversos autores e também de traçar um paralelo entre o desenvolvimento das fazendas inteligentes com as tecnologias da Indústria 4.0.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho visa atingir dois objetivos principais, sendo eles:

a) Objetivo 1 - Compreender, através de uma RBS, o conceito de fazenda inteligente;
b) Objetivo 2 - Desenvolver um gêmeo digital para um sistema de irrigação com base nas tecnologias da IoT e da simulação computacional utilizando o *software* Plant Simulation.

O trabalho também inclui uma série de objetivos secundários, sendo eles:

a) Apresentar o relatório da RBS através do texto desta dissertação;
b) Apresentar o conceito de fazenda inteligente de forma a unir as diversas visões do conceito presentes na literatura;
c) Compreender o funcionamento e comunicação dos diversos componentes de uma plataforma IoT;
d) Desenvolver componentes específicos para a plataforma IoT de forma a coletar dados climáticos, calcular prescrições de irrigação, simular o envio de dados de uma sonda de solo e controlar um sistema de irrigação;
e) Desenvolver um painel personalizado para que os fazendeiros possam visualizar o estado de suas fazendas.

1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para atingir os objetivos principais deste trabalho utilizam-se duas metodologias, sendo elas:

a) Método qualitativo e exploratório para atingir o objetivo 1.

   Para atingir o objetivo 1 utiliza-se a RBS para explorar a interseção entre tecnologias, como a IoT, o *big data*, CPS e a Tecnologia da informação e comunicação (ICT), e a agricultura. Utiliza-se essa metodologia já que o objetivo 1 visa compreender o conceito de fazenda inteligente que está na interseção entre tecnologias digitais e agricultura.

b) Método quantitativo e exploratório para atingir o objetivo 2.

   Para atingir o objetivo 2 utiliza-se um experimento exploratório, que visa compreender como as diversas tecnologias podem atuar de maneira integrada, para

desenvolver um gêmeo digital para um sistema de irrigação. O experimento foi realizado apenas no ambiente digital para verificar o comportamento da plataforma IoT e sua comunicação com o *software* Plant Simulation.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento histórico da agricultura e indústria, como a tecnologia vem sendo aplicada na agricultura e também algumas ferramentas e tecnologias utilizadas para o desenvolvimento de um gêmeo digital para um sistema de irrigação através da integração de uma plataforma IoT e um *software* de simulação por eventos discretos. Destaca-se que a revisão bibliográfica foi composta com base no protocolo de revisão sistemática bibliográfica apresentada no capítulo seguinte, considerando que a etapa de relatório da revisão é a elaboração desta dissertação.

Sendo assim, a primeira seção apresenta um panorama da agricultura através das revoluções agrícolas; a segunda seção apresenta um panorama da Indústria 4.0 e sua ligação com a agricultura de precisão; a terceira seção define o conceito de agricultura de precisão e as tecnologias atualmente utilizadas na mesma; a quarta seção apresenta os impactos do *big data* na agricultura; a quinta seção apresenta como a IoT está sendo aplicada na agricultura bem como o conceito de fazenda inteligente; a sexta seção apresenta como é realizada a gestão de recursos hídricos; a sétima seção apresenta algumas plataformas de IoT utilizadas para a coleta de dados; a oitava seção apresenta os conceitos de gêmeo digital e CPS; a nona seção apresenta o *software* de simulação Plant Simulation; por fim, a décima seção apresenta a comunicação por OPC UA.

2.1 UM PANORAMA SOBRE AGRICULTURA

A FAO apresenta diversas informações sobre o desenvolvimento global de todo o processo produtivo de alimentos seja através da agricultura, pecuária, piscicultura, aquacultura etc. Esta organização realiza diversas publicações ao longo do ano para indicar a importância da agricultura, os desafios que a agricultura deve enfrentar, as oportunidades que surgem nesse domínio e o desenvolvimento que a área teve ao longo dos últimos anos como pode ser visto em FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2019).

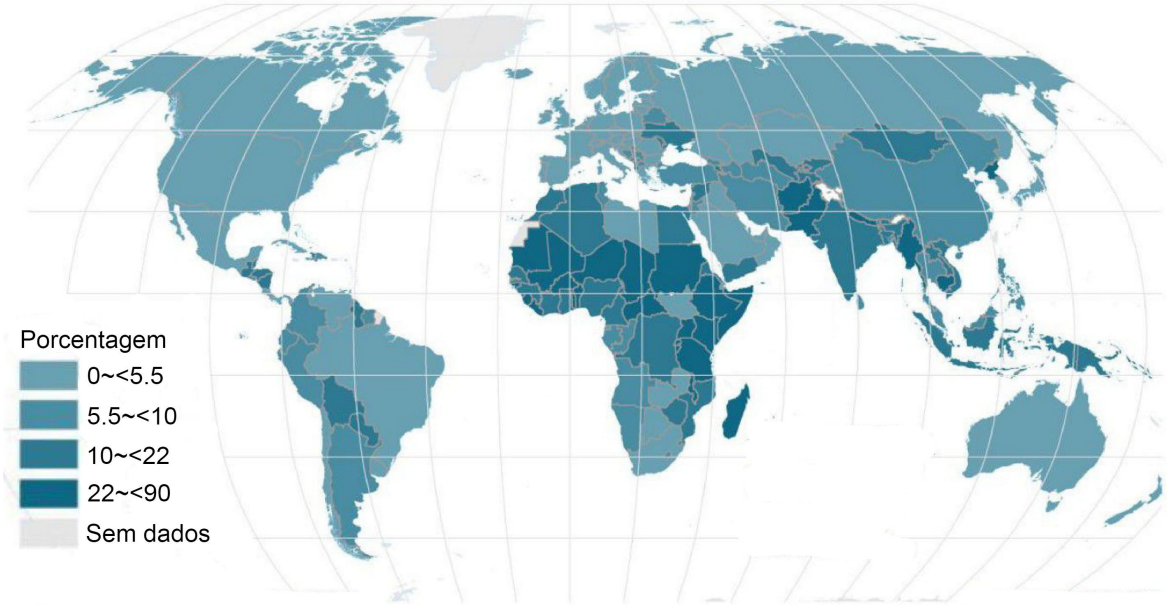
Destaca-se que a agricultura é uma das principais atividades em diversos países como pode ser visto nas figuras 1, 2 e 3. Nota-se que a agricultura tem grande impacto principalmente na África e na Ásia como pode ser visto pela 4.

Para compreender melhor o impacto da agricultura no mundo é necessário compreender a história das três revoluções agrícolas bem como o desenvolvimento atual do tema em paralelo

Figura 1 – População rural, proporção da população total (2018)

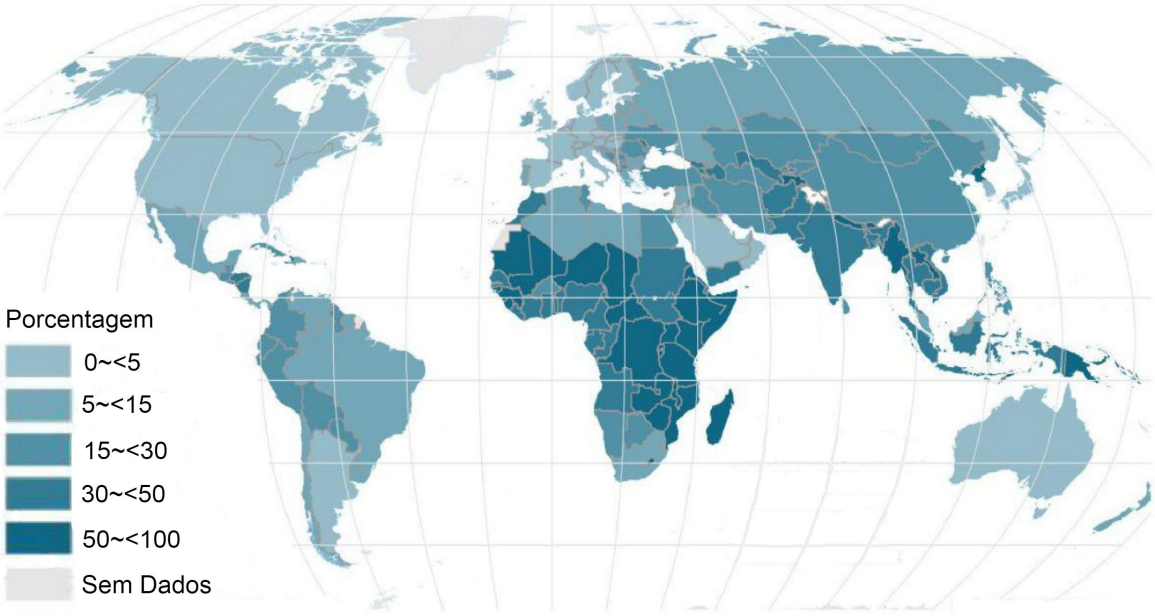
Fonte: Autor "adaptado de"FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2018b

Figura 2 – Valor adicionado na agricultura, parcela do PIB (2016-2017)



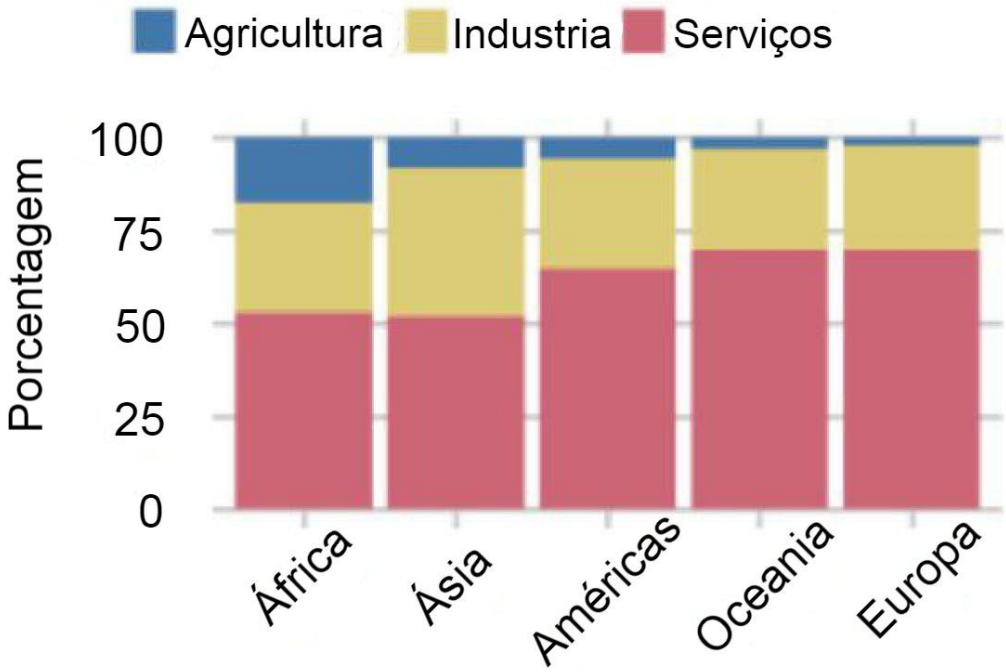
Fonte:Autor "adaptado de"FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2018b

Figura 3 – Emprego na agricultura, parte do emprego total (2018)



Fonte: Autor "adaptado de"FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2018b

Figura 4 – Valor adicionado na agricultura, silvicultura e pesca, indústria e serviços, participação no PIB, preços correntes (2018)



Fonte: Autor "adaptado de"FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2018b

com a quarta revolução industrial. A subseção a seguir visa descrever as quatro revoluções agrícolas e seus impactos.

2.1.1 Revoluções agrícolas

Exitem 4 revoluções agrícolas apontadas na literatura. A primeira delas ocorreu com substituição da caça e coleta pela plantação e colheita durante o período neolítico (BROWN *et al.*, 2009); a segunda revolução ocorreu durante o meio do século XVII principalmente na Inglaterra onde o aumento da produção agrícola foi possível devido ao aumento na força de trabalho e na criação de alguns processos agrícolas (OVERTON, 1996); a terceira revolução agrícola ou também conhecida como revolução verde ocorreu durante a década de 50 e 60 na qual diversas práticas agrícolas modernas foram implementadas para aumentar a produção, destaca-se, para tanto, o uso de fertilizantes e agrotóxicos nas plantações (HAZELL, 2009); por fim, estima-se que uma quarta revolução agrícola esteja ocorrendo no momento impulsionada pela utilização de tecnologias de comunicação e informação bem como do melhoramento genético (SCHWAB, 2016).

Estas revoluções agrícolas devem ser exploradas em detalhes para que seja possível avaliar o desenvolvimento da agricultura ao longo dos anos e também para traçar um paralelo entre as revoluções agrícolas e industriais dado o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos.

2.1.1.1 Primeira revolução agrícola

Segundo Brown *et al.* (2009):

> "O início da agricultura, cerca de 10.000 anos atrás, tem sido repetidamente visto como a principal transição no passado humano, uma mudança do ambiente natural no controle dos seres humanos para os humanos no controle do ambiente natural"

O adoção da agricultura ao invés da caça e coleta foi realizada em diversas partes do mundo ao mesmo tempo sendo principalmente implantada na Crescente Fértil, região localizada no Oriente Médio, e posteriormente na Mesomérica, no sudeste da Ásia e no Equador como pode ser visto na Figura 5 (LEWIN, 2004).

O surgimento da agricultura coincidiu com os aumento da população durante o período Neolítico devido ao aumento da complexidade das sociedades da época já que estas não ne-

cessitavam mais sair para caçar e coletar alimentos com tanta frequência pois a produção de alimentos passou a ser fixa em uma determinada região agriculturável (BOCQUET-APPEL, 2011).

Figura 5 – Surgimento da agricultura pelo mundo

Fonte: Autor "adaptado de"Lewin, 2004

2.1.1.2 Segunda revolução agrícola

Não existe consenso, na literatura, quanto ao período em que a a segunda revolução agrícola, também conhecida como revolução agrícola Britânica, ocorreu, no entanto segundo Overton (1996) argumenta, a revolução agrícola Britânica ocorreu em duas fases entre 1500 e 1850: a primeira fase foi caracterizada por uma limitação da produção agrícola que barrou o crescimento populacional, pois a qualquer momento que a população crescia os preços dos alimentos também crescia; a segunda fase foi caracterizada por uma maior capacidade de produção por hectare o que permitiu que a população crescesse além dos limites anteriores.

Vale ressaltar também que durante estes dois períodos a proporção da população inglesa trabalhando no campo saiu de aproximadamente 80% em 1500 para 20% em 1850, fato ca-

racterizado pela ocorrência da revolução industrial durante este mesmo período (OVERTON, 1996).

Segundo Mokyr (2011) esta revolução agrícola foi caracterizada principalmente pela implantação de métodos de rotação de cultivos permitindo que o solo recuperasse as suas características minerais, e a realização do controle de doenças e de risco dos cultivos. Ainda de acordo com o autor duas práticas de rotação são consideradas essenciais durante este período: a primeira conhecida como método Norfolk no qual plantações de trevo e nabo foram rotacionadas com cevada e trigo; e a segunda conhecida como criação conversível que envolve produzir cereais por anos e depois transformar a fazenda em um pasto por décadas garantindo a recuperação do nitrogênio no solo.

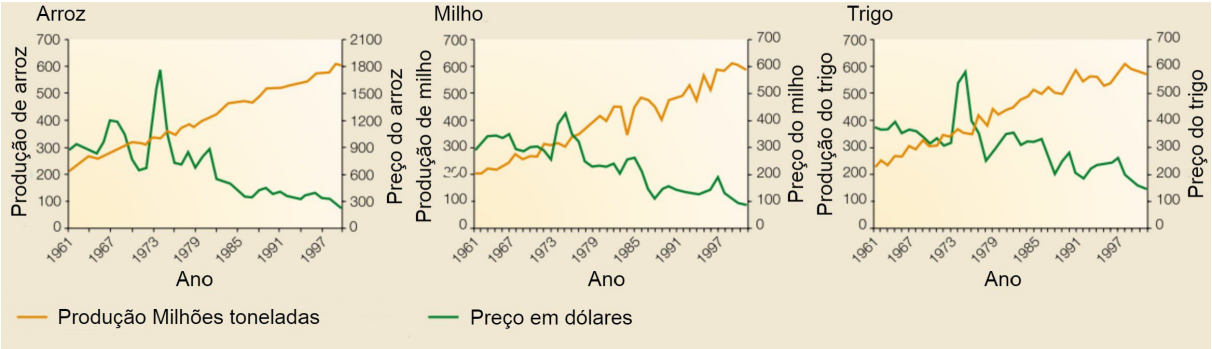
2.1.1.3 Terceira revolução agrícola

O termo revolução verde foi utilizado pela primeira vez em um discurso proferido William S. Gaud no qual ele expressa a sua visão sobre o uso de tecnologias e novos métodos na agricultura (GAUD, 1968). A revolução verde tem como elementos principais uma maior variedade de cerais, melhores práticas de irrigação, um controle de pestes mais adequado e o desenvolvimento de pesticidas e fertilizantes. Esta revolução não foi apenas tecnológica mas também incluiu aspectos econômicos e politicas ambientais (HAZELL, 2009).

A utilização de tecnologias da revolução verde principalmente o uso de variedades de sementes com maior capacidade de produção, conhecidas como high-yielding crop varieties (HYCV), provocou um aumento na produção de alimentos que por consequência contribuiu para a diminuição dos preços dos cultivos globalmente e para o aumento da quantidade média de calorias ingeridas (EVENSON, 2003). Contudo, segundo pontua Evenson (2003), os críticos de tal revolução levantam preocupações quanto as consequências ambientais para o uso das tecnologias da terceira revolução agrícola. Tais consequências podem ser descritas como a degradação do solo, a poluição química, a depleção dos aquíferos e o aumento da salinidade do solo.

O aumento da produção agrícola e a diminuição dos preços durante a revolução verde é evidenciado pela figura 6.

Figura 6 – Impacto da revolução verde



Fonte: Autor "adaptado de"Khush, 2001

2.1.1.4 Quarta revolução agrícola

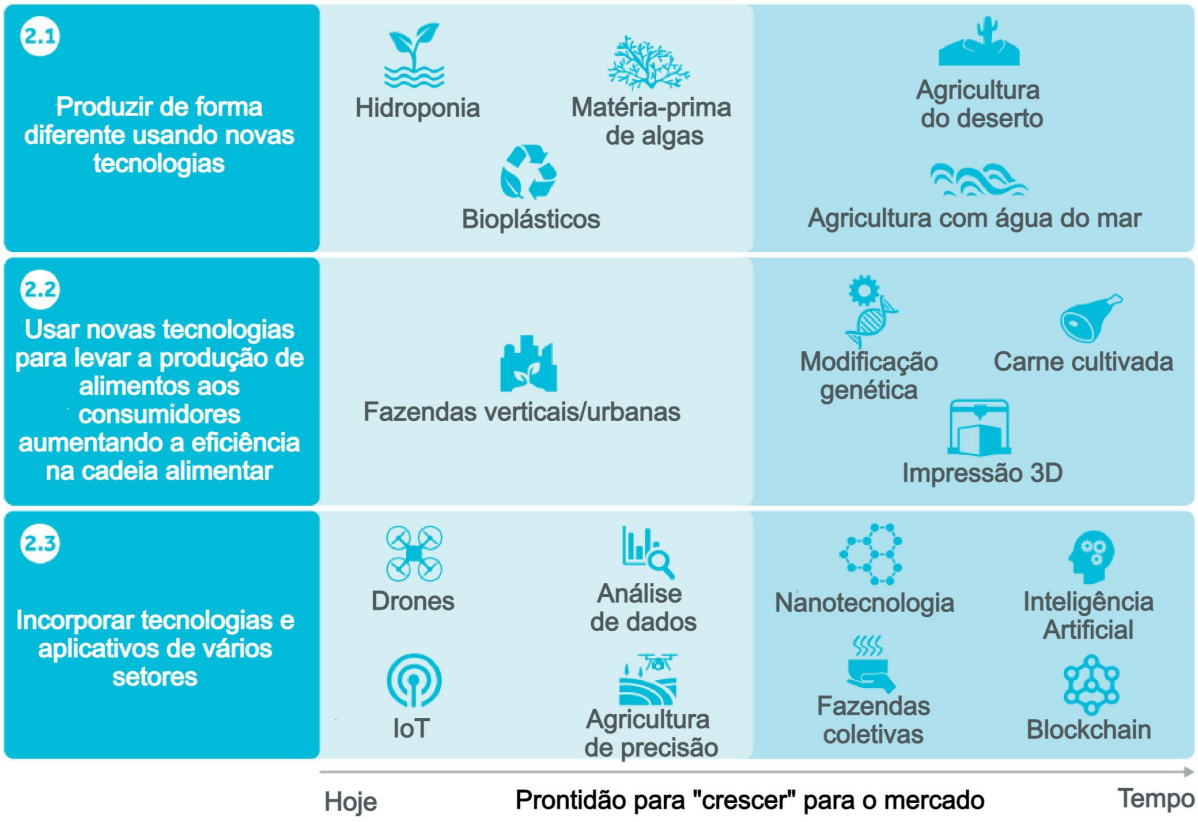
Não existe um consenso na literatura se existe uma quarta revolução agrícola, ou agricultura 4.0, ou se o que existe é uma extensão da revolução verde, porém com o desenvolvimento das ICT e o crescente uso de *Big Data*, IoT, robôs inteligentes e outras tecnologias da quarta revolução industrial é possível traçar um paralelo dos impactos que tais tecnologias tem na agricultura como descrito por Schwab (2016).

Segundo Deutscher Bauernverband (2016) alguns elementos são essenciais para o desenvolvimento da agricultura 4.0 dentre eles: internet rápida nas fazendas; abertura de dados; uso de dados meteorológicos; controle por satélite; tecnologia por drone; dados de equipamentos digitais; interfaces eletrônicas e infraestrutura de comunicação; segurança de dados. O uso de tais tecnologias na agricultura, no entanto, depende de uma série de investimentos em diversos setores e no continuo desenvolvimento de tais tecnologias levando em consideração as necessidades do setor agrícola.

É importante destacar as diversas tecnologias que podem ser utilizadas na agricultura 4.0, sendo elas: a IoT, o |*big data* e *data analytics*, a impressão 3D, o *blockchain*, dentre outras que podem ser vistas na figura 7 (CLERCQ; VATS; BIEL, 2018). Destaca-se que os autores identificaram três tendências gerais para o desenvolvimento de tais tecnologias sendo elas: a produção utilizando novas técnicas; o uso de tecnologias na cadeia produtiva para aproximar as centros de produção dos consumidores finais; e a interseção entre tecnologias e aplicações da indústria com a agricultura.

Vale destacar a relação entre as tecnologias apresentadas por Clercq, Vats e Biel (2018) e os pilares tecnológicos da Indústria 4.0, principalmente no que se refere a última tendência

Figura 7 – Mapa de tecnologias da agricultura 4.0



Fonte: Autor “Adaptado de” Clercq, Vats e Biel, 2018

apresentada pelos autores. A próxima sessão abordará o surgimento e desenvolvimento do conceito de Indústria 4.0 bem como seus possíveis impactos na agricultura.

2.2 UM PANORAMA DA INDúSTRIA 4.0

No artigo de Schuh *et al.* (2017) os autores afirmam que:

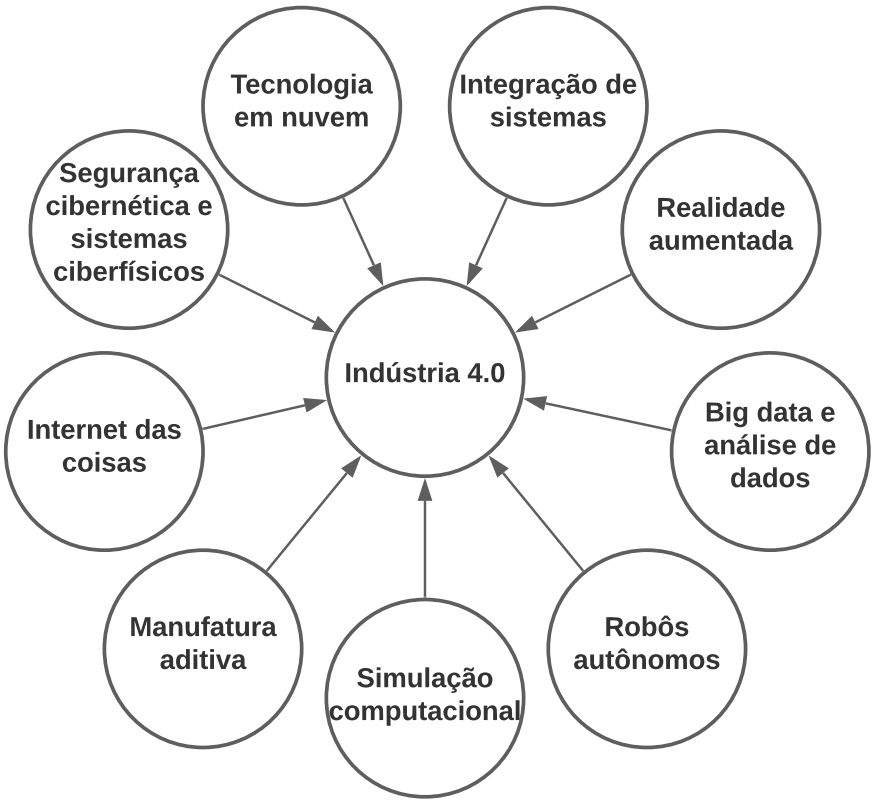
> “O termo “Industre 4.0” foi introduzido em 2011 pelo *Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance* para descrever a ampla integração da tecnologia da informação e comunicação na produção industrial.”

De acordo com Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), para implementar com sucesso e desenvolver o conceito de Indústria 4.0, existem oito tópicos principais que necessitam de atenção: padronização e arquitetura de referência; gerenciamento de sistemas complexos; uma infra-estrutura abrangente de banda larga para a indústria; segurança e proteção de dados; organização do trabalho; treinamento e desenvolvimento profissional contínuo; *framework* regulamentado; e eficiência de recursos.

Nota-se que estas tecnologias atuam em três vertentes sendo elas: a primeira de infraestrutura e regulação pois é necessário garantir que a indústria tenha um ambiente adequado para a implantação das múltiplas tecnologias habilitadoras da quarta revolução industrial; a segunda é a de padronização, interoperabilidade e segurança dos sistemas implantados, dado que é necessário ter uma maior e mais segura comunicação entre os diversos participantes da indústria; e por fim o desenvolvimento pessoal visto que não só os trabalhadores mas também os consumidores devem se preparar de maneira adequada para esta nova revolução industrial.

Vaidya, Ambad e Bhosle (2018) chamam afirmam que existem nove pilares tecnológicos para o desenvolvimento do conceito de indústria 4.0, que são os seguintes: *big data* e *data analytics*; robôs autônomos; simulação; integração de sistemas; a Internet Industrial das Coisas (IIoT); segurança cibernética e CPS; tecnologia de nuvem; manufatura aditiva; e realidade aumentada. A figura 8 apresenta os nove pilares tecnológicos da indústria 4.0.

Figura 8 – Pilares da Indústria 4.0



Fonte: O Autor

Essas tecnologias estão moldando a pesquisa na área de indústria 4.0, dado que cada uma delas apresenta seus desafios e oportunidades de desenvolvimento únicos. O trabalho de Lu (2017) mostrou como o tema quarta revolução industrial vem sendo tratado na literatura,

apontando os conceitos, as perspectivas, as tecnologias-chave, as arquiteturas básicas e as aplicações nos diversos setores produtivos. Integrar cada uma dessas tecnologias em um sistema robusto e flexível é crucial para garantir que as indústrias estejam cada vez mais preparadas para atuar em um cenário no qual os diversos *stakeholders* estão cada vez mais interligados e que a interação entre humanos e máquinas é cada vez mais rápida e flexível (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

Destaca-se ainda os 6 estágios de desenvolvimento da Indústria 4.0 como proposto por Schuh *et al.* (2017) e que pode ser visto na figura 9. É importante descrever com detalhes as seis etapas relativas ao desenvolvimento da Indústria 4.0, sendo elas:

Figura 9 – Estágios do índice de maturidade da indústria 4.0

Fonte: Autor "Adptado de"Schuh *et al.*, 2017

a) O estágio 1 é o da informatização, na qual os sistemas de informação de cada empresa permanece isolado de dentro da empresa.
b) O estágio 2 é o da conectividade, na qual esses sistemas de informação estão conectados entre si.
c) O estágio 3 é o da visibilidade, em que as informações fornecidas pelos sistemas são reunidas em tempo real, permitindo a criação da sombra digital de uma empresa.
d) O estágio 4 é o da transparência, na qual as informações coletadas pela sombra digital são analisadas para criar conhecimento e significado sobre suas interações dentro da empresa.
e) O estágio 5 é o da capacidade preditiva, na qual é possível simular cenários futuros com base no conhecimento do estágio anterior.

f) O estágio 6 é o da adaptabilidade, na qual é possível adaptar a empresa com base em ações automatizadas e tomada de decisões automatizada.

É importante ressaltar que a Indústria 4.0 é um tema em constante desenvolvimento e que sua completa aplicação ainda não está disponível, visto que a interoperabilidade entre as diversas tecnologias ainda não foi alcançada. Além disso, destaca-se que para a implantação da Indústria 4.0 é necessário não só a aplicação de tecnologia nas indústrias mas também uma modificação na forma com que os recursos disponíveis são utilizados e uma alteração na estrutura organizacional das empresas e também na cultura dos indivíduos envolvidos nessa revolução industrial (SCHUH *et al.*, 2017).

2.3 TECNOLOGIAS APLICADAS NA AGRICULTURA

É importante ressaltar que algumas das tecnologias da Indústria 4.0 são aplicadas, em menor escala, na agricultura através do conceito de agricultura de precisão, todavia é importante ampliar o uso de tais tecnologias para o controle e planejamento da produção agrícola (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018). Inicialmente o termo agricultura de precisão será definido e posteriormente um paralelo entre as suas tecnologias e as tecnologias da Indústria 4.0 é traçado.

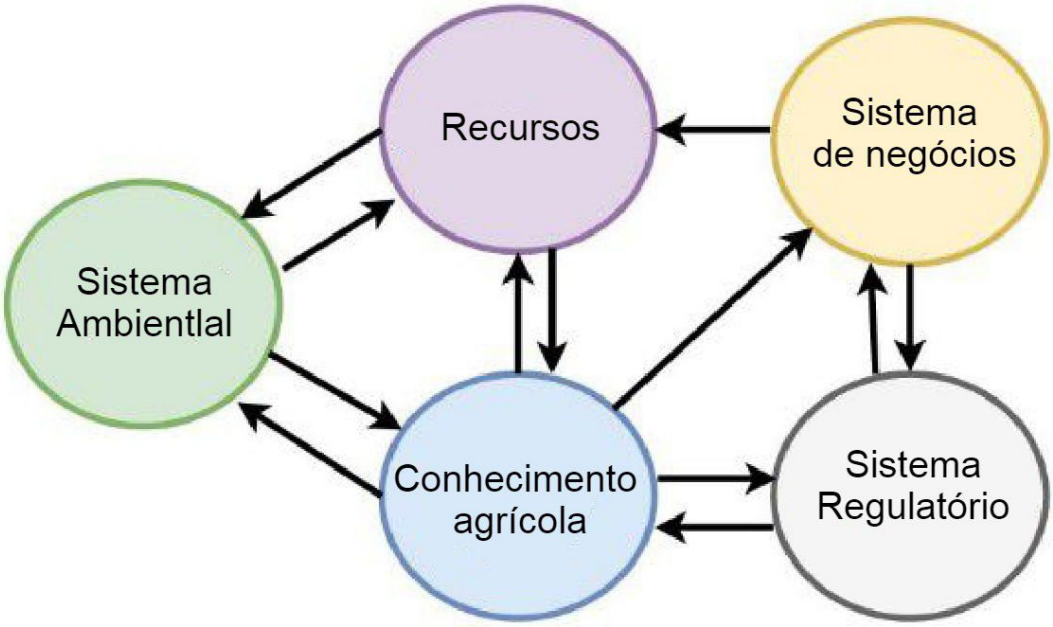
2.3.1 Agricultura de precisão

De acordo com Dumitrache *et al.* (2017) os elementos que formam um sistema de agricultura são os seguintes:

a) Ambiente - o solo, água, vento, insolação solar, etc
b) Recursos - Sementes, equipamentos, maquinários, força de trabalho, força de trabalho especializada, etc
c) Conhecimento - Processos, técnicas, métodos, experiência, treinamentos, protocolos, etc
d) Negócios - Estrutura organizacional, relação com clientes e fornecedores, logística, etc
e) Regulação - Politicas públicas, planejamento rural, distribuição e regulação de terras, politicas para agrotóxicos, etc.

Todos estes elementos se relacionam para criar um ambiente dinâmico e diverso, no qual o mal funcionamento de qualquer esfera tem impactos graves em todo o sistema agrícola, por exemplo, uma politica de regulação de agrotóxicos mal executada terá impactos diretos no ambiente agrícola, na necessidade de recursos específicos para lidar com os efeitos de tais agrotóxicos, no conhecimento de novas técnicas e processos para a correta implantação de um novo agrotóxico, na relação e percepção dos clientes quanto a produção agrícola e etc. As relações entre cada esfera poder ser observada na figura 10.

Figura 10 – Relações entre um sistema agrícola



Fonte: Autor "Adptado de"Dumitrache *et al.*, 2017

Com o desenvolvimento de tecnologias na agricultura surge o conceito de agricultura de precisão que, de acordo com Pierce e Nowak (1999), é definido como:

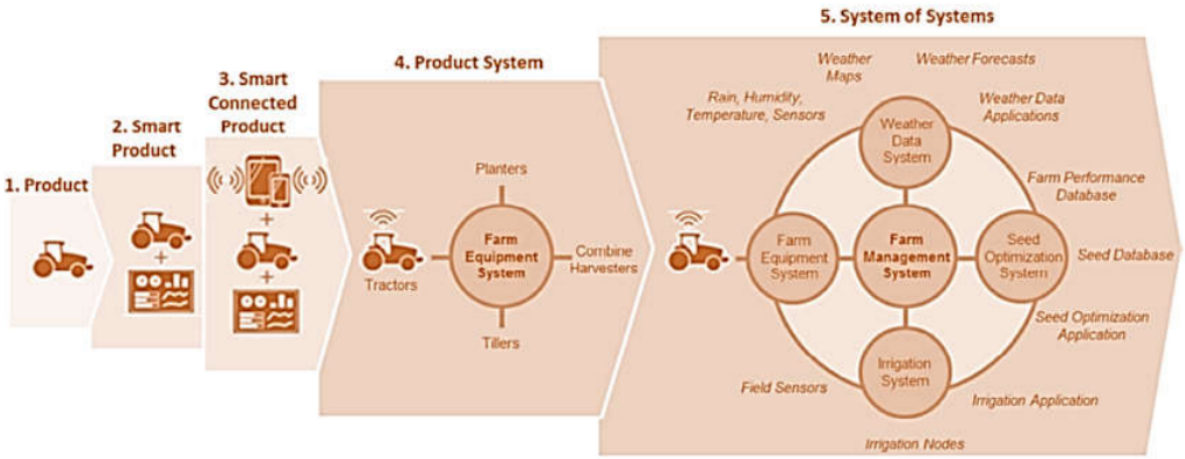
> "A aplicação de tecnologias e princípios para gerenciar a variabilidade espacial e temporal associada a diversos aspectos da produção agrícola, com o objetivo de melhorar o desempenho das culturas e a qualidade ambiental"

2.3.2 Indústria 4.0 e agricultura de precisão

Zambon *et al.* (2019) destacam como o desenvolvimento tecnológico afeta não apenas a indústria mas também a agricultura principalmente em relação a Pequenas e Médias Empresas (PMEs). Os autores destacam que uma integração entre o mercado, a produção e os negócios

é imprescindível para que as fazendas sejam capazes de se adaptar rapidamente. A figura 11 indica como a comunicação entre os diversos atores do setor agrícola deve ser virtualizada para que os benefícios da agricultura 4.0 possam ser extraídos.

Figura 11 – Dados sobre os métodos de irrigação aplicados no mundo



Fonte: Autor "Adptado de"Zambon *et al.*, 2019

Nota-se que a aplicação correta da agricultura de precisão depende de 4 elementos sendo eles: até que ponto as condições dentro da fazenda são conhecidas e gerenciáveis, a adequação das recomendações de recursos de entrada, o grau de controle da aplicação e o grau de suporte através de infraestrutura pública e privada (PIERCE; NOWAK, 1999). Cada um destes elementos é crucial para o desenvolvimento da agricultura de precisão e afeta as relações de cada subsistema dentro de um sistema agrícola. O autor ainda destaca que:

> "O sucesso na implantação da agricultura de precisão depende de evoluir de uma coleção de tecnologias parcialmente compatíveis para um sistema de gerenciamento integrado capaz de acomodar as diversas configurações biofísicas e empresas de cultivo características da agricultura atual"

Um trabalho muito importante para ser destacado foi realizado por Trivelli *et al.* (2019), em que ele realizou uma revisão da bibliografia e identificou 6 grupos de tecnologias que estão na intersecção entre agricultura de precisão e Indústria 4.0 sendo eles:

a) Monitoramento - Tecnologias como o Sistema de Posicionamento Global (GPS), Sistema de Informação Geográfica (GIS), Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM), satélite, ultrassom, lidar etc, fornecem os meios para realizar o monitoramento do ambiente agrícola e dos equipamentos envolvidos no processo de produção.

b) IoT - Redes de sensores sem fio, Identificação por Radiofrequência (RFID), *Blutetooth*, *Zigbee*, *Wi-Fi*, etc. São tecnologias de comunicação através da internet que permitem que sensores sejam conectados à nuvem.

c) Automação - Veículos autônomos, Veículos Aéreos não Tripulados (VANT), robôs agrícolas, etc, são tecnologias que possibilitam a automação de máquinas, equipamentos e processos dentro de uma fazenda.

d) Decisão - Inteligência Artificial (IA), mineração de dados, sistemas especialistas, previsão, aprendizado de máquina, web semântica, rede inteligente, etc. São tecnologias que permitem os equipamentos e sistemas oferecerem suporte na tomada de decisão realizada pelos fazendeiros.

e) Hardware - Sistemas embarcados, CPS, *Raspberry pi*, *arduinos*, módulos de comunicação, sondas de solo etc. São tecnologias que permitem o desenvolvimento de soluções cada vez mais robustas e resistentes garantindo a sua implantação no ambiente agrícola.

f) Laser - Laser, transmissor a laser, receptor a laser, avaliação a laser, fibra óptica, sensor fotônico, etc. São tenologias que permitem a coleta de imagens e informações relevantes para o correto funcionamento dos sistemas anteriores.

Nota-se que estas tecnologias também estão presentes nos pilares tecnológicos descritos por Vaidya, Ambad e Bhosle (2018), portanto existe uma grande intersecção dos dois temas mesmo que na prática o desenvolvimento tecnológico das duas frentes, agricultura e indústria, tenha, cada um, as suas particularidades.

É possível notar que tal visão de sucesso também pode ser aplicada para a quarta revolução industrial, já que é necessário unir diversas tecnologias diferentes em um sistema integrado capaz de ser flexível, ágil, robusto e seguro. O conceito de indústria 4.0, seus pilares tecnológicos e seus avanços são evidenciados na seção seguinte bem como posteriormente é traçado um paralelo entre o desenvolvimento da indústria 4.0 e da agricultura 4.0.

2.3.3 Tecnologias aplicadas na agricultura de precisão

Existem diversas tecnologias que podem ser aplicadas na agricultura deste a modificação genética para melhoramento da produção agrícola até a automação de máquinas e equipamentos. Neste contexto, é importante destacar as tecnologias que são aplicas na agricultura de

precisão para garantir que os recursos como água, fertilizantes, agrotóxicos etc, sejam aplicados nas quantidades corretas e nos locais corretos.

A seguir serão descritas algumas tecnologias apontadas por Bhakta, Phadikar e Majumder (2019), destacando-se a aplicação destas tecnologias em 3 etapas sendo elas: coleta de dados; processamento de dados e tomada de decisão; e controle de taxa variada. A coleta de dados permite a extração de informação através de sensores e dispositivos remotos como *drones* e satélites. A etapa de processamento depende da computação na nuvem, das plataformas IoT e de algoritmos de IA. Já o controle a taxa variada é necessário para garantir a variabilidade espacial e temporal necessária para a agricultura de precisão. As tecnologias presentes dentro de cada uma dessas etapas pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1 – Tecnologias aplicadas na agricultura

Coleta de dados	**Análise de dados**	**Controle a taxa variada**
GPS	GIS	Irrigação a taxa variada
Sensoriamento Remoto	Lógica *fuzzy*	Fertirrigação a taxa variada
Sensores sem fio	Internet das coisas	Pesticida a taxa variada
Monitores de rendimento	Aprendizagem de máquina	
	Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo	
	Algoritmos inspirados na natureza	
	Computação em nuvem	

Fonte: O Autor "Adaptado de"Bhakta, Phadikar e Majumder, 2019

É importante destacar que cada uma dessas tecnologias ainda tem ramificações ou relações com outras tecnologias como é o caso do sensoriamento remoto, que pode ser realizado através da coleta de imagens por satélites ou então por VANT. Acentua-se a importância de separar as tecnologias em três grupos pois assim é possível avaliar criteriosamente cada etapa de um processo de tomada de decisão e verificar quais são as melhores tecnologias disponíveis ou que podem ser utilizadas em determinada fazenda.

Utilizando como base a tabela 1 é possível extrair dois conceitos presentes na literatura que tem grande impacto na agricultura, sendo eles a IoT e o *Big Data*. As próximas sessões visam analisar o impacto desses conceitos na agricultura.

2.4 BIG DATA NA AGRICULTURA

SMART MANUFACTURING: PAST RESEARCH... (2016) afirmam que *big data* geralmente significa um conjunto de dados que é inadequado para ser analisado pelos métodos tradicionais de processamento de dados devido a sua ampla variedade, estrutura complexa e tamanho, enquanto Lee, Kao e Yang (2014) dizem que *big data* é crítico para criar máquinas com capacidade de auto aprender, ou seja capazes de aprender enquanto executam tarefas. Usando a metodologia *big data*, é possível criar modelos e simulações com base na maneira correta de tratar dados.

Rodič (2017) afirma que a simulação mudou de modelos puramente analíticos e orientados a otimização para integrar modelos de simulação em ferramentas de suporte à tomada de decisão a serem usadas recorrentemente. Além disso, modelos independentes foram substituídos por modelos conectados a partir de diferentes fontes de dados. Isso significa que o *big data* está ajudando a criar modelos e simulações mais robustos,capazes de representar com mais precisão as informações coletadas de diferentes recursos.

Segundo Bendre, Thool e Thool (2015) os dados obtidos em fazendas podem ser divididos em 6 tipos, sendo eles:

a) Dados históricos - Inclui dados de características do solo, características de desenvolvimento dos cultivos, monitoramento do clima, dados de trabalho, monitoramento de produção final, etc.
b) Dados de sensores e equipamentos - Dados coletados por máquinas e equipamentos, dados coletados por sensores do solo, dados de temperatura ambiente, registros dos fazendeiros e dos equipamentos, etc.
c) Dados sociais e da internet - Inclui comentários de clientes, sites e blogs agrícolas, grupos de mídia social, páginas da web, etc.
d) Publicações - Inclui pesquisa agropecuária, orientações e práticas baseadas em texto e requisitos da agricultura, etc.
e) Dados transmitidos - inclui monitoramento de culturas, drones, aeronaves, sensores sem fio, celulares, câmeras de segurança, etc.
f) Dados externos, de negócios e industrias - Os dados de sistemas de cobrança e agendamento, departamentos agrícolas e outras empresas fabricantes de equipamentos agrícolas, etc.

É importante destacar que a forma com que os dados são apresentados, seja por meio de tabelas, figuras, gráficos, distribuições espaciais, etc, é crucial para que os agricultores compreendam corretamente as informações sendo transmitidas. Em países em desenvolvimento alguns fatores influenciam na escolha da correta forma de visualizar os dados como a baixa escolaridade, a falta de conhecimento sobre as ferramentas disponíveis, a diversidade de línguas, a baixa experiência com interfaces de usuário etc (ANIK *et al.*, 2015). Isso não significa que os agricultores não adotam ou adotariam novas tecnologias mas que é necessário desenvolver tais tecnologias pensando nas necessidades dos agricultores (MONTELEONE *et al.*, 2020). A IoT é uma tecnologia que permite mostrar ao agricultor a situação de sua fazenda através de painéis e aplicativos personalizados para a necessidade do agricultor.

A próxima seção visa mostrar o uso da IoT na agricultura, evidenciando como está o desenvolvimento desse tema nos últimos anos e também como alguns projetos de IoT foram realizados.

2.5 INTERNET DAS COISAS APLICADA NA AGRICULTURA

Uma das principais tecnologias que já começa a ser aplicada em fazendas é a IoT. A revisão da literatura sobre o tema aponta que os estudos realizados nesta área são dominados por pesquisas expRede de longa distância e de baixa potência (LoRaWAN)tórias ou por estudos que mostram os sistemas utilizados em pequenas fazendas pilotos (VERDOUW; WOLFERT; TEKINERDOGAN, 2016). Portanto, para uma boa fundamentação teórica alguns desses estudos devem ser levantados de maneira a evidenciar a evolução do tema e as dificuldades encontradas pelos pesquisadores para que o tema seja desenvolvido. Algumas revisões da literatura sobre o tema já foram realizadas (NAVARRO; COSTA; PEREIRA, 2020; RAY, 2017; TALAVERA *et al.*, 2017; TZOUNIS *et al.*, 2017; VERDOUW; WOLFERT; TEKINERDOGAN, 2016), contudo vale destacar alguns dos artigos retratados na literatura.

Agale e Gaikwad (2017) propôs um sistema utilizando IoT para capturar parâmetros como temperatura, umidade do ambiente, umidade do solo etc, a cada 10 segundos para gerar análises capazes de identificar a necessidade de água das plantas. O sistema utiliza como base um *hardware Raspberry Pi* 3 modelo B+ para fazer o processamento dos dados coletados pelos sensores que estão posicionados perto da planta. O autor destaca alguns benefícios do sistema criado, dentre eles tem-se: o sistema pode ser implantado em pequenas fazendas, os dados

obtidos localmente estão disponíveis mundialmente através da internet e a possibilidade de automatizar o sistema de irrigação baseado nas análises realizadas.

Já o estudo realizado por Krishna *et al.* (2017) utiliza um *hardware Raspberry Pi* 2 modelo B para controlar um robô que contem sensores de gás carbônico, umidade ambiente, umidade do solo, temperatura ambiente, pH, luz ultravioleta, e infra vermelho passivo. O robô é capaz de andar para a frente e para trás através de um motor elétrico e é capaz de fazer a coleta dos dados dos sensores e transmiti-los sem fios para um central.

Pitakphongmetha *et al.* (2016) desenvolveram uma rede de sensores conectados sem fio para uma estufa. O sistema é composto por sensores de temperatura, umidade do solo e módulo ultrassônico para controle do nível do tanque de água. Tais sensores transmitem seus dados para a plataforma *ThingSpeak* através de um controlador do tipo *nodeMCU*. Segundo os autores o sistema também foi conectado a um aplicativo chamado *Blyn* em que é possível visualizar os dados coletados pelos sensores arrastando *widgets* disponíveis no aplicativo.

Ruengittinun, Phongsamsuan e Sureeratanakorn (2017) também desenvolveram um sistema de *iot* para uma estufa, porém este sistema é controlado por um *hardware Arduino UNO* e um *Arduino Wi-Fi shield*. Os sensores utilizados são de condutividade do solo, pH e módulo ultrassônico. O sistema também é capaz de controlar a irrigação das plantas através de uma bomba e de um dispositivo de dispersão de líquidos. Os autores desenvolveram o sistema pensando em agricultores que gostariam de ter um cultivo em estufa, mas que não tem o tempo para administrar a plantação.

Suakanto *et al.* (2016) desenvolveram um modelo conceitual baseado na *iot* para o auxílio na tomada de decisão dos fazendeiros. Para tal modelo os autores propuseram um sistema no qual a tomada de dados por sensores, as tarefas de controle e gerenciamento e a análise dos dados obtidos pelo sistema foram considerados. O modelo foi desenvolvido utilizando seis categorias diferentes, sendo elas: monitoramento, gerenciamento, planejamento, distribuição da informação, sistema de suporte de decisão e controle de ação. Os autores ainda evidenciam duas principais dificuldades que surgem com o sistema proposto, sendo elas: o gerenciamento de tráfego dentro do sistema e a natureza dos dados obtidos que por vezes precisa ser coletado em tempo real e em grandes quantidades.

Jayaraman *et al.* (2016) desenvolvam uma plataforma de IoT chamada *SmartFarmNet* que coleta de maneira automática alguns parâmetros das fazendas como informações sobre o solo, fertilização e irrigação. Os autores levantam alguns desafios encontrados na literatura para o desenvolvimento de plataforma IoT, sendo eles: a possibilidade de se capturar uma variedade

de dados de uma grande variedade de sensores; suportar a integração de sensores diversos fabricados por diferentes empresas; integrar dados atuais com dados coletados anteriormente por outras metodologias que não sejam pela aplicação da tecnologia IoT; promover ferramentas de análise e visualização que os próprios fazendeiros possam utilizar; e compartilhar os dispositivos e análises realizados em uma fazenda com outras fazendas.

Para resolver tais dificuldades Jayaraman *et al.* (2016) desenvolveu a plataforma *SmartFarmNet* com os seguintes objetivos: permitir a integração entre diversos dispositivos fabricados por vários fabricantes; garantir a escalabilidade do sistema para grandes fazendas; e permitir que existam funcionalidades que os próprios fazendeiros possam utilizar para fazer as análises de suas fazendas. Os autores ainda mostram que existem algumas plataformas que podem ser utilizadas como base para a criação de plataformas voltadas para a agricultura, algumas dessas plataformas são: Unidots(UNIDOS, 2018), Xively (XIVELY, 2018), Thing Speak (THING SPEAK, 2018), Open.Sen.se (OPENSENSE, 2016), SensorCloud (SENSOR CLOUD, 2018), Amazon IoT (AWS IOT, 2018) e IBM IoT (IBM, 2018).

Vasisht *et al.* (2017) desenvolveram uma plataforma chamada *FarmBeats* baseada na tecnologia de IoT capaz de fazer a transmissão de dados entre sensores, câmeras e drones com a internet. O sistema proposto pelos autores foi utilizado por seis meses em duas fazendas nos Estados Unidos. Os autores destacam quatro pontos principais que a plataforma proposta contribui, sendo eles: a entrega em larga escala, a capacidade da estação base de reconhecer o clima em que esteja inserida, a capacidade de comprimir as informações contidas nas imagens para a transferência até a nuvem e um algoritmo de planejamento de voo para drones na agricultura.

Segundo Vasisht *et al.* (2017) no desenvolvimento da plataforma eles focaram em quatro aspectos principais: disponibilidade frente a problemas elétricos e de conexão; capacidade de suportar um grande quantidade de dados e sensores; conectividade com a nuvem para permitir que o agricultor acesse as informações mesmo fora da fazenda; e disponibilidade dos dados de maneira adequada mesmo com problemas de lacunas na transmissão e estocagem dos dados.

Mohanraj *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de irrigação por gotejamento com base em diferentes nós sendo que cada nó é divido em unidade de processamento, unidade de monitoramento, unidade de energia, unidade de comunicação. Neste trabalho foram desenvolvidos dois nós diferentes sendo eles um nó final que calculava a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) e o nó coletor que era responsável por detectar o excesso de água no campo, determinar a taxa de precipitação, programar a fertirrigação e monitorar a quantidade de energia da bateria.

Oliveira-Jr *et al.* (2020) desenvolveram uma plataforma de IoT que coleta parâmetros sobre o estado do solo, como pH, umidade, textura e cor do solo, e também parâmetros como a temperatura do ar e a intensidade luminosa. Desta forma os autores propõem um dispositivo integrado de baixo custo capaz de coletar estes diversos parâmetros e envia-los através da internet para serem analisados e visualizados pelos fazendeiros.

Ma e Chen (2018) desenvolver uma plataforma de IoT com tecnologia LoRaWAN para transmissão, que é capaz de coletar dados de diversos sensores conectados a um *hardware Arduíno* que contém o módulo LoRaWAN. Os dados são transmitidos para o *Gateway LoRaWAN* que faz a transferência desses dados para a plataforma para que eles sejam processados e posteriormente utilizados nas aplicações e serviços.

Waleed *et al.* (2020) desenvolveram um sistema para determinar a área de cobertura de um implemento agrícola através da IoT, GPS e IA. O sistema proposto utiliza o método K-ésimo vizinho mais próximo, ou K-nearest neighbors (KNN) em inglês, com ou sem uso da biblioteca Fast Library for Approximate Nearest Neighbours (FLAN)

Nota-se que grande parte dos artigos sobre IoT apresentam apenas pequenos protótipos ou então arquiteturas de plataformas como destacado por Verdouw, Wolfert e Tekinerdogan (2016). Grande parte dos artigos sobre protótipos mostram os circuitos eletrônicos e indicam que o sistema proposto funciona, mas não colocam os protótipos em campo para coletar dados reais de uma determinada cultura. Já os artigos que destacam a arquitetura de plataformas IoT apresentam esquemas de funcionamento sem aplicar tais plataformas em uma fazenda real.

É possível observar pelos trabalhos apresentados que a IoT aplicada a agricultura é um tema em desenvolvimento e que ainda tem alguns desafios que devem ser superados. No entanto, muitos benefícios surgem com a utilização desta tecnologia. Uma das dificuldades que surge com o uso de uma plataforma IoT é o de verificar a influência dos parâmetros analisados no resultado da produção de uma fazenda. Este projeto visa analisar tais dificuldades de forma a propor uma solução tecnológica utilizando conceitos de CPS e gêmeos digitais.

2.5.1 O conceito de fazenda inteligente

O conceito de *smart farming*, ou fazenda inteligente, vem sendo estudado recentemente devido à grande importância da agricultura para as sociedades e nações, no entanto, o conceito ainda carece de uma definição aceita pela maioria dos autores. A tabela 2 indica a definição apresentada na literatura por alguns autores.

Tabela 2 – Conceito de fazenda inteligente

Autor	**Definição**
Bojan *et al.* (2015)	Fazenda inteligente é a integração de uma rede de sensores nas fazendas
Chetan Dwarkani M *et al.* (2015)	Fazenda inteligente é o vínculo entre um sistema de sensoriamento e um sistema inteligente de irrigação através da comunicação sem fio
Verdouw, Wolfert e Tekinerdogan (2016)	O conceito é uma ampliação do conceito de agricultura de precisão utilizando como extensão a IoT
Jayaraman *et al.* (2016)	Fazenda inteligente envolve o uso de ICT, *big data* e a IoT para monitorar as plantações.
Suakanto *et al.* (2016)	O conceito de fazenda inteligente visa fazer o monitoramento do ambiente das fazendas
Alipio *et al.* (2017)	Fazenda inteligente é uma fazenda que se torna orientada e habilidata através dos dados obtidos principalmente através da IoT
O'Grady e O'Hare (2017)	O conceito visa utilizar as ICT de maneira a habilitar fazendas mais eficientes, produtivas e rentáveis
Chidambaranathan, Handa e Ramanamurthy (2018)	Fazenda inteligente é a habilidade de aumentar a produção agrícola através da coleta, documentação e utilização de dados de maneira a gerar estratégias de gerenciamento utilizando sensores e atuadores
Pivoto *et al.* (2018)	O conceito deve incluir, além sensoriamento da fazenda, o sensoriamento de máquinas e equipamentos também
Budaev *et al.* (2018)	Fazenda inteligente existe através da criação de um ambiente digital de serviços utilizando o conhecimento de base e tecnologias disponíveis por vários agentes
Pooja *et al.* (2017)	O uso de tecnologias de automação baseados em sensores é vital para a definição do conceito de fazenda inteligente
Xue-fen *et al.* (2018)	O conceito de fazenda inteligente visa aumentar a produção agrícola através da informatização dos sistemas existentes nas fazendas
Colezea *et al.* (2018)	O conceito é uma ciência que combina as vantagens oferecidas pelo surgimento de novas tecnologias com o amadurecimento da agricultura

Fonte: O Autor

Verifica-se que cada autor tem uma visão diferente do que seria o conceito de fazenda inteligente e como ele pode ser compreendido e aplicado. Unindo as diferentes perspecivas do conceito pode-se definir fazenda inteligente como a utilização integrada da ICT, como a IoT, o *big data* e a IA, de maneira a realizar o sensoriamento e monitoramento não só do ambiente agrícola mas também das máquinas e equipamentos utilizados pelos fazendeiros, para a gerar e analisar dados integrados e documentáveis de forma que o fazendeiro ou empresa possa

aumentar sua produção, reduzir seu custo e reduzir seu desperdício, para habilitar fazendas mais eficientes, produtivas e rentáveis.

O estudo de Pivoto *et al.* (2018) mostra que na literatura existem três preocupações recorrentes em relação a implantação de uma fazenda inteligente, sendo elas: o desenvolvimento de tecnologias para o surgimento das mesmas; a integração das diversas tecnologias com as fazendas e as cadeias de suprimentos; e o impacto causado pelo uso das tecnologias nas fazendas e no ambiente. Verifica-se que tais preocupações são mostradas também por outros autores (JAYARAMAN *et al.*, 2016; VERDOUW; WOLFERT; TEKINERDOGAN, 2016; WOLFERT *et al.*, 2017) e que devem ser analisadas para que o tema possa ser desenvolvido.

É importante ressaltar que o avanço no desenvolvimento de tecnologias para as fazendas inteligentes é altamente dependente do progresso nas áreas de biotecnologia, nanotecnologia, e ICT (COLLADO; FOSSATTI; SAEZ, 2019). Além destas áreas principais destaca-se também o desenvolvimento em engenharia para a aplicação de máquinas e equipamento agrícolas mais eficientes e também de estudos sociais sobre a adoção de tecnologias em áreas rurais, bem como o impacto ambiental que a redução no consumo dos recursos naturais causará.

É importante notar que o conceito de fazenda inteligente pode ser ampliado ao longo dos próximos anos com o uso dos conceitos de sistemas ciberfísicos e também de gêmeos digitais. Este trabalho visa ampliar o desenvolvimento do tema através da proposta de uma fazenda digital e inteligente e da validação dessa proposta em um experimento real.

2.6 GESTÃO DE ÁGUA

De acordo com Nam *et al.* (2017) um sistema de gestão de água é definido como um elemento capaz de garantir a correta aplicação de água nas regiões necessárias e também deve garantir a operação e manutenção dos sistema para garantir a eficiência do mesmo. O autor destaca diversos desafios que devem ser enfrentados para a correta implantação de um sistema de gestão de água adequado, dentre eles destaca-se: a perda de água devido a infiltração nos canais, tubulações, reservatórios e etc; manutenção inadequada dos sistemas de irrigação e das estruturas que compõem o sistema hídrico; dificuldade na definição dos locais exatos onde se faz necessário a irrigação e também da quantidade adequada de água a ser executada; a falta de conhecimento operacional da força de trabalho que opera o sistema ou se beneficia dele;e a falta de transmissão de instruções de gerenciamento por todos os envolvidos no sistema.

Segundo Robles *et al.* (2014) o setor de gerenciamento de água enfrenta algumas dificuldades para criar um padrão para a gestão de água devido ao grande numero de *stakeholders* tanto do setor privado quanto público, bem como da sociedade civil. Dentre os desafios os autores destacam: a insuficiente integração e implementação de soluções; a falta de modelos de gerenciamento de água com base nas tecnologias de informação e comunicação; a dimensão das empresas de gerenciamento de água; falta de interconexão entre os diferentes provedores de soluções.

É importante destacar que a automação dos sistemas de irrigação pode ser dividido em duas categorias principais (COLLADO; FOSSATTI; SAEZ, 2019):

a) Sistemas sem *feedback*: Sistemas condicionado pelo tempo e volume de água predeterminados.
b) Sistemas com *feedback*: Sistema que monitora no mínimo duas variáveis de entrada para garantir o correto funcionamento do sistema durante a irrigação.

No primeiro caso o fazendeiro deve escolher a quantidade de água e o tempo em que a irrigação ficará ligada e assim o sistema funcionará de acordo com as informações fornecidas pelo fazendeiro. Isso significa que mesmo que não haja a necessidade de irrigar, mesmo em casos extremos em que está chovendo, o sistema executará o processo de irrigação da mesma forma. Já no segundo caso o sistema monitora duas ou mais variáveis que restringem o funcionamento do sistema além da definição do volume a ser irrigado e do tempo de irrigação. Neste caso, as restrições podem ser, por exemplo, a ocorrência de chuva durante a irrigação, a delimitação de horários de operação do sistema, a verificação de possíveis vazamentos no sistema, dentre outras restrições. Segundo Soto-Garcia *et al.* (2013) a aplicação de tecnologias ICT na agricultura, mais precisamente para o uso da água, trás como benefícios: melhorar a eficiência da distribuição de água; fazer uma distribuição justa da água; permitir a rastreabilidade da água; economizar no consumo de água; ter uma transparência na gestão; reduzir os conflitos entre os agricultores; reduzir os custos de consumo e energia; reduzir o número de escritórios de campo prestando assistência aos agricultores e guardas de água; agir rapidamente para evitar atos de vandalismo.

É importante compreender melhor os diversos métodos de irrigação existentes para que se possa avaliar qual é o método adequado que o fazendeiro deve escolher para que ele possa ter um melhor controle da irrigação de sua fazenda. Também deve-se destacar o modelo de evapotranspiração de Allen *et al.* (1998) para medir a quantidade de água necessária para um

cultivo. As seções a seguir visão mostrar os diversos métodos de irrigação e também o modelo de evapotranspiração.

2.6.1 Sistemas de irrigação

Existem 4 tipos principais de irrigação sendo eles: irrigação por aspersores, irrigação de superfície, irrigação localizada e sub-irrigação (BJORNEBERG, 2013). Escolher o método de irrigação correto requer uma avaliação do local da fazenda, do tipo de cultivo e da disponibilidade de equipamento. A tabela 3 mostra os números dos métodos de irrigação aplicados ao redor do mundo.

É importante ressaltar ainda que 42% da irrigação aplicada no mundo inteiro ocorre apenas em dois países, China e Índia (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014). Para maiores informações sobre o uso de água no mundo verifique o Anexo B. A seguir são descritos as principais características de cada método de irrigação e a forma como eles podem ser vistos.

Tabela 3 – Dados sobre os principais métodos de irrigação aplicados no mundo

	Irrigação de superfície	**Irrigação por aspersão**	**Irrigação localizada**
Área em 2012	280 milhões de ha	35 milhões de ha	9 milhões de ha
% do total	86	11	3
Preço	$	$$	$$$
Eficiência	+	++	+++
Mobilidade	-	+/-	-

Fonte: Autor "adaptado de"FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014

2.6.1.1 Irrigação por aspersão

Irrigação por aspersão ocorre quando a água é distribuída, comumente, por um conduto principal e então é aspergida nos bocais de aspersão liberando assim pequenas gotículas de água no solo. A irrigação por aspersão pode ser usada em diversos cultivos, no pasto, na produção de grama e pomares. (BJORNEBERG, 2013).

Dentro deste tipo de irrigação estão três outros subtipos, sendo eles: a irrigação por aspersores fixos, no qual os aspersores ficam fixos durante toda a safra; a irrigação por aspersores

fixo-móveis, no qual após a irrigação de uma área todo o equipamento é movido para outra área; e a irrigação por aspersores móveis no qual os aspersores ficam conectados a um equipamento móvel como um trator ou então um pivô central (BJORNEBERG, 2013). A figura 12 mostra um exemplo de irrigação por aspersores.

Figura 12 – Irrigação por aspersão

Fonte: Cornell University, 2020

2.6.1.2 Irrigação de superfície

A irrigação de superfície ocorre quando a água e direcionada pela ação da gravidade para uma determina região e fica sobre a superfície do solo durante o plantio. Em alguns casos é necessário elevar a água através de bombas, no entanto a água deve ficar exposta ao sol de qualquer maneira (BJORNEBERG, 2013). A eficiência desse sistema depende de parâmetros como o tipo de solo, o tipo de cultivo, topologia da fazenda etc.

São dois os tipos de sistemas de irrigação de superfície, sendo eles: irrigação por sulco, na qual diversos sulcos paralelos são feitos no campo para que a água, proveniente de tubos ou valas de concreto, possa fluir para a fazenda; a irrigação por bacia ou fronteira na qual uma lamina de água fica na superfície do solo e é mantida pelo posicionamento de diques. A figura 13 mostra um exemplo de irrigação de superfície.

Figura 13 – Irrigação por superfície

Fonte: Cornell University, 2020

2.6.1.3 Irrigação localizada

A irrigação localizada, micro-aspersão ou irrigação por gotejamento envolve aplicar aguá a baixas taxas e baixas pressões diretamente na raiz da planta. Á água é direcionada através de tubos ou fitas plásticas até os emissores que podem gotejar ou aplicar um pequeno spray de água no pé da planta. Este tipo de irrigação é muito utilizado para cultivos fixos como árvores, vinhedos, pomares e arbustos (BJORNEBERG, 2013). A figura 14 mostra um exemplo de irrigação por gotejamento.

2.6.1.4 Subirrigação

A subirrigação aplica água abaixo do solo por tubulações previamente instaladas durante a etapa de plantio do cultivo escolhido, mas não deve ser utilizada em regiões áridas e semiáridas no qual a irrigação é critica para a germinação das plantas. Neste tipo de irrigação a drenagem é muito importante para garantir que os cultivos não tenham água em excesso em suas raízes e isso possa prejudicar o desenvolvimento das mesmas. A figura 15 mostra um exemplo de um sistema de subirrigação.

Figura 14 – Irrigação localizada

Fonte: Cornell University, 2020

Figura 15 – Subirrigação

Fonte: Cornell University, 2020

2.6.2 Modelo de evapotranspiração

Conhecer os modelos de estimativa para as necessidades de irrigação é crucial para que os fazendeiros possam utilizar de maneira adequada o principal recurso de suas fazendas, a água. O principal modelo para o cálculo das necessidades da água é proposto por Allen *et al.* (1998) e tem como base os cálculos de evapotranspiração.

O processo de evapotranspiração é uma combinação dos processos de evaporação e transpiração. O primeiro ocorre quando a água passa do estado líquido para o estado gasoso em superfícies liquidas enquanto o segundo ocorre quando e transformação do estado líquido para o estado gasoso ocorre nos tecidos das plantas. Ambos os processos acontecem ao mesmo tempo durante o crescimento das plantas.

A figura 16 mostra os diferentes tipos de evapotranspiração sendo eles:

a) Evapotranspiração de referência (ETo) - A ETo é baseada em uma cultura hipotética de grama em que apenas os parâmetros de clima são levados em conta. Isso se faz necessário para generalizar a evapotranspiração para qualquer cultura e prática de manejo.

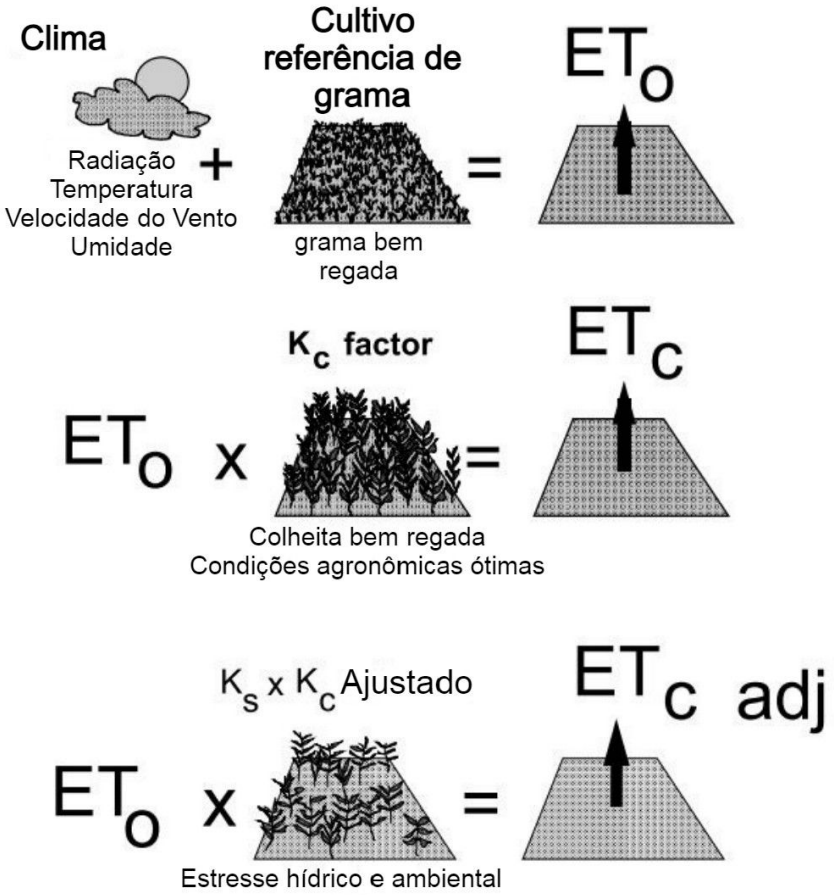
b) Evapotranspiração das culturas em condições padrão (ETc)- A ETc leva em conta os parâmetros de um cultivo especifico, considerando que esse cultivo não tenha nenhuma doença, esteja bem fertilizado e irrigado garantindo assim a melhor produção possível.

c) Evapotranspiração das culturas em condições não padronizadas (ETc adj) - A ETc adj leva em consideração que o cultivo apresenta condições não padronizadas, logo apresenta, por exemplo, a presença de pragas e doenças, alterações na salinidade do solo, baixa fertilidade do solo, escassez de água ou alagamento.

A ET_o é calculada de acordo com a equação (1) em que Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor em $kPa°C^{-1}$, R_n é a radiação efetiva na superfície do cultivo em $MJm^{-2}dia^{-1}$, G é a densidade do fluxo de calor do solo em $MJm^{-2}dia^{-1}$, γ é a constante psicométrica em $kPa°C^{-1}$, T é a temperatura média diária do ar a 2 metros de altura em $°C$, u_2 é a velocidade do vento a dois metros de altura em ms^{-1}, e_s é a pressão de saturação do vapor em kPa, e_a é a pressão de vapor atual em kPa.

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

Figura 16 – Representação da evapotranspiração

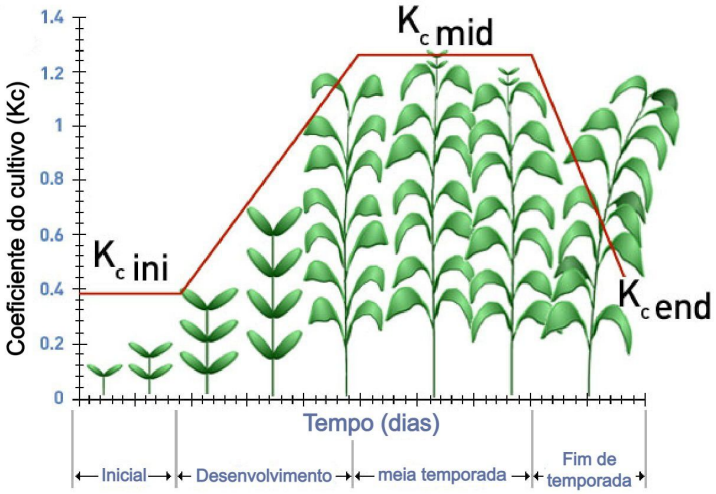


Fonte: Autor "Adptado de"Allen *et al.*, 1998

O cálculo das diversas variáveis utilizadas para o cálculo da ETo pode ser realizado de maneira precisa ou estimada, utilizando-se das equações descritas por (ALLEN *et al.*, 1998). Nota-se que, pela figura 16, após o cálculo de ETo deve-se calcular o ETc multiplicando a ETo por um fator de cultivo denominado Coeficiente da cultura (Kc), posteriormente ajusta-se a ETc por um coeficiente de cultivo e de estresse hídricos ajustados.

A FAO indica os valores de Kc para alguns cultivos, como pode ser observado na figura 17 para o caso do milho. Nota-se que o Kc depende principalmente da quantidade de dias que se passaram desde o plantio das plantas e considera que, em todo o período de crescimento, o cultivo recebeu a quantidade de água adequada.

Figura 17 – Representação da evapotranspiração



Fonte: Autor "Adptado de"FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2019

2.6.3 Software para gestão de água

É importante destacar o uso de *softwares* e *hardwares* para o correto manejo dos recursos hídricos em fazendas. Destaca-se o trabalho de Brajović, Vujović e Đukanović (2015) em que os autores diferem os *softwares* utilizados em sistemas de irrigação em duas categorias, sendo elas:

a) *Softwares* simples e com baixo volume de dados - São responsáveis por fazer o controle direto dos sistemas de irrigação com base em sistemas embarcados e no cronograma estipulado. Estes *softwares* também utilizam os dados internos dos sistemas de irrigação para verificar possíveis falhas e perdas de performance do sistema como um todo.

b) *Softwares* complexos e com alto volume de dados - São responsáveis por agregar aos dados dos *softwares* da categoria acima com dados externos ao sistema de irrigação, como a umidade do solo, temperatura do solo, a previsão do clima, temperatura do ar, umidade do ar, etc. Estes *softwares* utilizam algoritmos complexos como a inteligência artificial para interpretar todos estes dados e fornecer as recomendações de irrigação, bem como fazer previsões para o comportamento futuro dos sistemas de irrigação.

O trabalho de Rodríguez, Fernández e Hormazábal (2018) é importante para demonstrar como está o estado da arte da literatura em relação aos diversos métodos de interação entre

humanos e máquinas no contexto da agricultura. Os autores avaliaram o uso de tecnologias como o reconhecimento de fala, reconhecimento de gestos, realidade aumentada, realidade virtual, interfaces multimodais e interfaces hápticas, sendo que a maior ocorrência encontrada na literatura foi de tecnologias de reconhecimento de fala. Destaca-se que o reconhecimento de fala teve maior número de ocorrências devido à facilidade dos usuários de utilizar esta tecnologia enquanto realizam outras atividades e também devido ao baixo índice de alfabetização dos fazendeiros.

O trabalho de González Perea *et al.* (2017), como exemplo, define um sistema de gestão de água para morangos baseado em um *software* para *desktop* e um *software* para dispositivos móveis utilizando o sistema operacional *android*. O primeiro é responsável por estimar a irrigação da temporada do cultivo com base em dados históricos da estação meteorológica mais próxima da fazenda, dos estágios de crescimento das plantas, do comportamento hidráulico do sistema de irrigação e das características de comportamento do solo, sendo que tais dados são imputados manualmente exceto pelos dados da estação meteorológico. Já o segundo é responsável por atualizar o fazendeiro diariamente com os dados meteorológicos e também facilitar o acesso as prescrições de irrigação dadas pelo sistema anterior.

Vale destacar que o uso eficiente de água pode garantir uma boa economia de água como apontado por González Perea *et al.* (2017) no qual a aplicação do sistema descrito acima durante a safra de 2014/2015 em 69% das fazendas da região proporcionou uma redução de 3,4% no uso de água para a produção de morangos.

2.7 PLATAFORMAS PARA COLETA DE DADOS NA AGRICULTURA

Existe um grande número de plataformas para realizar a coleta e análise de dados sendo que algumas são abertas e outras fechadas, algumas são pagas e outras não, como indicado por Linna, Narra e Grönman (2019). Os autores ainda dividem as plataformas em 3 categorias, sendo elas:

a) Gestão de dados em forma tabular - no qual os dados são inseridos em tabelas ou arquivos do tipo *comma separated value*. As análises são feitas posteriormente de acordo com as necessidades dos fazendeiros.
b) Gestão de dados em forma geoespacial - Adiciona a capacidade de visualizar dados geoespaciais, o que permite uma maior compreensão do correto local em que as análises estão sendo feitas.

c) Gestão de dados por meio de interfaces e *plugins* - Esse tipo de *software* adiciona diversas outras formas de interação e permite uma maior flexibilidade para as necessidades do fazendeiro. Pode incluir dados de imagens, geoespaciais, históricos, de contexto etc.

Nota-se que o último tipo de *software* para gestão de água não é tão comum na literatura principalmente se tratando de plataformas abertas(LINNA; NARRA; GRÖNMAN, 2019). Criar estes tipos de plataformas requer o uso de diversas tecnologias e o foco em criar soluções integradas. O uso da IoT e de tecnologias em nuvem permite criar plataformas mais robustas e flexíveis capazes de atender as necessidades dos fazendeiros e também de integrarem diversas tecnologias em uma única plataforma.

Dentro das diversas plataformas para aquisição de dados, este trabalho destaca duas delas; a plataforma FIWARE (FIWARE, 2020a) que garante uma grande flexibilidade e integração entre sistemas por ser aberta e construída com base em componentes chamados *generic enablers*, que realizam tarefas especificas; e a plataforma SWAMP (KAMIENSKI *et al.*, 2019) que utiliza o FIWARE e a plataforma SEPA como base para o desenvolvimento de uma solução para o gerenciamento e distribuição de água em fazendas.

2.7.1 Plataforma FIWARE

O FIWARE é uma organização sem fins lucrativos fundada em 2016 pela Atos Engineering, Orange Bussiness Services e Telefônica e tem como missão promover a adoção de uma estrutura de compartilhamento de dados comum, colaborativa e interoperável, baseada em padrões e tecnologia de código aberto (FIWARE, 2020a). A plataforma FIWARE incentiva seus usuários a criarem soluções em diversos setores como:

a) Setor de cidades Inteligentes - Incentivam a interoperabilidade e a troca de informações entre cidades permitindo a criação de soluções mais robustas garantindo que um padrão comum seja adotado entre as diversas cidades;
b) Setor industrial inteligente - Atua na transformação digital da economia garantindo que um padrão possa ser utilizado dentro da indústria e de toda a cadeia produtiva, melhorando a interação do mundo físico com o digital;

c) Setor Agroalimentar inteligente - Incentivam a adoção de tecnologias no setor agrícola para otimizar todas as etapas do processo produtivo e melhorar o rendimento das plantações;

d) Setor de energia inteligente - Incentivam a fusão de diversos setores de energia para garantir uma maior flexibilidade da rede de distribuição por meio de uma otimização em tempo real da oferta e da demanda.

Os principais componentes da plataforma FIWARE são chamados de *Generic Enablers (GEs)* e permitem a configuração da plataforma de acordo com as necessidades das soluções a serem criadas. As GEs são elementos que desempenham um papel especifico dentro da plataforma mas que, com a combinação de GEs diferentes, permitem a flexibilização da mesma. Esses componentes são divididos em quatro grupos principais dependendo de suas funções. São eles:

a) Gestão principal de contexto - Tem como elemento principal o *Orion Context Broker* que permite gerenciar informações de contexto de maneira descentralizada e em larga escala. Alguns elementos nessa categoria são STH Comet, Cygnus, Scorpio, etc (FIWARE, 2020b);

b) Interfaces com sistemas IoT, robôs e sistemas de terceiros - Permite a interação de outros serviços com o *Orion Contex Broker* .Alguns elementos nessa categoria são o IoT Agent for Json, ioT Agente for LWM2M, IoT Agent for Ultralight, Fast RTPS, Micro XRCE-DDS, etc (FIWARE, 2020b);

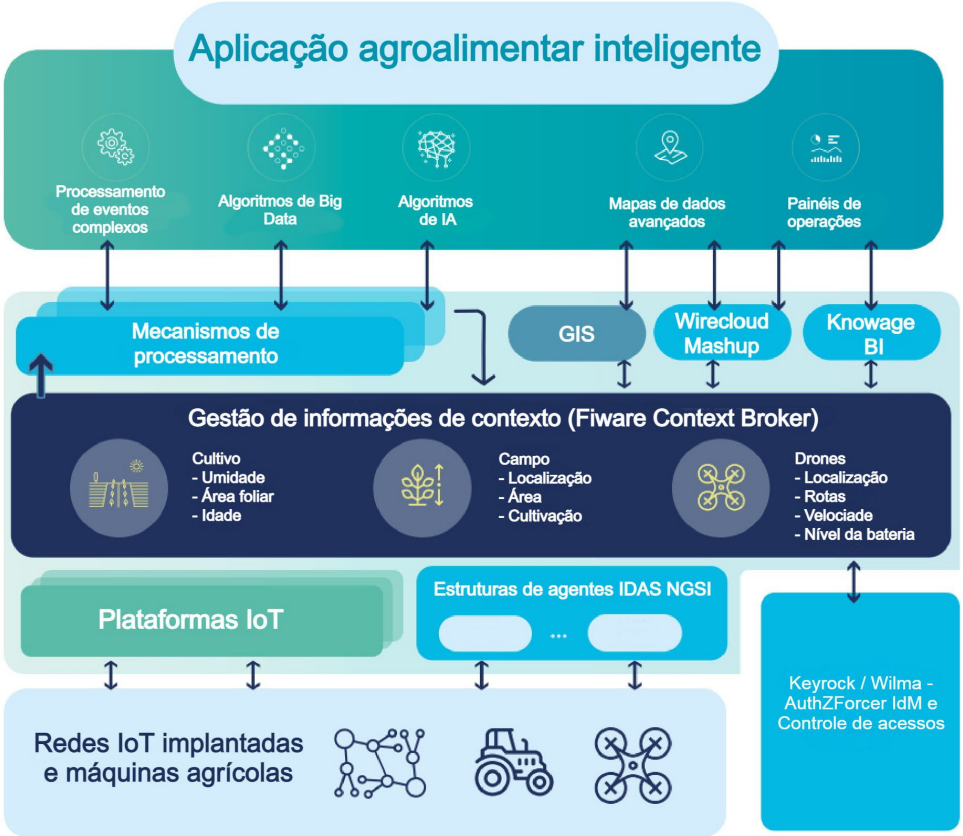
c) Processamento, análise e visualização de contexto - São elementos utilizados para trabalhar com os dados de contexto, permitindo criar comportamentos inteligentes. Alguns elementos nessa categoria são o Wirecloud, Knowage, Kurento, Cosmos, etc (FIWARE, 2020b);

d) Gerenciamento, publicação e monetização de dados de contexto e APIs - Permite implementar o acesso seguro aos componentes do FIWARE bem como a monetização do acesso aos dados de contexto armazenados. Alguns elementos nessa categoria são o Keyrock, Wilma, Biz Framework etc (FIWARE, 2020b).

No ramo da agricultura a plataforma FIWARE disponibiliza uma arquitetura base para o desenvolvimento de soluções nessa área como mostra a figura 18. Esta visão é baseado no conceito de sistemas de sistemas, o que permite que o FIWARE atue na integração de diversos

sistemas por gerenciar informações com contexto e garantir a integração de diversas aplicações verticais (FIWARE, 2018).

Figura 18 – Arquitetura base disponibilizada pelo FIWARE



Fonte: Autor "Adptado de"FIWARE, 2018

2.7.2 Plataforma SWAMP

Utilizar uma plataforma para o gerenciamento de recursos hídricos ainda é uma lacuna na literatura e que pretende ser preenchida pelo projeto SWAMP (KAMIENSKI *et al.*, 2019). O projeto é desenvolvido com base nas duas plataformas anteriores, FIWARE e SEPA.

A plataforma pode ser dividida em 5 camadas como mostra a figura 19, sendo que cada camada significa:

a) Camada 1: Dispositivos e comunicação - Nesta primeira camada estão localizados os dispositivos físicos da plataforma como os sensores, atuadores, *gateways*, máquinas e equipamentos agrícolas, sistemas de irrigação, etc.

b) Camada 2: Aquisição e segurança de dados - Nesta camada estão os elementos e/ou serviços que encriptam os dados e fazem a conversão de um protocolo de comunicação para outro.

c) Camada 3: Gestão de dados - Nesta camada estão os elementos e/ou serviços que fazem a gestão, processamento e armazenamento dos dados dentro da plataforma, utilizando bancos de dados relacionais e não relacionais.

d) Camada 4: Modelos de distribuição de água e irrigação - Nesta cada estão localizados os modelos tradicionais ou de aprendizagem de máquina para avaliar as necessidades de água dos cultivos e para gerar recomendações de irrigação.

e) Camada 5: Serviços e aplicações - Nesta camada estão os serviços e interfaces que farão a comunicação com os fazendeiros, mostrando as informações que eles necessitam da forma com que eles precisam.

A plataforma SWAMP deve ser adaptável a diferentes cenários e por isso está sendo aplicada em quatro pilotos sendo eles os seguintes:

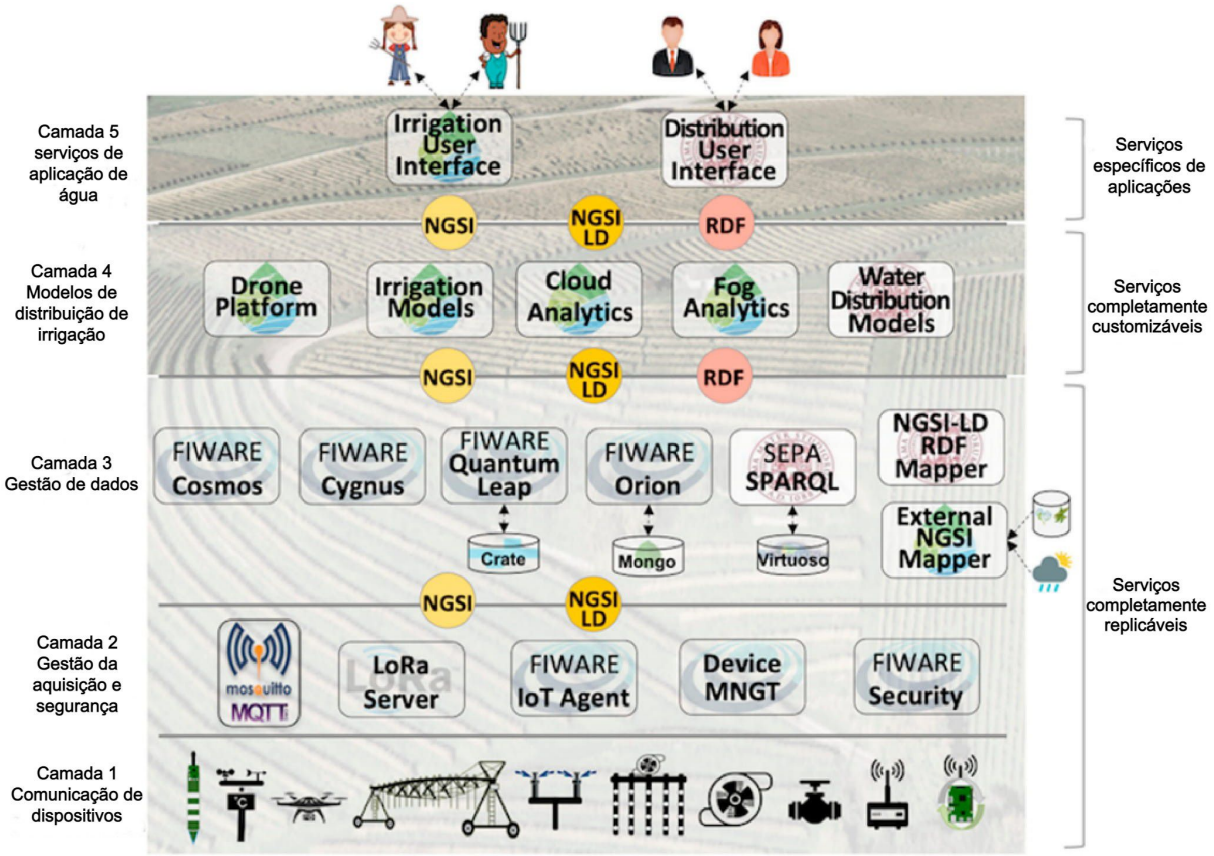
a) Piloto MATOPIBA - Localizado entre os estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, este piloto utiliza como método de irrigação o pivô central e tem como objetivo principal expandir o controle sobre o sistema do pivô central permitindo diminuir os custos operacionais e energéticos no processo de irrigação.

b) Piloto Guaspari - Localizado no município de Espírito Santo do Pinhal, no estado de São Paulo, este piloto utiliza como método de irrigação o gotejamento e seu principal objetivo é monitorar precisamente a quantidade de água utilizada em cada videira para garantir um vinho de excelente qualidade.

c) Piloto CBEC - Localizado na região da Emilia Centralle, na Itália, este piloto utiliza como método de irrigação canais abertos para a distribuição da água e tem como objetivo principal reduzir o desperdício de água e gasto energético para fornecer água para todos os fazendeiros da região.

d) Piloto Intercrop - Localizado na região de Cartagena, na Espanha, este piloto utiliza como método de irrigação os aspersores fixos e tem como objetivo principal reduzir o consumo de água e maximizar a produção de hortaliças da região.

Figura 19 – Camadas da plataforma SWAMP



Fonte: Autor "Adaptado de"Kamienski *et al.*, 2019

2.8 GÊMEOS DIGITAIS E SISTEMAS CIBERFÍSICOS

As próximas sessões visam descrever os conceitos de gêmeo digital e de CPS, bem como a aplicação destes conceitos na agricultura. Por fim, mostra-se o uso do *Plant Simulation* para realizar a simulação do sistema de irrigação em ambiente digital, o que é uma etapa importante para garantir que o gêmeo digital e o CPS funcionem de maneira adequada quando implantado.

2.8.1 Gêmeos digitais

O uso de simulação nas fábricas não é novo. No entanto, criar simulações em tempo real de fábricas ainda é um desafio, como aponta Terkaj, Tolio e Urgo (2015). O primeiro problema que o artigo indica é que uma simulação de modelo suave é mal suportada pelos fabricantes de *software* e a segunda é que a integração entre vários conjuntos de dados e fontes é difícil de

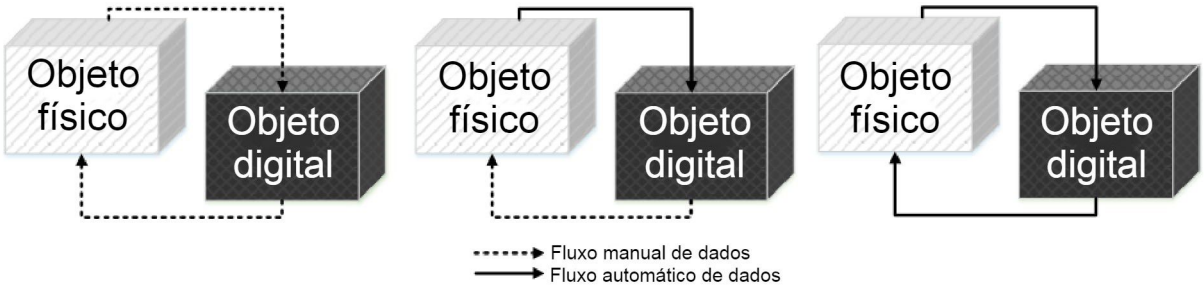
alcançar. Uma abordagem que poderia funcionar para criar um modelo de fábrica melhor é usar computação visual.

Posada *et al.* (2015) afirma que a computação visual desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de CPS. O artigo indica que o uso de computação visual, como computação gráfica, processamento de imagens, modelagem 3D, representação de imagens, visualização e interfaces com o usuário, aprimorará e possibilitará uma integração mais complexa entre os espaços cibernéticos e físicos. Ao representar a influência da computação visual, duas tecnologias diferentes emergem: primeiro o uso ou realidade aumentada e virtual em fábricas e o segundo como o conceito de gêmeos digitais como um facilitador de sistemas ciberfísicos.

Outro ponto importante na criação de fábricas virtuais é o uso de um conceito gêmeo digital. Kritzinger *et al.* (2018) aponta as diferentes definições que alguns autores utilizam sobre o conceito de gêmeos digitais. O artigo mostra que ainda não existe uma definição comum, já que o conceito de gêmeo digital é usado como sinônimo de modelo digital e sombra digital.

Kritzinger *et al.* (2018) afirma que um modelo digital é aquele em que o fluxo de dados entre um objeto digital e sua representação física é feito manualmente, enquanto uma sombra digital é aquela em que existe um fluxo de dados automático de um objeto físico para seu objeto digital, mas um fluxo de dados manual do objeto digital para a representação física e um gêmeo digital é aquele em que os dados que fluem entre um objeto físico e um digital são feitos automaticamente.

Figura 20 – Modelo, sombra e gêmeo digital



Fonte: Autor "Adaptado de"Kritzinger *et al.*, 2018

Isso significa que um gêmeo digital é uma representação digital, em tempo real, de um objeto físico no qual ocorre uma interação entre a representação digital e o objeto físico. Qi *et al.* (2018) argumenta que um gêmeo digital é difícil de construir pois envolve o uso de técnicas de modelagem, fusão e análise de dados.

Nota-se que o conceito de gêmeo digital pode ser aplicado na agricultura de forma a representar um subsistema presente em uma fazenda como, por exemplo, um sistema de irrigação por aspersores. Para que o sistema de irrigação seja caracterizado como um gêmeo digital é imprescindível que os parâmetros de controle sejam coletados, analisados por algum *software* ou plataforma e, posteriormente, os comandos sejam enviados para os atuadores presentes nesse sistema de irrigação.

Um exemplo de gêmeo digital para a agricultura que está em desenvolvimento é o projeto *Greenhouse Industry 4.0* (ANTHONY HOWARD *et al.*, 2020), inciado em setembro de 2019 e com previsão de finalização em outubro de 2023, que prevê o desenvolvimento de um gêmeo digital para uma estufa de alimentos, sendo tal gêmeo digital construído com base em 3 gêmeos digitais, sendo eles: gêmeo digital para componentes do clima, gêmeo digital para o fluxo produtivo da estufa, e gêmeo digital para o sistema de energia.

É importante ressaltar que o desenvolvimento de um gêmeo digital se apoia principalmente nos conceitos de IoT e *big data* para viabilizar as etapas de coleta e análise de dados, bem como, da atuação final com base nas análises realizadas. Além disso, é importante compreender a interação entre o gêmeo digital e um CPS.

2.8.2 Sistemas ciberfísicos na agricultura

Lee, Bagheri e Kao (2015) argumenta que um CPS é definido como uma tecnologia transformável capaz de gerenciar sistemas interconectados entre seus ativos físicos e recursos computacionais e Baheti e Gill (2011) complementa que o CPS pode interagir com seres humanos através de novas modalidades, possibilitando uma expansão da interação com o mundo físico através da computação. Segundo Baheti e Gill (2011) os estudos em CPS ainda estão em seus estágios iniciais e é dividida, atualmente, em áreas isoladas o que permite um maior controle e análise de cada subsistema. No entanto, não garante o correto funcionamento e integração entre os componentes físicos e digitais.

Lee, Bagheri e Kao (2015) mostram uma arquitetura de cinco camadas para o desenvolvimento de um sistema CPS, dividido da seguinte forma: nível de conexão inteligente; nível de conversão de dados em informação; nível cibernético; nível de cognição; nível de configuração.

O primeiro nível serve para coletar dados de maneira confiável de máquinas, sensores e componentes; o segundo nível serve para transformar os dados e informações simples em dados e informações com significado real; o terceiro nível é capaz de intermediar dados de diferentes

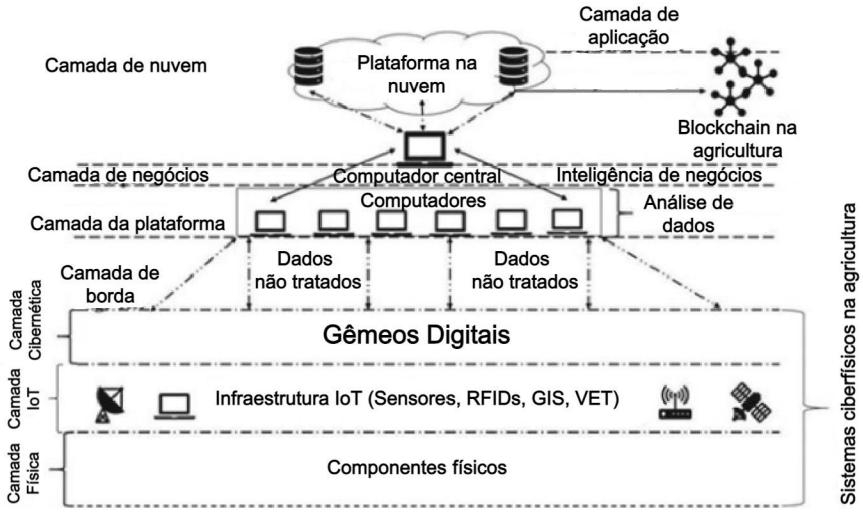
máquinas e fontes, tornando possível compará-los; o quarto nível é capaz de representar os dados de maneira significativa para ajudar os especialistas na tomada de decisões; o quinto e último nível tem função de dar *feedback* entre o espaço físico e o ciberespaço.

Segundo Dumitrache *et al.* (2017) o desenvolvimento de um sistema ciberfísico na agricultura requer a utilização de sete princípios, sendo eles:

a) Arquitetura orientada ao CPS - As estruturas que compõem um sistema CPS deve ter como princípio uma arquitetura estabelecida para garantir a integração dos sistemas de maneira rápida e simples como proposto por Lee, Bagheri e Kao (2015)
b) Redes de sensores e IoT - Deve-se estruturar uma rede de sensores que seja capaz de coletar os dados necessários para o correto funcionamento do sistema CPS e também utilizar a IoT para integrar computadores, controladores, sensores e outros dispositivos para o mundo digital.
c) Cadeias de valor e cadeias de redes - Deve-se garantir a integração da cadeia de valor nos níveis de dados, processos e conhecimento para que as organizações possam ter maior flexibilidade e possam reagir em tempo real a mudanças realizadas nos sistemas.
d) Sistemas de suporte a decisão e *data analytics* - Criar sistemas que auxiliem, em tempo real, na tomada de decisão e no controle dos parâmetros e elementos que compõem o sistema CPS.
e) Sistemas de sistemas com bordas dinâmicas e integração de sistemas - Os sistemas devem ser integrados verticalmente e horizontalmente garantindo a interoperabilidade entre os diversos subsistemas de uma empresa, permitindo assim uma maior flexibilidade e aumento na tomada de decisão de maneira autônoma.
f) Recursos inteligentes das empresas - A empresa deve funcionar como um grande recurso inteligente no qual diversos subsistemas operam de maneira individual porém integrada, garantindo assim a análise e funcionamento da empresa em diversas faixas de resolução em relação ao tempo e ao espaço.
g) Integração das informações e conhecimentos nos sistemas complexos - Toda a informação e conhecimento deve ser separada e analisada em relação a cinco atributos, sendo eles: percepção, comunicação, aprendizado, planejamento, raciocínio e execução.

Sharma, Parhi e Shishodia (2021) evidenciam uma estrutura para a implantação de um CPAS com base na integração das tecnologias CPS, IoT, Computação na Nuvem (CC) e *Big Data* como pode ser visto na figura 21.

Figura 21 – Estrutura para o desenvolvimento de uma CPAS



Fonte: Autor "Adaptado de"Sharma, Parhi e Shishodia, 2021

Nota-se que é possível utilizar os sete princípios levantados por Dumitrache *et al.* (2017) na agricultura de forma que cada subsistema agrícola, ou seja, cada etapa do processo agrícola, cada equipamento e recurso envolvido e cada *stakeholder* envolvido no ambiente agrícola seja integrado através do uso dos conceitos de gêmeo digital e CPS, bem como de tecnologias como a IoT, CC e o *Big Data* como indicado por Sharma, Parhi e Shishodia (2021).

Ainda vale ressaltar os desafios a serem enfrentados para a aplicação da CPAS como apontado por Arvanitis e Symeonaki (2020), sendo eles: design de *software* e hardware adequados para o ambiente abertos e hostis como o do campo; aumentar a precisão do sensoriamento em termos de custo beneficio; custo beneficio do processamento de sinais e dados; e a eficiência energética.

2.9 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZANDO O SOFTWARE PLANT SIMULATION

Segundo a empresa Siemens o *Plant Simulation* é um *software* de "simulação por eventos discretos que permite analisar e otimizar o rendimento de produção para melhorar o desempenho de um sistema de manufatura". Apesar do foco do *software* ser em modelar o ambiente

industrial, a ferramenta possui a capacidade de simular o comportamento de qualquer processo utilizando para isso a metodologia de simulação por eventos discretos (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Segundo Jeon e Kim (2016) a simulação por eventos discretos é aquela em que as alterações no sistema ocorrem em pontos discretos de tempo, ou seja, é necessário que um evento ocorra para gerar uma alteração no modelo. Os autores ainda argumentam que nesse tipo de simulação as entidades podem ser representações físicas ou então fluxos de informação e que é imprescindível que o simulador acompanhe o tempo de simulação. Um dos simuladores mais utilizados na indústria é o *Plant Simulation* desenvolvido pela empresa Siemens (2020).

O *Plant Simulation* é capaz de realizar simulações para diversas áreas como logística, manufatura, robótica, alimentos e bebidas, etc. O *software* apresenta ao usuário uma série de componentes que podem ser utilizados, além de oferecer a possibilidade de conectar a simulação com banco de dados Linguagem de Consulta Estruturada (SQL), Controlador lógico programável (CLP)s, servidores OPC UA etc. Dentro do contexto de gêmeos digitais, o *software* oferece a possibilidade de modelar determinados processos e equipamentos de forma a representar digitalmente um sistema real e, através da conexão com elementos externos, coletar e enviar informações para equipamentos reais.

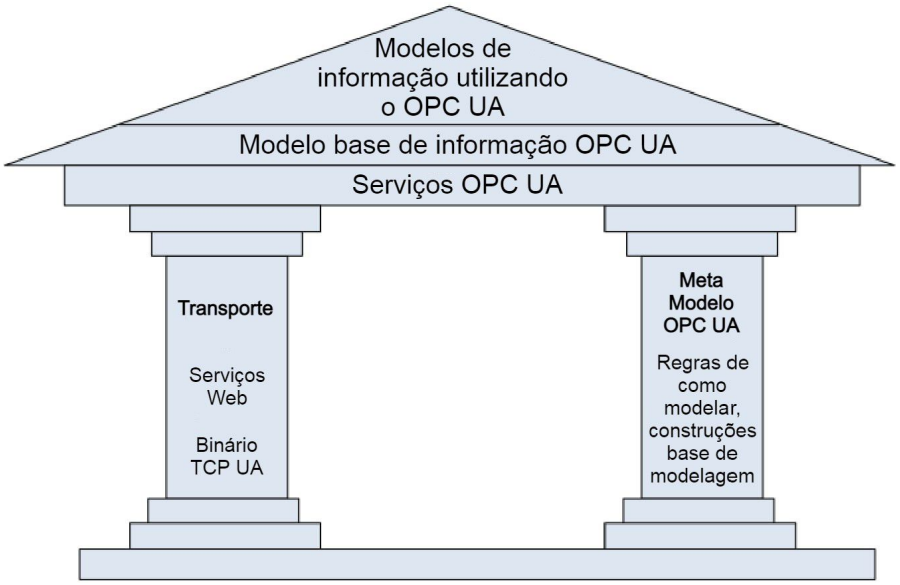
2.10 COMUNICAÇÃO DA PLATAFORMA IOT COM A SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO OPC UA

Para realizar a integração entre diversos dispositivos indústriais uma das principais tecnologias é a Open Platform Communications (OPC) e, mais recentemente na indústria, a utilização da tecnologia OPC UA (HANNELIUS; SALMENPERA; KUIKKA, 2008). O surgimento do protocolo OPC UA veio para ampliar a integração dos dispositivos em redes locais proporcionado pela tecnologia OPC para a internet, tornando assim os dispositivos capazes de se comunicarem com a internet independentemente do fabricante que produziu esses dispositivos (MAHNKE; LEITNER; DAMM, 2009).

A base da construção tecnológica do OPC UA é a modelagem de dados e também os protocolos de comunicação web como mostra a figura 22. O primeiro elemento define as regras de modelagem para que os usuários da tecnologia consigam modelar os seus equipamentos de forma semelhante facilitando assim o entendimento do modelo de dados por usuários que não

criaram o modelo em si. Já para o segundo elemento, a tecnologia garante uma padronização na comunicação dos dispositivos com a internet.

Figura 22 – Elementos base da tecnologia OPC UA

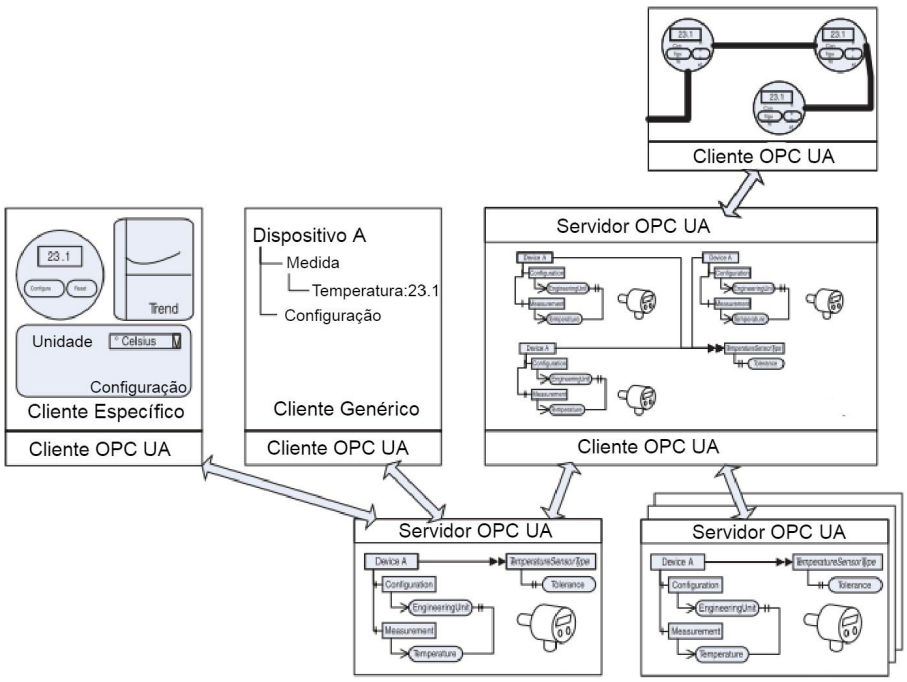


Fonte: Autor "Adaptado de"Mahnke, Leitner e Damm, 2009

O OPC UA, assim como o OPC clássico, atua através de uma interação cliente-servidor, na qual o servidor une as informações de um processo ou dispositivo e as disponibilizam através de uma interface na qual um cliente pode se conectar para consumir tais dados. Essa relação permite a construção de soluções com conexões diversas como apresentado na figura 23. A figura apresenta a possibilidade de clientes OPC UA genéricos ou então específicos de um fabricante e também servidores OPC UA funcionando diretamente nos dispositivos, em sistemas de controle distribuídos (DAS) ou então associando diversos dispositivos num mesmo servidor.

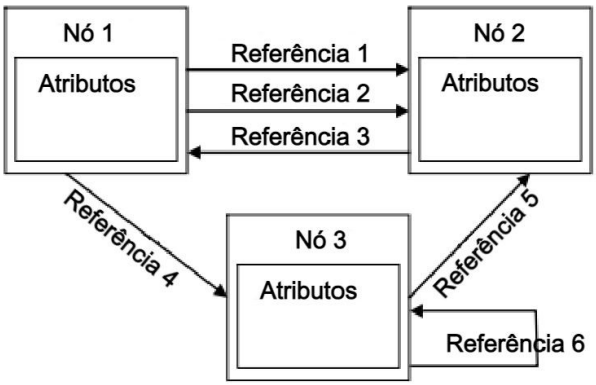
Os principais conceitos para a modelagem de dados utilizando o OPC UA são os nós e as referências. Um nó pode conter diversos atributos e também ter referências a diversos outros nós como indicado na figura 24. As principais classes de nós são os objetos, as variáveis e os métodos. Os objetos são usados para estruturar o modelo de dados, as variáveis são usadas para indicar um valor e os métodos são utilizados para, quando solicitados por um cliente, retornarem um resultado ou executarem uma modificação em determinadas variáveis. Nota-se que os clientes podem ler e escrever valores nas variáveis assim como podem sobrescrever a mudanças nos valores de uma variável.

Figura 23 – Relação entre cliente e servidor em diversas configurações



Fonte: Autor "Adaptado de"Mahnke, Leitner e Damm, 2009

Figura 24 – Relação entre nós e referências entre nós.



Fonte: Autor "Adaptado de"Mahnke, Leitner e Damm, 2009

Um dos principais benefícios de utilizar o OPC UA é a capacidade de realizar uma integração vertical entre os dispositivos e sistemas supervisórios, possibilitando assim uma melhor interação entre os diversos componentes de uma fábrica, fazenda ou negócio (SAUTER; LOBASHOV, 2011). Esse tipo de comunicação é central para o desenvolvimento de um gêmeo digital pois permite a comunicação com a plataforma de internet das coisas através da comunicação cliente-servidor.

Neste caso o servidor OPC UA atua em comunicação com a plataforma IoT, a simulação computacional e o sistema de irrigação, garantindo que a comunicação entre os dispositivos reais localizados no sistema de irrigação e os componentes digitais localizados na simulação e na plataforma IoT seja feita de forma automatizada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Neste capítulo é descrito o protocolo de revisão bibliográfica elaborado para o desenvolvimento desta dissertação. A RBS foi utilizada para atingir o objetivo 1 através de uma pesquisa qualitativa e exploratória. A RBS é divida em três etapas sendo elas: planejamento, condução e relatório final (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). Cada uma destas etapas está dividida nas subseções a seguir.

3.1 PLANEJAMENTO DA REVISÃO

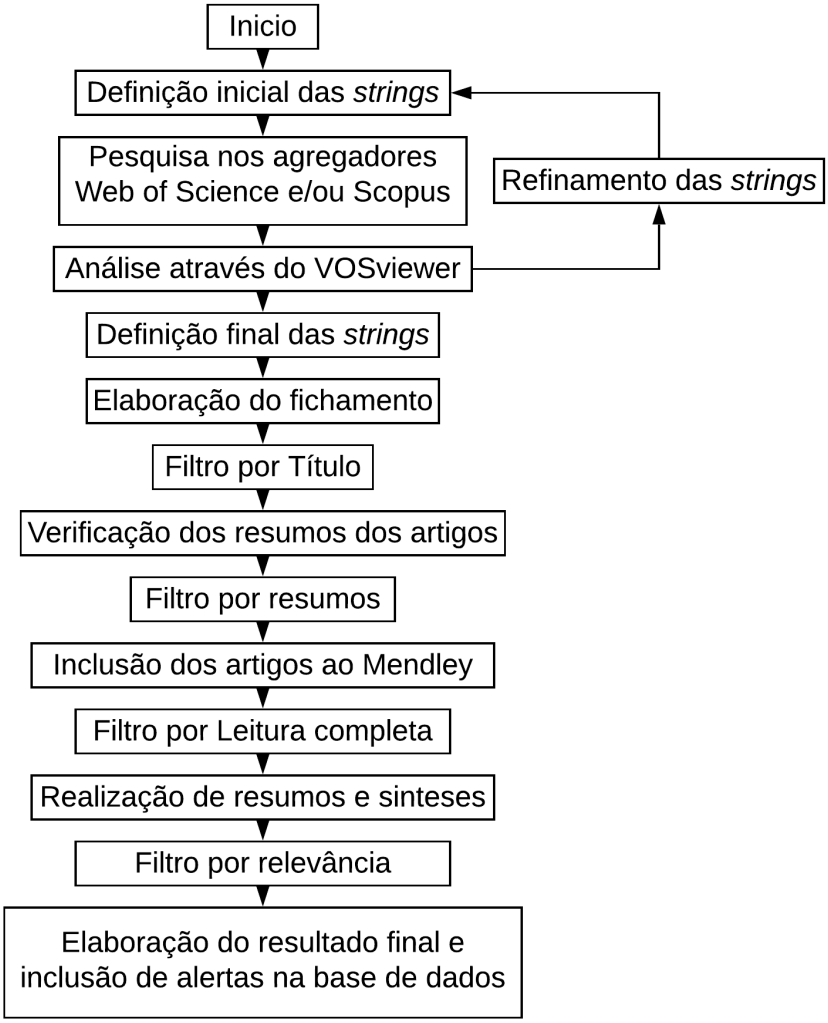
Para esta etapa é imprescindível realizar a elaboração de um protocolo de revisão que deve ser seguido para a revisão seja realizada de maneira criteriosa e que tal protocolo possa ser reproduzido por outros pesquisadores. Este protocolo deve servir como guia para a elaboração da RBS de forma a incluir todos os artigos relevantes para responder o objetivo de pesquisa indicado anteriormente. A figura 25 indica o protocolo utilizado nesta dissertação.

3.2 CONDUÇÃO DA REVISÃO

O primeiro termo de busca utilizado visa associar os seguintes temas: ICT, Indústria 4.0, *Big data e data analytics*, IoT, e sistemas ciberfísicos, todos aplicados no domínio da agricultura ou irrigação. Para isso construiu-se o seguinte termo de busca na base de artigos Scopus: TITLE-ABS-KEY(ict OR "information and communication technologies"OR "information and communication technology"OR "industry 4.0"OR "I4.0"OR "Industrie 4.0"OR "big data"OR "data visualization"OR "data analysis"OR "data analytics"OR "internet of things"OR "Internet of Things"OR "Wireless sensor networks"OR iot OR iot OR wsn OR "cyber physical systems"OR "cyber-physical systems"OR "cyber physical system"OR "cyber-physical system") AND TITLE-ABS-KEY (agriculture OR "smart farm"OR "smart farming"OR irrigation OR farm OR farming).

Obteve-se mais de 10 mil artigos utilizando-se este termo de busca, sendo selecionados os 2000 artigos mais recentes para serem incluídos na análise utilizando-se o *software* VosViewer. A figura 26 mostra o resultado obtido através de uma análise das palavras-chave contidas nesses 2000 artigos e que apareceram em ao menos 14 artigos diferentes.

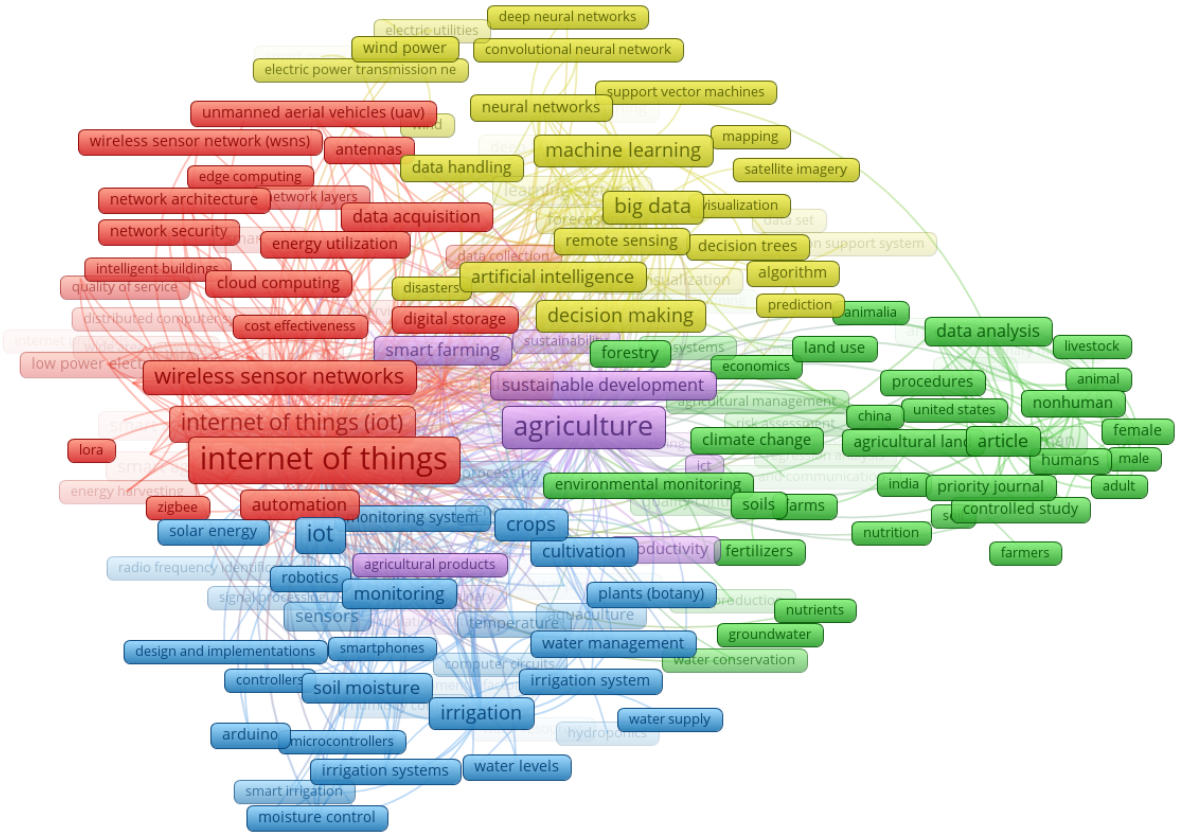
Figura 25 – Protocolo de RBS



Fonte: Autor

Explorando a figura 26 através do *software* percebe-se a existência de 5 grupos, sendo que 4 deles possui um cunho mais tecnológico. Contudo, o grupo verde indica uma maior preocupação com fatores climáticos e biológicos como pode ser evidenciado pelas palavras-chave *climate change, land use, nutrients, fertilizers, groundwater, water conservation etc*. Através da análise mais criteriosa das palavras-chave contidas no grupo verde nota-se que o termo *climate-smart agriculture* é utilizado na maioria dos artigos para indicar uma preocupação com fatores climáticos, portanto, tal palavra-chave foi removida utilizando-se a conjunção *AND NOT* na pesquisa nas bases de dados. Por fim, o termo de busca foi dividido nas áreas tecnológicas

Figura 26 – Mapa de palavras-chave obtido através do *software* VosViewer



Fonte: Autor

mencionadas anteriormente sendo elas: ICT, Indústria 4.0, *Big data e data analytics*, IoT, sistemas ciberfísicos.

Nota-se também que o termo de busca contém um filtro extra por área da computação e engenharia para as palavras *Big data e data analytics* pois tais palavras retornavam artigos relacionados a área de análise do solo, do clima e outras técnicas não ligadas ao escopo deste trabalho.

A partir da definição final do termo de busca seguiu-se o protocolo de RBS indicado anteriormente, obtendo-se a tabela 4. A condução da revisão sistemática da literatura ocorreu em janeiro de 2020 e posteriormente para cada palavra do termo de busca determinado foram incluídos alertas, através da plataforma *Scopus*, para que os novos artigos relacionados ao tema pudessem ser avaliados e suas inclusões na revisão consideradas caso necessário.

Cada etapa indicada na figura 4 mostra uma filtragem realizada para que apenas os artigos com aderência ao objetivo desta dissertação fossem incluídos. A etapa 1 indica uma filtragem com base no título dos artigo, a etapa 2 indica uma filtragem através da leitura dos

Tabela 4 – Etapas de revisão sistemática

Termo	**Etapa1**	**Etapa 2**	**Etapa3**
ICT	1383	99	64
Industry 4.0	82	24	18
Big data and data analytics	1718	91	63
IoT	544	90	69
CPS e Irrigation	103	31	19
Total	3830	335	233

resumos dos artigos, a etapa 3 indica uma filtragem através da leitura da introdução e conclusão do artigo.

3.3 RELATÓRIO FINAL DA REVISÃO

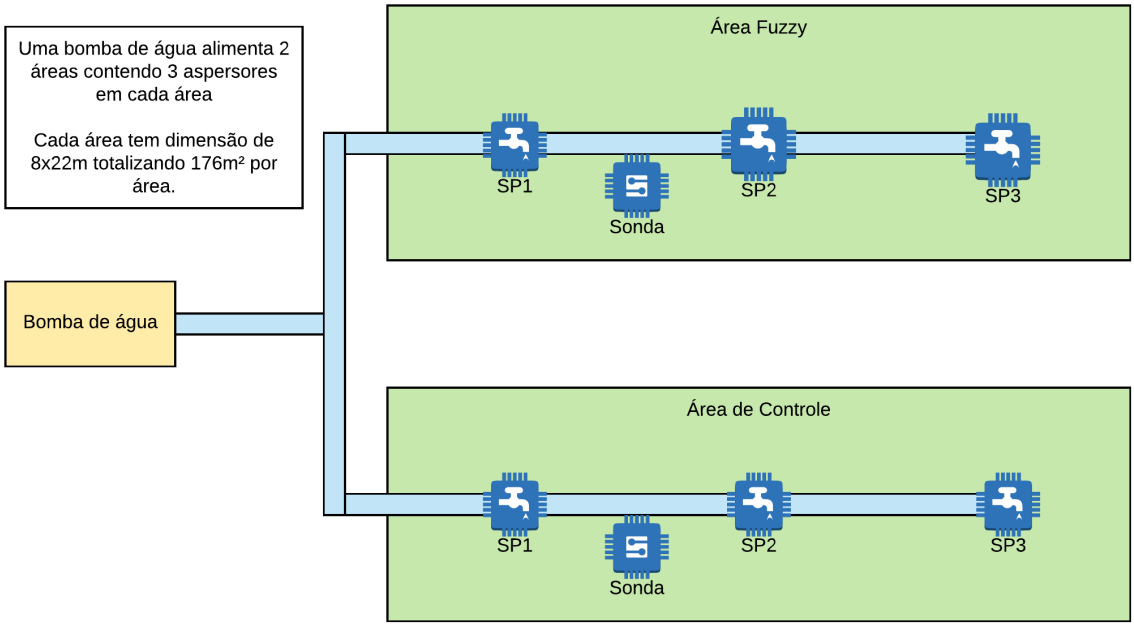
Para o relatório final os artigos foram distribuídos de forma a colaborar para a fundamentação teórica desta dissertação tendo em vista os possíveis leitores que poderão utilizar este trabalho para futuras pesquisas. Destaca-se que, principalmente, a seção de fazendas inteligentes e de internet das coisas desta dissertação contém uma lista de artigos relevantes para a discussão da aplicação de tecnologia na agricultura e da definição de fazendas inteligentes.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo contém a descrição do desenvolvimento experimental que consiste nos elementos da plataforma IoT e também a simulação computacional realizada no *software* Plant Simulation. O experimento visa atingir o objetivo 2 através de uma pesquisa qualitativa e exploratória para avaliar o comportamento da plataforma IoT e a comunicação com o *software* Plant Simulation. O acesso ao código e também um passo-a-passo para instalação e operação do ambiente digital está disponível no GitHub (ALVES, 2020) para que possa ser utilizado futuramente.

A figura 27 apresenta um exemplo de fazenda piloto que foi adotado para realizar o modelo da simulação. O modelo leva em consideração uma bomba de água com vazão de 1 litro por segundo que deve irrigar duas áreas: uma denominada "Área de Controle"e a outra denominada "Área *fuzzy*". Para o exemplo descrito, adota-se que cada área será irrigada uniformemente considerando então cada área como uma zona de manejo. Isso significa que os três aspersores de cada área serão ligados e desligados ao mesmo tempo.

Figura 27 – Modelo de sistema de irrigação adotado



Fonte: Autor

Em cada área existem 3 aspersores (SP1, SP2 e SP3) que farão a dispersão da água em círculo, garantindo uma melhor cobertura da irrigação. Cada área tem dimensão de $8x22$ metros equivalendo a uma área total de $176m^2$ por região. O cultivo escolhido como exemplo é o do pimentão, sendo cultivado em um solo do tipo argiloso siltoso. Duas sondas de solo serão simuladas para enviar, a cada 30 minutos, os parâmetros de umidade do solo, temperatura do solo, umidade do ar, temperatura do ar e iluminância.

Considera-se também uma estação meteorológica local que enviará dados climáticos atuais e também a previsão climática para os próximos 5 ou 7 dias. Tal estação meteorológica será simulada obtendo-se dados climáticos através do OpenWeather (2020) e do Weather Wunderground (2020).

O experimento considera três elementos principais: o ambiente real da fazenda, o ambiente digital da plataforma IoT e um computador. A figura 28 apresenta a visão geral do experimento considerando a aplicação da solução em uma fazenda piloto de acordo com o exemplo apresentado anteriormente.

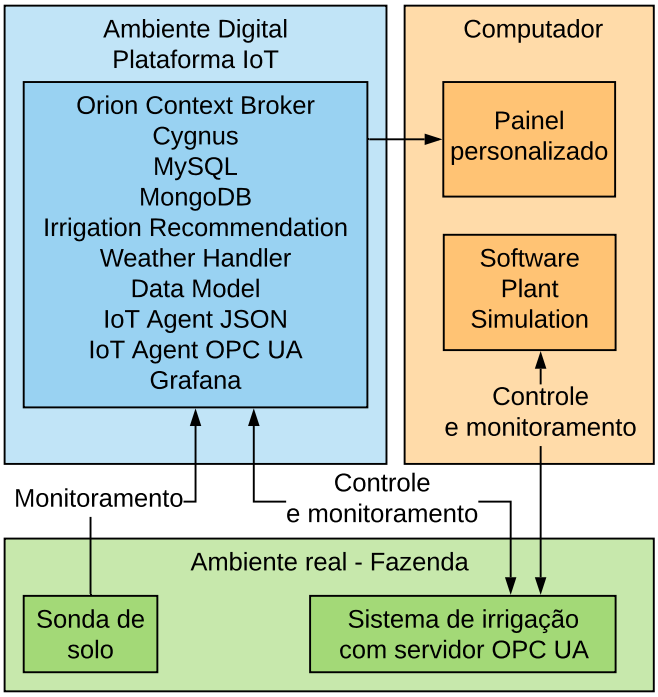
O ambiente real é composto pela sonda de solo e pelo sistema de irrigação com um servidor OPC UA instalado para controlar e monitorar o sistema de irrigação. A plataforma IoT monitora e controla os elementos do ambiente real e também cria o painel personalizado. O computador local visualiza o painel personalizado e também realiza a simulação do sistema de irrigação através do *software* Plant Simulation. É importante destacar que os elementos do ambiente real foram simulados em ambiente digital, através do *software* Plant Simulation ou do desenvolvimento de um componente específico como o realizado para simular o comportamento da sonda de solo. Uma descrição de cada componente utilizado no experimento bem como a descrição do modelo utilizado no *software* Plant Simulation é feita nas próximas seções.

As seções a seguir são divididas da seguinte forma: em primeiro lugar, defini-se a plataforma IoT desenvolvida, bem como os serviços utilizados e desenvolvidos; em segundo lugar, define-se a simulação realizada no *software* Plant Simulation bem como os elementos utilizados na simulação para adaptar a modelagem por eventos discretos para a simulação de elementos contínuos.

4.1 PLATAFORMA DE INTERNET DAS COISAS

A plataforma de internet das coisas foi desenvolvida com base nos componentes do FIWARE (2020a) e alguns componentes personalizados que foram desenvolvidos para simular

Figura 28 – Visão geral do experimento



Fonte: Autor

o comportamento da sonda de solo, coletar dados meteorológicos e calcular a recomendação de irrigação para cada uma das zonas de manejo descritas anteriormente. Cada um dos componentes foi desenvolvido separadamente dentro de um contêiner do *docker* (DOCKER, 2020), para que seja possível replicar as funcionalidades da plataforma em qualquer computador independente da infraestrutura. Os componentes utilizados na plataforma são os seguintes:

a) Orion Context Broker: O *Orion Context Broker* permite gerenciar todo o ciclo de vida das informações de contexto, incluindo atualizações, consultas, registros e assinaturas.

b) Mongo DB: O MongoDB é um banco de dados distribuído baseado em documentos.

c) MySQL DB: O MySQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional, que utiliza a linguagem SQL como interface.

d) IoT Agent JSON: O IoT Agent JSON é um agente que faz a ligação entre um dispositivo que utiliza o protocolo JSON com *brokers* que utilizam o protocolo NGSI como o Orion Context Broker.

e) IoT Agent OPC UA: O IoT Agent OPC UA é um agente que faz a ligação entre dispositivos que utilizam um servidor OPC UA e o Orion Context Broker.

f) Cygnus: O Cygnus é um conector encarregado de persistir fontes de dados em armazenamentos de terceiros (MySQL, PosgreSQL, Kafka, CKAN, Carto etc), criando uma visão histórica de tais dados. Neste trabalho foi utilizado o banco de dados MySQL.

g) Grafana: O grafana é uma aplicação web de código aberto e multiplataforma que permite a análise e visualização de dados através de tabelas, gráficos e alertas.

h) OPC UA Server: O servidor OPC UA contém os parâmetros utilizados para realizar o controle do sistema de irrigação.

i) Weather Handler: O Weather Handler faz a coleta de parâmetros climáticos com base nas APIs do Weather Wunderground, 2020 e também do OpenWeather, 2020.

j) Data Model: o Data Model faz a publicação das entidades a serem utilizadas no Orion, IoT Agent JSON e Cygnus para que o ambiente virtual esteja configurado de acordo com a proposta desta dissertação.

k) Probe: O Probe faz o envio dos dados de uma sonda de solo teórica. A sonda envia os dados de temperatura e umidade do solo e do ar, bem como a iluminância.

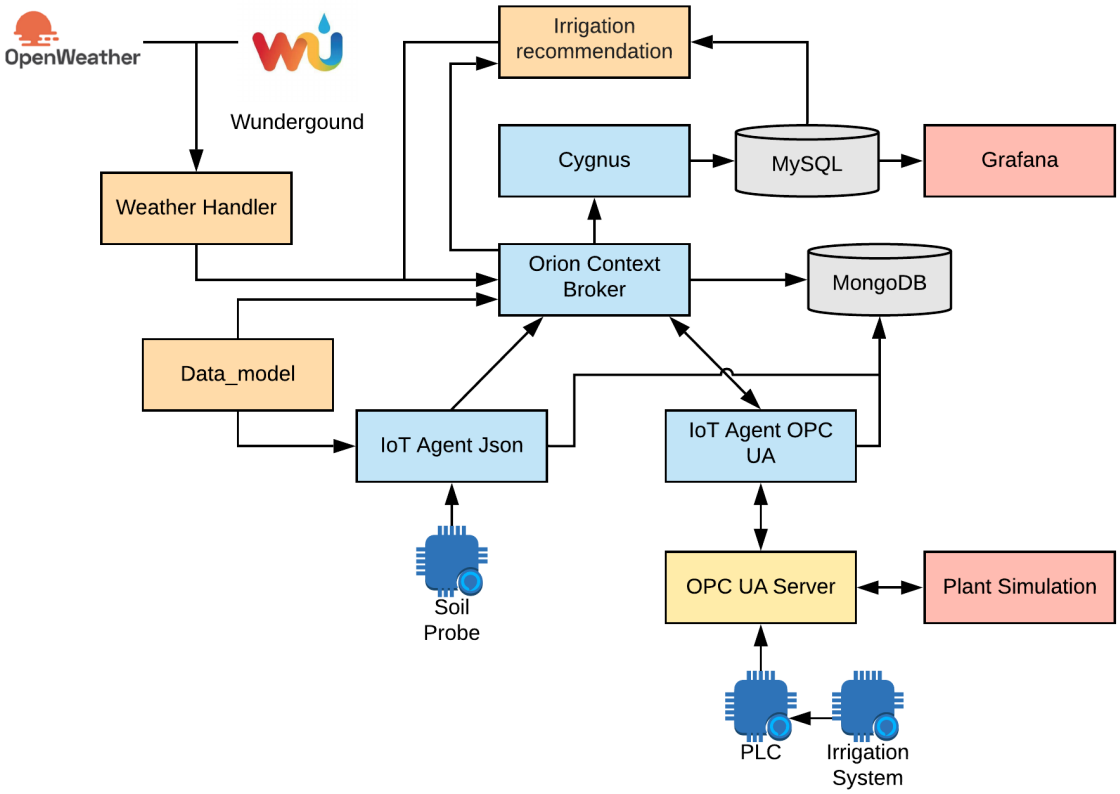
l) Irrigation Recommendation: Este componente faz o cálculo dos valores máximos, mínimos e médios de temperatura e umidade do ar diária, calcula a evapotranspiração de referência como base no modelo da FAO e também aplica um algoritmo de inteligência artificial baseado em lógica *fuzzy* (SOUZA *et al.*, 2020) para calcular a quantidade de água diária que um determinado cultivo precisa.

A conexão entre os diversos componentes da plataforma é feita de acordo com a figura 29. As subseções a seguir visam descrever com mais detalhes os componentes: servidor OPC UA, *Wather Handler*, *Data Model*, *Probe* e *Irrigation Recommendation*, pois estes componentes foram desenvolvidos especificamente para o modelo de fazenda indicado anteriormente, enquanto os demais componentes foram desenvolvidos pelos grupos ou empresas FIWARE (2020a), GRAFANA LABS (2020) e Siemens (2020), e necessitam apenas ser configurados.

4.1.1 Servidor OPC UA

O servidor OPC UA foi desenvolvido em linguagem Python com base na biblioteca python OPC UA (ROULET-DUBONNET, 2020). A tabela 5 indica os principais elementos

Figura 29 – Arquitetura da plataforma



Fonte: Autor

que compõem o servidor OPC UA, sendo que a especificação de cada elemento bem como suas variáveis pode ser visto no apêndice A.

Tabela 5 – Elementos principais do servidor OPC UA

Nome	**Tipo**	**Descrição**
Control	Objeto	Contém as variáveis da área de controle
Fuzzy	Objeto	Contém as variáveis da área de fuzzy
Pump	Objeto	Contém as variáveis da bomba de água
Automatic	Pasta	Contém os comandos para operação do sistema de irrigação de forma automática
Manual	Pasta	Contém os comandos para operação do sistema de irrigação de forma manual

Fonte: Autor

Nota-se que o servidor tem 3 objetos sendo eles a bomba de água, a zona de controle e a zona *Fuzzy*. Cada objeto contém as variáveis de controle para aquele objeto, ou seja, os

objetos que representam as áreas de controle e *fuzzy* contém variáveis para indicar a vazão dos aspersores, o volume irrigado pelos aspersores, se os aspersores estão ligados e a recomendação de irrigação para a área, enquanto o objeto bomba contém as variáveis para indicar a vazão da bomba e se ela está ligada ou desligada.

Existem também duas pastas: uma para os comandos da operação manual e uma para os comandos das operações automáticas. Entende-se por automáticas as ações que vão irrigar a zona de controle e/ou a zona *fuzzy* de acordo com o que for determinado pela plataforma IoT e por ações manuais as ações que podem ser utilizadas pelo fazendeiro caso ele ative a operação manual. As ações manuais são capazes de ligar e desligar a bomba de água, abrir e fechar as zonas de irrigação individualmente e ligar e desligar o sistema de irrigação.

O servidor OPC UA se comunica com os outros componentes da plataforma IoT de acordo com a figura 30. O servidor atua como um intermediário entre a simulação realizada no *software* Plant Simulation e a plataforma IoT, sendo sua atuação em duas frentes: a primeira a de receber comandos da simulação e enviá-los para a plataforma IoT; e a segunda a de receber comandos da plataforma IoT e enviá-los para a simulação.

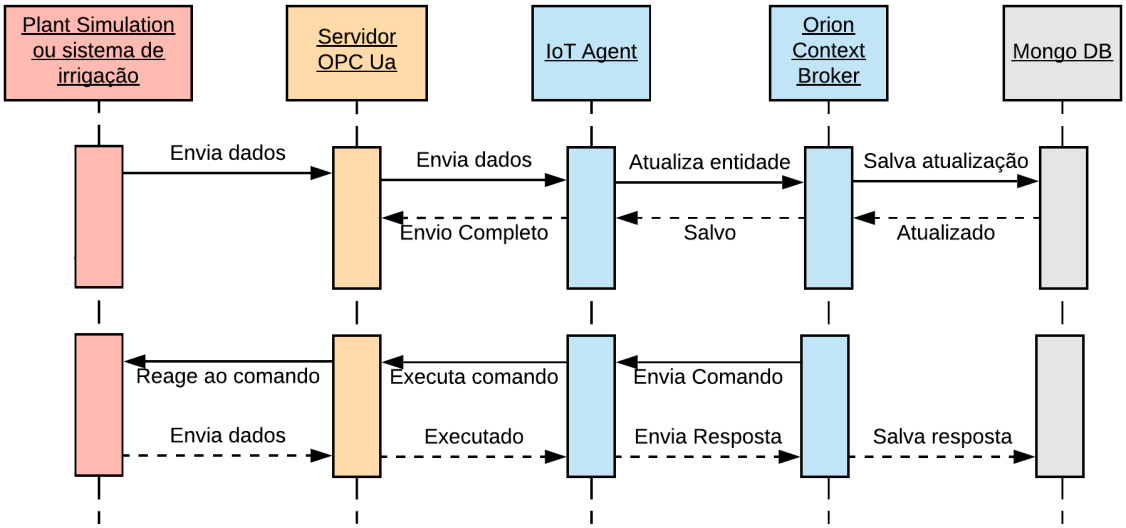
Nota-se que o servidor OPC UA tem, neste caso, dois clientes conectados a ele: o IoT Agent e o *software* Plant Simulation. Contudo, seria possível conectar como cliente os dispositivos localizados no sistema de irrigação, ou então fazer o servidor OPC UA controlar os dispositivos do sistema de irrigação de maneira direta. A decisão de fazer o servidor OPC UA controlar, diretamente ou por meio de clientes, os dispositivos do sistema de irrigação vai depender da infraestrutura presente na fazenda, ou seja, vai depender da existência de um controle central para todo o sistema de irrigação ou então de um controle distribuído em diversas áreas de manejo ou talhões.

4.1.2 Componente Weather Handler

O Weather Handler é responsável por coletar as variáveis climáticas das APIs *OneCallAPI* do OpenWeather (2020) e do Weather Wunderground (2020) e postá-las no *Orion Context Broker*. É importante notar que a previsão climática pela API do OpenWeather é de 7 dias, enquanto que a previsão do Wunderground é de 5 dias. Existe ainda uma diferença nas variáveis que são enviadas por cada API, como pode ser visto no apêndice B.

A figura 31 indica como o componente se comunica com outros elementos da plataforma. Inicialmente, o componente solicita os dados para as APIs do *OpenWeather* e *Weather*

Figura 30 – Comunicação do servidor OPC UA com outros elementos da plataforma



Fonte: Autor

Wunderground e depois envia estes dados para o *Orion Context Broker*, que irá atualizar as entidades pertinentes e também notificará o *Cygnus* para que este salve os dados no banco *MySQL*.

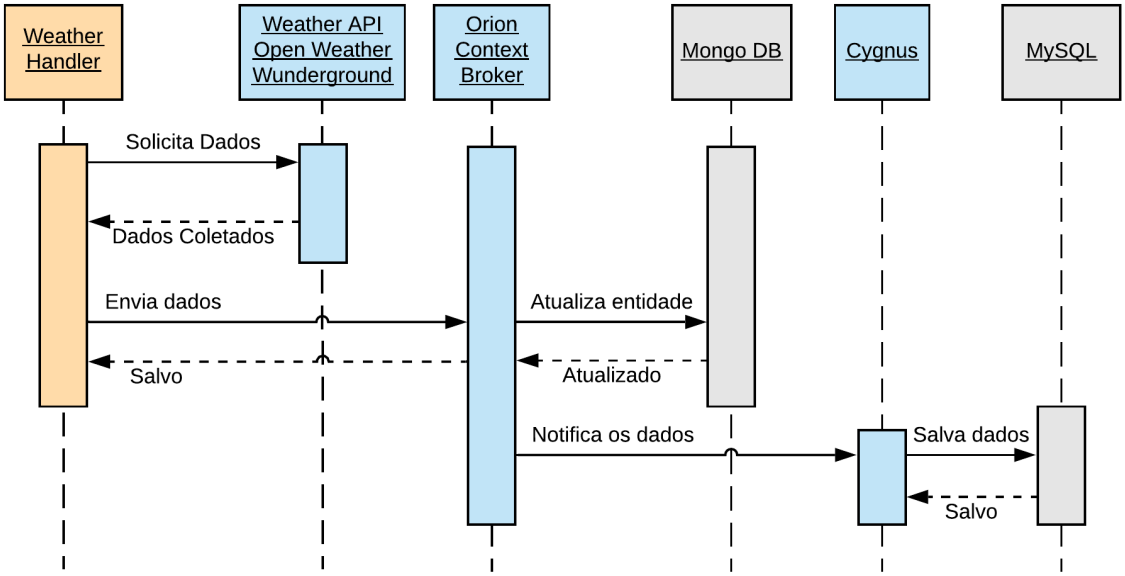
Um parâmetro muito importante de ser considerado neste componente é a "data observada" pois ela indica tanto a data e hora em que os parâmetros foram coletados, quanto a data em que as previsões são validas. Este parâmetro deve ser cuidadosamente utilizado, já que para cada API existem apenas duas entidades: a de dados climáticos corrente e a dos dados climáticos futuros.

4.1.3 Componente Data Model

Este componente é responsável por criar as entidades no *Orion Context broker*, criar as entidades no *IoT Agent JSON*, e criar a subscrição do *Cygnus* no *Orion Context Broker*. Esse modelo de dados pode ser ampliado ou reduzido de acordo com as necessidades de cada fazenda, dado que cada fazenda tem um determinando cultivo, uma determinada infraestrutura e uma determinada divisão de talhões e zonas de manejo. O modelo de dados utilizado pode ser visto na figura 32.

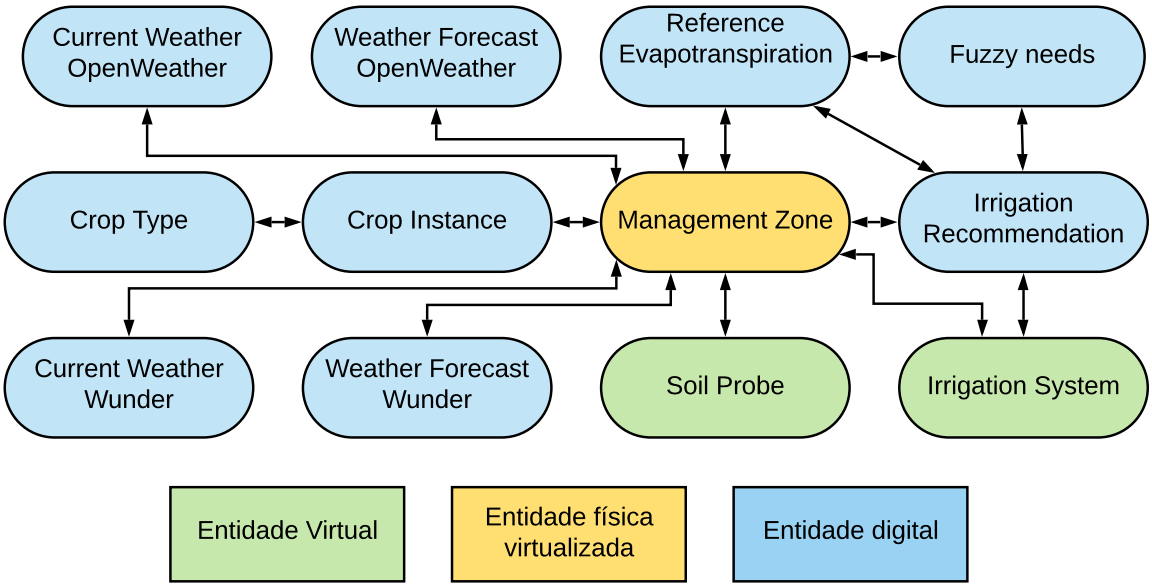
É importante notar que o modelo de dados contém três tipos de entidades diferentes, sendo eles: as Entidades virtuais (VEs), que representam objetos reais que interagem direta-

Figura 31 – Comunicação entre o *Weather Handler* e os outros componentes da plataforma



Fonte: Autor

Figura 32 – Modelo de dados utilizado na plataforma de internet das coisas



Fonte: Autor

mente com a plataforma, como o sistema de irrigação e a sonda de solo; as Entidades físicas virtualizadas (VPEs), que representam os elementos que existem no mundo real mas que não interagem diretamente com a plataforma, como a zona de manejo e a instância do cultivo; e as Entidades digitais (DEs), que representam elementos conceituais abstratos que normalmente são calculados ou então elementos que não interagem diretamente com a plataforma, como a evapotranspiração de referência e as entidades climáticas.

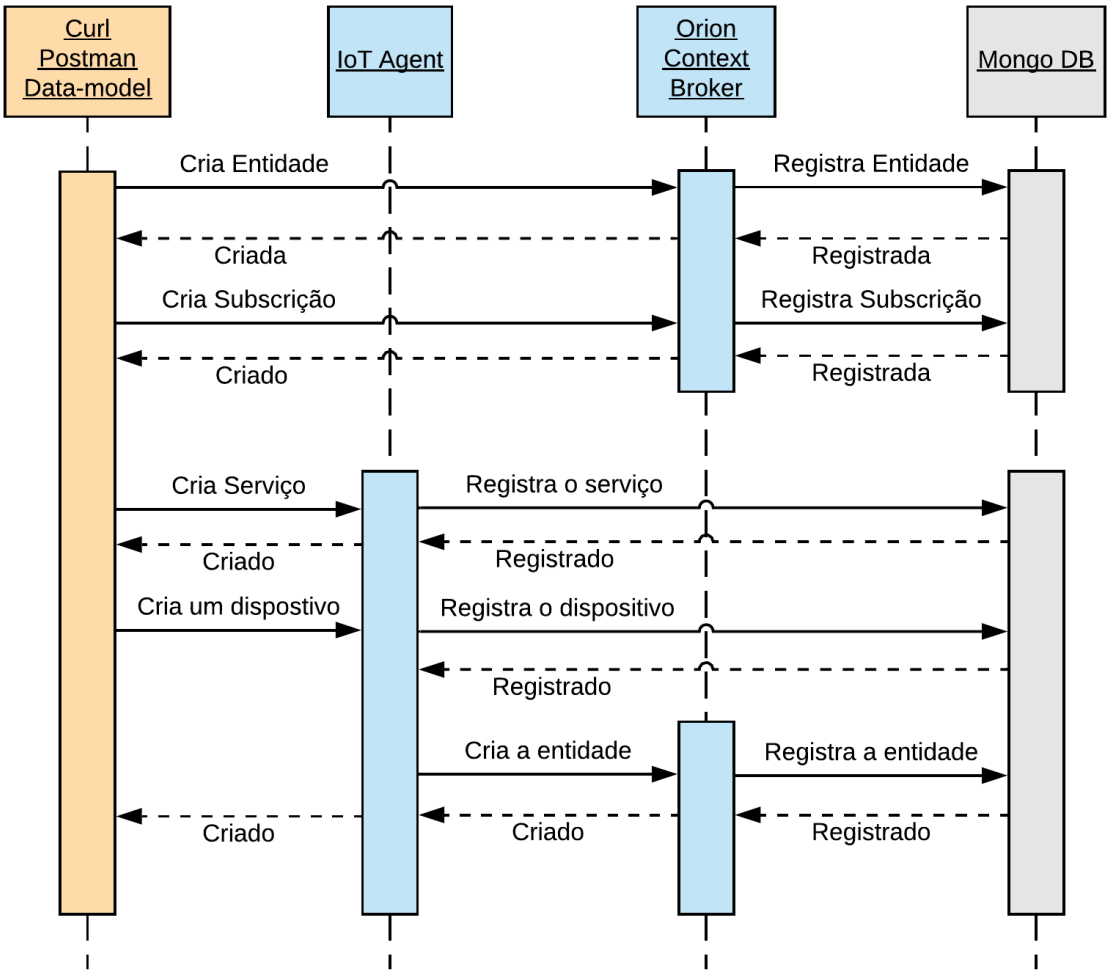
A figura 33 apresenta a comunicação do componente *Data Model* com outros elementos da plataforma. Nota-se que inicialmente o *Data Model* cria as entidades no *Orion Context Broker*, depois cria a subscrição do *Cygnus* no *Orion Context Broker* para posteriormente criar os serviços e registrar os dispositivos no *IoT Agent*. Uma descrição das variáveis que compõem cada uma das entidades utilizadas no modelo de dados pode ser vista no apêndice C, com exceção da entidade do sistema de irrigação, pois esta contém as mesmas variáveis apresentadas no apêndice A.

4.1.4 Componente Probe

Este componente foi desenvolvido para simular o comportamento de uma sonda de solo. O Envio dos dados é feito a cada 30 minutos pelo componente pois foi essa a taxa de coleta utilizada em um experimento realizado anteriormente com uma sonda de solo real (ALVES, 2020). A figura 34 apresenta a comunicação entre o componente *Probe* e os outros elementos da plataforma. O componente envia os dados para o *IoT Agent JSON*, que então atualiza a entidade no *Orion Context Broker*. Este por sua vez salva a alteração no banco de dados *MongoDD* e também notifica a modificação da entidade para o *Cygnus*, para que este salve os dados no banco de dados *MySQL*.

A figura 35 apresenta parte dos dados de umidade do solo, em dois níveis, coletados em campo pela sonda. Uma média móvel de 24 horas foi aplicada nos dados coletados pela sonda para suavizar o comportamento da mesma. É importante destacar que a sonda de solo foi utilizada em um campo sem cultivo e que por isso não pode ser utilizada para validar a prescrição de irrigação, mas apenas para validar a comunicação entre uma sonda e toda a plataforma.

Figura 33 – Comunicação do *Data Model* com os outros componentes da plataforma



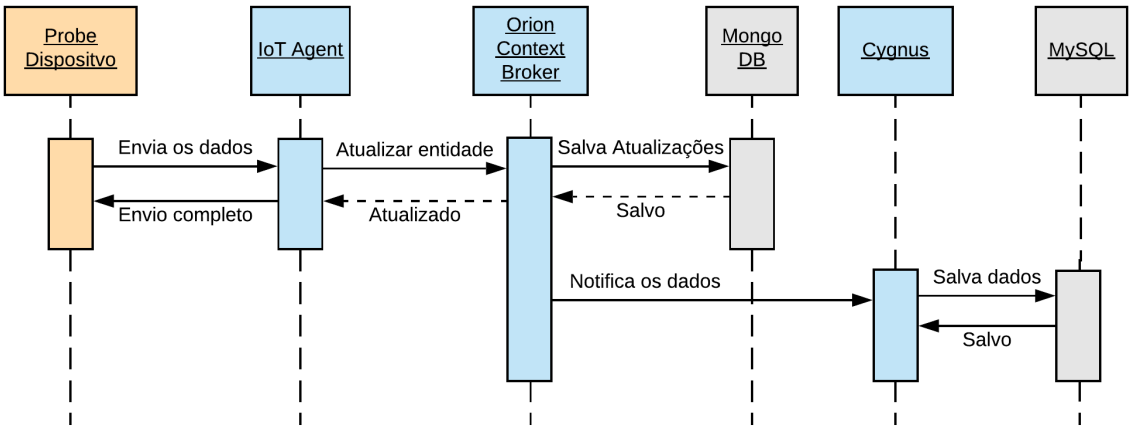
Fonte: Autor

4.1.5 Componente Irrigation recommendation

O componente *irrigation recommendation* é responsável por calcular os parâmetros de entrada para o modelo de evapotranspiração, calcular a evapotranspiração de referência, calcular a evapotranspiração da cultura e também calcular a prescrição de irrigação pelo modelo de inteligência artificial *fuzzy* proposto por Souza *et al.* (2020).

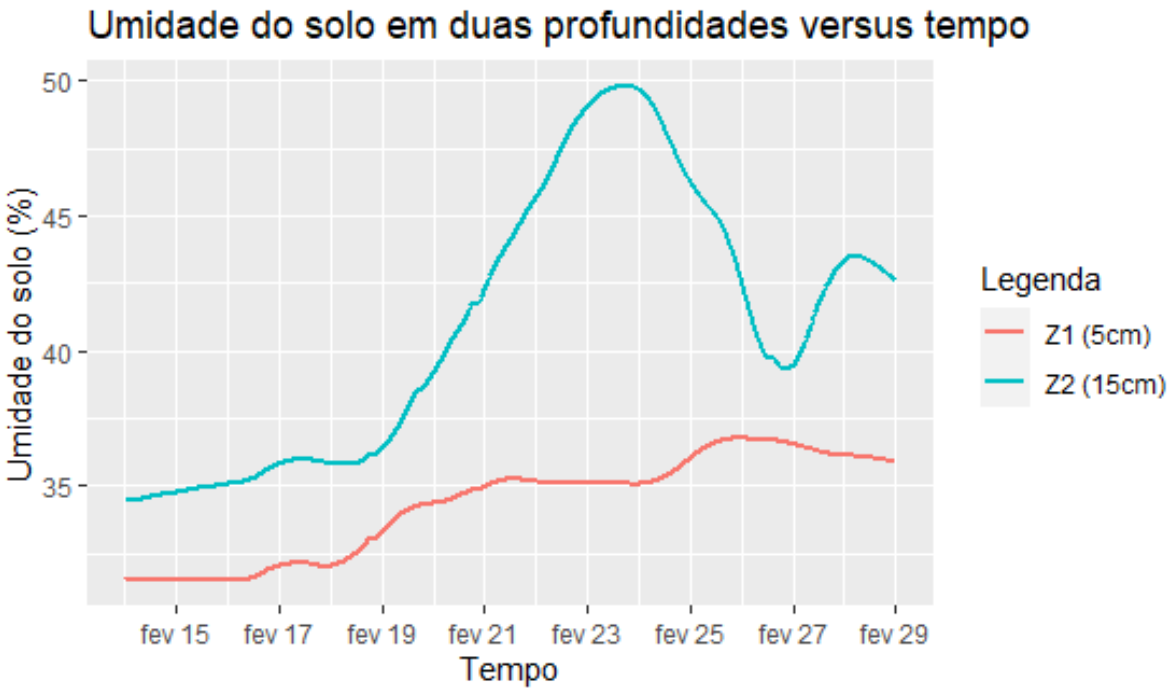
Destaca-se que o componente recupera dados tando do *Orion Contex Broker* quanto do banco *MySQL* para poder calcular todos os parâmetros mencionados anteriormente e também deve, após cada cálculo ser realizado, salvar o resultado dos cálculos nas entidades *Reference*

Figura 34 – Comunicação entre o componente *Probe* e outros elementos da plataforma



Fonte: Autor

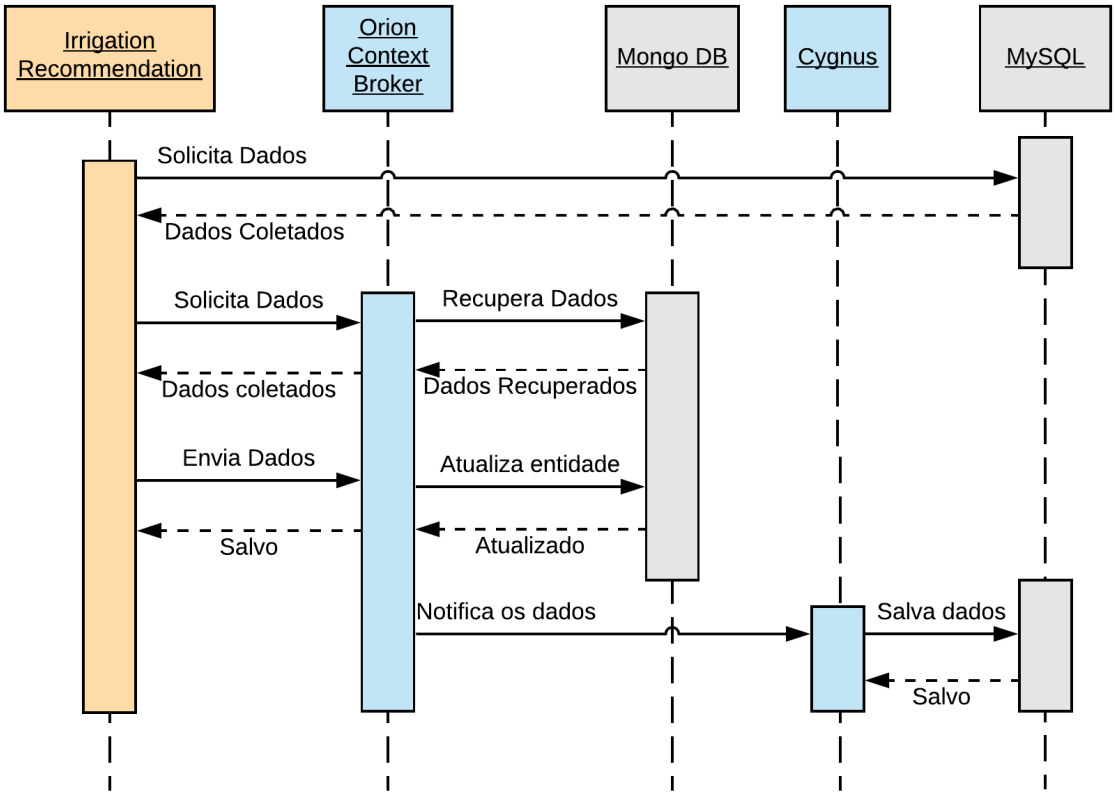
Figura 35 – Exemplo dos dados coletados pela sonda de solo



Fonte: Autor

Evapotranspiration, Fuzzy Needs e Irrigation Recommendation. A figura 36 indica a comunicação entre o componente e os outros elementos da plataforma.

Figura 36 – Fluxo de informações entre o componente *Irrigation Recommendation* e a plataforma



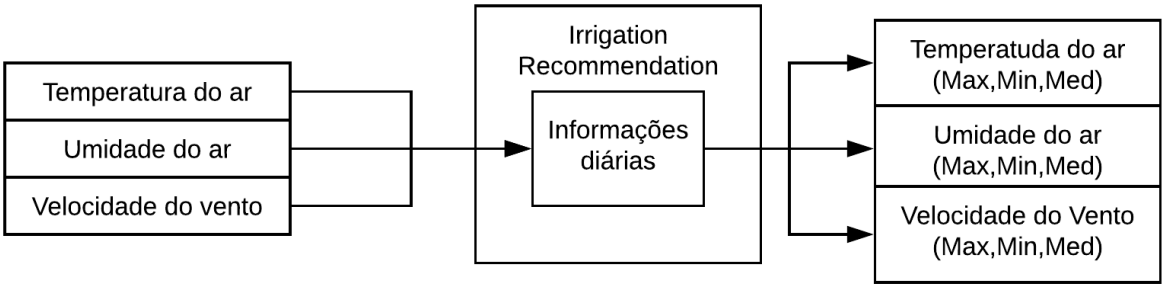
Fonte: Autor

O componente *Irrigation Recommendation* é composto por 4 funções, sendo elas: *daily info*, *evapotrasnpiration*, *fao recommendation* e *fuzzy recommendation*.

A figura 37 apresenta os parâmetros de temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento que são resgatados do banco de dados e utilizados na função *daily info*, para que o componente calcule os valores médios, máximos e mínimos diários de cada parâmetro. Os valores calculados são enviados para a entidade *Reference Evapotranspiration* para que a evapotranspiração de referência seja calculada.

A figura 38 apresenta os parâmetros resgatados da entidade *Reference Evapotranspiration* e das APIs climáticas para calcular a evapotranspiração diária através da função *evapotranspiration*. Nota-se que os valores de elevação da região e latitude da região são relativos

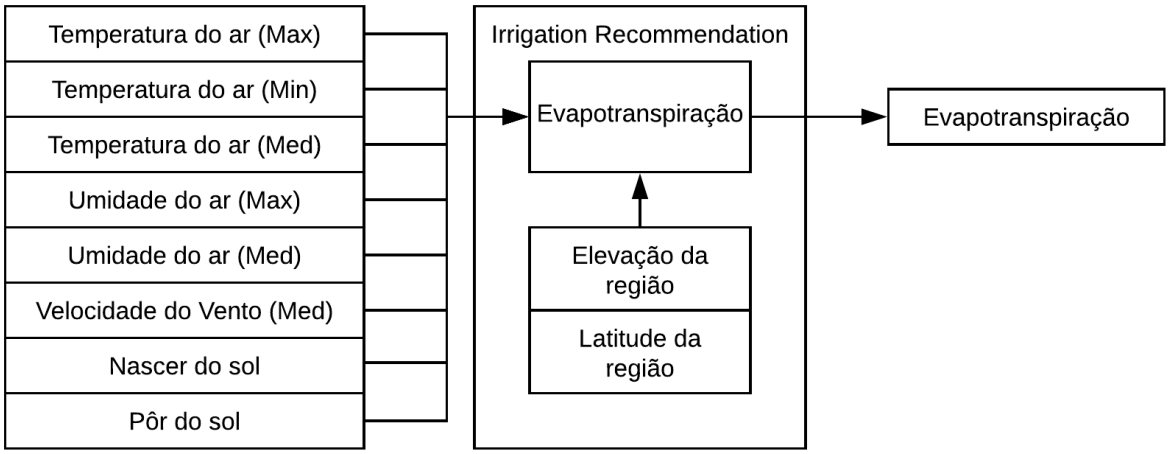
Figura 37 – Diagrama da função *daily info*



Fonte: Autor

a região da cidade de São Bernardo do Campo, ou seja, elevação de 801 metros e latitude de -0.40 radianos ou -23 graus. Esses valores estão incluídos no código da função, já que o modelo utilizado neste projeto é para um piloto na região de São Bernardo do Campo. Após o cálculo, a evapotranspiração de referencia é salva na entidade *Reference Evapotranspiration* para criar um histórico dos parâmetros climáticos máximos, mínimos e médios e a evapotranspiração de referência para cada dia.

Figura 38 – Diagrama da função *evapotranspiration*

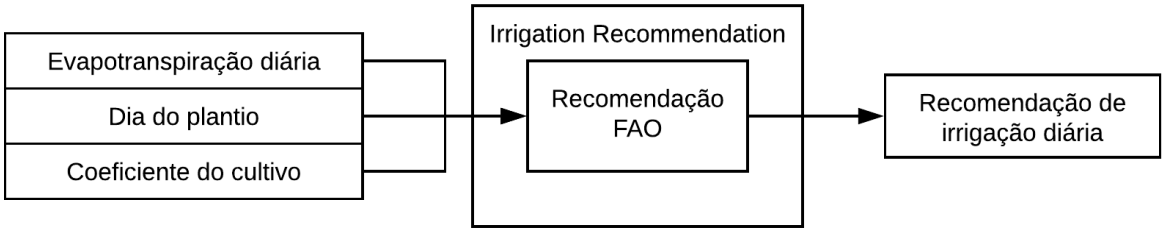


Fonte: Autor

A figura 39 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo da recomendação de irrigação diária pelo modelo FAO, através da função *fao recommendation*. Nota-se que como entrada tem-se os dados de evapotranspiração diária, a quantidade de dias após plantio e o coeficiente de cultivo que são obtidos nas entidades *Reference Evapotrasnpiration, Crop Instance e Crop*

Type, respectivamente. Por fim, calcula-se a recomendação de irrigação em milímetros de água e envia-se este dado para a entidade Irrigation Recommendation que tem relação com a área de controle.

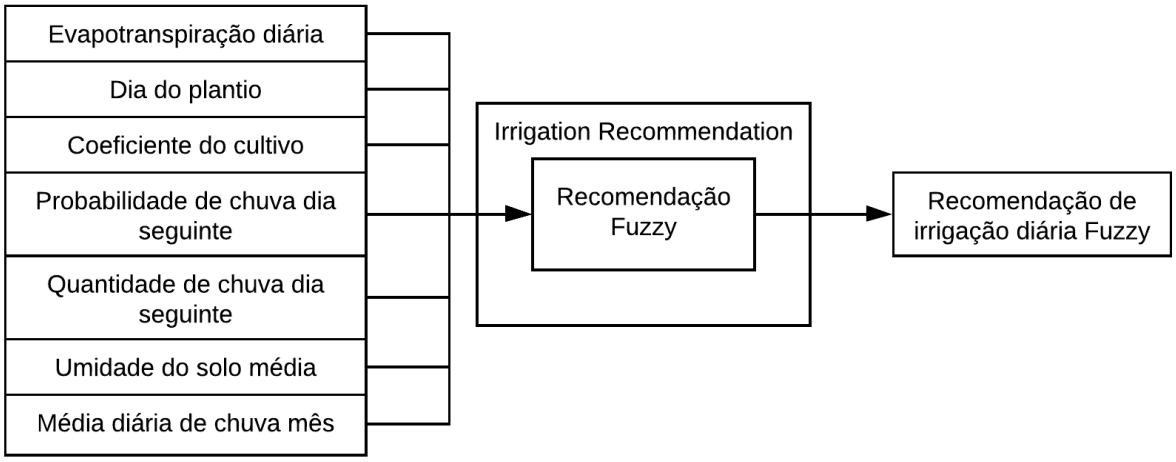
Figura 39 – Diagrama da função *fao recommendation*



Fonte: Autor

A figura 40 apresenta os parâmetros resgatados do *Orion Contex Broker*, do banco *MySQL* e das APIs climáticas para dar entrada no modelo de inteligência artificial, utilizando lógica *fuzzy* (SOUZA *et al.*, 2020), através da função *fuzzy recommendation*. Após o cálculo da recomendação de irrigação, esse dado é enviado para a entidade *Irrigation Recommendation* relacionada com a área denominada "área *fuzzy*".

Figura 40 – Diagrama da função *fuzzy recommendation*

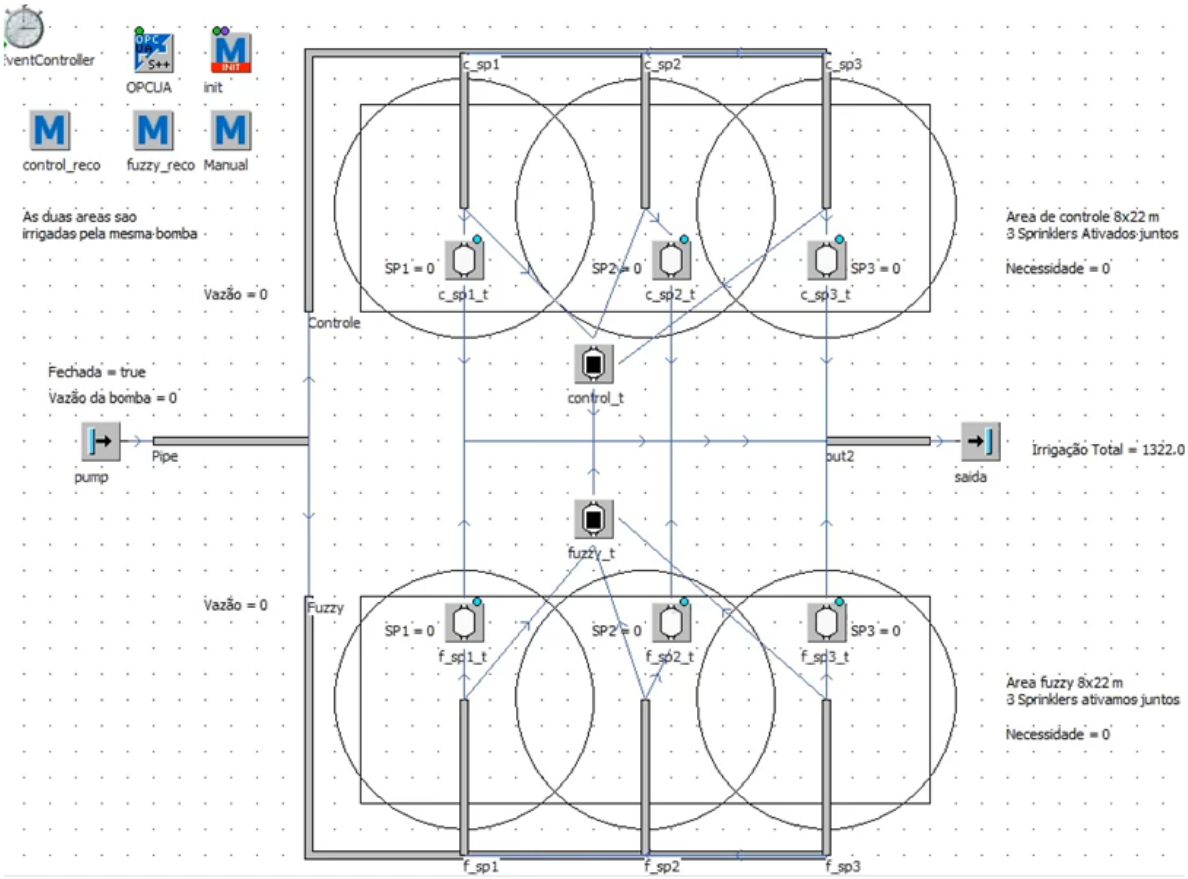


Fonte: Autor

4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Para a simulação do sistema de irrigação foi desenvolvido um modelo utilizando o *software* Plant Simulation (SIEMENS, 2020). Uma visão geral do ambiente da simulação pode ser visto na figura 41. O mapeamento das variáveis do servidor OPC UA é feito através do componente OPC UA, no qual faz o mapeamento através de uma chave de identificação única para cada variável do servidor OPC UA para uma variável que deve ser nomeada no *software* Plant Simulation.

Figura 41 – Visualização da simulação no Plant Simulation



Fonte: Autor

Para simular os aspersores do sistema de irrigação utiliza-se o elemento “tanque” na simulação. Com esse elemento é possível visualizar o volume de água irrigada por determinado aspersor ou região, desde que o tanque tenha volume o suficiente e que a sua saída esteja fechada. No modelo existe um tanque para cada aspersor, quando a operação manual estiver ligada e um tanque por zona de manejo, quando a operação automática estiver ligada.

O elemento *pump* é utilizado para simular a bomba de água, sendo que sua vazão é de $1l/s$ quando ela está ativada. Tubos são utilizados como representação visual do sistema de irrigação proposto e também como forma de direcionar a água para as devidas zonas de manejo. A divisão do fluxo de água para cada região foi definida em 50% para cada área independentemente da quantidade de aspersores que estiver ligada em cada zona de manejo.

Por fim, foi utilizado o elemento *"display"* para mostrar os valores de algumas variáveis importantes diretamente na área de trabalho da simulação. As variáveis apresentadas são a vazão da bomba, a vazão de cada zona de manejo, a vazão de cada aspersor, o volume de água irrigada por cada aspersor quando a operação manual está ligada, o volume de água irrigada por área quando a operação automática está ativada e o volume total de água irrigada.

Com estes elementos criados e configurados é possível visualizar como ocorreria a prescrição de irrigação de acordo com o que foi proposto pela plataforma IoT ou então de acordo com os comando manuais do fazendeiro. Nota-se que o modelo permite simular o comportamento em velocidades acima de tempo real, logo é necessário avaliar os resultados obtidos pela simulação.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo descrevem-se os resultados obtidos considerando que o presente sistema ficou operacional durante quarenta e oito horas. É necessário que o primeiro dia passe para que a prescrição de irrigação para o segundo dia seja calculada e que durante o segundo dia a irrigação seja realizada, logo é necessário que o experimento funcione por pelo menos dois dias. O experimento foi iniciado no dia 5 de outubro de 2020 e terminando no dia 7 de outubro de 2020.

É imprescindível que cada componente da plataforma IoT opere corretamente para que a informação flua entre os diferentes componentes e possa chegar na simulação computacional realizada no *software* Plant Simulation. A figura 42 apresenta o estado de cada componente durante o experimento. Nota-se que apenas o componente *Data Model* apresenta o estado *"exit 0"* pois, uma vez que este componente cria as entidades no *Orion Context Broker* e no *IoT Agent JSON*, ele termina a execução do seu código. Os outros componentes apresentam o estado *"up"*, indicando que os componentes estão operacionais.

Figura 42 – Estado dos componentes durante a execução do experimento

```
ralves@DESKTOP-TITBNV9:~/dtsmartfarming/platform$ docker-compose ps -a
          Name                        Command                 State                          Ports
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------
data_model                  python -u ./setup.py            Exit 0
db-mongo                    docker-entrypoint.sh --bin ...  Up          0.0.0.0:27017->27017/tcp
db-mysql                    docker-entrypoint.sh mysqld     Up          0.0.0.0:3306->3306/tcp, 33060/tcp
fiware-cygnus               /cygnus-entrypoint.sh           Up          0.0.0.0:5050->5050/tcp, 0.0.0.0:5080->5080/tcp
fiware-orion                /usr/bin/contextBroker -fg ...  Up (healthy) 0.0.0.0:1026->1026/tcp
grafana                     /run.sh                         Up          0.0.0.0:3000->3000/tcp
irrigation_recommendation   python -u ./irrigation.py       Up
opc_ua_server               python -u ./server.py           Up          0.0.0.0:4840->4840/tcp, 0.0.0.0:5001->5001/tcp
platform_iot-agent-json_1   docker/entrypoint.sh --  c ...  Up          0.0.0.0:4041->4041/tcp, 0.0.0.0:7896->7896/tcp
platform_iot-agent-opcua_1  docker/entrypoint.sh /usr/ ...  Up          0.0.0.0:4003->4003/tcp, 4041/tcp, 0.0.0.0:4081->8080/tcp
probe                       python -u ./uploaddata.py       Up
weather_handler             python -u ./weather.py          Up
ralves@DESKTOP-TITBNV9:~/dtsmartfarming/platform$
```

Fonte: Autor

Antes de obter os resultados do funcionamento da plataforma é necessário realizar uma série de passos para garantir que a plataforma funcione corretamente. O apêndice D indica uma série de validações que foram realizadas durante o procedimento experimental para garantir a comunicação e integração dos diversos componentes da plataforma. As seções a seguir indicam os resultados obtidos na plataforma IoT para o experimento realizado.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PELOS COMPONENTES DA PLATAFORMA

A plataforma IoT ficou operacional durante quarenta e oito horas. Durante este período todos os componentes da plataforma foram capazes de se comunicar adequadamente. Sendo assim, a plataforma foi configurada para realizar os seguintes passos:

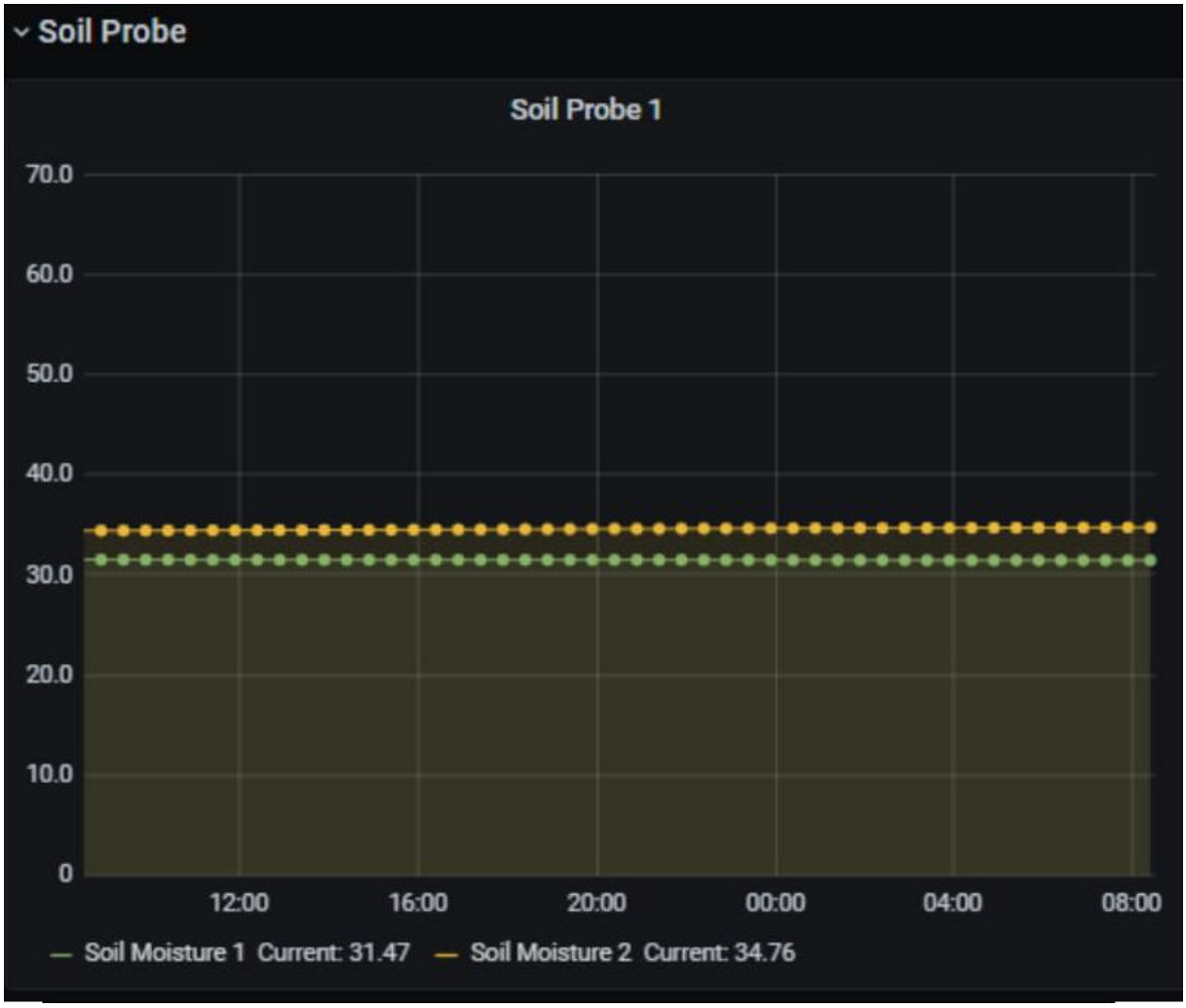
a) A cada 30 minutos o componente *Probe* enviava os dados para a plataforma;
b) A cada hora a plataforma calculava os valores máximos, médios e mínimos diários para a temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento;
c) A cada hora a plataforma calculava o valor da evapotranspiração de referência para o dia seguinte com base nos dados do item anterior;
d) A cada hora a plataforma calculava a recomendação de irrigação para a área de controle com base na evapotranspiração de referência e no Kc, considerando o plantio no dia 5 de outubro de 2020;
e) A cada hora a plataforma calculava a recomendação de irrigação para a área *fuzzy* com base na evapotranspiração de referência, valor médio da sonda de solo, dias após plantio, previsão de chuva para o dia seguinte e quantidade de chuva em mm para o dia anterior.

As figuras 43, 44 e 45 apresentam os valores de umidade do solo em dois níveis, umidade do ar, temperatura do ar e temperatura do solo enviados pelo componente *Probe* à plataforma durante o experimento e apresentados no painel criado no componente *Grafana*. É importante destacar que apenas a umidade do solo em dois níveis foi utilizada para os cálculos mencionados acima, mesmo que o componente fosse capaz de enviar outros parâmetros. Isso se deve ao fato de a sonda em questão não representar as condições reais de um determinado cultivo já que os dados utilizados foram coletados por uma sonda sem cultivo e também não representam valores relativos à data em que o experimento foi realizado.

As figuras 46 e 47 indicam os dados climáticos obtidos durante o experimento para as APIs do *Open Weather* e *Weather Wunderground*, respectivamente. Estas figuras indicam no painel os dados climáticos às 8 horas da manhã do dia 6 de outubro de 2020 e nos gráficos a evolução da temperatura e umidade do ar durante o experimento.

Destaca-se que a API do *Open Weather* faz um cálculo médio dos parâmetros climáticos para a região com base em uma rede de estações meteorológicas, enquanto a API do *Weater Wundergorund* retorna os valores de apenas uma estação meteorológica, que pode não estar

Figura 43 – Visualização do painel personalizado com dados de umidade em dois níveis enviados pelo componente *Probe*



Fonte: Autor

instalada de maneira correta. Assim sendo, optou-se por utilizar apenas os dados climáticos da API *Open Weather* para realizar todos os demais cálculos realizados na plataforma.

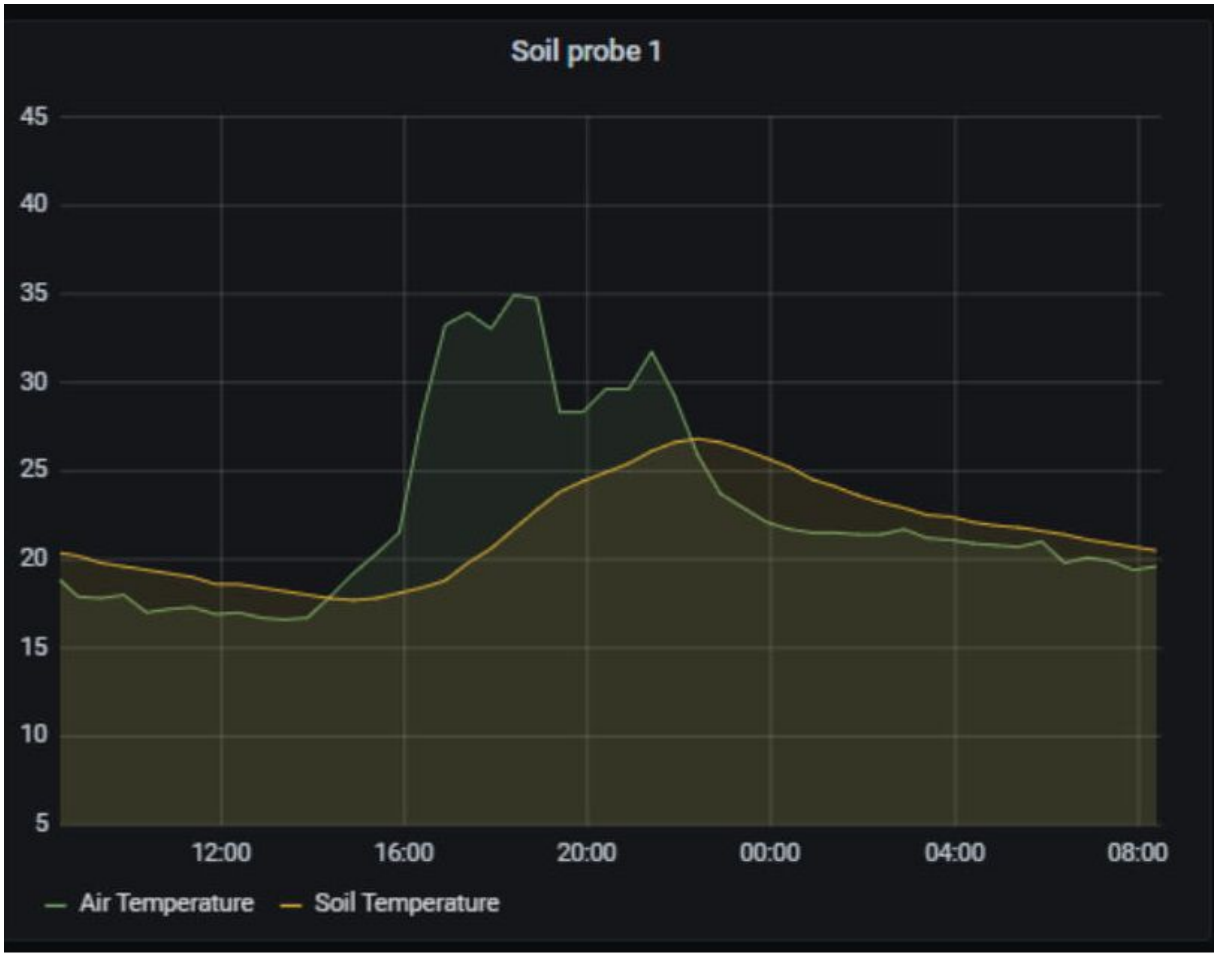
Com base nos dados apresentados anteriormente a plataforma calculou a recomendação de irrigação para o dia 6 de outubro de 2020 chegando aos valores de 4,15 mm para a área de controle e 2mm para a área *fuzzy*, como apresentado na figura 48. A mesma figura ainda indica os valores de recomendação de irrigação para o dia 7 de outubro de 2020 com base nos dados coletados até as oito horas da manhã do dia 6 de outubro de 2020. Nota-se que a recomendação de irrigação para o dia seguinte varia ao longo do dia já que a evapotranspiração de referência é calculada com base nos valores máximos, mínimos e médios de diversos parâmetros e que tais parâmetros variam ao longo do dia.

Figura 44 – Visualização do painel personalizado com dados de umidade do ar enviados pelo componente *Probe*

Fonte: Autor

O painel desenvolvido no componente *Grafana* visa indicar para o fazendeiro a situação de sua fazenda. Portanto, é possível visualizar os dados históricos da sonda de solo, os dados históricos dos parâmetros climáticos da região, a previsão climática para os próximos 5 dias e também a recomendação de irrigação para o dia e a previsão de irrigação para o dia seguinte até aquele momento. A partir destas informações tem-se duas situações: a primeira em que a própria plataforma enviará automaticamente as recomendações de irrigação para o servidor OPC UA do sistema de irrigação através do *IoT Agent OPC UA*; ou então o fazendeiro operará manualmente o sistema de irrigação para irrigar as duas áreas de acordo ou não com a recomendação de irrigação.

Figura 45 – Visualização do painel personalizado com dados de temperatura do ar e do solo enviados pelo componente *Probe*



Fonte: Autor

No primeiro caso a plataforma opera de maneira automática através dos métodos *irrigate control* e *irrigate fuzzy* do servidor OPC UA, enquanto no segundo caso deve-se utilizar os comandos manuais presentes no servidor OPC UA, como por exemplo, os métodos *turncontrolon* e *turnfuzzyon*. Nota-se que existe uma flexibilidade na tomada de decisão sobre o processo de irrigação já que este é um processo crucial para o correto desenvolvimento dos cultivos e que, portanto, deve ser executado de acordo com as decisões do fazendeiro.

Para o experimento proposto, a plataforma de irrigação faz o envio da recomendação de irrigação de forma automática as oito horas da manhã todos os dias. Sendo assim os métodos *irrigate control* e *irrigate fuzzy* são acionados no servidor OPC UA com as recomendações de 4,15 mm e 2 mm respectivamente. Como o servidor OPC UA não está implantado em um sistema de irrigação real, é necessário que uma modelo computacional faça a simulação do

Figura 46 – Parâmetros climáticos coletados através da API *Open Weather*

Fonte: Autor

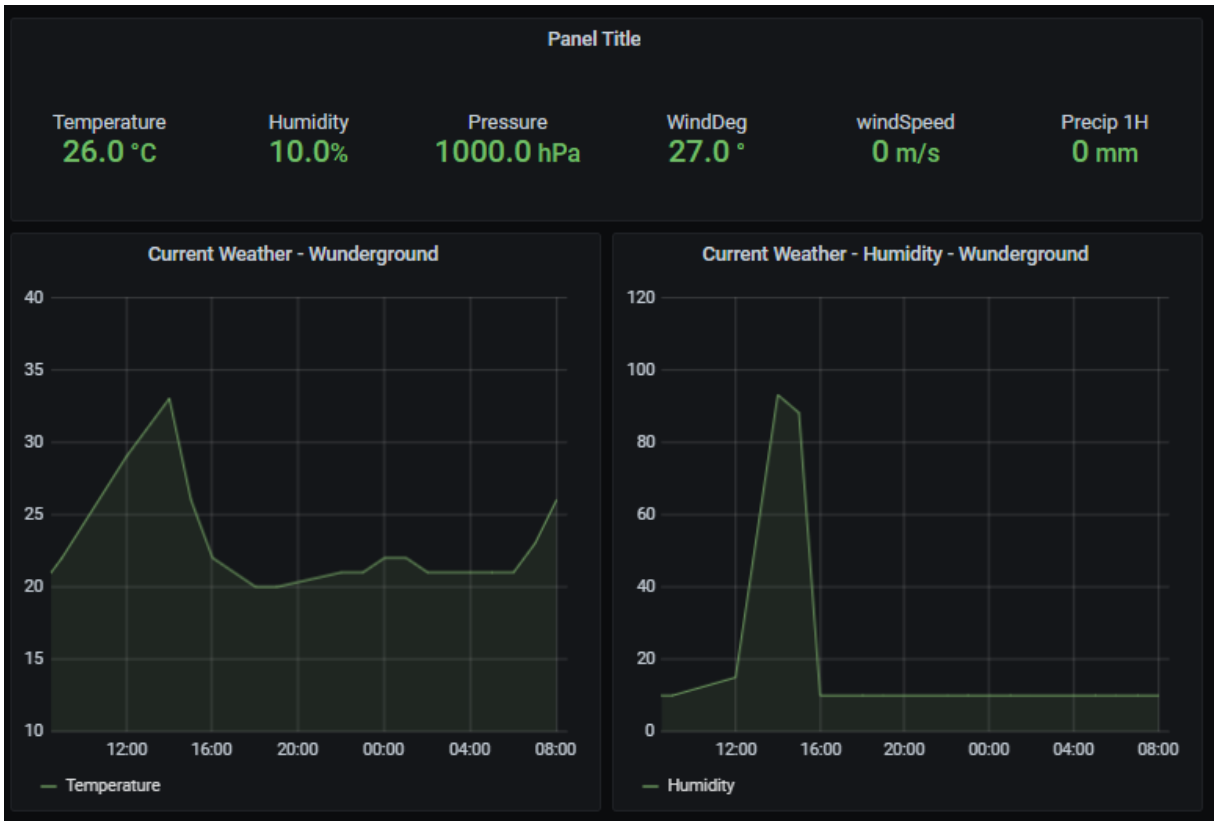
comportamento do sistema de irrigação a fim de demonstrar como o sistema de irrigação real reagiria a tais recomendações de irrigação. A seção a seguir indica os resultados obtidos durante a simulação do sistema de irrigação.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NO SOFTWARE PLANT SIMULATION

Inicialmente a simulação recebe duas recomendações de irrigação: uma de $4{,}15mm$ para a área de controle e uma de $2mm$ para a área *fuzzy*. A simulação então calcula o volume de água a ser irrigada para cada uma das áreas. Logo teríamos $730{,}14$ litros para a área de controle e 352 litros para a área *fuzzy* já que cada área tem $176m^2$.

Com as recomendações de irrigação recebidas, o modelo define o volume do tanque de controle e *fuzzy* para os respectivos volumes de irrigação. Esses tanques são utilizados para definir a meta de irrigação para cada uma das áreas. Portanto, a saída dos tanques deve estar

Figura 47 – Parâmetros climáticos coletados através da API *Weather Wunderground*



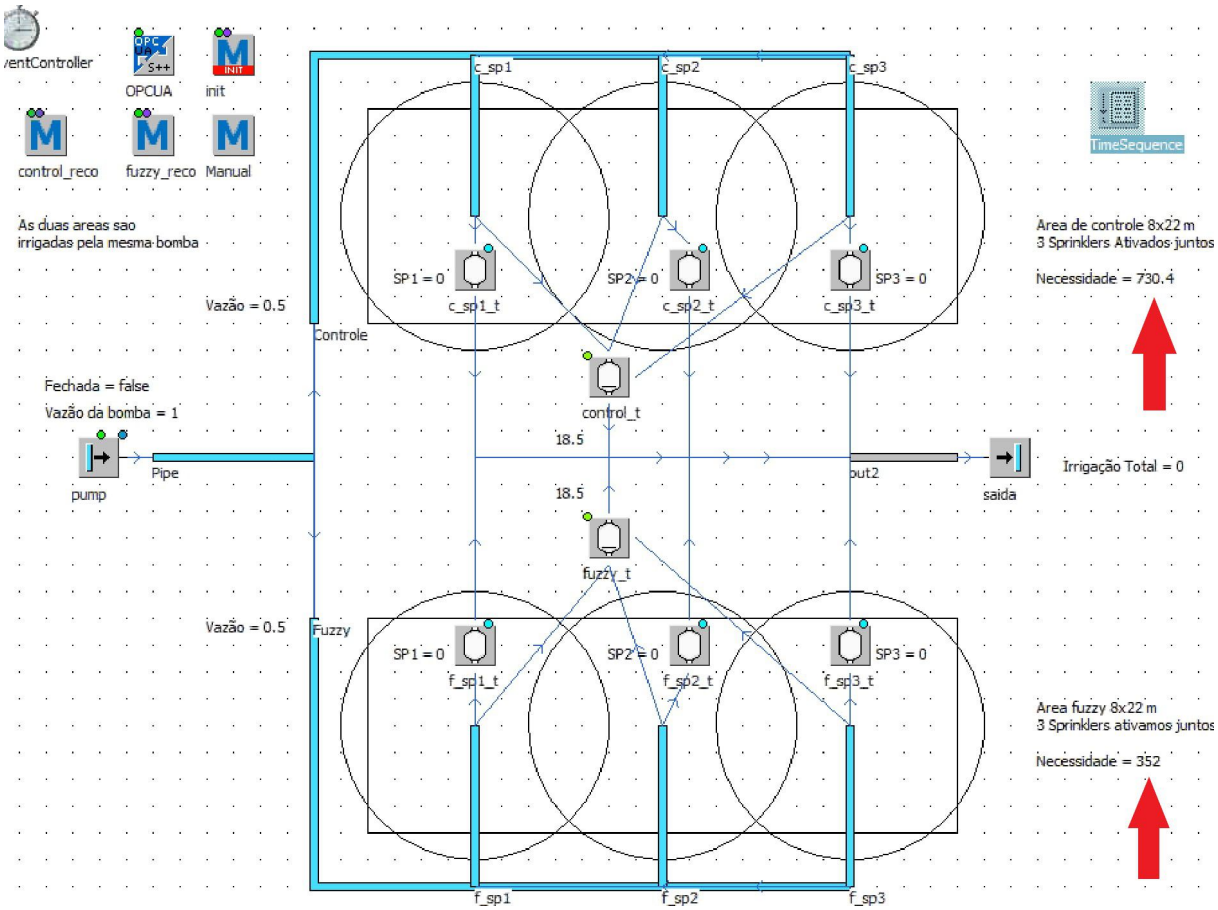
Fonte: Autor

Figura 48 – Recomendação de irrigação obtida pela plataforma IoT

Fonte: Autor

fechada durante o processo de irrigação para que o volume do tanque aumente até o limite. O próximo passo é ligar os aspersores SP1, SP2 e SP3 de cada área. Logo após, a bomba é ligada com uma vazão de $1l/s$ como definido durante a descrição do procedimento experimental. A figura 49 apresenta o sistema de irrigação ligado, como pode ser visto pela cor azul nas tubulações, e também a necessidade de irrigação para cada área, como indicado pelas setas vermelhas.

Figura 49 – Inicio da simulação, após a simulação receber os comandos de irrigação

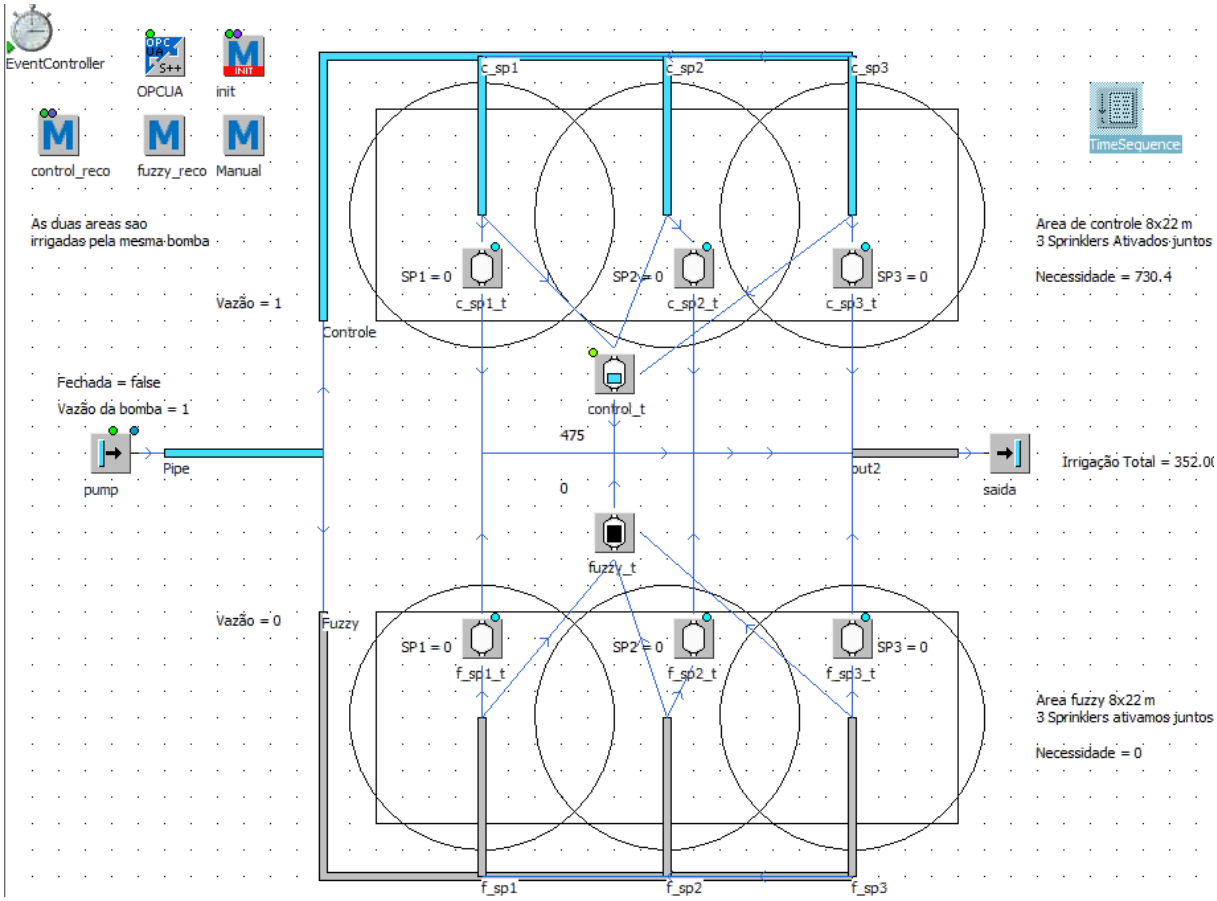


Fonte: Autor

Uma vez que o tanque de uma área atinge a capacidade máxima, ou seja, atinge o volume de água a ser irrigada para tal área, o modelo desliga os aspersores SP1, SP2 e SP3 da área. O modelo também desliga o bomba de água caso as duas áreas já tenham sido irrigadas. A figura 50 indica a situação do sistema de de irrigação quando a área *fuzzy* foi totalmente irrigada e, portanto, apenas a área de controle está ligada.

Uma vez que todos os aspersores de uma determinada área são desligados a simulação então fecha a entrada e abre a saída do tanque da respectiva área para que o volume de água

Figura 50 – Estado da simulação após uma das áreas ter sido irrigada



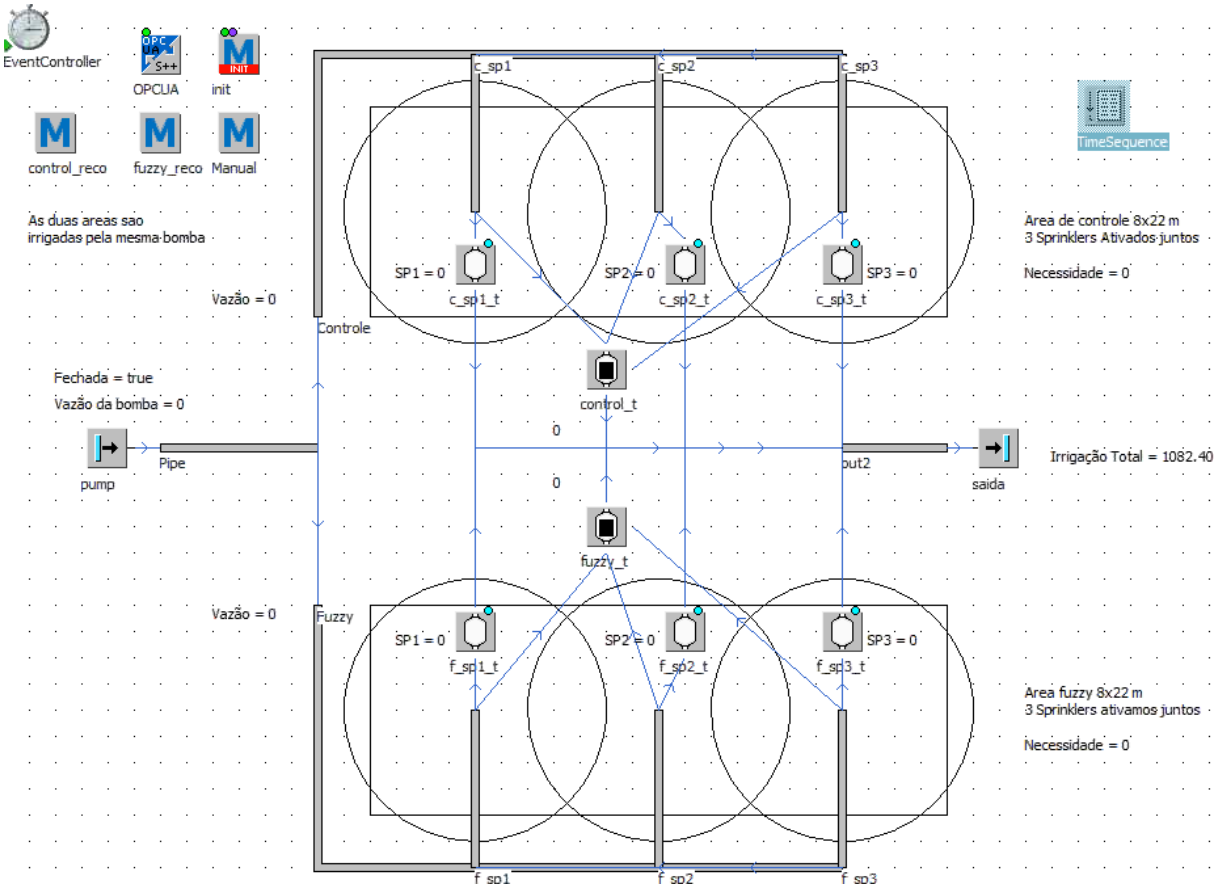
Fonte: Autor

irrigado seja enviado para a saída da simulação e contabilizado no volume total de água irrigada. Também é possível notar na figura 50 que a necessidade de irrigação retornou ao valor 0 e que o volume total irrigado foi de 352 litros. Por fim, a figura 51 indica o estado da simulação ao fim das duas irrigação. O volume total irrigado foi de 1082.4 litros.

Para o experimento nota-se que o volume de água a ser irrigado para a área de controle é muito maior do que o volume de água irrigado para a área *fuzzy*. Logo a irrigação da área *fuzzy* termina antes da área de controle. Uma vez que a irrigação de todas as áreas esteja completa é possível visualizar o volume total de água irrigada como visto na figura 51 e o tempo em que cada irrigação foi ativado como visto na tabela 6. Nota-se que o tempo de irrigação da área *fuzzy* foi de 14:57 - 3:12 = 11:45 minutos e que o tempo para a irrigação da área de controle foi de 21:15 - 3:12 = 18:03 minutos.

Nota-se que as recomendações de irrigação para as duas áreas foram enviadas no mesmo tempo, ou seja, a 3:12 minutos do início da simulação e, portanto, a irrigação das duas áreas é

Figura 51 – Estado da simulação ao fim da irrigação das duas áreas



Fonte: Autor

Tabela 6 – Tempos de início e finalização da irrigação de cada área

Tempo (Minutos)	**Vazão Área Fuzzy (l/s)**	**Vazão Área Controle (l/s)**	**Volume Irrigado Fuzzy (l)**	**Volume Irrigado Fuzzy (l)**	**Observação**
0:00	0	0	0	0	Inicio da simulação
3:12	0.5	0.5	0	0	Comandos recebidos
14:57	0	1	352	352	Fim da irrigação da área Fuzzy
21:15	0	0	352	730.4	Fim da irrigação das duas áreas

Fonte: Autor

ligada ao mesmo tempo. Sendo assim, inicialmente, a bomba de água é ligada com vazão de 1 l/s, sendo tal vazão dividida igualmente entre as duas áreas. Logo, ambas as áreas inciam seu processo de irrigação com vazão de 0,5 l/s e após a finalização da irrigação da área *fuzzy* (no tempo 14:57 minutos) toda a vazão é destinada a irrigação da área de controle. A divisão de vazão em 50% para cada área foi fixada no modelo. Contudo, destaca-se que em um sistema real é necessário realizar o balanceamento de carga do sistema para cumprir essa regra, pois, caso contrário, as vazões para cada área serão diferentes. As restrições de operação do sistema de irrigação podem ser adicionadas ao modelo conforme a necessidade, tornando assim o modelo computacional mais condizente com o funcionamento real de um sistema de irrigação.

Vale destacar que também é possível operar o sistema de irrigação de maneira manual, sendo assim, a simulação seria controlada manualmente através de comandos enviados externamente ao servidor OPC UA, seja através da plataforma IoT ou então um cliente OPC UA. Nota-se que os comandos possíveis são para ligar e desligar todo o sistema de irrigação, ligar e desligar cada uma das áreas independentemente, e ligar e desligar a bomba de água. Neste tipo de operação um tanque com volume infinito é definido para cada aspersor para que seja possível verificar o volume irrigado por cada aspersor durante a operação manual. Neste tipo de operação o controle da irrigação é realizado de acordo com as necessidades dos fazendeiros.

A simulação realizada no *software* Plant Simulation se comunica com o servidor OPC UA e portando uma alteração em uma das variáveis do servidor OPC UA provoca alterações nas variáveis utilizadas na simulação e vice-versa. Essas alterações nas variáveis do servidor podem ser feitas pelos dois clientes conectados a ele: o *software* Plant Simulation e o *IoT Agent OPC UA*.

Uma vez realizada a simulação e avaliado o comportamento do sistema de irrigação é possível conectar os dispositivos de um sistema de irrigação real ao servidor OPC UA e assim garantir o correto funcionamento do sistema de irrigação. Além disso também é possível utilizar a simulação para visualizar o comportamento do sistema de irrigação em tempo real, já que o servidor OPC UA funciona através do mecanismo cliente-servidor. Para tal operação é necessário alterar os métodos da simulação para que ela não altere nenhuma variável, já que a alteração das variáveis deve depender apenas de mudanças no servidor OPC UA e no sistema real.

É importante destacar que este trabalho não realizou nenhuma avaliação sobre o consumo de água ou de energia utilizados na irrigação, bem como não avaliou o melhor *layout* e operação de um determinado sistema pois tais avaliações dependem da implantação de um

sistema real. A simulação oferece apenas uma avaliação inicial do comportamento de determinado sistema, mas ao longo da operação do mesmo junto a plataforma IoT é que será possível otimizar a irrigação dada uma restrição ou objetivo do fazendeiro como por exemplo reduzir o consumo de água e/ou uniformizar a velocidade de irrigação em diversas zonas de manejo.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma RBS da literatura para apoiar a compreensão de como o conceito de fazenda inteligente está definido na literatura. Nota-se que não existe um consenso sobre a definição do conceito. Portanto, fazenda inteligente é definida neste trabalho como a utilização integrada da ICT, a IoT, o *big data* e a IA, de maneira a realizar o sensoriamento e monitoramento não só do ambiente agrícola, mas, também das máquinas e equipamentos utilizados pelos fazendeiros para gerar e analisar dados integrados, de forma que os fazendeiros possam aumentar sua produção, reduzir seu custo e reduzir seu desperdício, para habilitar fazendas mais eficientes, produtivas e rentáveis.

Além disso, foi possível unir uma plataforma IoT com uma simulação computacional desenvolvida no *software* Plant Simulation para gerar um gêmeo digital de um sistema de irrigação. A plataforma IoT é responsável por criar um modelo digital da fazenda através da definição das entidades. Além disso, a plataforma realiza o gerenciamento das informações da fazenda para definir recomendações de irrigação para as zonas de manejo. Uma vez definidas, as recomendações de irrigação são enviadas para o servidor OPC UA conectado ao *software* Plant Simulation para que seja possível avaliar o comportamento de um sistema de irrigação real. Nota-se que com o sistema proposto é possível receber e enviar dados de forma automática de forma a irrigar adequadamente uma determinada zona de manejo. Os benefícios atingidos pelo desenvolvimento do gêmeo digital para um sistema de irrigação foram:

a) Desenvolvimento de um modelo de dados que represente uma fazenda com suas zonas de manejo, cultivos, sondas de solo, parâmetros climáticos, recomendações de irrigação e sistema de irrigação;
b) Cálculo diário da evapotranspiração de referência e da evapotranspiração do cultivo para cada zona de manejo;
c) Cálculo diário da recomendação de irrigação com base no modelo da FAO (ALLEN *et al.*, 1998) e do modelo de IA por lógica *fuzzy* (SOUZA *et al.*, 2020);
d) Recebimento de dados da sonda de solo, do sistema de irrigação e das APIs do *Open Weather* e *Weather Wunderground*;
e) Envio de comandos da plataforma para o sistema de irrigação através do servidor OPC UA;
f) Simulação do comportamento do sistema de irrigação antes da implantação real do mesmo;

g) Monitoramento da situação da fazenda em um painel personalizado;

Já os trabalhos futuros com base no sistema proposto são:

a) A ampliação do modelo de dados para outros cultivos e dispositivos;
b) A generalização do componente *Irrigation Recommendation* para calcular a prescrição de irrigação para diversos cultivos e zonas de manejo.
c) A melhor definição as variáveis e métodos do servidor OPC UA para representar um sistema de irrigação real já implantado;
d) A criação de um algoritmo de otimização, com base em algum parâmetro definido pelos fazendeiros, para a simulação do sistema de irrigação;
e) A validação do sistema proposto em uma fazenda piloto para avaliar a correta operação da plataforma e da simulação.

Tais benefícios são advindos da utilização em conjunto de uma plataforma IoT com um *software* de simulação como o *Plant Simulation*. O principal benefício é a capacidade de simular um sistema de irrigação antes de implantar um sistema de irrigação real e, depois da implantação real, utilizar a mesma simulação para monitorar o sistema de irrigação.

Com tal proposta conclui-se que um gêmeo digital para um sistema de irrigação é viável. Contudo, ainda é necessário validar esta proposta com a implantação de um piloto. A implantação em um experimento piloto se faz necessária para avaliar o correto funcionamento da plataforma IoT e da simulação computacional em campo, já que é necessário verificar se a tomada de decisão proposta com o uso do gêmeo digital não causa alguma perda de produtividade das fazendas, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de água e/ou energia elétrica.

REFERÊNCIAS

AGALE, R. R.; GAIKWAD, D. P. Automated Irrigation and Crop Security System in Agriculture Using Internet of Things. *In*. 2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA). [*S. l.: s. n.*], 2017. p. 1–5. DOI: 10.1109/ICCUBEA.2017.8463726.

ALIPIO, M. I. *et al.* A smart hydroponics farming system using exact inference in Bayesian network. *In*. 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). [*S. l.: s. n.*], out. 2017. p. 1–5. DOI: 10.1109/GCCE.2017.8229470.

ALLEN, Richard G. *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Food and Agriculture Organization fo the United Nations**, n. 56, abr. 1998. Disponível em: http: //www.fao.org/tempref/SD/Reserved/Agromet/PET/FAO_Irrigation_Drainage_Paper_56.pdf.

ALVES, Rafael Gomes. **Gêmeo digital para um sistema de irrigação**. [*S. l.: s. n.*], 2020. Disponível em: https://github.com/rafaelalvesitm/dtsmartfarming. Acesso em: 24 set. 2020.

ANIK, T. A. *et al.* Spatial data visualization methodologies in ICT4D research. *In*. 2015 18th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT). [*S. l.: s. n.*], dez. 2015. p. 429–434. DOI: 10.1109/ICCITechn.2015.7488109.

ANTHONY HOWARD, Daniel *et al.* Data Architecture for Digital Twin of Commercial Greenhouse Production. *In*. 2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF). [*S. l.*]: IEEE, out. 2020. p. 1–7. DOI: 10.1109/RIVF48685.2020.9140726. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9140726/.

ARVANITIS, Konstantinos G.; SYMEONAKI, Eleni G. Agriculture 4.0: The Role of Innovative Smart Technologies Towards Sustainable Farm Management. **The Open Agriculture Journal**, v. 14, n. 1, p. 130–135, ago. 2020. DOI: 10.2174/1874331502014010130. Disponível em: https://openagriculturejournal.com/VOLUME/14/PAGE/130/.

AWS IOT. **O portfólio mais seguro e escalável de serviços de IoT do ponto para a nuvem**. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://aws.amazon.com/pt/iot/.

BAHETI, Radhakisan; GILL, Helen. Cyber-pysical Systems. *In*, 1. v. 12, p. 161–166.

BENDRE, M. R.; THOOL, R. C.; THOOL, V. R. Big data in precision agriculture: Weather forecasting for future farming. *In*. 2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT). [*S. l.: s. n.*], set. 2015. p. 744–750. DOI: 10.1109/NGCT.2015.7375220.

BHAKTA, Ishita; PHADIKAR, Santanu; MAJUMDER, Koushik. State-of-the-art technologies in precision agriculture: a systematic review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 11, p. 4878–4888, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9693.

BJORNEBERG, D.L. IRRIGATION | Methods. *In*. REFERENCE Module in Earth Systems and Environmental Sciences. [*S. l.*]: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-409548-9. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05195-2. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489051952.

BOCQUET-APPEL, J.-P. When the World's Population Took Off: The Springboard of the Neolithic Demographic Transition. **Science**, v. 333, n. 6042, p. 560–561, jul. 2011. DOI: 10.1126/science.1208880. Disponível em: http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1208880.

BOJAN, V. *et al.* Cloud-based service for time series analysis and visualisation in Farm Management System. *In*. 2015 IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). [*S. l.: s. n.*], set. 2015. p. 425–432. DOI: 10.1109/ICCP.2015.7312697.

BRAJOVIĆ, M.; VUJOVIĆ, S.; ĐUKANOVIĆ, S. An overview of smart irrigation software. *In*. 2015 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). [*S. l.: s. n.*], jun. 2015. p. 353–356. DOI: 10.1109/MECO.2015.7181942.

BRAUN, Anja-Tatjana; COLANGELO, Eduardo; STECKEL, Thilo. Farming in the Era of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, Elsevier B.V., v. 72, p. 979–984, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.176. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.176.

BROWN, Terence A. *et al.* The complex origins of domesticated crops in the Fertile Crescent. **Trends in Ecology and Evolution**, Elsevier Ltd, v. 24, n. 2, p. 103–109, 2009. DOI: 10.1016/j.tree.2008.09.008. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2008.09.008.

BUDAEV, D. *et al.* Conceptual design of smart farming solution for precise agriculture. **International Journal of Design & Nature and Ecodynamics**, v. 13, n. 3, p. 307–314, ago. 2018. DOI: 10.2495/DNE-V13-N3-307-314. Disponível em: doi.org/10.2495/DNE-V13-N3-307-314.

CASSANDRAS, C.G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. [*S. l.*]: Springer, 2008. p. 1–771. DOI: 10.1007/978-0-387-68612-7.

CHETAN DWARKANI M *et al.* Smart farming system using sensors for agricultural task automation. *In*. 2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR). [*S. l.: s. n.*], jul. 2015. p. 49–53. DOI: 10.1109/TIAR.2015.7358530.

CHIDAMBARANATHAN, C. M.; HANDA, S.S.; RAMANAMURTHY, M.V. Development of smart farming - a detailed study. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 2.4, p. 56–58, mar. 2018. ISSN 2227-524X. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.4.10042.

CLERCQ, Matthieu De; VATS, Anshu; BIEL, Alvaro. Agriculture 4.0 : the Future of farming technology. **World Government Summit**, n. 1, fev. 2018.

COLEZEA, Madalin *et al.* CLUeFARM: Integrated web-service platform for smart farms. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, p. 134–154, 2018. ISSN 0168-1699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.015. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917305112.

COLLADO, Edwin; FOSSATTI, Anibal; SAEZ, Yessica. Smart farming: A potential solution towards a modern and sustainable agriculture in Panama. **AIMS Agriculture and Food**, v. 4, n. 2, p. 266–284, 2019. DOI: 10.3934/AGRFOOD.2019.2.266.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, Sérgio Luis Da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**, n. 1998, p. 1–12, 2011. DOI: 10.1016/S2212-5671(15)00209-9. Disponível em: https: //edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2205710/mod_resource/content/1/Roteiro%5C%20para%5C%20revis%C3%A3o%5C%20bibliogr%C3%A1fica%5C%20sistem%C3%A1tica.pdf.

CORNELL UNIVERSITY. **Certified Crop Advisor study resources (Northeast region)**. [*S. l.: s. n.*]. Disponível em: https://nrcca.cals.cornell.edu/soil/CA3/CA0324.php. Acesso em: 30 jan. 2020.

DEUTSCHER BAUERNVERBAND. **Landwirtschaft 4.0 – Chancen und Handlungsbedarf**. [*S. l.*], 2016. p. 1–5.

DOCKER. **What is a Container? A standardized unit of software**. [*S. l.: s. n.*], 2020. Disponível em: https://www.docker.com/resources/what-container. Acesso em: 24 set. 2020.

DUMITRACHE, I. *et al.* A Cyber Physical Systems Approach for Agricultural Enterprise and Sustainable Agriculture. *In*. 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). [*S. l.: s. n.*], mai. 2017. p. 477–484. DOI: 10.1109/CSCS.2017.74.

EVENSON, R. E. Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. **Science**, v. 300, n. 5620, p. 758–762, mai. 2003. DOI: 10.1126/science.1078710. Disponível em: http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1078710.

FIWARE. **Fiware catalogue**. [*S. l.: s. n.*]. Disponível em: https://www.fiware.org/developers/catalogue/. Acesso em: 30 jan. 2020.

FIWARE. **Fiware: the Open Source Platform of Choice for Building Smart Farming Solutions the New Revolution**. [*S. l.*], 2018. p. 11.

FIWARE. **What is the FIWARE foundation**. [*S. l.: s. n.*]. Disponível em: https://www.fiware.org/foundation/. Acesso em: 30 jan. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO ' s work on agricultural innovation: Sowing the seeds of transformation to archieve the SDGs**. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: http://www.fao.org/3/CA2460EN/ca2460en.pdf.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Fao Publications Catalogue 2019**. Rome: FAO, 2019. p. 110.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of Food and Agriculture: Leveraging Food Systems for Inclusive Rural Transformation**. Rome: FAO, 2017. v. 2, p. 160. Disponível em: http://www.fao.org/3/a-i7658e.pdf. Acesso em: 30 jan. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Water factsheets, 2014. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Infographics_all_eng.pdf. Acesso em: 30 jan. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Water withdrawal by sector, around 2010**. [*S. l.: s. n.*], 2016. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/tables/worlddata-withdrawal_eng.pdf.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World Food and Agriculture: Statistical Pocketbook 2018**. Rome: [*s. n.*], 2018. p. 1–254. Disponível em: http://www.fao.org/3/CA1796EN/ca1796en.pdf.

GAUD, William S. **The Green Revolution: Accomplishments and Apprehensions**. [*S. l.: s. n.*], 1968. Disponível em: http://www.agbioworld.org/biotech-info/topics/borlaug/borlaug-green.html.

GONZÁLEZ PEREA, R. *et al.* Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 194–201, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.017. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416302633.

GRAFANA LABS. **Grafana**. [*S. l.: s. n.*]. Disponível em: https://grafana.com/oss/grafana/?plcmt=footer. Acesso em: 29 set. 2020.

HANNELIUS, T.; SALMENPERA, M.; KUIKKA, S. Roadmap to adopting OPC UA. *In*. 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics. [*S. l.: s. n.*], jul. 2008. p. 756–761. DOI: 10.1109/INDIN.2008.4618203.

HAZELL, Peter B R. The Asian green revolution. **Food Security, Volume Two – Producing enough food, Part One – Sources of agricultural growth**, n. 911, 2009. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/6257689.pdf.

IBM. **The Internet of Things delivers the data. AI powers the insights.** [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://www.ibm.com/internet-of-things.

JAYARAMAN, Prem *et al.* Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt. **Sensors**, MDPI AG, v. 16, n. 11, p. 1884, nov. 2016. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s16111884.

JEON, Su Min; KIM, Gitae. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). **Production Planning and Control**, v. 27, n. 5, p. 360–377, 2016. DOI: 10.1080/09537287.2015.1128010.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 working group. Acatech, n. 1, 2013. Disponível em: https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf.

KAMIENSKI, Carlos *et al.* Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture. **Sensors**, MDPI AG, v. 19, n. 2, p. 276, jan. 2019. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s19020276. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/s19020276.

KHUSH, Gurdev S. Green revolution: the way forward. **Nature Reviews Genetics**, v. 2, n. 10, p. 815–822, out. 2001. DOI: 10.1038/35093585. Disponível em: http://www.nature.com/articles/35093585.

KRISHNA, K. L. *et al.* Internet of Things application for implementation of smart agriculture system. *In*. 2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC). [*S. l.: s. n.*], 2017. p. 54–59. DOI: 10.1109/I-SMAC.2017.8058236.

KRITZINGER, Werner *et al.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier B.V., v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015.

ISSN 2213-8463. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X.

LEE, Jay; KAO, Hung-An; YANG, Shanhu. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3–8, 2014. Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems. ISSN 2212-8271. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114000857.

LEWIN, R. **Human Evolution: An Illustrated Introduction**. [*S. l.*]: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 9781405156141.

LINNA, P.; NARRA, N.; GRÖNMAN, J. Intelligent data service for farmers. *In*. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). [*S. l.: s. n.*], mai. 2019. p. 1072–1075. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8756688.

LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, Elsevier Inc., v. 6, p. 1–10, jun. 2017. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005.

MA, Y.; CHEN, J. Toward intelligent agriculture service platform with lora-based wireless sensor network. *In*. 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI). [*S. l.: s. n.*], abr. 2018. p. 204–207. DOI: 10.1109/ICASI.2018.8394568.

MAHNKE, Wolfgang; LEITNER, Stefan-Helmut; DAMM, Matthias. **OPC Unified Architecture**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 1–339. DOI: 10.1007/978-3-540-68899-0. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-68899-0.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Estatísticas e dados básicos de economia agrícola - 2015, p. 53, 2015. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/agroestatisticas/estatisticas-e-dados-basicos-de-economia-agricola/estatisticas-e-dados-basicos-de-economia-agricola-marco-2015.pdf/view.

MOHANRAJ, I. *et al.* Intelligent drip irrigation and fertigation using wireless sensor networks. *In*. 2017 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR). [*S. l.: s. n.*], abr. 2017. p. 36–41. DOI: 10.1109/TIAR.2017.8273682.

MOKYR, J. **The Enlightened Economy: Britain and the Industrial Revolution, 1700-1850**. [*S. l.*]: Penguin Books, 2011.

MONTELEONE, Sergio *et al.* Exploring the Adoption of Precision Agriculture for Irrigation in the Context of Agriculture 4.0: The Key Role of Internet of Things. **Sensors**, MDPI AG,

v. 20, n. 24, p. 7091, dez. 2020. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s20247091. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/s20247091.

NAM, Won-Ho *et al.* A Wireless Sensor Network (WSN) application for irrigation facilities management based on Information and Communication Technologies (ICTs). **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 143, p. 185–192, 2017. DOI: 10.1016/j.compag.2017.10.007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.007.

NAVARRO, Emerson; COSTA, Nuno; PEREIRA, António. A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming. **Sensors**, MDPI AG, v. 20, n. 15, p. 4231, jul. 2020. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s20154231. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/s20154231.

O'GRADY, Michael J.; O'HARE, Gregory M.P. Modelling the smart farm. **Information Processing in Agriculture**, v. 4, n. 3, p. 179–187, 2017. DOI: 10.1016/j.inpa.2017.05.001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317316301287.

OLIVEIRA-JR, Antonio *et al.* IoT Sensing Platform as a Driver for Digital Farming in Rural Africa. **Sensors**, MDPI AG, v. 20, n. 12, p. 3511, jun. 2020. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s20123511. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/s20123511.

OPENSENSE. **OpenSense: A participatory open sensor data platform by ISE**. [*S. l.: s. n.*], 2016. Disponível em: https://opensense.network/.

OPENWEATHER. **OpenWeather global services**. [*S. l.: s. n.*], 2020. Disponível em: https://openweathermap.org/. Acesso em: 24 set. 2020.

OVERTON, Mark. **Agricultural Revolution in England: The Transformation of the Agrarian Economy 1500–1850**. [*S. l.*]: Cambridge University Press, 1996. (Cambridge Studies in Historical Geography). DOI: 10.1017/CBO9780511607967.

PIERCE, Francis J.; NOWAK, Peter. Aspects of Precision Agriculture. *In*. ADVANCES in Agronomy. [*S. l.: s. n.*], 1999. v. 67. p. 1–85. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60513-1. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065211308605131.

PITAKPHONGMETHA, J. *et al.* Internet of things for planting in smart farm hydroponics style. *In*. 2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC). [*S. l.: s. n.*], 2016. p. 1–5. DOI: 10.1109/ICSEC.2016.7859872.

PIVOTO, Dieisson *et al.* Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. **Information Processing in Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 21–32, 2018. ISSN 2214-3173. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.002. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317316301184.

POOJA, S. *et al.* Application of MQTT protocol for real time weather monitoring and precision farming. *In*. 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT). [*S. l.: s. n.*], dez. 2017. p. 1–6. DOI: 10.1109/ICEECCOT.2017.8284616.

POSADA, J. *et al.* Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 35, n. 2, p. 26–40, mar. 2015. ISSN 1558-1756. DOI: 10.1109/MCG.2015.45.

QI, Qinglin *et al.* Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. **Procedia CIRP**, Elsevier B.V., v. 72, p. 237–242, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.103. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103.

RAY, Partha Pratim. Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, v. 9, n. 4, p. 395–420, 2017. DOI: 10.3233/AIS-170440.

ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, 2016. DOI: 10.1177/2158244016653987.

ROBLES, T. *et al.* An Internet of Things-Based Model for Smart Water Management. *In*. 2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. [*S. l.: s. n.*], mai. 2014. p. 821–826. DOI: 10.1109/WAINA.2014.129.

RODIČ, Blaž. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. **Organizacija**, v. 50, n. 3, p. 193–207, 2017. DOI: 10.1515/orga-2017-0017.

RODRÍGUEZ, Andres; FERNÁNDEZ, Alejandro; HORMAZÁBAL, Jorge Hernández. Beyond the GUI in agriculture: A bibliographic review, challenges and opportunities. **ACM International Conference Proceeding Series**, p. 1–8, 2018. DOI: 10.1145/3233824.3233844.

ROULET-DUBONNET, Olivier. **Python OPC-UA Documentation**. [*S. l.: s. n.*], 2020. Disponível em: https://python-opcua.readthedocs.io/en/latest/. Acesso em: 24 set. 2020.

RUENGITTINUN, S.; PHONGSAMSUAN, S.; SUREERATANAKORN, P. Applied internet of thing for smart hydroponic farming ecosystem (HFE). *In*. 2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media). [*S. l.: s. n.*], ago. 2017. p. 1–4. DOI: 10.1109/UMEDIA.2017.8074148.

SAUTER, T.; LOBASHOV, M. How to Access Factory Floor Information Using Internet Technologies and Gateways. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 7, n. 4, p. 699–712, nov. 2011. DOI: 10.1109/TII.2011.2166788.

SCHUH, Günther *et al.* Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies. **Acatech publications**, v. 1, n. 1, p. 53, 2017. DOI: 10.1136/bmj.3.5765.46-b. Disponível em: www.acatech.de/publikationen. Acesso em: 15 out. 2020.

SCHWAB, Klaus. **The fourth industrial revolution**. New York: Crown Business, 2016. p. 192.

SENSOR CLOUD. **Sensor Cloud Powered by LORD Sensing**. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://www.sensorcloud.com.

SHARMA, Rohit; PARHI, Shreyanshu; SHISHODIA, Anjali. Industry 4.0 Applications in Agriculture: Cyber-Physical Agricultural Systems (CPASs). *In*. LECTURE Notes in Mechanical Engineering. [*S. l.: s. n.*], 2021. p. 807–813. DOI: 10.1007/978-981-15-3639-7_97. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-3639-7%7B%5C_%7D97.

SIEMENS. **Use plant simulation and throughput optimization to improve manufacturing performance**. [*S. l.: s. n.*]. Disponível em: https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html. Acesso em: 29 set. 2020.

SMART MANUFACTURING: PAST RESEARCH, PRESENT FINDINGS, AND FUTURE DIRECTIONS. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 3, n. 1, p. 111–128, 2016. DOI: 10.1007/s40684-016-0015-5.

SOTO-GARCIA, M. *et al.* The role of information and communication technologies in the modernisation of water user associations' management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 98, p. 121–130, 2013. ISSN 0168-1699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.005. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169913001737.

SOUZA, Gilberto *et al.* A fuzzy irrigation control system. *In*. 2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). [*S. l.: s. n.*], 2020. p. 1–6. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/345724334_A_fuzzy_irrigation_control_system.

SUAKANTO, S. *et al.* Sensor networks data acquisition and task management for decision support of smart farming. *In*. 2016 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI). [*S. l.: s. n.*], 2016. p. 1–5. DOI: 10.1109/ICITSI.2016.7858233.

TALAVERA, Jesús Martín *et al.* Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 142, p. 283–297, 2017. ISSN 0168-1699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917304155.

TERKAJ, Walter; TOLIO, Tullio; URGO, Marcello. A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning. **CIRP Annals**, CIRP, v. 64, n. 1, p. 451–454, 2015. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.121. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.121.

THING SPEAK. **Understand Your Things: The open IoT platform with MATLAB analytics.** [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://thingspeak.com/.

TRIVELLI, Leonello *et al.* From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector. **British Food Journal**, v. 121, n. 8, p. 1730–1743, 2019. DOI: 10.1108/BFJ-11-2018-0747.

TZOUNIS, Antonis *et al.* Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, v. 164, p. 31–48, 2017. ISSN 1537-5110. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511017302544.

UNIDOS. **Data Drives Decisions**. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://ubidots.com/.

VAIDYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh. Industry 4.0 – A Glimpse. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 233–238, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300672.

VASISHT, Deepak *et al.* FarmBeats: An IoT Platform for Data-Driven Agriculture. *In*. 14TH USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 17). Boston, MA: USENIX Association, mar. 2017. p. 515–529. Disponível em: https://www.usenix.org/conference/nsdi17/technical-sessions/presentation/vasisht.

VERDOUW, C.N.; WOLFERT, Jacques; TEKINERDOGAN, B. Internet of Things in agriculture. English. **CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources**, CAB International, v. 11, 2016. ISSN 1749-8848. DOI: 10.1079/PAVSNNR201611035. Disponível em: http://www.cabi.org/cabreviews/review/20163379897.

WALEED, Muhammad *et al.* Determining the Precise Work Area of Agriculture Machinery Using Internet of Things and Artificial Intelligence. **Applied Sciences**, MDPI AG, v. 10, n. 10, p. 3365, mai. 2020. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app10103365. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/app10103365.

WEATHER WUNDERGROUND. **Personal Weather Station Network**. [*S. l.: s. n.*], 2020. Disponível em: https://www.wunderground.com/pws/overview. Acesso em: 24 set. 2020.

WOLFERT, Sjaak *et al.* Big Data in Smart Farming – A review. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 69–80, 2017. ISSN 0308-521X. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754.

XIVELY. **Leading connected product companies choose Xively**. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://xively.com/.

XUE-FEN, Wan *et al.* Design of Distributed Agricultural Service Node with Smartphone In-field Access Supporting for Smart Farming in Beijing-Tianjin-Hebei Region. **Sensors and Materials**, v. 30, n. 10, p. 2281–2293, out. 2018. ISSN 0914-4935. DOI: 10.18494/SAM.2018.1846. Disponível em: http://myukk.org/SM2017/article.php?ss=1846.

ZAMBON, Ilaria *et al.* Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. **Processes**, MDPI AG, v. 7, n. 1, p. 36, jan. 2019. ISSN 2227-9717. DOI: 10.3390/pr7010036. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/pr7010036.

APÊNDICE A – TABELA COM A DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS, MÉTODOS E ARGUMENTOS DO SERVIDOR OPC UA

Tabela 7 – Descrição das variáveis, métodos e argumentos do servidor OPC UA

Nome	Tipo	Descrição
c_sp1_open	Variável	Estado do aspersor SP1 da área de controle
c_sp2_open	Variável	Estado do aspersor SP2 da área de controle
c_sp3_open	Variável	Estado do aspersor SP3 da área de controle
c_sp1_q	Variável	Vazão do aspersor SP1 da área de controle
c_sp2_q	Variável	Vazão do aspersor SP2 da área de controle
c_sp3_q	Variável	Vazão do aspersor SP3 da área de controle
c_sp1_v	Variável	Volume irrigado pelo aspersor SP1 da área de controle
c_sp2_v	Variável	Volume irrigado pelo aspersor SP2 da área de controle
c_sp3_v	Variável	Volume irrigado pelo aspersor SP3 da área de controle
control_ir	Variável	Recomendação de irrigação para a área de controle
control_q	Variável	Vazão total da área de controle
f_sp1_open	Variável	Estado do aspersor SP1 da área fuzzy
f_sp2_open	Variável	Estado do aspersor SP2 da área fuzzy
f_sp3_open	Variável	Estado do aspersor SP3 da área fuzzy
f_sp1_q	Variável	Vazão do aspersor SP1 da área fuzzy
f_sp2_q	Variável	Vazão do aspersor SP2 da área fuzzy
f_sp3_q	Variável	Vazão do aspersor SP3 da área fuzzy
f_sp1_v	Variável	Volume irrigado pelo aspersor SP1 da área fuzzy
f_sp2_v	Variável	Volume irrigado pelo aspersor SP2 da área fuzzy
f_sp3_v	Variável	Volume irrigado pelo aspersor SP3 da área fuzzy
fuzzy_ir	Variável	Recomendação de irrigação da área fuzzy
fuzzy_q	Variável	Vazão total da área fuzzy
manualoperation	Variável	Estado da operação manual
pump_closed	Variável	Estado da bomba de água
pump_q	Variável	Indica a vazão da bomba de água
togglemanual	Método	Ativa e desativa a operação manual
turnalloff	Método	Desliga o sistema de irrigação inteiro
turnallon	Método	Liga o sistema de irrigação inteiro
turncontroloff	Método	Desliga os aspersores da área de controle
turncontrolon	Método	Liga os aspersores da área de controle
turnfuzzyoff	Método	Desliga os aspersores da área fuzzy
turnfuzzyon	Método	Liga os aspersores da área fuzzy
turnpumpon	Método	Liga a bomba de água
turnpumpoff	Método	Desliga a bomba de água
irrigatecontrol	Método	Irriga a área de controle
irrigatefuzzy	Método	Irriga a área fuzzy
mm_control	Argumento	Lamina de água utilizada no método *irrigate control*
mm_fuzzy	Argumento	Lamina de água utilizada no método *irrigate fuzzy*

Fonte: Autor

APÊNDICE B – PARÂMETROS COLETADOS PELO COMPONENTE WEATHER HANDLER

Tabela 8 – Variáveis coletadas para o clima atual pela API do *OpenWeather*

Variável	**Descrição**
Data observada	Indica a data e tempo em que os parâmetros foram coletados
Temperatura	Temperatura em $°C$
Pressão	Pressão em hPa
Umidade do ar	Umidade do ar em porcentagem
Velocidade do vento	Celocidade do vento em $\frac{m}{s}$
Direção do vento	Direção do vento em graus meteorológicos

Fonte: Autor

Tabela 9 – Variáveis coletadas para a previsão do clima pela API do *OpenWeather*

Variável	**Descrição**
Data da previsão	Indica a data em que a previsão é feita
Temperatura máxima	Máxima temperatura para o dia em $°C$
Temperatura miníma	Mínima temperatura para o dia em $°C$
Pressão	Pressão em hPa
Umidade do ar	Umidade do ar em porcentagem
Velocidade do vento	Celocidade do vento em $\frac{m}{s}$
Direção do vento	Direção do vento em graus meteorológicos
Chuva	Previsão de chuva para o dia em mm
Probabilidade de chuva	Probabilidade de ocorrência de chuva

Fonte: Autor

Tabela 10 – Variáveis coletadas para o clima atual pela API do *Weather Wunderground*

Variável	**Descrição**
Data observada	Indica a data e tempo em que os parâmetros foram coletados
Temperatura	Temperatura em $°C$
Pressão	Pressão em hPa
Umidade do ar	Umidade do ar em porcentagem
Velocidade do vento	Celocidade do vento em $\frac{m}{s}$
Direção do vento	Direção do vento em graus meteorológicos
Precipitação total	Precipitação total do dia até a hora da coleta do dado

Fonte: Autor

Tabela 11 – Variáveis coletadas para a previsão do clima pela API do *Weather Wunderground*

Variável	**Descrição**
Data da previsão	Indica a data em que a previsão é feita
Temperatura máxima	Máxima temperatura para o dia em $°C$
Temperatura miníma	Mínima temperatura para o dia em $°C$
Chuva	Previsão de chuva para o dia em mm
Probabilidade de chuva	Probabilidade de ocorrência de chuva

Fonte: Autor

APÊNDICE C – PARÂMETROS E VARIÁVEIS DAS ENTIDADES UTILIZADAS NOS COMPONENTES DA PLATAFORMA DE INTERNET DAS COISAS

Tabela 12 – Entidade *Soil Probe*

Variável	**Tipo**	**Descrição**
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Soil Probe
Name	Texto	Identifica o nome da sonda caso necessário
Location	geo:json	Identifica a localização da sonda através de coordenadas de GPS
Manufacturer	Texto	Nome do fabricante da sonda de solo
Number of sensors	Texto	Quantidade de níveis que a sonda mede a umidade do solo
Soil Moisture Raw Depth 1	Numero	Umidade do solo no nível 1 em valor inteiro
Soil Moisture Raw Depth 2	Numero	Umidade do solo no nível 2 em valor inteiro
Soil Moisture Raw Depth 3	Numero	Umidade do solo no nível 3 em valor inteiro
Soil Moisture Calibrated Depth 1	Numero	Umidade do solo no nível 1 em %
Soil Moisture Calibrated Depth 2	Numero	Umidade do solo no nível 2 em %
Soil Moisture Calibrated Depth 3	Numero	Umidade do solo no nível 3 em %
Air Humidity	Numero	Umidade do ar em %
Air Temperature	Numero	temperature do ar em $^{\circ}C$
Luminosity	Numero	Luminosidade do ar em valor inteiro
Ref Management Zone	Relação	Indica em qual zona de manejo a sonda está localizada

Fonte: Autor

Tabela 13 – Entidade *Management Zone*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Management Zone
Name	Texto	Identifica o nome da zona de manejo
Ref Irrigation Recommendation	Relação	Relação com uma recomendação de irrigação
Ref Soil Probe	Relação	Relação com as sondas de solo
Red Irrigation System	Relação	Relação com o sistema de irrigação
Ref Weather Forecast Wunder	Relação	Relação com a previsão do clima pelo *OpenWeather*
Ref Weather Forecast Open 2	Relação	Relação com a previsão do clima pelo *Weather Wunderground*
Ref Current Weather Wunder	Relação	Relação com o clima atual pelo *OpenWeather*
Ref Current Weather Open	Relação	Relação com o clima atual pelo *Weather Wundergorund*

Fonte: Autor

Tabela 14 – Entidade *Irrigation Recommendation*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Irrigation Recommendation
Name	Texto	Identifica o nome da recomendação caso necessário
Irrigation In Millimeters	Numero	Recomendação de irrigação em milímetros
Red Irrigation System	Relação	Relação com o sistema de irrigação
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo
Ref Reference Evapotranspiration	Relação	Relação com o calculo de evapotranspiração

Fonte: Autor

Tabela 15 – Entidade *Fuzzy Needs*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Fuzzy Needs
Etc	Numero	Evapotranspiração diária da cultura
Days After Seeding	Numero	Dias após plantio
Rain Forecast	Numero	Precisão de chuva em milímetros para o dia seguinte
Rain Forecast Probability	Numero	Chance de chover no dia seguinte em %
Ref Reference Evapotranspiration	Relação	Relação com o calculo de evapotranspiração
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo
Ref Irrigation Recommendation	Relação	Relação com uma recomendação de irrigação

Fonte: Autor

Tabela 16 – Entidade *Crop Instance*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Crop Instance
Name	Texto	Nome do cultivo
Seeding Day	Data	Dia em que o plantio foi realizado
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo
Ref Crop Type	Relação	Relação com um determinado tipo de cultivo

Fonte: Autor

Tabela 17 – Entidade *Crop Type*

Variável	**Tipo**	**Descrição**
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Crop Type
Name	Texto	Nome do cultivo
Date Observed	Data	Dia em que a evapotranspiração foi calculada
Daily Tmax	Número	Temperatura máxima diária para o dia observado
Daily Tmin	Número	Temperatura miníma diária para o dia observado
Daily Tmed	Número	Temperatura média diária para o dia observado
Daily Rhmax	Número	Umidade relativa máxima diária para o dia observado
Daily Rhmin	Número	Umidade relativa miníma diária para o dia observado
Daily Rhmed	Número	Umidade relativa média diária para o dia observado
Daily Vmax	Número	Velocidade do vento máxima diária para o dia observado
Daily Vmin	Número	Velocidade do vento miníma diária para o dia observado
Daily Vmed	Número	Velocidade do vento média diária para o dia observado
Evapotranspiration	Número	Evapotranspiração de referencia calculada
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo
Ref Fuzzy Needs	Relação	Relação com a entidade de necessidades do método fuzzy
Ref Irrigation recommendation	Relação	Relação com a recomendação de irrigação

Fonte: Autor

Tabela 18 – Entidade *Reference Evapotranspiration*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Reference Evapotranspiration
Name	Texto	Nome do cultivo
Stage Ini Days	Número	Duração do estágio inicial do cultivo
Stage Dev Days	Número	Duração do estágio de desenvolvimento do cultivo
Stage Mid Day	Número	Duração do estágio intermediário do cultivo
Stage Late Days	Número	Duração do estágio final do cultivo
Stage Ini Kc	Número	Fator do cultivo do estágio inicial do cultivo
Stage Dev Kc	Número	Fator do cultivo do estágio de desenvolvimento do cultivo
Stage Mid Kc	Número	Fator do cultivo do estágio intermediário do cultivo
Stage Late Kc	Número	Fator do cultivo do estágio final do cultivo
Ref Crop Instance	Relação	Relação com uma instancia de cultivo

Fonte: Autor

Tabela 19 – Entidade *Weather Forecast Wunder*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Weahter Forecast Wunder
Date Forecast	Data	Data e hora da previsão realizada
Temperature Max	Número	Máxima temperatura em $°C$ para o dia observado
Temperature Min	Número	Miníma temperatura em $°C$ para o dia observado
Location	geo:json	Localizão em coordenadas de GPS
Station Name	Texto	Nome da estação no qual os dados são coletados
Precipitation	Número	Previsão de precipitação para o dia observado
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo

Fonte: Autor

Tabela 20 – Entidade *Weather Forecast Open*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Weahter Forecast Open
Date Observed	Data	Data e hora da observação realizada
Temperature Max	Número	Máxima temperatura em $°C$ para o dia observado
TemperatureMin	Número	Miníma temperatura em $°C$ para o dia observado
Pressure	Número	Pressão em hPa
Wind Speed	Número	Velocidade do vento em m/s
Location	geo:json	Localizão em coordenadas de GPS
Station Name	Texto	Nome da estação no qual os dados são coletados
Wind Deg	Número	Direção do vento em graus meteorológicos
Rain	Número	Previsão de precipitação para o dia observado
Probability	Número	Probabilidade de chuva para o dia observado
Humidity	Número	Umidade em porcentagem
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo

Fonte: Autor

Tabela 21 – Entidade *Current Weather Wunder*

Variável	Tipo	Descrição
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Current Weather Wunder
Date Observed	Data	Data e hora da observação realizada
Temperature	Número	Tempratura em $°C$
Pressure	Número	Pressão em hPa
Wind Speed	Número	Velocidade do vento em m/s
Location	geo:json	Localizão em coordenadas de GPS
Station Name	Texto	Nome da estação no qual os dados são coletados
Wind Deg	Número	Direção do vento em graus meteorológicos
Precip Total	Número	Precipitação total do dia até o momento observado em mm
Humidity	Número	Umidade em porcentagem
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo

Fonte: Autor

Tabela 22 – Entidade *Current Weather Open*

Variável	**Tipo**	**Descrição**
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Reference Evapotranspiration
ID	@ID	Identifica, de maneira única, a entidade.
Type	@Type	Weather Current Open
Date Observed	Data	Data e hora da observação realizada
Temperature	Número	Temperatura em $°C$ para o momento observado
Pressure	Número	Pressão em hPa
Wind Speed	Número	Velocidade do vento em m/s
Location	geo:json	Localização em coordenadas de GPS
Station Name	Texto	Nome da estação no qual os dados são coletados
Wind Deg	Número	Direção do vento em graus meteorológicos
Humidity	Número	Umidade em porcentagem
Ref Management Zone	Relação	Relação com a zona de manejo

Fonte: Autor

APÊNDICE D – TESTES DE VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA IOT

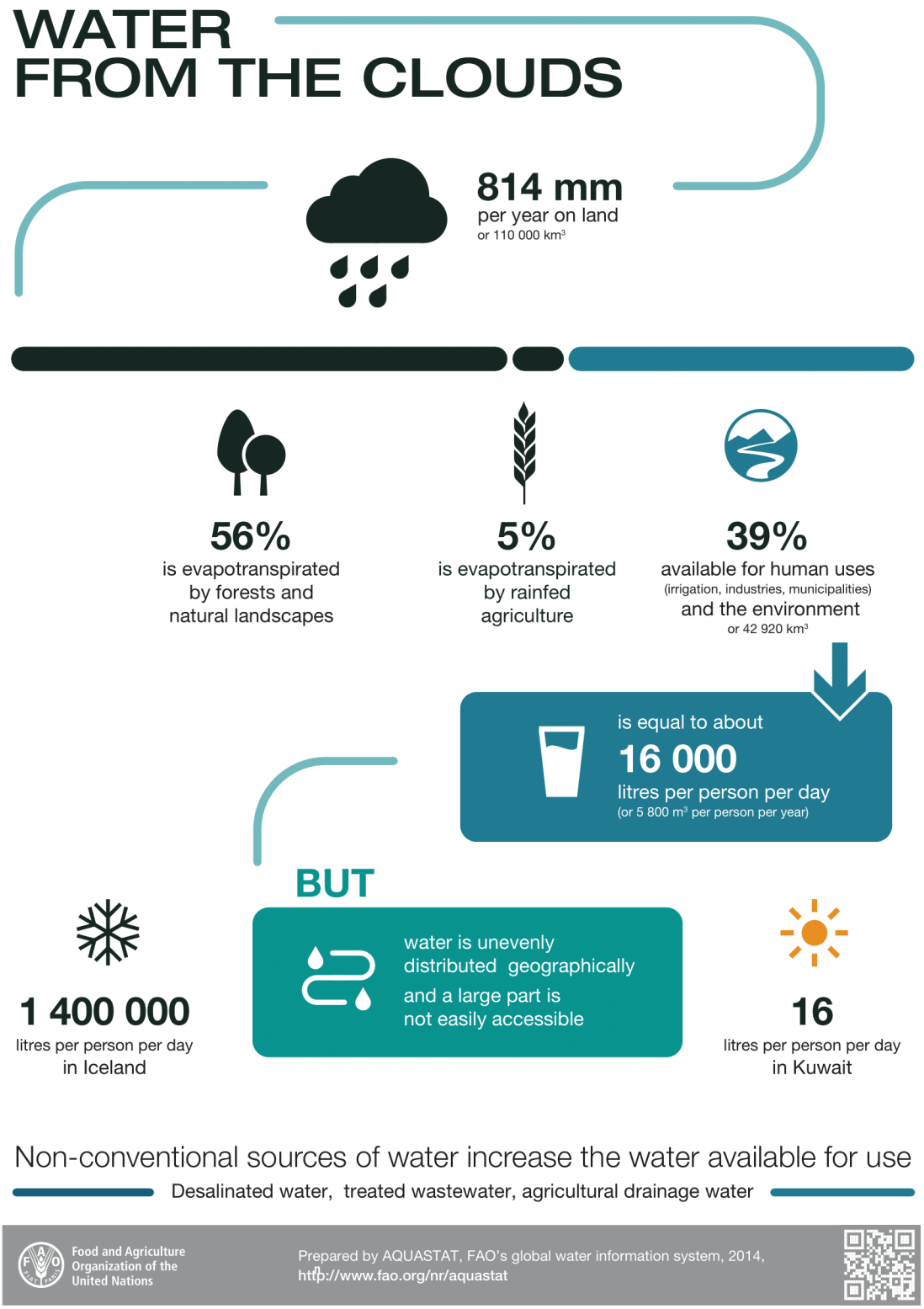
Tabela 23 – Validações executadas para o funcionamento da plataforma IoT

Componente	**verificação**
Probe	Envio dos dados a cada 30 minutos.
Data Model	Criação as entidades no Orion Context Broker
Data Model	Criação da subscrição do Cygnus no Orion Context Broker
Data Model	Criação do serviço no IoT Agent JSON
Data Model	Criação da entidade no IoT Agent JSON
IoT Agent JSON	Comunicação entre o IoT Agent JSON e o Orion Context Broker
IoT Agent JSON	Criação da entidade sonda de solo
IoT Agent JSON	Verificar alterações nos dados da entidade sonda de solo a cada 30 minutos
Weather Handler	Comunicação com as APIs Weather Wunderground e Open Weather
Weather Handler	Comunicação com o Orion Context Broker
Orion Context Broker	Comunicação com o IoT Agent JSON
Orion Context Broker	Comunicação com o IoT Agent OPC UA
Orion Context Broker	Subscrição com o Cygnus
Orion Context Broker	Alteração na entidade soil probe a cada 30 minutos
Orion Context Broker	Alteração nas entidades climáticas a cada 1 hora
Orion Context Broker	Alteração na entidade reference evapotranspiration a cada 1 hora
Orion Context Broker	Alteração da entidade fuzzy needs a cada 1 hora
Orion Context Broker	Alteração na entidade irrigation recommendation a cada 1 hora
Cygnus	Capacidade de enviar dados para o MySQL
MySQL	Criação de uma tabela para cada entidade alterada
MongoDb	Criação de um arquivo para cada entidade
Irrigation Recommendation	Comunicação com o banco MySQL
Irrigation Recommendation	Comunicação com o Orion Context Broker
Irrigation Recommendation	Cálculo de parametros diários a cada 1 hora
Irrigation Recommendation	Cálculo da evapotranspiração de referência a cada 1 hora
Irrigation Recommendation	Caálculo da prescrição da recomendação de irrigação pelo método FAO a cada 1 hora
Irrigation Recommendation	Cálculo da prescrição de irrigação com base no modelo Fuzzy a cada 1 hora
Grafana	Comunicação com o MySQL
Grafana	Verificar o funcionamento do painel personalizado
IoT Agent OPC UA	Comunicação com o Orion Context Broker
IoT Agent OPC UA	Comunicação com o servidor OPC UA
Servidor OPC UA	Comunicação com o cliente UA Expert
Servidor OPC UA	Comunicação com o IoT Agent OPC UA
Servidor OPC UA	Comunicação com o Plant Simulation
Plant Simulation	Comunicação com o servidor OPC UA

Fonte: Autor

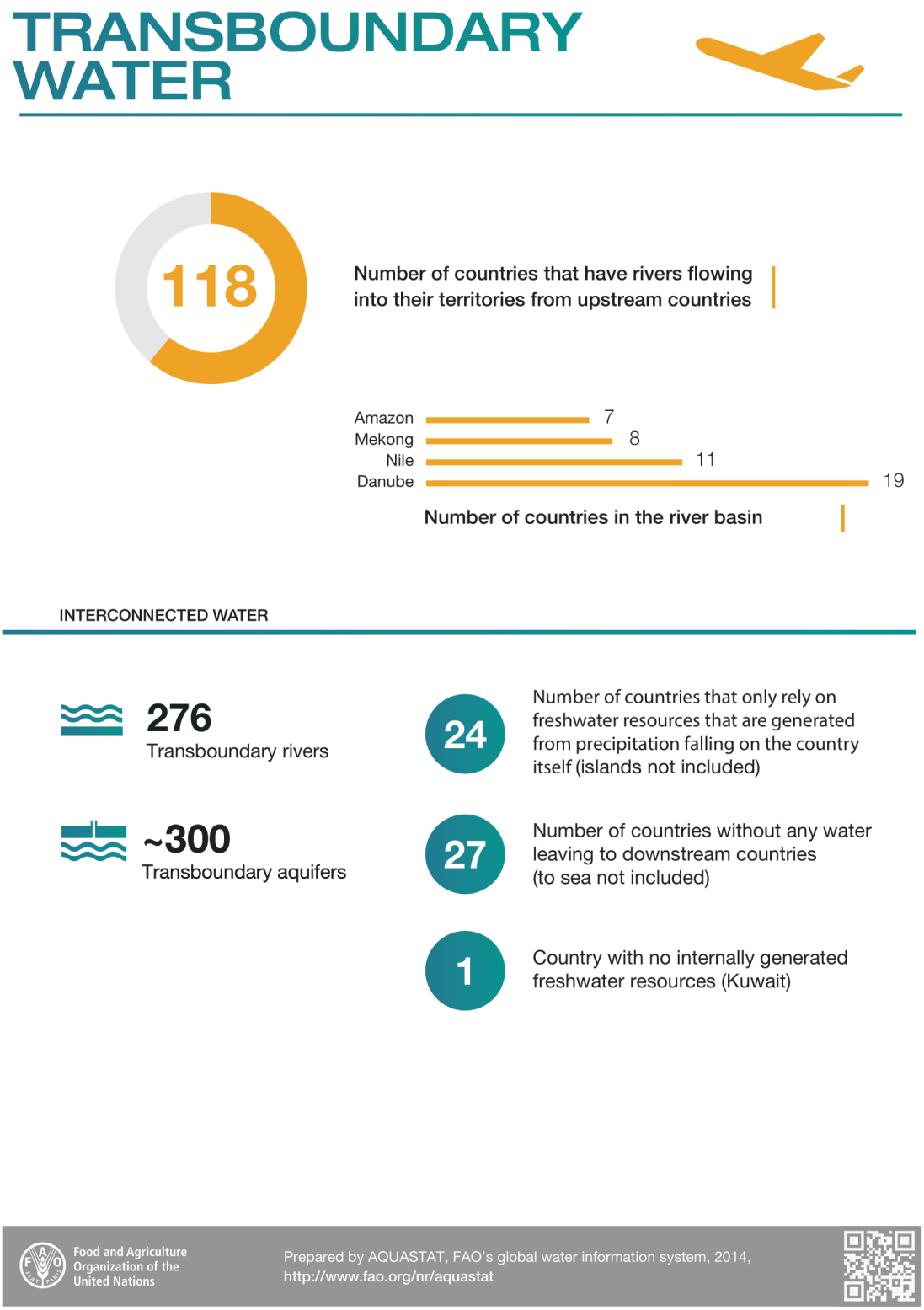
ANEXO A – DADOS SOBRE O USO DE ÁGUA E IRRIGAÇÃO NO MUNDO

Figura 52 – Água das nuvens



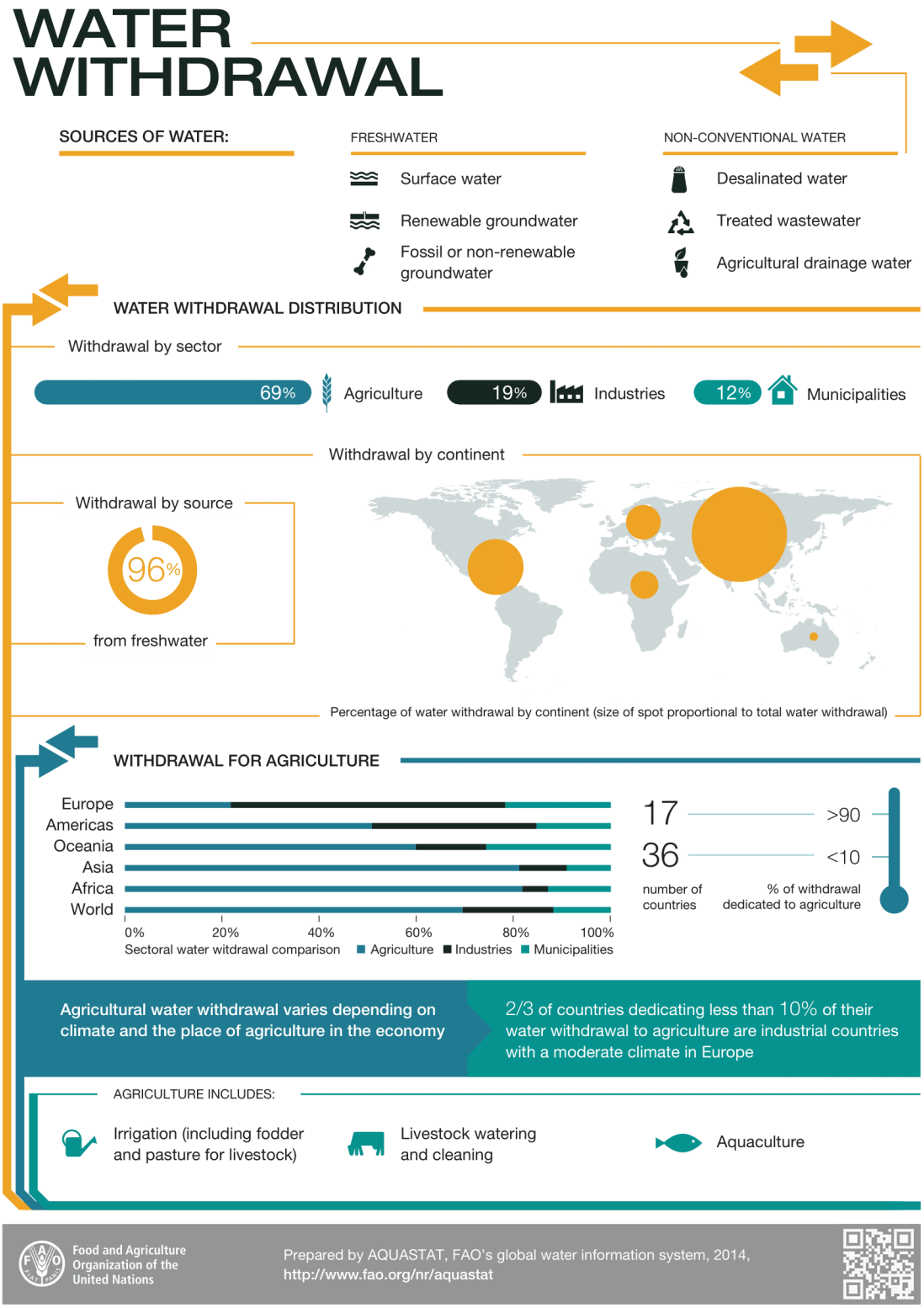
Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014

Figura 53 – Água transfronteiriça



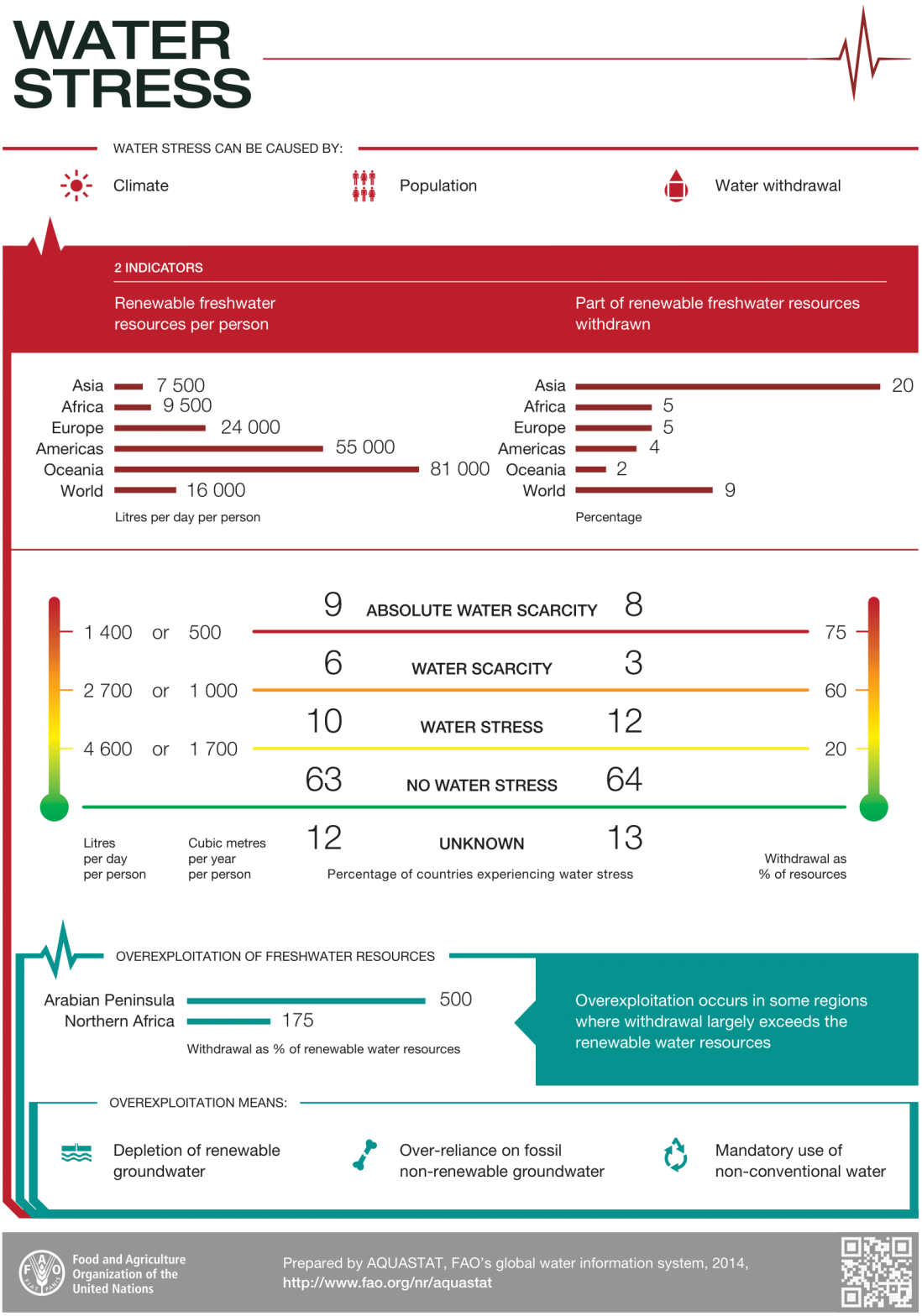
Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014

Figura 54 – Retirada de água



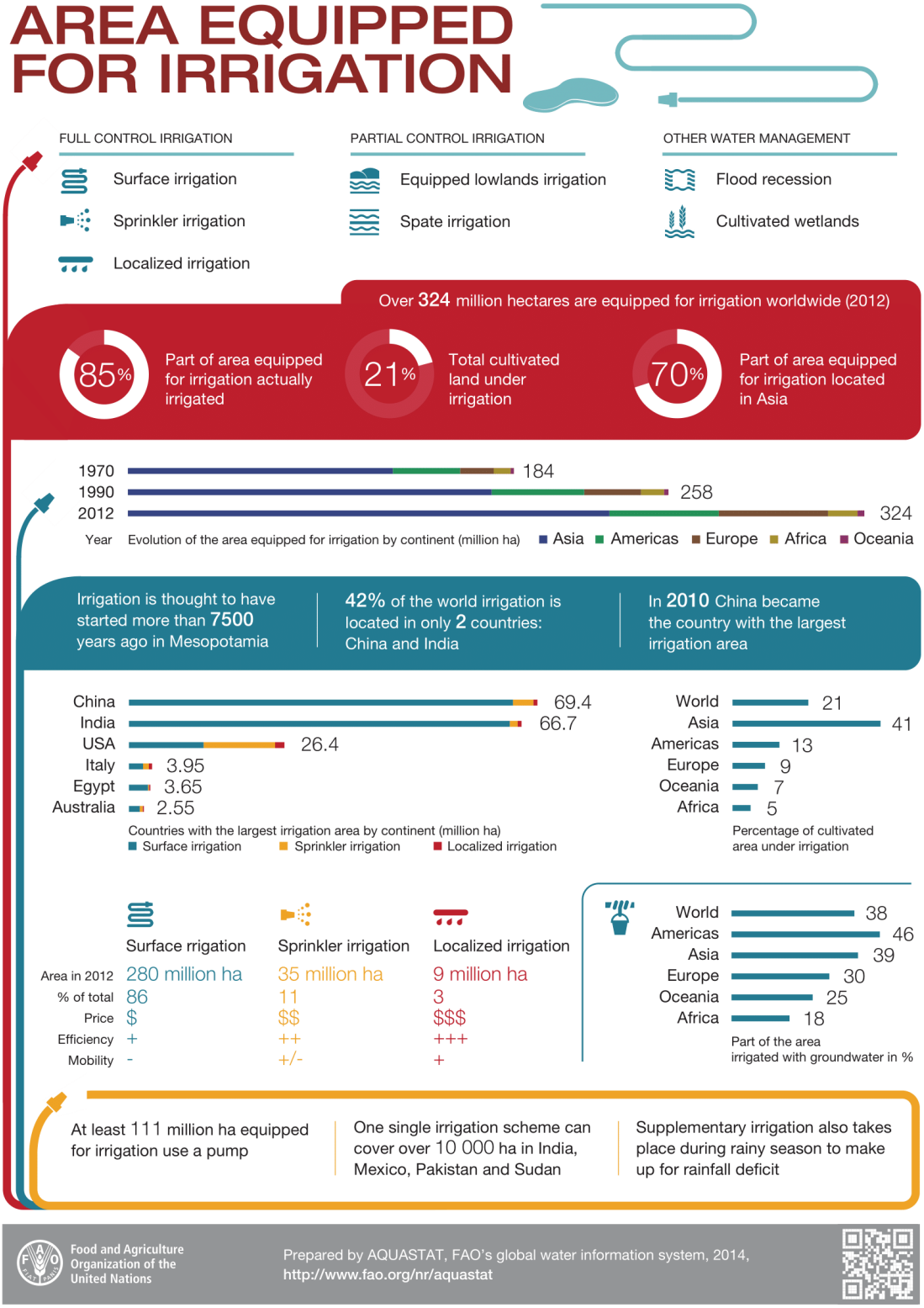
Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014

Figura 55 – Estresse hídrico



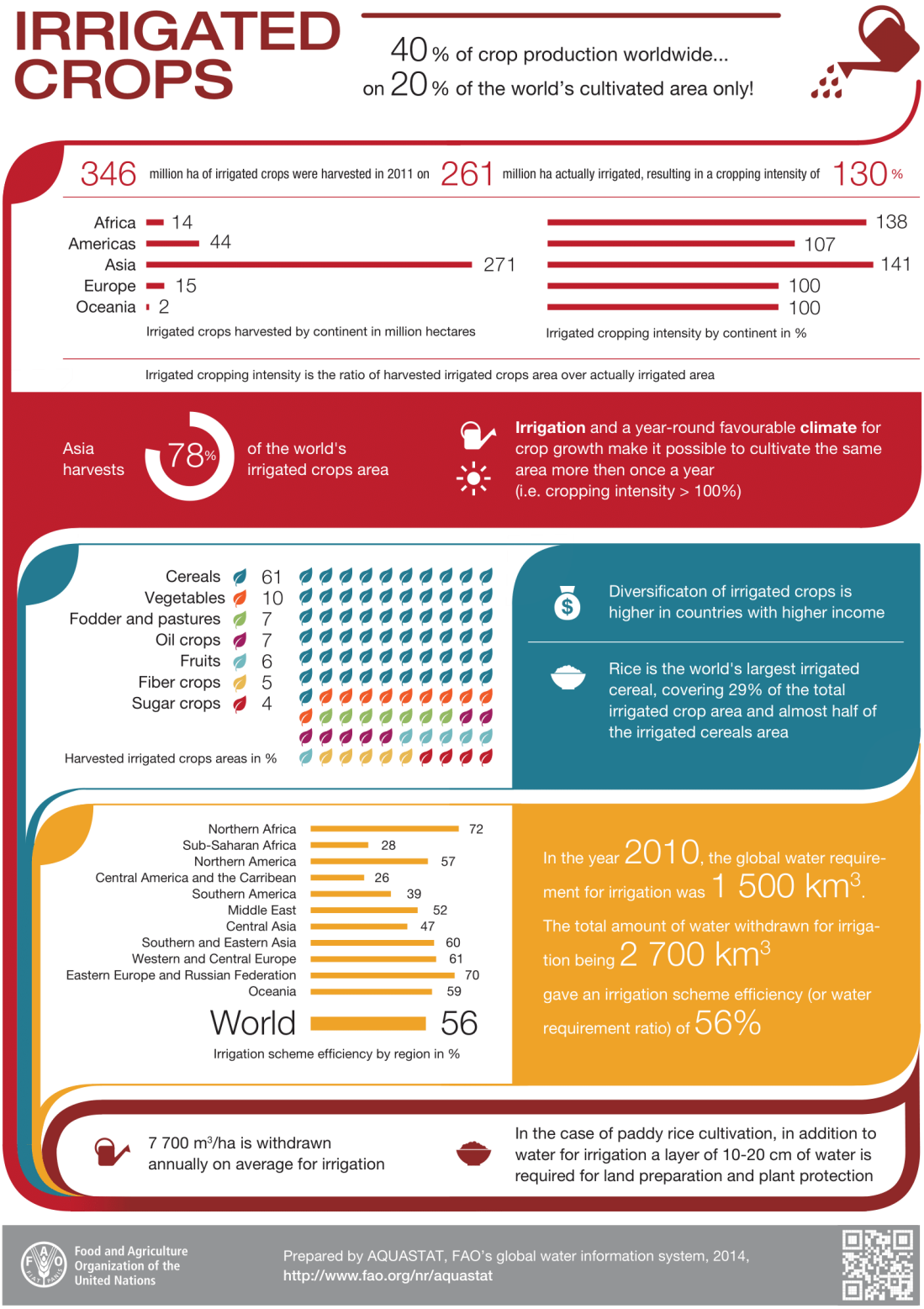
Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014

Figura 56 – Área equipada para irrigação



Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014

Figura 57 – Colheitas irrigadas



Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2014