



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

DAVILA FERNANDES MENDES

**SISTEMA DE INTERNET DAS COISAS PARA CAPTAÇÃO DE DADOS DO
MICROCLIMA VEGETAL NA AGRICULTURA**

FORTALEZA

2023

DAVILA FERNANDES MENDES

SISTEMA DE INTERNET DAS COISAS PARA CAPTAÇÃO DE DADOS DO
MICROCLIMA VEGETAL NA AGRICULTURA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Teleinformática do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas.

Orientadora: Prof. Dra. Atslands Rego da Rocha.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M49s Mendes, Davila Fernandes.
Sistema De Internet Das Coisas Para Captação De Dados Do Microclima Vegetal Na Agricultura /
Davila Fernandes Mendes. – 2023.
71 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profª. Dra. Atslands Rego da Rocha.
1. Microclima. 2. Internet das Coisas. 3. Agricultura de precisão. 4. Agricultura inteligente. 5. Sensores
de planta vestíveis. I. Título.

CDD 621.38

DAVILA FERNANDES MENDES

SISTEMA DE INTERNET DAS COISAS PARA CAPTAÇÃO DE DADOS DO
MICROCLIMA VEGETAL NA AGRICULTURA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Teleinformática do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas.

Aprovada em: 26/09/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Atslands Rego da Rocha (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Michela Mulas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Patrik Luiz Pastori
Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

Ao meu marido e principal incentivador, pela capacidade de me entender e acumular atividades nos cuidados dos nossos filhos. A minha família que sempre acreditou que eu conseguiria, aos amigos presentes durante os momentos mais difíceis e principalmente a Deus que sempre abriu portas e iluminou os caminhos que segui.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Embrapa Agroindústria Tropical, pela oportunidade de fazer o mestrado, em especial ao Chefe da Unidade, Gustavo Adolfo Saavedra Pinto.

A Professora Dra. Atslands R. da Rocha, pela excelente orientação e apoio em vários momentos difíceis durante o curso.

Aos professores participantes da banca examinadora Michela Mulas e Patrik Luiz Pastori pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da Embrapa Agroindústria Tropical, em especial Helenira Ellery Marinho Vasconcelos, Raimundo Nonato de Lima, Verônica Maria Vasconcelos Freire, Antonio Teixeira Cavalcanti Júnior, Patrícia Cardoso Bezerra Cabral, Sirley Freire Nogueira, Leto Saraiva, Antônio Genésio Vasconcelos Neto, Cláudio José Reis de Carvalho, Marlon Vagner Valentim Martins e José Roberto Vieira Júnior.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

"The next revolution in the era of computing will be out of the realm of the classical desktop. In IoT environment, the numerous things that surround us will be connected to the internet in one way or another"

(Yan et al., 2008)

RESUMO

Tendências globais indicam que os principais desafios da humanidade nos próximos anos serão energia, água, alimentos, ambiente e pobreza. A escassez de recursos torna imprescindível abordar novos modelos para a agricultura de precisão visando otimizar a utilização desses recursos. Uma demanda é a de maior precisão na captação dos elementos climáticos que impactam diretamente no desenvolvimento da planta e na produção de alimentos. Nesse contexto, a Internet das Coisas é um conceito que potencializa a tomada de decisão e o monitoramento eficiente de recursos, ao permitir a conexão entre objetos e seres humanos, juntamente com os aspectos ambientais. O monitoramento das condições climáticas, principalmente temperatura e umidade, são relevantes para diversas aplicações agrícolas, como a irrigação de precisão, o controle de pragas e doenças, análise de solo, dentre outros. Portanto, essas variáveis são bastante comuns no ambiente produtivo, sendo geralmente coletadas por estações meteorológicas posicionadas em locais centrais nos campos agrícolas. Os dados retornados pelas estações meteorológicas são referentes aos elementos climáticos da zona exterior do campo. Entretanto, para diversas aplicações é importante a medição desses elementos no microclima vegetal (folhas e dorso da planta estudada) para suporte a tomada de decisão mais acurada. Neste contexto, é proposto nesse trabalho um sistema de Internet das Coisas (IoT) para captura de dados climáticos cujo diferencial são sensores especificamente colocados no microclima da planta. Dessa forma, o estudo da dinâmica dos elementos climáticos envolvidos no desenvolvimento vegetal é viabilizado. Os resultados dos experimentos indicam que a posição dos sensores na planta influem diretamente nos valores dos dados climáticos. A diferença encontrada de temperatura entre os sensores foi acima de 20%, demonstrando o impacto que o posicionamento de sensores pode ter nas medições.

Palavras-chave: Microclima, Internet das Coisas; agricultura de precisão; agricultura inteligente, sensores de planta vestíveis.

ABSTRACT

Global trends indicate that the main challenges facing humanity in the coming years will be energy, water, food, the environment, and poverty. The scarcity of resources demands new models for precision agriculture in order to optimize resource usage. One need is higher accuracy in capturing climatic elements that directly impact plant development and food production. In this context, the Internet of Things is a concept that improves automated and accurate decision-making regarding the efficient use of resources. This aspect is because the Internet of Things connects objects, human beings, and environmental aspects. The Internet of Things allows to monitor, process, and store data collected by using sensors. Monitoring climatic conditions, mainly temperature and humidity, is relevant for several agricultural applications, such as precision irrigation, pest and disease control, and soil analysis. Therefore, these variables are often monitored in the productive environment and are generally collected by meteorological stations appropriately positioned in the agricultural field. Meteorological stations gather data referring to the climatic elements of the outer zone of the field. However, measuring these climatic elements in the plant microclimate (leaves and back of the studied plant) is essential for multiple applications to support more accurate decision-making. In this context, we propose an Internet of Things (IoT) system for capturing meteorological data whose differentials are sensors placed explicitly in the microclimate of the plant. In this way, studying the dynamics of the meteorological elements involved in plant development is possible. The temperature difference between the sensors was over 20%, showcasing the impact of sensor positioning on measurements.

Keywords: Microclimate, Internet of Things; precision agriculture; smart agriculture, wearable plant sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cajueiro Anão Precoce	24
Figura 2 – Proposta Sistema IoT de Análise de Microclima Vegetal	30
Figura 3 – Arquitetura Sistema IoT.	31
Figura 4 – Sensor de Temperatura da Folha.	32
Figura 5 – Lateral do Sensor de Temperatura da Folha.	33
Figura 6 – Psicrômetro Aspirado.	33
Figura 7 – Placa Sensores de Temperatura	34
Figura 8 – Placa Psicrometro Aspirado	35
Figura 9 – Coleta de dados dos Sensores de Temperatura.	36
Figura 10 – Coleta de dados dos Psicrômetro Aspirado.	36
Figura 11 – Cajueiro CCP76.	37
Figura 12 – Posicionamento dos Sensores e posição da planta em relação ao sol.	37
Figura 13 – Sensores de Temperatura	38
Figura 14 – Psicrometro Aspirado	39
Figura 15 – Sensor Interno 1 - Dias 25 e 26	40
Figura 16 – Sensor Interno 1 - Dias 27 e 28	41
Figura 17 – Sensor Interno 2 - Dias 25 e 26	42
Figura 18 – Sensor Interno 2 - Dias 27 e 28	43
Figura 19 – Sensor Externo 3 - Dias 25 e 26	44
Figura 20 – Sensor Externo 3 - Dias 27 e 28	45
Figura 21 – Sensor Intermediário 4 - Dias 25 e 26	46
Figura 22 – Sensor Intermediário 4 - Dias 27 e 28	47
Figura 23 – Temperatura do Psicrômetro Aspirado nos Dias 25 e 26	48
Figura 24 – Temperatura do Psicrômetro Aspirado nos Dias 27 e 28	49
Figura 25 – Umidade do Psicrômetro Aspirado nos dias 25 e 26	50
Figura 26 – Umidade do Psicrômetro Aspirado nos dias 27 e 28	51
Figura 27 – Correlação Umidade e Temperatura do Psicrômetro Aspirado	52
Figura 28 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Interno 1 e Sensor Externo 3	53
Figura 29 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Interno 1 e Sensor Externo 3 no dia 25	54

Figura 30 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Psicrômetro e Sensor Externo 3	55
Figura 31 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Psicrômetro e Sensor Externo 3 no Dia 25	56
Figura 32 – Temperatura e Umidade Media Itaperi / Psicrômetro	57
Figura 33 – Temperaturas Máximas Itaperi / Sensores	58
Figura 34 – Temperaturas Médias Itaperi / Sensores	59
Figura 35 – Temperaturas Mínimas Itaperi / Sensores	60
Figura 36 – Sensores de Temperatura	61
Figura 37 – Psicrometro Aspirado	62
Figura 38 – Estação Meteorológica Ufc	63
Figura 39 – Umidades Máximas Itaperi, Ufc e Psicrômetro	64
Figura 40 – Umidades Médias Itaperi, Ufc e Psicrômetro	65
Figura 41 – Umidades Mínimas Itaperi, Ufc e Psicrômetro	66
Figura 42 – Temperaturas Máximas Itaperi, UFC e Sensores	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos Relacionados - Foco	22
Tabela 2 – Artigos Relacionados - Comparativo	22
Tabela 3 – Sensor Interno 1	41
Tabela 4 – Sensor Interno 2	42
Tabela 5 – Sensor Externo 3	43
Tabela 6 – Sensor Intermediário 4	44
Tabela 7 – Psicrômetro Aspirado - Temperatura	46
Tabela 8 – Psicrômetro Aspirado - Umidade	46
Tabela 9 – Estação Meteorológica Itaperi - Temperatura	48
Tabela 10 – Estação Meteorológica Itaperi - Umidade	48
Tabela 11 – Estação Meteorológica UFC - Temperatura	52
Tabela 12 – Estação Meteorológica UFC - Umidade	52

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>UR</i>	Umidade relativa do ar
<i>GPS</i>	Global Positioning System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i>	18
1.2	Produção Científica	19
1.3	Estrutura da Dissertação	19
2	TRABALHOS RELACIONADOS	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1	Microclima Vegetal	23
3.2	Internet das Coisas	25
3.3	Lora	27
4	METODOLOGIA	30
4.1	Arquitetura do Sistema IoT	30
4.1.1	<i>Sensor de medição de temperatura em folhas ou panículas e sensor de umidade (Psicrômetro Aspirado)</i>	32
4.1.2	<i>Dispositivos de Captura de Dados de Temperatura e Umidade</i>	34
4.1.2.1	<i>Sensores de Temperatura da Folha Vestíveis</i>	34
4.1.2.2	<i>Psicrômetro aspirado</i>	34
4.2	Experimento em Laboratório	34
4.2.1	<i>Método</i>	34
4.2.2	<i>Resultados em Laboratório</i>	35
4.3	Experimento em uma Planta Real	36
4.3.1	<i>Método</i>	36
4.3.1.1	<i>Sensores de Temperatura de Folha</i>	38
4.3.1.2	<i>Psicrômetro aspirado</i>	38
4.3.1.3	<i>Estações Meteorológicas</i>	39
4.3.2	<i>Resultados do experimento em uma planta real</i>	40
4.3.2.1	<i>Sensores de Folha</i>	40
4.3.2.2	<i>Psicrômetro</i>	45
4.3.2.3	<i>Estações Meteorológicas do Itaperi e da UFC e Sensores</i>	47
4.3.2.4	<i>Análises Finais</i>	53

5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Tendências globais e previsões para o planeta indicam que nos próximos 50 anos os principais desafios da humanidade serão energia, água, alimentos, ambiente e pobreza. A agricultura mundial encontra-se sob forte pressão para garantir a segurança alimentar. O cenário global previsto é crítico: a população mundial atingindo nove bilhões de habitantes em 2050; crescente escassez dos recursos terra e água; mudanças climáticas e eventos extremos; e urbanização em crescimento constante e decrescente produtividade agrícola em alguns países (MASSRUHA; LEITE, 2014).

A escassez de recursos torna obrigatório abordar a questão da agricultura de precisão e novos modelos devem ser desenvolvidos para otimizar a utilização de recursos (KOUR; ARORA, 2020). Nesse contexto, a Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* - IoT) é uma tecnologia que potencializa a tomada de decisão em relação à utilização eficiente de recursos, ao permitir a conexão entre objetos e seres humanos, juntamente com os aspectos ambientais. A IoT é uma tecnologia largamente usada para realizar o monitoramento, processamento e armazenamento de grandes volumes de dados coletados por meios de sensores a fim de automatizar processos e prover serviços. Assim, buscando a visão de onipresença, ou seja, a qualquer hora, qualquer coisa, em qualquer lugar, a IoT deve ser considerada um núcleo para o desenvolvimento de novos conceitos arquitetônicos.

De acordo com (SOUZA *et al.*, 2020), a disponibilização de equipamentos e sensores conectados aos ambientes produtivos têm possibilitado aos usuários a medição e o monitoramento de variáveis relevantes, como a temperatura, nível de umidade e nutrientes do solo, ocorrência de ervas daninhas, pragas e doenças, destacando o valor do presente estudo que, instrumentalizado nas possibilidades disponíveis na IoT, busca estreitar os laços entre resultados de pesquisa aplicados aos ambientes de produção.

O monitoramento das variáveis de temperatura e umidade do ambiente são relevantes para diversas aplicações agrícolas, como a irrigação de precisão, o controle de pragas e doenças, análise de solo, dentre outros. Portanto, essas variáveis são bastante comuns no ambiente produtivo, sendo geralmente coletadas por estações meteorológicas posicionadas em locais centrais no campo agrícola. Os dados retornados pelas estações meteorológicas são referentes aos elementos climáticos da zona exterior do campo. Entretanto, para diversas aplicações é importante a medição desses elementos no microclima vegetal (folhas e dorso da planta estudada) para suporte a tomada de decisão mais acurada.

Um exemplo de aplicação que pode se beneficiar do monitoramento do microclima é o controle de pragas e doenças. Entre elas estão o Oídio (*Oidium anacardii*) (SHOMARIA; KENNEDY, 1999), as Brocas das Pontas (*Anthistarcha binoculares*) (MESQUITA *et al.*, 2016) e a Traça-Das-Castanhas (*Anacampsis phytomiella*) (MESQUITA *et al.*, 2016), que tem sido uma constante ameaça por causar significativas quedas de produção e perdas econômicas em milhões de reais (NETO *et al.*, 2018).

A identificação dos primeiros sintomas de doenças é um dos principais marcos para a indústria de proteção de lavouras, mas também para dois desafios sociais e ambientais: aumentar a produção ou minimizar as perdas. Segundo (Agrios,G.N, 2006), a medição de doenças de plantas pode ser dividida em três partes: medição da incidência, severidade e perda de rendimento. A incidência é descrita como a proporção da planta que está doente. A severidade é especificada como a proporção da área infectada. E a perda de rendimento é a parte da colheita que é destruída ou que afeta a qualidade do produto. Embora a severidade e a perda de rendimento sejam prioritárias para o agricultor, a incidência de uma doença é mais difícil de medir. Além disso, em alguns casos, só é possível medir tardiamente devido à incidência incipiente que não é detectada pelos agricultores. É necessário levar em consideração que a detecção dos primeiros sintomas é um limite usual considerado para o manejo integrado de pragas estratégias de doenças. Consequentemente, a pesquisa precisa se concentrar em atividades que possam identificar doenças em um estágio inicial, para que as atividades direcionadas possam ser desencadeadas, os sintomas possam ser tratados e até mesmo epidemias possam ser prevenidas (JOHANNES *et al.*, 2017).

Em alguns trabalhos como (MARTINS *et al.*, 2020) (CAFFARRA *et al.*, 2012), é possível observar que os elementos climáticos são preponderantes sobre a intensidade da doença, evidenciando que uma ampla faixa de umidade tem influência sobre o fungo e que temperaturas extremas são desfavoráveis ao patógeno. Entretanto, é importante ressaltar que os elementos climáticos observados precisam de uma análise em campo em conjunto com outros elementos climáticos tais como vento, incidência solar, tempo de orvalho, dentre outros.

Vários trabalhos concentram-se em medições de elementos climáticos na plantação usando soluções IoT ou usando estações meteorológicas. Porém, o que este trabalho propõe é além da medição de elementos climáticos na plantação, a medição desses elementos ser feita também no microclima vegetal (folhas e dorso da planta estudada) em árvores com copa densa. Desde que o microclima possui condições atmosféricas que diferem da zona exterior, é

importante analisar esses dados em conjunto a fim de suportar modelos mais acurados.

Como exemplo de cultura com formação de copa densa, pode-se citar o cajueiro. No caso do oídio do cajueiro, este pode ser observado em todo o dossel da planta, desde a extremidade onde ocorre a grande maioria da frutificação (surgimento das panículas - onde são emitidas as flores e produção de frutos) e dentro do dossel da planta. No entanto, algumas características do interior da planta como temperatura, umidade relativa e sombra por exemplo, favorecem a produção, manutenção e a dispersão de uma grande quantidade de inóculo (conídios do fungo) para novos ciclos de infecção, bem como para a sobrevivência do fungo na entressafra do caju (SHOMARIA; KENNEDY, 1999). Portanto, monitorar o microclima da planta possibilita a identificação da doença em estágio inicial.

Desse modo, nesta dissertação é proposto um sistema de Internet das Coisas para coletar os dados do microclima vegetal através de sensores de temperatura de folha vestíveis (sensor de deformação flexível personalizado para monitorar a temperatura no dorso da folha) e sensor de temperatura do ambiente e umidade (psicrômetro aspirado). Os dados coletados pelos sensores são comparados com dados de duas estações meteorológicas com diferentes distâncias do campo observado com o intuito de avaliar a variação climática em torno da copa de plantas. O conhecimento do microclima vegetal em conjunto com o uso de sensores vestíveis, pode ser aplicado em um leque abrangente de aplicações da agricultura digital.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a coleta e o estudo de dados do microclima vegetal destinado à utilização na agricultura em plantas com copas altas, através de um sistema de Internet das Coisas proposto nesta dissertação.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor um sistema de internet das coisas para monitoramento do microclima vegetal de plantas.
- Desenvolver um protótipo do psicrômetro aspirado e adaptação do sensor vestível para monitoramento de temperatura em folhas para os dois serem usados de forma conjunta no Sistema IoT.

- Avaliar sensores de temperatura vestíveis posicionados em cima da copa e embaixo, nas folhas, para monitorar a temperatura real da planta em diferentes pontos da copa.
- Avaliar um sensor de temperatura e umidade, psicrômetro aspirado, posicionado próximo ao tronco da planta, embaixo da copa, monitorando os elementos climáticos mais internos, com menos exposição solar.
- Comparar os dados climáticos captados pelos sensores do microclima vegetal com dados de sensores de estações meteorológicas mais próximas do experimento realizado.

1.2 Produção Científica

No decorrer da pesquisa, foi realizada a seguinte contribuição científica:

- MENDES, Davila F.; CARVALHO, Claudio Jose R. de; SOUSA, Otto Alan P. De; MARTINS, Marlon Vagner V.; ROCHA, Atslands R. da. Sistema de Internet das Coisas para Captação de Dados do Microclima Vegetal na Agricultura. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 14. , 2023, João Pessoa/PB. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023 . p. 111-120. ISSN 2595-6124. DOI: <https://doi.org/10.5753/wcama.2023.230003>.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por cinco capítulos que foram estruturados da seguinte forma. No Capítulo 1 é apresentada a contextualização do problema, juntamente com as motivações da pesquisa e os objetivos deste trabalho. No Capítulo 2 são apresentados os trabalhos relacionados que serviram como base para esta pesquisa. Em seguida, no Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica, na qual são discutidos alguns conceitos importantes, para um melhor entendimento do trabalho. No Capítulo 4 é apresentado a metodologia adotada, explicando os experimentos realizados com os resultados obtidos. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas a partir da pesquisa realizada. Destacam-se os resultados alcançados, as limitações encontradas e são sugeridos possíveis trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos para expandir e aprofundar o tema abordado.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Vários artigos com abordagens tradicionais para a captação ou manutenção dos elementos climáticos têm sido desenvolvidos. Em (CHEN *et al.*, 2020) é apresentado um sistema IoT, que usando dados de sensores locais (umidade e temperatura) e uma estação meteorológica, realiza a predição da doença do arroz (*Brusone*). A doença é detectada em tempo real com uma acurácia de 89.4% de acerto. Na cultura do arroz não há a formação de árvores com copas de plantas. Portanto, ao colocar sensores no meio da plantação se tem um microclima uniforme, o que facilita a análise. No entanto, não pode ser aplicado em outras culturas que possuem a formação de copas.

Outra abordagem é apresentada em (KIM *et al.*, 2018), em que o uso de casas de vegetação que possuem também os elementos climáticos (umidade e temperatura), controlados por um sistema que oferece as melhores condições para o desenvolvimento da plantação. Esta abordagem se torna inviável financeiramente devido ao tamanho das plantações com árvores com copas altas, com custo muito alto aos produtores locais.

Dentre os trabalhos com abordagens tradicionais apresentados o que mais se assemelha a abordagem proposta neste trabalho é o (CHEN *et al.*, 2020). Entretanto, esta dissertação tem o diferencial de os sensores serem colocados no microclima da planta, cujas condições atmosféricas diferem da zona exterior, geralmente coletadas por uma estação meteorológica mais distante da plantação. Assim, pode-se além de captar os diferentes microclimas existentes na plantação, focar em cada um deles e estudar sua dinâmica em torno da planta. Desse modo, possibilita-se a análise na planta estudada das diferenças dos elementos climáticos em cada parte.

No trabalho (A *et al.*, 2023) foi desenvolvido um sistema capaz de gerar características microclimáticas específicas de onde a planta se encontra com o uso de um sensor de umidade do solo e um de temperatura ambiente na planta. Os dados são analisados e validados com a ajuda da ferramenta *Cropwat* que analisa e monitora a irrigação adequada. Neste caso, a preocupação específica para análise de microclima é a irrigação adequada do solo, não se tem o foco em ter dados climáticos na planta como um todo, em várias partes. O seu foco principal são sensores em vários pontos da plantação próximos ao solo.

No artigo (TOCCO *et al.*, 2023) foi proposta uma plataforma multissensor para monitorar o crescimento da planta (caule e fruto) e microclima (temperatura ambiental e umidade relativa). A plataforma consiste em um sensor de deformação flexível personalizado para monitorar o crescimento quando acoplado em uma planta e uma unidade de detecção comercial

para monitorar os valores de temperatura e umidade no entorno da planta. Neste trabalho, (TOCCO *et al.*, 2023), os autores também tem a característica de uso de sensor vestível na planta, assim como os sensores de folha que foram usados nesta dissertação para medir a temperatura. Porém, por se tratar da cultura de melões, não se tem a formação de copas, os sensores estão próximo ao solo e nas frutas, que não chegam a estar de forma suspensa e sim também diretamente no solo.

Na cultura de arroz, trigo, soja e melões existe uma uniformidade, provavelmente um sensor de temperatura colocado em pontos diferentes da plantação trará a mesma temperatura. Já em árvores com formação de copas, a plantação tem um afastamento entre uma árvore e outra. Um sensor colocado no meio da plantação não irá refletir a temperatura e umidade embaixo da copa, nem as diferenças entre sensores posicionados mais internamente da copa dos mais próximos ao topo da planta.

Esta análise de microclima em árvores com copa é o que este estudo se propõe a fazer, mostrando a importância do posicionamento dos sensores e as diferenças de um microclima mais próximo à planta, embaixo da copa, com um mais distante ou externo à plantação. Para esse estudo, além de dados de sensores vestíveis de temperatura, dados de um psicrômetro aspirado de temperatura e umidade foram utilizados. Dados de estações meteorológicas mais próximas ao experimento também foram avaliadas tornando a análise de dados mais completa.

Na Tabela 1 é apresentado cada trabalho com sua abordagem e foco principal de atuação. Já na Tabela 2 é realizado um comparativo dos trabalhos, com suas características principais.

Tabela 1 – Artigos Relacionados - Foco

	Abordagem	Foco
(CHEN et al., 2020)	Sistema IoT que usa dados de sensores locais (umidade e temperatura) e uma estação meteorológica.	Trata o microclima de maneira uniforme
(KIM et al., 2018)	Uso de casas de vegetação que possuem também os elementos climáticos (umidade e temperatura), controlados por um sistema que oferece as melhores condições para o desenvolvimento da plantação.	Faz uso de casas de vegetação que para a cultura com copas, arvores, se torna inviável financeiramente
(A et al., 2023)	Sistema capaz de gerar características microclimáticas específicas de onde a planta se encontra com o uso de um sensor de umidade do solo e um de temperatura ambiente na planta.	Foco apenas na irrigação, sem analisar o microclima como um todo
(TOCCO et al., 2023)	Plataforma multissensor para monitorar o crescimento da planta (caule e fruto) e captação de dados (temperatura ambiental e umidade relativa).	Foco no crescimento da planta com o uso de sensor vestível, mas sem análise de microclima
Neste Trabalho	Sistema Internet das Coisas de Captação de Dados do Microclima Vegetal, com o uso de sensores vestíveis e dados de Estações Meteorológicas próximas.	Foco na análise do microclima vegetal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Artigos Relacionados - Comparativo

	(CHEN et al., 2020)	(KIM et al., 2018)	(A et al., 2023)	(TOCCO et al., 2023)	Neste trabalho
Sensor de Umidade	x	x	x	x	x
Sensor de Temperatura	x	x	x	x	x
Sensor vestível				x	x
Dados de Estações Meteorológicas	x				x
Analisa o Microclima					x

Fonte: elaborada pelo autor.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica, na qual são discutidos conceitos importantes para um melhor entendimento do trabalho como os conceitos de microclima vegetal, Internet das Coisas e tecnologia Lora.

3.1 Microclima Vegetal

Segundo (NAIMAN *et al.*, 2005) microclima é o conjunto de condições climáticas medidas em áreas localizadas próximas à superfície da Terra. Estas variáveis ambientais que incluem temperatura, luz, velocidade do vento e umidade fornecem indicadores significativos para a seleção de *habitats* e outras atividades ecológicas. O microclima influencia os processos ecológicos, como a regeneração e o crescimento das plantas, a respiração do solo, a ciclagem de nutrientes sendo um componente essencial da pesquisa ecológica atual.

Outra definição é apresentada em (AUST; HOYNINGEN-HUENE, 1986), no qual afirma que cada planta cultivada produz um clima especial dentro de sua própria copa. Epidemias das doenças das plantas são influenciadas por este microclima especial dentro da cultura, bem como por fatores meteorológicos, a suscetibilidade do hospedeiro e a inóculo do patógeno já presente nas plantas.

Sendo o objetivo deste trabalho coletar e estudar dados do microclima vegetal, principalmente em culturas que possuam a formação de copas, a segunda definição de (AUST; HOYNINGEN-HUENE, 1986) se torna mais relevante para esta pesquisa. Para exemplificar uma árvore com copa alta, a Figura 1 mostra um cajueiro anão precoce. Nota-se principalmente a arquitetura da planta com uma copa densa, reforçando a importância das condições microclimáticas no interior da copa para o surgimento e tratamento das doenças fúngicas principalmente.

A temperatura, umidade relativa do ar (UR) e presença de filmes de água na superfície das folhas, comumente conhecido como orvalho, são elementos climáticos condicionantes para o surgimento de doenças de plantas, especialmente àquelas ocasionadas por fungos e bactérias.

Como estudo de caso de aplicações agrícolas em que o microclima pode ser utilizado para tomada de decisão, pode-se citar o controle de doenças em plantas. Uma das principais atividades geradoras de renda para as populações rurais do Nordeste brasileiro é a cajucultura, tendo na produção de castanha e de pedúnculo os responsáveis pelos rendimentos econômicos da cultura. Para esse tipo de árvore, que motivou a realização deste estudo, o clima influencia

Figura 1 – Cajueiro Anão Precoce



Fonte: Registro feito pelo autor.

o surgimento e desenvolvimento do oídio *P. anacardii*. No ciclo de infecção de *P. anacardii*, por exemplo, variações de umidade relativa do ar e temperatura interferem na germinação dos conídios do fungo, colonização do hospedeiro e disseminação do patógeno em condições controladas e no campo. Além desses fatores (umidade relativa do ar e temperatura), deve-se considerar os fatores ligados ao hospedeiro (cajueiro) e ao potencial de inóculo (presença do fungo) para que ocorram as epidemias (NETO *et al.*, 2018).

Para doenças foliares, a temperatura de ponto de orvalho da folha pode ser um indicador do risco potencial de epidemias. Quando a temperatura do ponto de orvalho da folha está próxima ou abaixo da temperatura do ar, a água líquida pode se acumular na superfície das folhas, criando condições favoráveis à germinação de esporos e o crescimento de fungos levando ao desenvolvimento de doenças (HUBER; GILLESPIE, 1992).

No caso do oídio do cajueiro, além da doença se manifestar nas panículas da planta, a mesma também pode estar presente nas folhas no interior da copa da planta o que torna essa região responsável pela manutenção do inóculo de *P. anacardii* para novos ciclos de infecção do fungo. Portanto, alguns elementos climáticos tornam-se importantes nos estudos epidemiológicos do oídio do cajueiro, principalmente por interferir no ciclo de infecção de *P. anacardii*. Por

exemplo, a produção e manutenção do inóculo do fungo externa ou internamente na planta pode variar conforme a variação do microclima e alterar o início de uma epidemia e o progresso da doença no campo (NETO *et al.*, 2018).

Dessa forma é importante conhecer como as condições microclimáticas dentro do plantio podem interferir no desenvolvimento da epidemia como um todo. Para isso, é necessário obter valores com alta frequência das principais variáveis implicadas como a temperatura e a umidade do ar dentro da copa o mais estreitamente acoplados às condições reinantes na superfície das folhas e panículas para assim correlacioná-los com o surgimento e desenvolvimento da doença através de modelagem.

Os elementos climáticos ocorridos no interior e no exterior da planta (próximo as folhas e panículas) podem sofrer variações em função da turbulência das massas de ar dentro e em torno da copa da planta e que podem ser substancialmente diferentes dos valores coletados em uma estação meteorológica distante. Saber qual desses dados interferem mais nas epidemias é fundamental para direcionar o manejo das doenças. Essa coleta de dados com alta frequência e nas várias regiões e órgãos da plantas pode ser executada através de dispositivos autônomos e com transmissão dinâmica sem fio (sistemas do tipo IoT), associada ao monitoramento da doença vai permitir um estudo mais aprofundado da dinâmica dos elementos climáticos com o oídio do cajueiro.

Neste trabalho, o microclima vegetal é monitorado através de um sistema IoT proposto. A coleta dos elementos climáticos é realizada através de sensores de temperatura e de umidade que estão posicionados estrategicamente em diferentes pontos da planta e do campo. Os dados coletados pelos sensores são enviados a uma plataforma IoT na nuvem para análise e armazenamento permanente. Além dos sensores que coletam dados do microclima das plantas, podem ser coletados dados climáticos da estação meteorológica mais próxima a plantação para serem analisados.

3.2 Internet das Coisas

A tecnologia aplicada ao campo fez com que fosse alcançado o patamar da agricultura atual. Essa tecnologia tem evolução contínua e o desafio atual é a chamada agricultura 4.0 ou agricultura digital. A agricultura 4.0 é um conjunto de tecnologias integradas e conectadas com o intuito de otimizar a produção agrícola em todas as suas etapas. Neste contexto está a Internet das Coisas, que pode ser entendida como uma rede de dispositivos inteligentes interconectados

capazes de se comunicarem entre si, gerando dados relevantes através de sensores sobre o ambiente em que operam. Dentre os ganhos da Internet das Coisas, estão os sistemas automáticos de localização e identificação de doenças baseados no uso de inteligência artificial. Na atualidade, alguns modelos tem sido desenvolvidos, seja por empresas particulares, seja por iniciativas de institutos de pesquisa ou Universidades. Esses sistemas tem contribuído significativamente para a redução do uso de agrotóxicos, aumento e produtividade, colocando conceitos teóricos do Manejo integrado em aspectos práticos, aproximando o produtor dos institutos de pesquisa e Centros de informação Agrícola.

Em (NAVARRO *et al.*, 2020) é discutida a arquitetura IoT que apresenta quatro camadas, denominadas percepção, transporte, processamento e aplicação. Nas camadas são consideradas os principais componentes, respectivamente: dispositivos, rede, serviços e aplicações. A camada de percepção engloba os dispositivos, que são responsáveis por coletar e monitorar grandezas físicas através de sensores embarcados e em muitos casos, de realizar ações através de atuadores. Exemplos de sensores são: GPS (*Global Positioning System*), termômetros, hidrômetros, giroscópios, dentre outros. Exemplos de atuadores são válvulas e cancelas, ou outros elementos que executem um comando recebido para realizar uma ação com o objetivo de modificar a dinâmica física de um sistema.

A camada de transporte envolve tecnologias de rede, que possibilitam a interconexão dos dispositivos IoT à Internet para processamento e armazenamento de dados com o intuito de prover novos serviços e aplicações. Alguns protocolos conhecidos para envio de dados pela rede são *Wifi*, *Bluetooth*, *Zigbee* e *LoraWan*.

A camada de processamento compreende recursos de visualização e processamento de dados. Inicialmente a Internet das Coisas era utilizada somente para coletar e armazenar os dados dos seus dispositivos/sensores utilizando tecnologia como computação em nuvem. Porém, nos últimos anos, é crescente as soluções IoT que utilizam técnicas e tecnologias complementares para tratar e analisar os dados coletados, como computação *big data* e inteligência artificial. As plataformas baseadas em nuvem fornecem escalabilidade para as soluções IoT, contando com a computação em nuvem para processar os dados. Existem serviços de infraestrutura fornecidos por provedores de nuvem que disponibilizam módulos de análise de dados com gráficos e painéis que permitem em tempo real o monitoramento das informações obtidas, ou a criação de painéis customizados a partir da integração de múltiplos dados (NAVARRO *et al.*, 2020).

A camada de aplicações envolve as aplicações que podem dar suporte a tomada de

decisão automatizada e mais acurada. Exemplos de aplicações na agricultura são: irrigação inteligente, rastreabilidade de produtos agrícolas, controle de pragas e doenças, detecção de queimadas e desmatamentos, dentre outros.

Nos experimentos deste trabalho são utilizados dois sensores, usados amplamente em sistemas IoT na agricultura: temperatura e umidade. O sensor de temperatura monitora as mudanças de temperatura que têm impacto na absorção de nutrientes do solo e umidade. A condição ambiental e o monitoramento de ativos são dois aspectos significativos da agricultura inteligente que precisam de sensores de temperatura. O cultivo de vinho, por exemplo, é conhecido por ocorrer dentro de uma janela de temperatura limitada entre -10°C a -12°C ao longo de um período de colheita. O negócio do vinho requer temperatura e umidade muito precisas para uma produção eficiente. Os sensores de temperatura são cruciais em quase todas as aplicações inteligentes de monitoramento de ativos agrícolas. (SINHA; DHANALAKSHMI, 2022)

O sensor de umidade captura a umidade que tem um efeito no crescimento das folhas das plantas e na fotossíntese. Como resultado, este sensor envolve a medição do teor de umidade e temperatura do ar para indicar o grau de umidade. (SINHA; DHANALAKSHMI, 2022)

Mesmo que apenas dois tipos de sensores sejam utilizados neste experimento, o método pode ser estendido a muitos outros tipos e, assim, possibilita uma grande variedade de análises que, além de novas descobertas no campo da ciência, também levam ao monitoramento constante do campo.

O monitoramento constante da plantação por meio de sensores em sistemas IoT torna isso possível tanto de forma automática quanto com alertas simples ao agricultor. Graças ao paradigma de Internet das Coisas, com sistemas agrícolas integrados pode-se agir rapidamente para afastar pragas e doenças ou simplesmente aumentar a produtividade no campo.

3.3 Lora

LoRa é uma tecnologia de modulação de rádio frequência para redes de longa distância de baixa potência (*Low Power Wide Area Network* - LPWANs). O nome LoRa é uma referência aos enlaces de dados de alcance extremamente longo (*long-range*) que essa tecnologia permite. Criado pela Semtech para padronizar LPWANs, o LoRa permite comunicações de longo alcance: até cinco quilômetros em áreas urbanas e até 15 quilômetros ou mais em áreas rurais (linha de visão). Uma característica fundamental das soluções baseadas em LoRa são os

requisitos de energia ultrabaixos, que permitem a criação de dispositivos operados por bateria que podem durar até 10 anos (Semtech, 2020).

De acordo com a especificação da (Semtech, 2020), os elementos da arquitetura Lora são:

- Dispositivo final ou nó (*End-Device*): Sensor ou atuador conectado sem fio a uma rede LoRaWAN por meio de gateways de rádio usando a Modulação rádio frequência (RF) LoRa. Na maioria das aplicações, um dispositivo final é um sensor autônomo, muitas vezes operado por bateria, que digitaliza condições físicas e eventos ambientais. Para exemplificar o uso de um atuador seria um comando para pulverizar uma plantação de forma automática, envio de mensagens de alerta, iniciar ou encerrar a irrigação da plantação, entre outros.
- Gateway: Recebe mensagens de RF moduladas LoRa de qualquer dispositivo final e encaminha essas mensagens de dados para o servidor de rede LoRaWAN, que é conectado através de um backbone IP. Não há associação fixa entre um dispositivo final e um gateway específico. Em vez disso, o mesmo sensor pode ser servido por vários gateways na área. Com o LoRaWAN, cada pacote de *uplink* enviado pelo dispositivo final será recebido por todos os gateways ao alcance. Esse arranjo reduz significativamente a taxa de erro do pacote (já que as chances de pelo menos um gateway receber a mensagem são muito altas), reduz significativamente a sobrecarga da bateria para sensores móveis e permite a geolocalização de baixo custo (supondo que os gateways em questão sejam capazes de geolocalização).

O tráfego IP de um gateway para o servidor de rede pode ser reencaminhado via Wi-Fi, Ethernet com fio ou via conexão celular. Os gateways LoRaWAN operam inteiramente na camada física e, em essência, não são nada além de encaminhadores de mensagens de rádio LoRa. Eles verificam a integridade dos dados de cada mensagem recebida. Se a integridade não estiver intacta a mensagem é descartada.

- Servidor de Rede: Gerencia toda a rede, controla dinamicamente os parâmetros da rede para adaptar o sistema às condições em constante mudança e estabelece conexões seguras de 128 bits, com padrão de criptografia avançado, para o transporte de dados de ponta a ponta (do dispositivo final LoRaWAN para a aplicação de usuários finais na nuvem), bem como para o controle do tráfego que flui do dispositivo final LoRaWAN para o Servidor de Rede (e de volta). O servidor de rede garante a autenticidade de cada sensor na rede e

a integridade de cada mensagem. Ao mesmo tempo, o servidor de rede não pode ver ou acessar os dados da aplicação.

- Servidor de Aplicação: Os servidores de aplicação são responsáveis por manipular, gerenciar e interpretar com segurança os dados do aplicativo do sensor. Eles também geram todas as cargas úteis de downlink da camada de aplicativo para os dispositivos finais conectados.

Em áreas rurais onde muitas vezes faltam sinais de internet (3G, 4G, etc), e com grandes extensões não cobertas pelo Wi-Fi, geralmente limitado apenas para a sede da fazenda, a comunicação usando Lora se tornou uma opção para viabilizar o envio de dados de sensores em sistemas IoT, usados na plantação, para um ponto de *gateway* (onde existe sinal de Wi-Fi). Após chegar no *gateway* pode-se enviar os dados via Wi-fi ou rede cabeada para a nuvem de dados e a partir deste ponto as plataformas IoT oferecem uma grande variedade de serviços e análise de dados.

A escolha desta tecnologia, para o experimento em questão, é de vital importância para a continuação dos trabalhos futuros, com a implantação da coleta de dados do microclima vegetal sendo realizada em grandes extensões rurais.

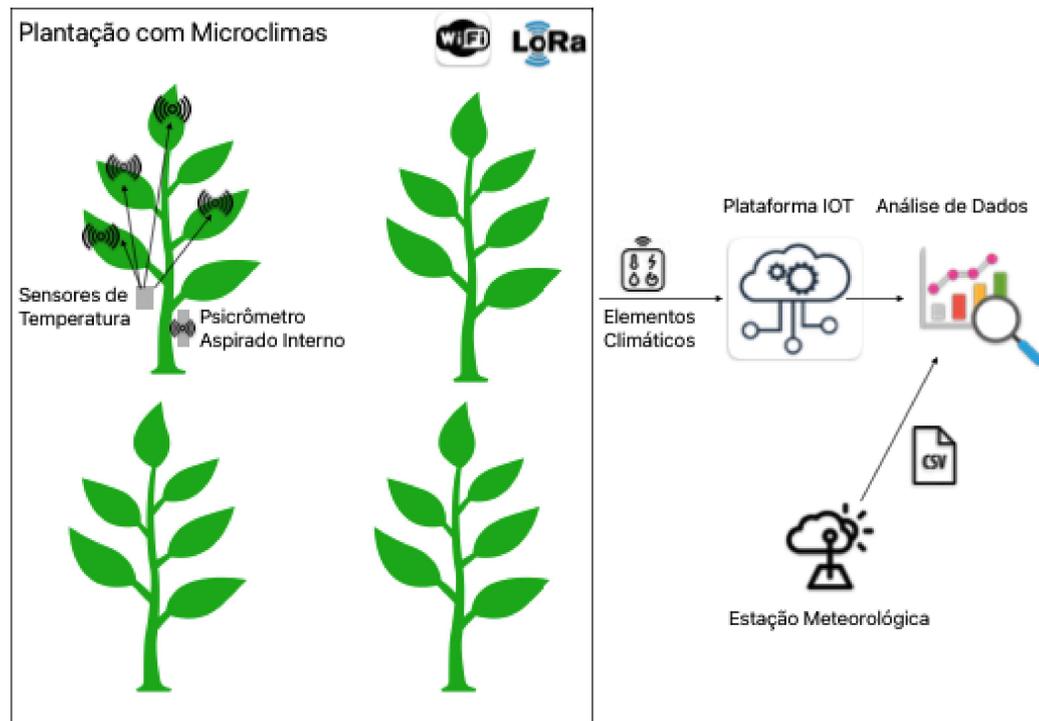
4 METODOLOGIA

Neste capítulo está descrita a arquitetura do sistema IoT proposto nesta dissertação e seus componentes, além da metodologia adotada e dos experimentos realizados.

4.1 Arquitetura do Sistema IoT

Na Figura 2 é ilustrada a estrutura do sistema proposto para coleta de dados e análise do microclima vegetal. A coleta dos elementos climáticos, posicionados estrategicamente em diferentes pontos da planta, serão enviados a uma plataforma IoT que serão analisados juntamente com os dados da estação meteorológica mais próxima.

Figura 2 – Proposta Sistema IoT de Análise de Microclima Vegetal

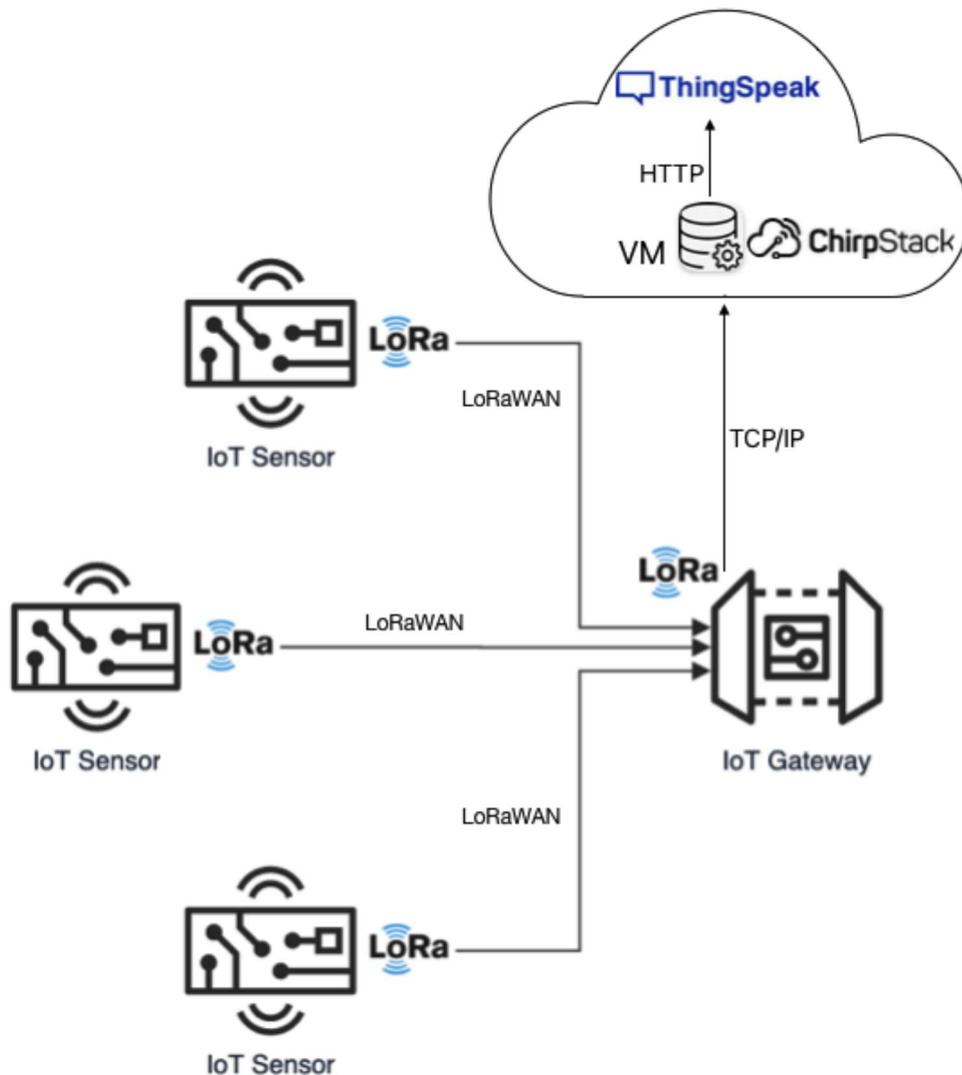


Fonte: Elaborada pelo autor.

O desenvolvimento da arquitetura do sistema IoT (Figura 3) foi baseado na utilização do rádio LoRa como técnica de comunicação sem fio e do protocolo LoRaWan (KASSAB; DARABKH, 2020) como protocolo de comunicação para criar uma rede que conecta nós sensores a uma nuvem. Esse tipo de modulação de rádio e protocolo foram escolhidos devido sua capacidade de permitir uma comunicação de longo alcance e geolocalização precisa, utilizando uma pequena quantidade de energia a um baixo custo de implementação. Contudo, devido a natureza da modulação do rádio LoRa, a quantidade de dados que podem ser trocados por mensagem é

bastante limitada, o que restringe as aplicações para esse tipo de técnica de comunicação.

Figura 3 – Arquitetura Sistema IoT.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Visto isso, para se criar uma rede LoRa são necessários três componentes principais, sendo eles: Um nó que possua integrado um transceptor de rádio LoRa, um *gateway* e um servidor LoRa. Assim, quando o nó precisar enviar dados à nuvem, ele deverá utilizar o protocolo LoRaWAN para construir um pacote e enviá-lo ao *gateway*, que por sua vez, o encaminhará para o servidor LoRa ao qual estiver associado.

Assim, a arquitetura do sistema IoT proposto é formada por um conjunto de nós sensores, um gateway LoRa e uma nuvem, que contém o servidor Lora. Os sensores realizam a leitura de dados ambientais a cada 60 segundos, os armazena brevemente em sua memória interna e os envia via LoRaWAN para um gateway LoRa que possui como papel o encaminhamento dos pacotes LoRA enviados pelos nós sensores à nuvem.

Uma vez enviados, esses pacotes são então recebidos por um servidor LoRa. Neste trabalho, foi utilizado o ChirpStack, um servidor de rede e ao mesmo tempo um servidor de aplicação que fornece uma interface web para o gerenciamento de gateways e dispositivos bem como para configurar integrações de dados com os principais provedores de nuvem, bancos de dados e serviços. O ChirpStack é instanciado na nuvem sendo responsável por desempacotar os dados enviados pelos nós sensores e enviar os dados obtidos a determinados serviços que estão sendo executados na mesma nuvem, os serviços realizam a validação, verificando se estão no formato correto e em seguida não só persistindo eles em arquivo, como também os enviando para uma plataforma IoT (ThingSpeak) para que possam ser visualizados nos *dashboards* da ferramenta.

4.1.1 Sensor de medição de temperatura em folhas ou panículas e sensor de umidade (Psicrômetro Aspirado)

As Figuras 4 e 5 mostram os sensores de temperatura de alta frequência com transmissão por LoRa 915 Mhz. Para este modelo de sensores de temperatura da folha foram desenvolvidos fixadores magnéticos impressos em impressora 3D com filamento de ABS (*Acrilonitrila Butadieno Estireno*), voltado para usos duráveis que suportam altas temperaturas. Os fixadores são constituídos de dois anéis contendo ímãs que mantêm os aros alinhados e fixos na superfície das folhas.

Figura 4 – Sensor de Temperatura da Folha.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como as medidas de temperatura das superfícies vegetais são feitas com alta frequência, foi necessário desenvolver também um psicrômetro aspirado, que fosse suficientemente

pequeno para não afetar a turbulência natural dentro da copa, mas que ao mesmo tempo permitisse um estreito acoplamento dos valores da umidade do ar com os valores das temperaturas das folhas. A Figura 6 mostra um psicrômetro aspirado com transmissão de dados via LoRa 915Mhz. Neste sensor, o ar é continuamente aspirado por um miniventilador passando continuamente por um sensor de umidade HDC 1080 (*Texas Instruments*), ligado a uma placa eletrônica desenhada em torno de um processador ESP 32 LoRa. Além de medir a umidade o psicrômetro aspirado também mede a temperatura do ambiente.

Figura 5 – Lateral do Sensor de Temperatura da Folha.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Psicrômetro Aspirado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Dispositivos de Captura de Dados de Temperatura e Umidade

4.1.2.1 Sensores de Temperatura da Folha Vestíveis

Foi concebido um dispositivo de captura, processamento e envio de dados de temperatura da folha, baseado em um microcontrolador ATmega328P-PU, fabricado por Atmel/MicrochipTechnology. A Figura 7 mostra o dispositivo desenvolvido.

Figura 7 – Placa Sensores de Temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2.2 Psicrômetro aspirado

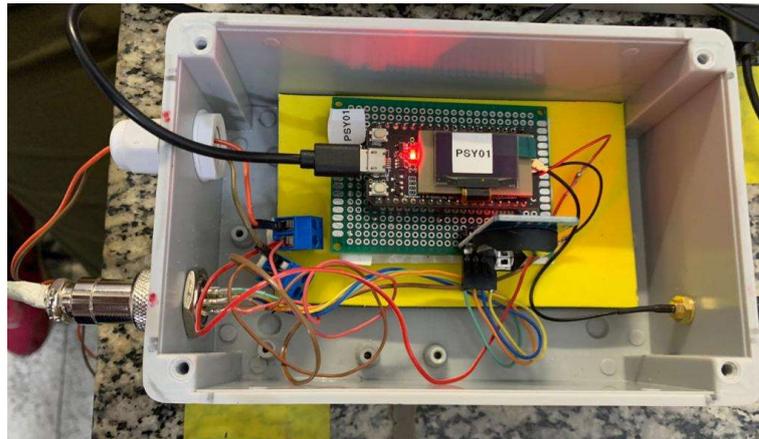
Para o dispositivo de captura, processamento e envio de dados de temperatura e umidade do ambiente foi utilizada uma placa de desenvolvimento LilyGo LoRa ESP32 com um transceiver Semtech SX1276. Além disso, foram utilizados sensores HDC1080 e RTC DS3231. A Figura 8 mostra o dispositivo desenvolvido.

4.2 Experimento em Laboratório

4.2.1 Método

Foram realizados dois experimentos. O primeiro experimento foi realizado em um laboratório onde os sensores e todo o sistema foram testados e validados. Após o ajuste fino de vários componentes, um segundo experimento foi conduzido no campo da Embrapa

Figura 8 – Placa Psicrometro Aspirado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Agroindústria Tropical.

Foram realizadas em laboratório as medições de temperatura de quatro termistores e um psicrômetro aspirado. Tanto a umidade do ar quanto as medidas de temperatura das folhas foram executadas a cada 60 segundos e enviadas para a nuvem através do gateway Lora. O experimento durou 24h. No caso das temperaturas das folhas, os quatro termistores foram calibrados contra um dispositivo equipado com um termômetro de mercúrio de 0,1C de precisão e ajustados utilizando a metodologia de Steihart -Hart (STEINHART; HART, 1968).

4.2.2 Resultados em Laboratório

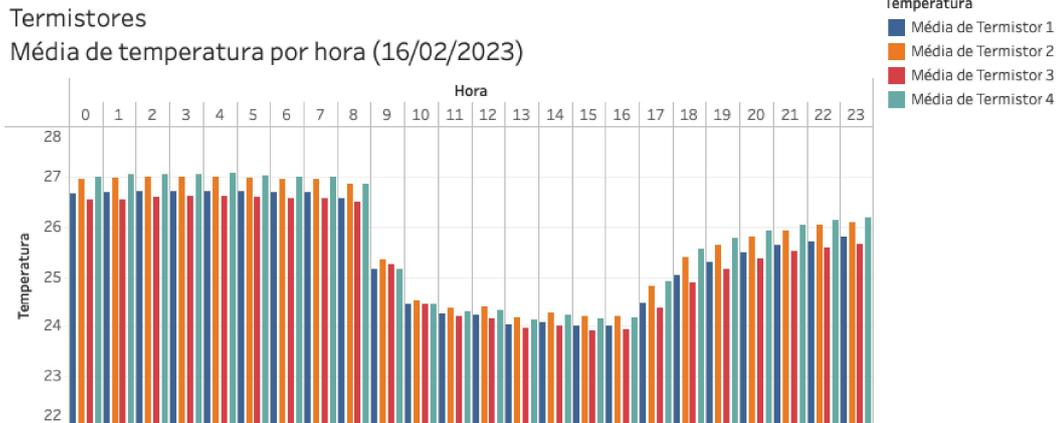
Os resultados das medições de temperatura de quatro termistores e de um psicrômetro aspirado são detalhados a seguir. A Figura 9 mostra os dados de um dia, média por hora de cada termistor. Pode-se observar que os termistores estão bem calibrados mostrando pouca variação entre eles, já que todos estão localizados próximos, em um mesmo laboratório.

Já na Figura 10 é mostrada a média por hora do psicrômetro aspirado. A umidade da sala de laboratório tem mais variabilidade, durante o dia havia entrada e saída de pessoas, porém se mantendo dentro da faixa esperada.

Tanto o método de transmissão via Lora como o armazenamento dos dados na nuvem foram bem sucedidos assim como ficou demonstrada a viabilidade de medidas bem sincronizadas no tempo entre os diferentes dispositivos, analisados via gráficos gerados na plataforma *ThingSpeak*. No conjunto, os resultados nos apontaram para a viabilidade de instalar um ensaio em campo dos sensores em condições de plantio real.

Os dados obtidos em laboratório demonstraram um bom funcionamento da arquite-

Figura 9 – Coleta de dados dos Sensores de Temperatura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Coleta de dados dos Psicrômetro Aspirado.

Psicrômetro Aspirado
Média de umidade por hora (16/02/2023)



Fonte: Elaborada pelo autor.

tura IoT para a captação dos dados climáticos e a coerência dos dados obtidos pelos sensores. Portanto, foi finalizado o desenvolvimento de sensores, juntamente com o sistema IoT, sendo usados próximos ao microclima vegetal, sem que isso atrapalhe a dinâmica natural da planta.

4.3 Experimento em uma Planta Real

4.3.1 Método

A arquitetura utilizada neste experimento foi a mesma arquitetura do experimento em laboratório (Figura 3). Os dispositivos foram posicionados em uma árvore com copa alta. Foi utilizado um clone de cajueiro anão precoce CCP 76 (Figura 11) com mais de dez 10 anos de idade, com altura aproximada de 2,68m e diâmetro de copa em torno de 5 metros.

Pode-se observar o posicionamento dos sensores na planta através da Figura 12, e

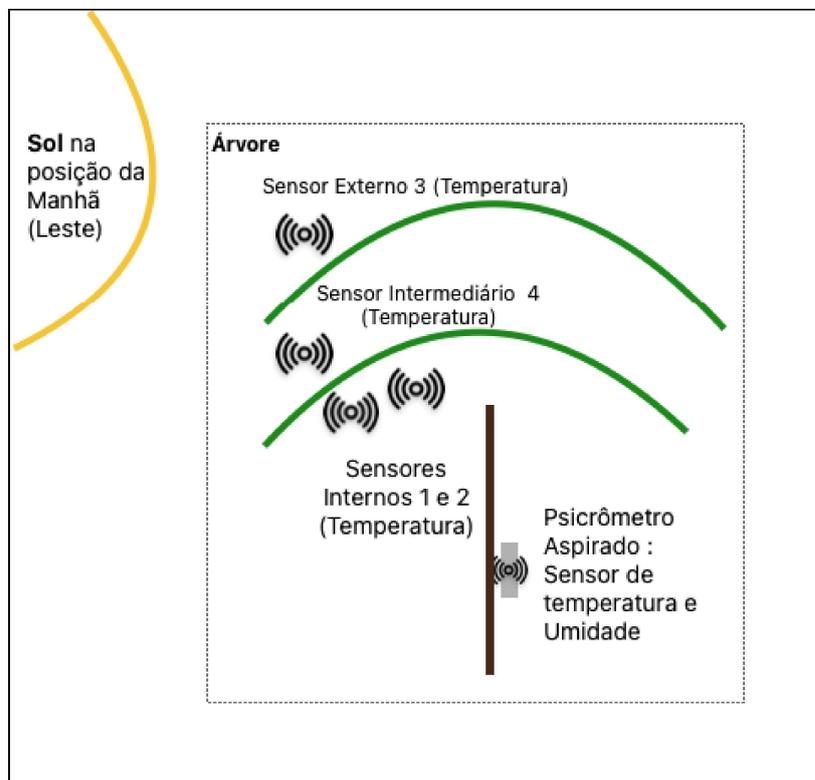
Figura 11 – Cajueiro CCP76.



Fonte: Elaborada pelo autor.

ainda o seu posicionamento em relação ao sol da manhã.

Figura 12 – Posicionamento dos Sensores e posição da planta em relação ao sol.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.1.1 Sensores de Temperatura de Folha

O cajueiro escolhido já estava na fase adulta, tendo portanto uma altura considerável, próxima de 3 metros. Foram colocados quatro sensores de folhas na copa do cajueiro posicionados da seguinte maneira:

- Sensor 1 e 2: posicionados embaixo da copa;
- Sensor 3: com exposição solar constante;
- Sensor 4: com exposição solar de forma intermitente

Na Figura 13 é mostrada a posição do dispositivo de captação com os sensores de temperatura de folha no cajueiro.

Figura 13 – Sensores de Temperatura



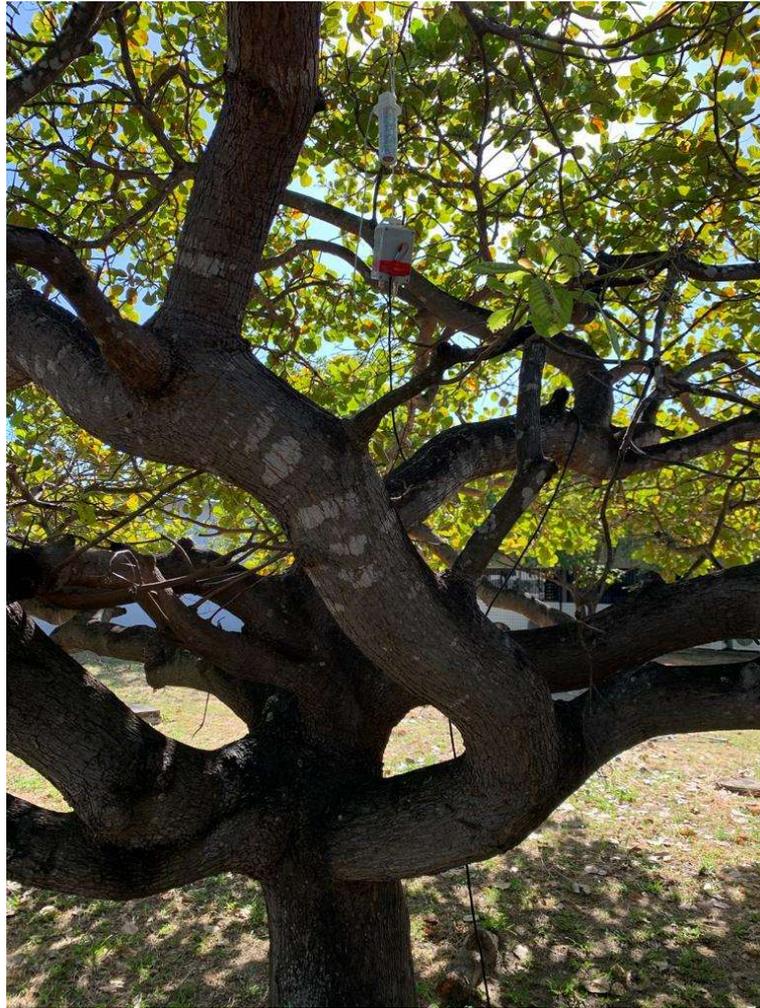
Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante quatro dias, os sensores posicionados em pontos estratégicos da planta coletaram, a cada um minuto, dados climáticos do ambiente, temperatura e umidade utilizando como fonte de energia uma bateria carregada por placas de energia solar.

4.3.1.2 Psicrômetro aspirado

A Figura 14 mostra a posição do psicrômetro aspirado no cajueiro, estando localizado mais próximo ao tronco, parte mais central e interna da planta .

Figura 14 – Psicrometro Aspirado



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.1.3 Estações Meteorológicas

Para fins comparativos, foram utilizados dados de duas estações meteorológicas. Os dados da primeira estação meteorológica foram cedidos pela Universidade Federal do Ceará, que fica mais próxima do experimento (por volta de um quilômetro - 1km).

Para obtenção dos dados da segunda estação meteorológica, foi realizado o *download* através do site da Funceme (Fundação Cearense de Meteorologia e Chuvas Artificiais) ¹ da Estação Meteorológica do Itaperi, com distância em torno de 6 (seis) quilômetros do experimento. Com estes dados coletados, foram gerados os gráficos de análise de dados e os resultados e conclusões comparativas puderam ser realizadas.

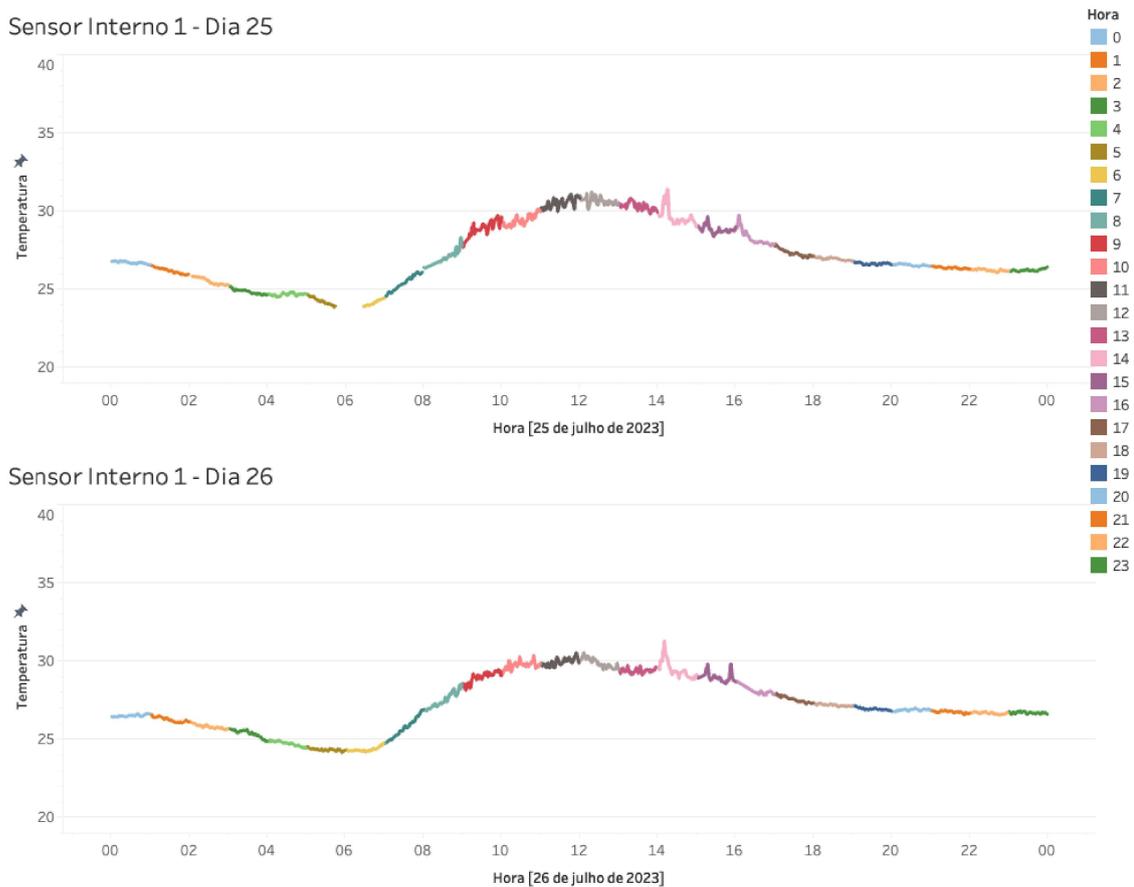
¹ <http://funceme.br/pcd/estacoes>

4.3.2 Resultados do experimento em uma planta real

4.3.2.1 Sensores de Folha

Os dados do Sensor Interno 1, que está localizado embaixo da copa do cajueiro, são mostrados nas Figuras 15 e 16. Os gráficos exibem as leituras de temperatura da folha ao longo de 4 dias.

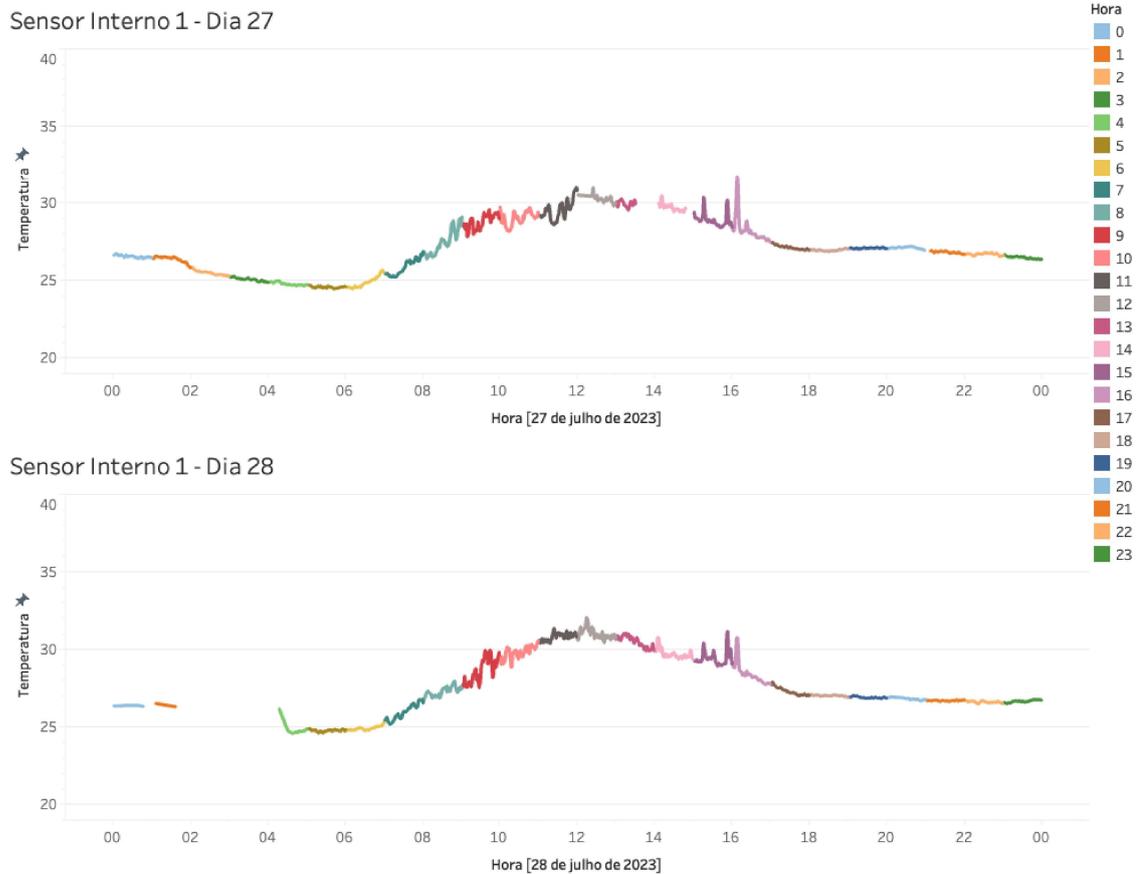
Figura 15 – Sensor Interno 1 - Dias 25 e 26



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas Figuras 15 e 16, cada cor representa uma hora do dia, conforme a legenda da figura. Observa-se que a temperatura começa a diminuir por volta de 0 horas do dia até ter a temperatura mínima por volta de 5 horas da manhã. Em seguida, com o amanhecer do dia a temperatura gradualmente aumenta, tendo seu ápice por volta de 12 horas. A temperatura mínima registrada nos cinco dias foi de 23.85° e a máxima foi 32.07°, conforme Tabela 3. Porém vale destacar que algumas medições de 11, 14 e 16 horas também se mostraram elevadas passando de 31°. Apesar desse sensor estar embaixo da copa, com o vento e a movimentação do sol o sensor em alguns momentos pode receber alguma luz do sol, aumentando assim sua temperatura e nos

Figura 16 – Sensor Interno 1 - Dias 27 e 28



informando uma leitura variável. O gráfico mostra que no período da manhã, com o fator da luz solar, há uma maior variabilidade de leituras em todos os dias. Já no período sem a presença do sol as leituras são mais uniformes, menos contrastantes em relação ao tempo. Na Tabela 3 foram apresentadas métricas estatísticas do Sensor Interno 1.

Tabela 3 – Sensor Interno 1

Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	23,85	31,40	27,25	1,95	3,80
26	24,14	31,30	27,20	1,73	3,00
27	24,44	31,75	27,08	1,67	2,80
28	24,60	32,07	27,76	1,94	3,76
Todos	23,85	32,07	27,31	1,84	3,39

Fonte: elaborada pelo autor.

No Sensor Interno 2 (Figuras 17 e 18) nota-se que em alguns momentos as leituras de temperaturas estão muito abaixo do esperado para a hora do dia monitorada. Diversas vezes pela manhã há medições com menos de 20 graus, incompatível com o clima da região, mesmo na sombra, com um nítido problema técnico nas suas medições. Excluindo esses *outliers*, o

comportamento desse sensor é parecido com o Sensor Interno 1. Os sensores Interno 1 e Interno 2 estão a aproximadamente 40 cm de distância um do outro, os dois embaixo da copa. Na Tabela 4 são apresentadas métricas estatísticas deste sensor.

Figura 17 – Sensor Interno 2 - Dias 25 e 26

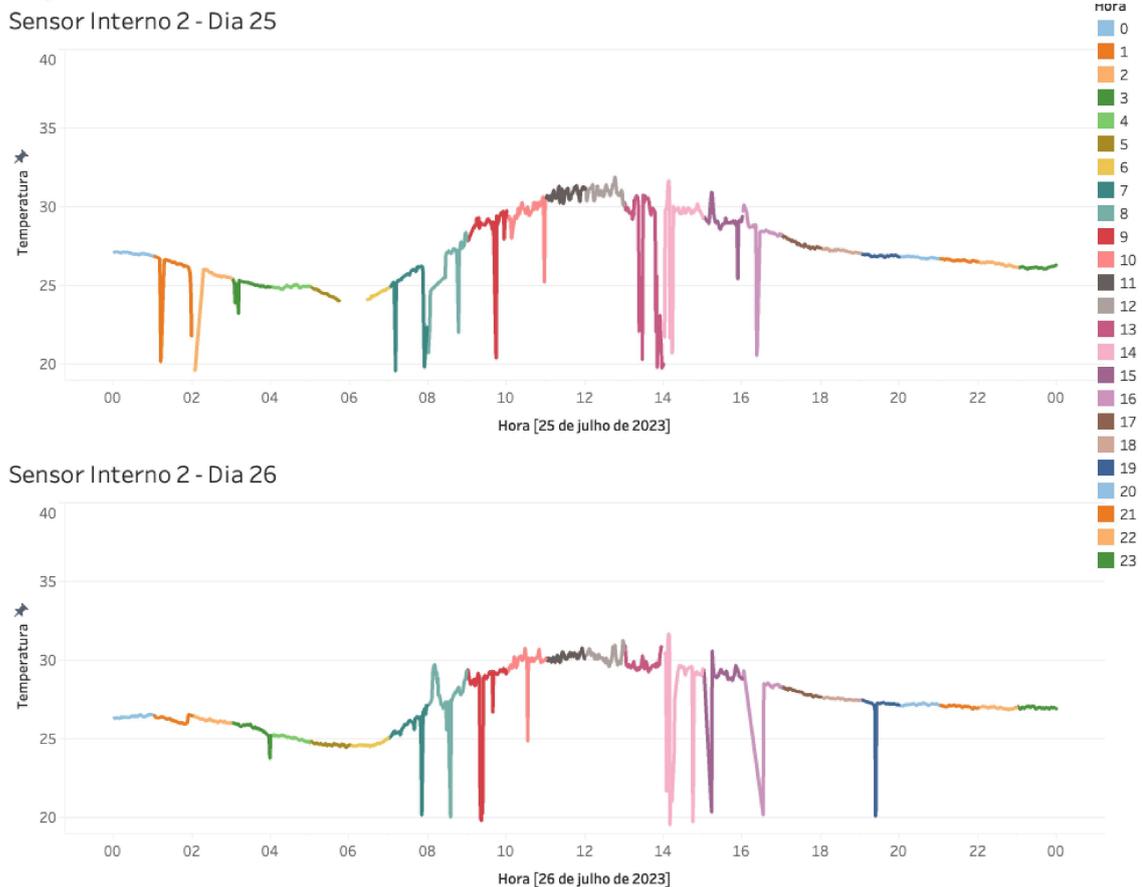


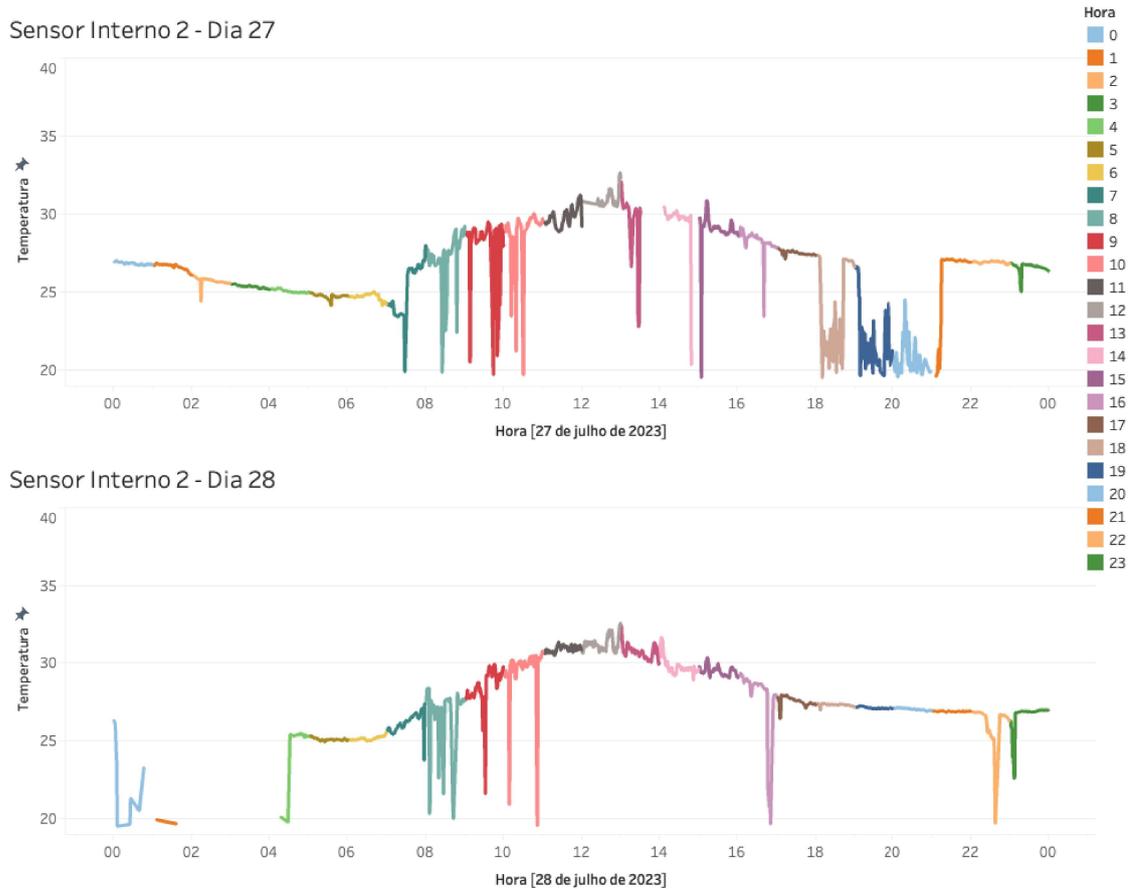
Tabela 4 – Sensor Interno 2

Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	19,59	31,92	27,27	2,15	4,64
26	19,57	31,69	27,37	1,89	3,58
27	19,54	32,66	26,64	2,54	6,45
28	19,54	32,60	27,76	2,18	4,77
Todos	19,54	32,66	27,25	2,24	5,00

Fonte: elaborada pelo autor.

As Figuras 19 e 20 mostram os dados do Sensor Externo 3, cuja localização é em cima da copa do cajueiro, virado para o nascente. Percebe-se temperaturas no horário entre 11 e 12 horas passando de 38 graus, enquanto os sensores mais internos não passavam de 33 graus. Existe também uma maior variabilidade de medições, por ser um sensor mais exposto

Figura 18 – Sensor Interno 2 - Dias 27 e 28



Fonte: Elaborada pelo autor.

aos intempéries climáticos como chuva, vento, nuvens de sombra. Na Tabela 5 são apresentadas métricas estatísticas deste sensor.

Tabela 5 – Sensor Externo 3

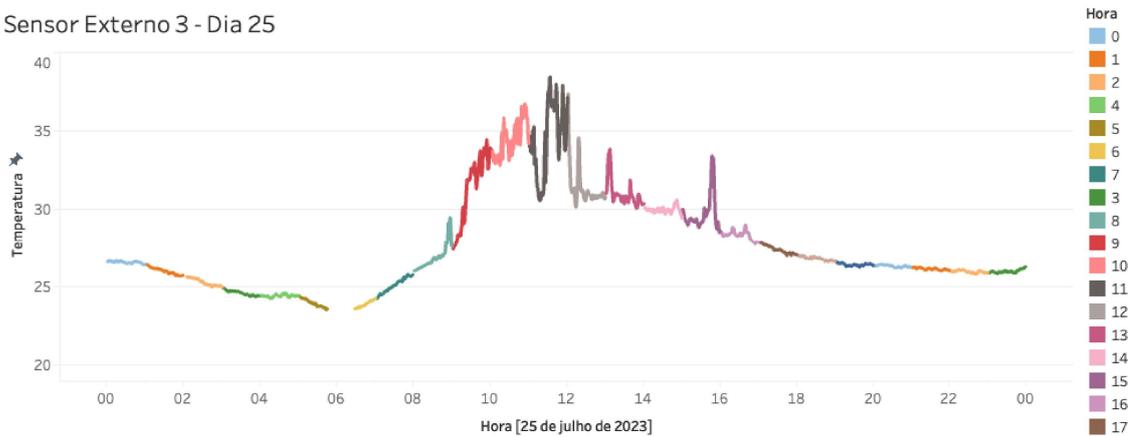
Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	23,54	38,46	27,75	3,14	9,85
26	23,78	36,81	27,55	2,76	7,59
27	24,17	38,43	27,13	2,09	4,39
28	24,17	37,39	27,92	2,59	6,72
Todos	23,54	38,46	27,58	2,69	7,25

Fonte: elaborada pelo autor.

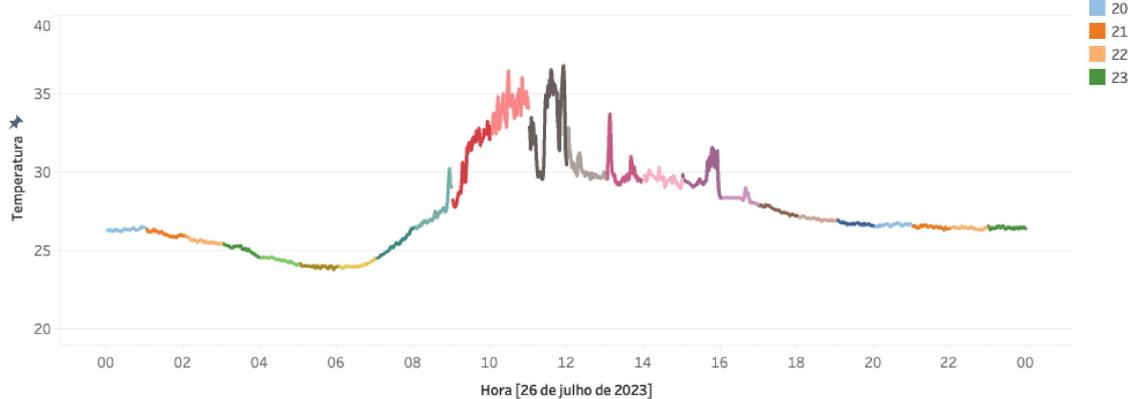
As figuras 21 e 22 mostra os dados do Sensor Intermediário 4, que fica localizado próximo ao Sensor Externo 3, embaixo da copa. As temperaturas estavam mais altas entre 9h e 10h da manhã em todos os dias. Este sensor está voltado para o nascente, portanto, o sol atinge a folha do sensor ao nascer do dia e depois ele fica na sombra no restante das horas. Nota-se que este sensor tem menos variabilidade de medições que o Sensor Externo 3, por ter menor exposição solar. Sua maior medição de temperatura registrada é 33,78 graus. Com gráfico geral

Figura 19 – Sensor Externo 3 - Dias 25 e 26

Sensor Externo 3 - Dia 25



Sensor Externo 3 - Dia 26



Fonte: Elaborada pelo autor.

de temperatura mais próximo dos sensores internos. Na Tabela 6 são apresentadas algumas métricas estatísticas deste sensor.

Todos os sensores de folhas apresentaram uma queda na transmissão de dados às 1h36m do dia 28, retornando 4h16m da manhã do mesmo dia. Uma hipótese para isso seria uma possível falha no carregamento da bateria solar, que voltava a ser carregada ao amanhecer do dia.

Tabela 6 – Sensor Intermediário 4

Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	24,07	33,13	27,74	2,28	5,20
26	24,28	33,78	27,62	2,01	4,06
27	24,68	32,05	27,40	1,72	2,97
28	24,59	32,73	28,03	1,98	3,92
Todos	24,07	33,78	27,69	2,02	4,09

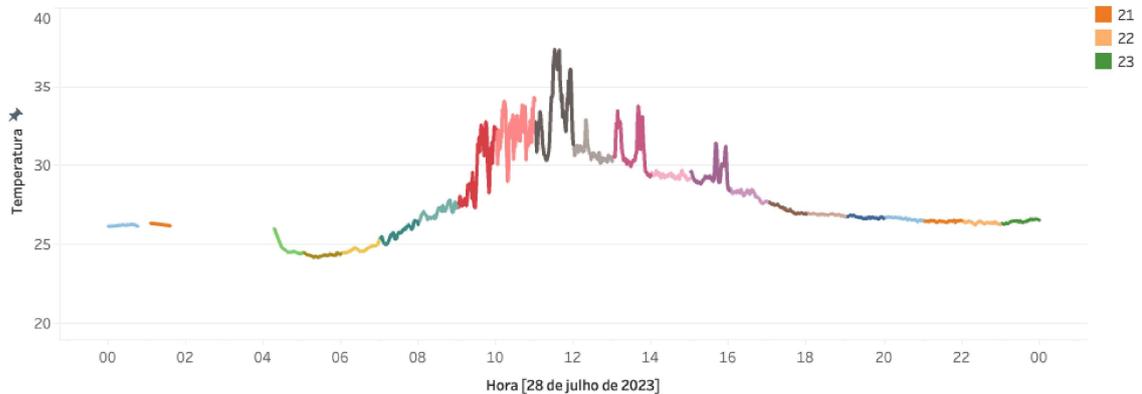
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 20 – Sensor Externo 3 - Dias 27 e 28

Sensor Externo 3 - Dia 27



Sensor Externo 3 - Dia 28



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2.2 Psicômetro

O sensor Psicrômetro Aspirado mede a temperatura do ambiente e a umidade. Ele está localizado próximo ao tronco do cajueiro, que é a parte mais interna e central da planta. Pode-se observar o comportamento de medições desse sensor nas Figuras 23, 24, 25 e 26. A temperatura máxima é atingida por volta de 12 horas, com valor de 32 graus. Já na medição de umidade, observa-se que existe uma relação próxima a de temperatura de maneira inversamente proporcional, com ápices praticamente opostos. Na figura 27 observamos a correlação negativa entre Umidade e Temperatura. Umidade = $-3,87208 * T5 + 179,8$ e Coeficiente de determinação: 0,715045. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas algumas métricas estatísticas deste sensor.

Analisando a temperatura nos sensores internos e externos da planta temos os gráficos da Figura 28 e da Figura 30. Tanto no primeiro quanto no segundo gráfico vemos grandes diferenças percentualmente entre os sensores nos períodos de maior incidência solar. A temperaturas máximas se destacam com maior porcentagem em relação as médias e mínimas apresentadas em cada hora do dia. Nas temperaturas do Sensor Psicrômetro Aspirado, localizado

Figura 21 – Sensor Intermediário 4 - Dias 25 e 26

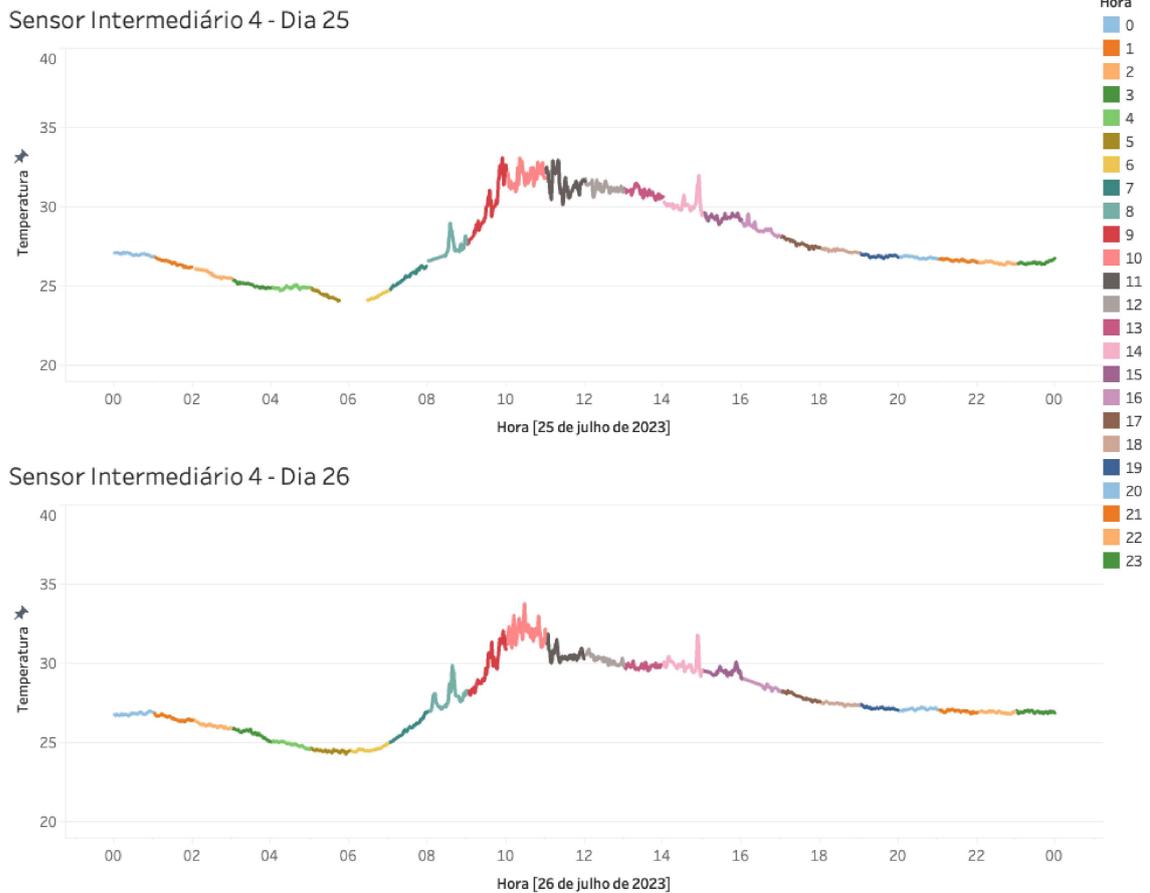


Tabela 7 – Psicrômetro Aspirado - Temperatura

Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	23,00	32,00	27,49	2,40	5,74
26	24,00	31,00	27,90	1,83	3,37
27	24,00	31,00	27,47	1,99	3,96
28	24,00	31,00	27,42	2,05	4,21
Todos	23,00	32,00	27,55	2,04	4,18

Fonte: elaborada pelo autor.

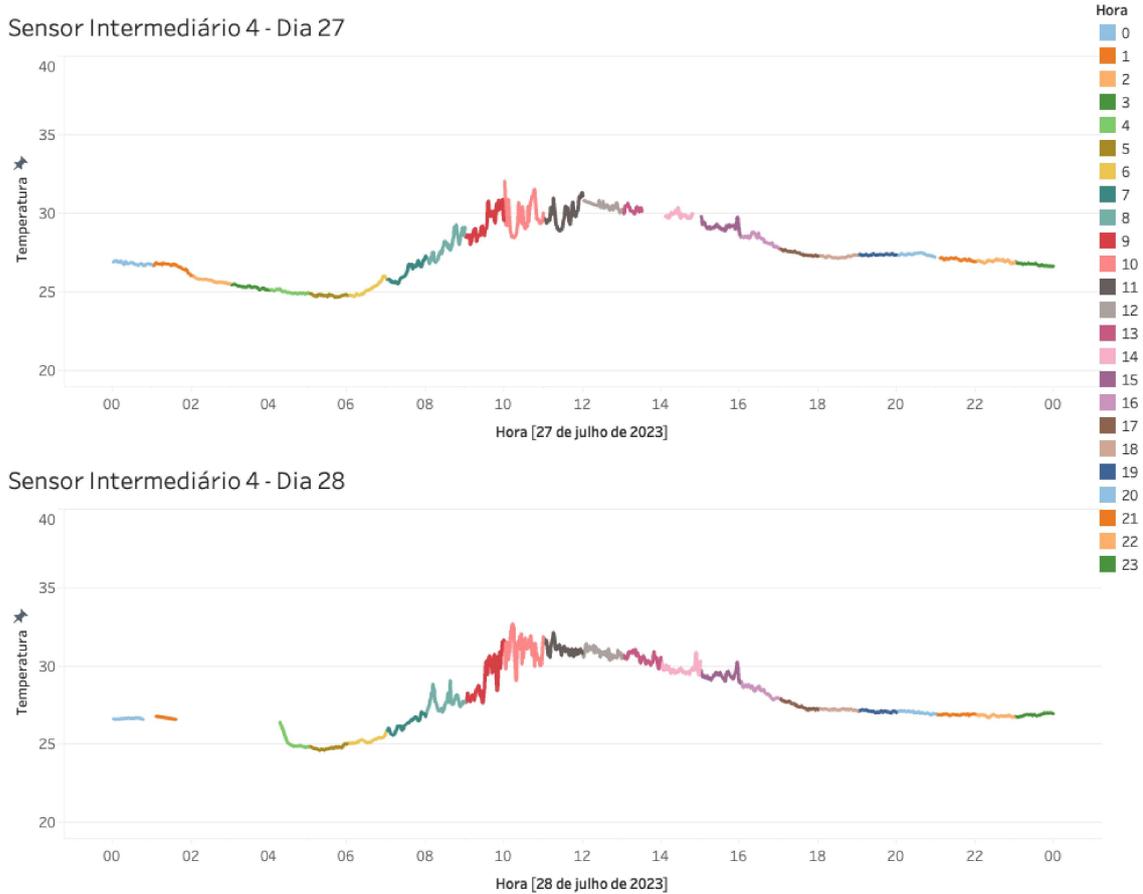
Tabela 8 – Psicrômetro Aspirado - Umidade

Dia	Umidade Mínima	Umidade Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	53,00	88,00	73,07	12,23	149,55
26	55,00	85,00	71,60	10,59	112,08
27	60,00	91,00	76,89	9,22	84,98
28	61,00	94,00	78,88	9,84	96,78
Todos	53,00	94,00	75,90	10,60	112,28

Fonte: elaborada pelo autor.

mais próximo ao troco da planta, região mais interna, com mais sombras, a porcentagem de diferença se torna maior que o Sensor de folhas Interno 1. No gráfico alguns números estão se sobrepondo a outros na parte de baixo por terem leituras muito próximas, praticamente iguais,

Figura 22 – Sensor Intermediário 4 - Dias 27 e 28



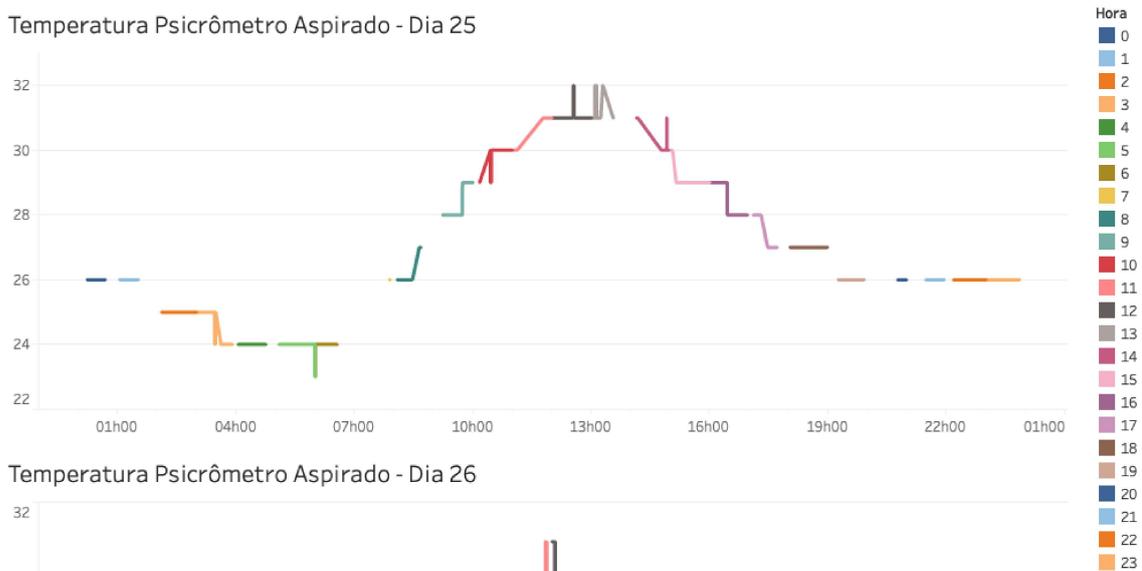
tornando difícil a visualização dos valores, nos mostrando mais uma vez o quanto a exposição solar influencia. As diferenças de temperaturas ocorrendo na presença de exposição solar. Para uma melhor visualização, as Figuras 29 e 31 possuem o detalhamento dos dados para o dia 25.

4.3.2.3 Estações Meteorológicas do Itaperi e da UFC e Sensores

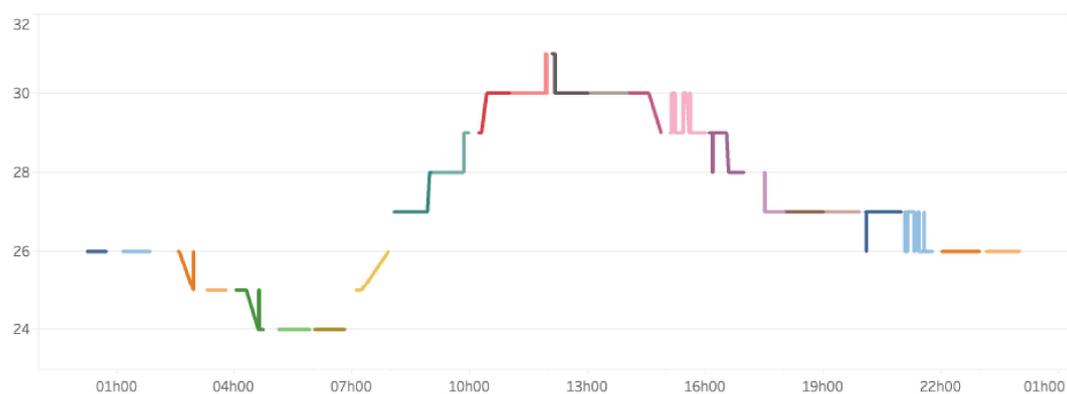
A Estação Meteorológica do Itaperi fornece os seguintes dados horários de umidade e temperatura: Média, Máximo e Mínimo. Na Figura 32, pode-se observar que o ápice da temperatura na Estação Meteorológica Itaperi fica às 16h com 32.11°, diferente da temperatura medida pelo sensor Psicrômetro que são às 12h com 31.09 °. Temos então valores próximos nas temperaturas do ápice no dia 25, repetindo um comportamento próximo nos dias seguintes, porém em horários diferentes. Em relação a umidade tem-se tanto para o Psicrômetro quanto para a Estação Meteorológica do Itaperi uma relação próxima, inversamente proporcional entre Umidade e Temperatura. Nas Tabelas 9 e 10 são apresentadas algumas métricas estatísticas desta Estação Meteorológica.

Figura 23 – Temperatura do Psicrômetro Aspirado nos Dias 25 e 26

Temperatura Psicrômetro Aspirado - Dia 25



Temperatura Psicrômetro Aspirado - Dia 26



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 – Estação Meteorológica Itaperi - Temperatura

Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	23,02	33,23	27,51	2,56	6,58
26	23,16	32,28	27,47	2,43	5,91
27	23,54	32,32	27,41	2,37	5,63
28	24,02	32,61	27,66	2,16	4,68
Todos	23,02	33,23	27,51	2,39	5,71

Fonte: elaborada pelo autor.

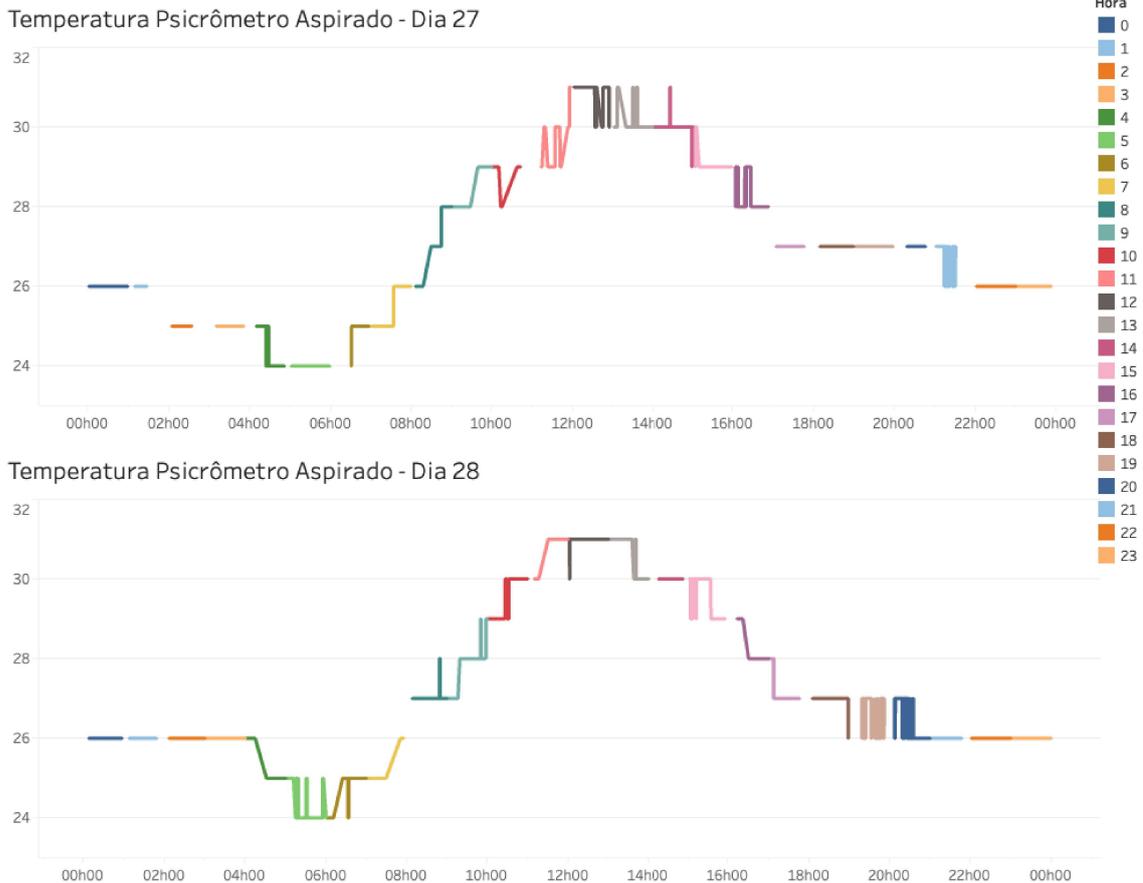
Tabela 10 – Estação Meteorológica Itaperi - Umidade

Dia	Umidade Mínima	Umidade Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	44,21	89,40	71,36	13,17	173,36
26	47,21	86,40	70,53	13,29	176,58
27	53,68	93,00	75,48	11,67	136,25
28	54,67	93,30	75,63	10,87	118,18
Todos	44,21	93,30	73,25	12,51	156,50

Fonte: elaborada pelo autor.

Observando a Figura 33 nota-se que a curva com a temperatura ápice da Estação Meteorológica Itaperi está um pouco mais a direita, indicando uma temperatura maior, encontrada um pouco mais tarde que os sensores do experimento. Nos sensores, o ápice de temperaturas

Figura 24 – Temperatura do Psicrômetro Aspirado nos Dias 27 e 28



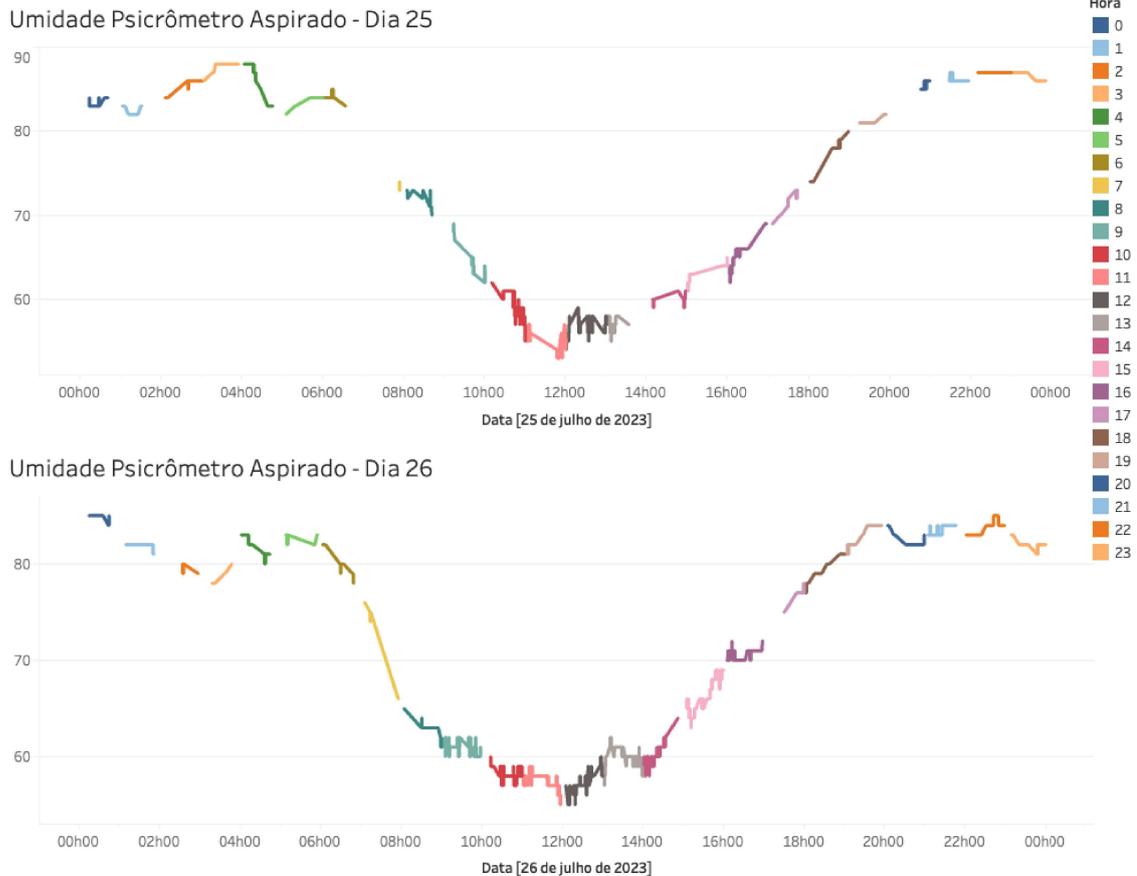
eram por volta de 12h e na estação por volta de 15h/16h. O Sensor Externo 3 apresenta as maiores temperaturas, indicando a forte incidência do sol no período diurno. Já no período noturno, as medições tanto da Estação do Itaperi quanto as dos sensores do experimento se aproximam. O sensor 2, por sua vez, teve nítida instabilidade.

O gráfico da Figura 34 mostra as temperaturas médias dos sensores e da Estação Meteorológica do Itaperi. Pode-se notar uma relação de distanciamento menor entre as medições porém com nítidas e impactantes diferenças de temperaturas entre Sensores Internos 1 e 2 versus Sensor Externo 3. Em alguns momentos a curva da Estação Meteorológica Itaperi ficou com ápice parecido ao Sensor Intermediário 4, porém em um horário temporal diferente, como visto nas figuras anteriores. Pode-se observar que ocorreu uma falha no Sensor interno 2.

Na Figura 35 pode-se observar as menores diferenças entre as curvas, com exceção do Sensor Interno 2, que apresenta problemas técnicos, durante muitas vezes registrou temperaturas bem abaixo da faixa normal para o período.

Da Estação Meteorológica da UFC foram fornecidos os dados de três dias de medições nos horários de 9h, 15h e 21 horas; nos dias 26, 27 e 28 de julho de 2023. Porém, no dia 27

Figura 25 – Umidade do Psicrômetro Aspirado nos dias 25 e 26



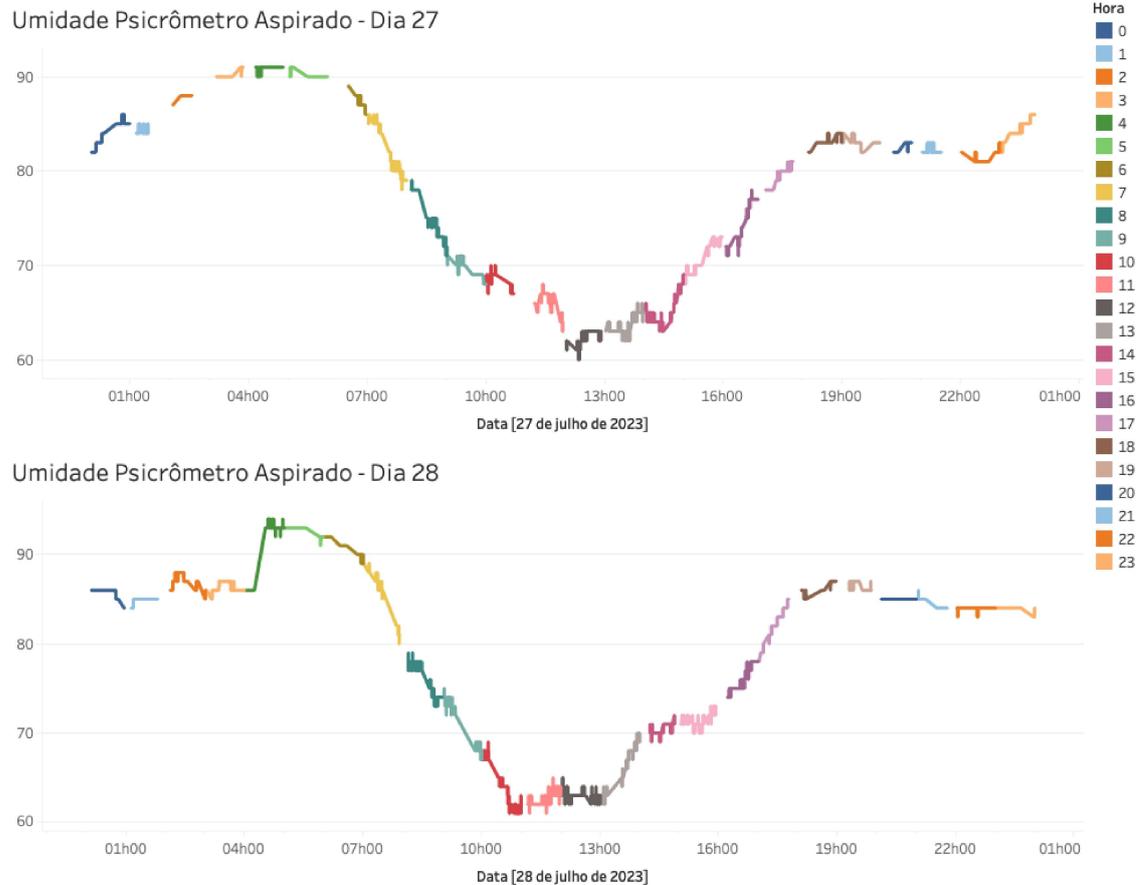
às 15h, houve uma falha na estação e esse dado não pode ser disponibilizado.

Na Figura 36, pode-se observar que pela manhã as médias de temperatura dos sensores Externo 3 e Sensor Intermediário 4 estavam bem mais altas em relação as outras. Depois das 15h elas tendiam a ficar com menor distanciamento e à noite essa tendência permanecia, ficando as 4 temperaturas mais próximas. A explicação para este efeito é a posição dos sensores que ficaram expostos em cima da copa, porém mais para o lado nascente. Às 9 da manhã estavam sendo atingidos pelo sol nascente, enquanto à tarde já estavam em grande parte na sombra, devido a extensa copa.

Em relação ao Psicrômetro Aspirado, na Figura 37 pode-se observar que a temperatura embaixo da copa à tarde era um pouco mais alta em relação ao dia, baixando com mais intensidade no período da noite. Já a umidade variou pouco entre manhã e tarde, sendo os picos maiores no período da noite.

Comparando as temperaturas de folhas com a temperatura medida no Psicrômetro Aspirado (parte central da planta, embaixo da copa) podem-se constatar que a dinâmica de temperaturas na própria planta tem muita variabilidade. Enquanto a temperatura máxima do

Figura 26 – Umidade do Psicrômetro Aspirado nos dias 27 e 28



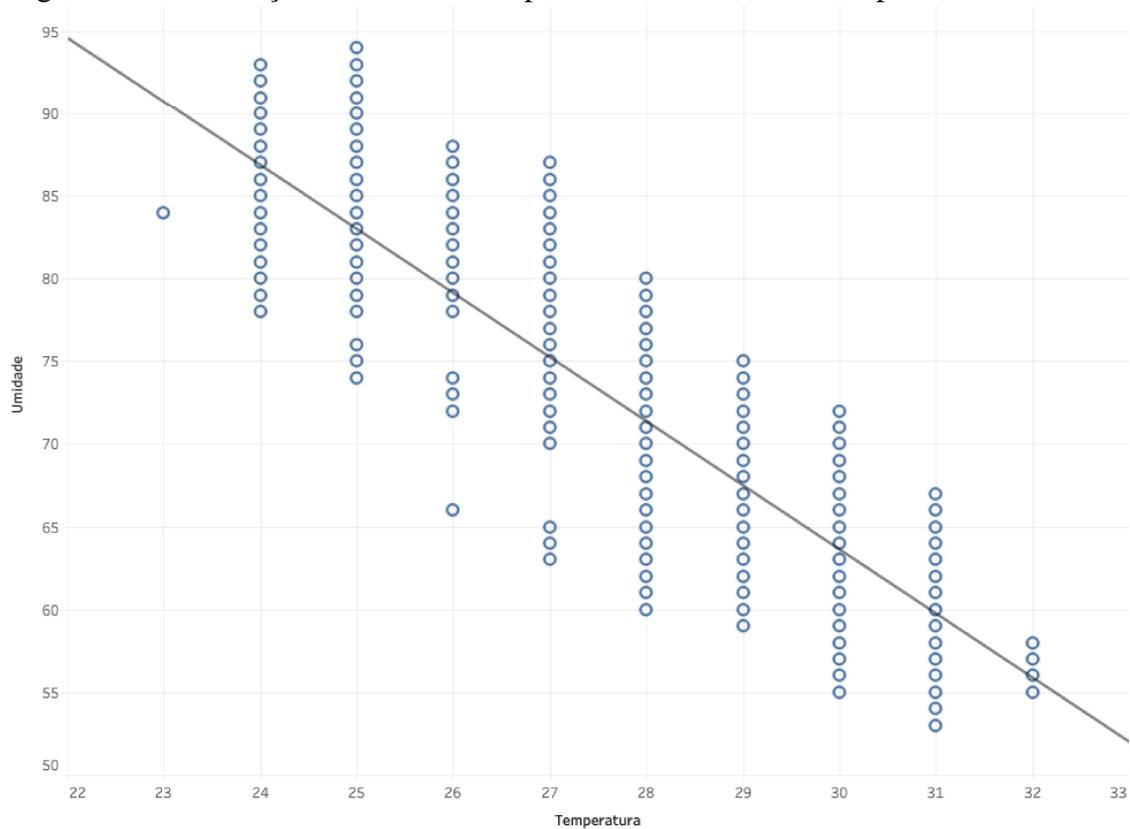
período no psicrômetro aspirado foi de 29,58 graus, a temperatura máxima nas folhas era 31,03 graus. Já na Estação Meteorológica da UFC (Figura 38) a máxima temperatura para o período foi de 31,2 graus, ficando bem próxima da temperatura máxima que medida pelos sensores.

Já a umidade máxima para o período do psicrômetro aspirado foi de 84,52 e 85 na Estação Meteorológica da UFC, porém em dias diferentes. A variação em relação à estação meteorológica da UFC é maior devido a fatores como irrigação, no período da manhã e à própria evapotranspiração da planta. Porém, a variação mantém-se em conformidade com a faixa de umidade esperada para o local e época do ano do experimento.

Nas Figuras 39 e 40 e 41, o comportamento é bastante semelhante em relação a umidade entre os sensores e a Estação Meteorológica Itaperi. Pode-se também observar que os pontos de medição fornecidos pela Estação Meteorológica da UFC, estes por sua vez, ficam mais próximos das medições dos sensores do experimento.

Observando a Figura 42, pode-se concluir que os pontos de temperatura da Estação Meteorológica da UFC se aproximam mais da Temperatura medida pelos sensores internos da copa do cajueiro, ficando mais distante das temperaturas medidas pela Estação Meteorológica do

Figura 27 – Correlação Umidade e Temperatura do Psicrômetro Aspirado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Itaperi e dos sensores Intermediário 4 e Externo 3. A da UFC por ser mais próxima fica com o microclima mais parecido com o do experimento do que a do Itaperi. Nas Tabelas 11 e Tabela 12 são apresentadas algumas métricas estatísticas da Estação Meteorológica da UFC.

Tabela 11 – Estação Meteorológica UFC - Temperatura

Dia	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	-	-	-	-	-
26	26,60	31,00	29,00	1,82	3,31
27	26,60	29,40	28,00	1,40	1,96
28	26,60	31,20	28,93	1,88	3,53
Todos	26,60	31,20	28,73	1,80	3,23

Fonte: elaborada pelo autor.

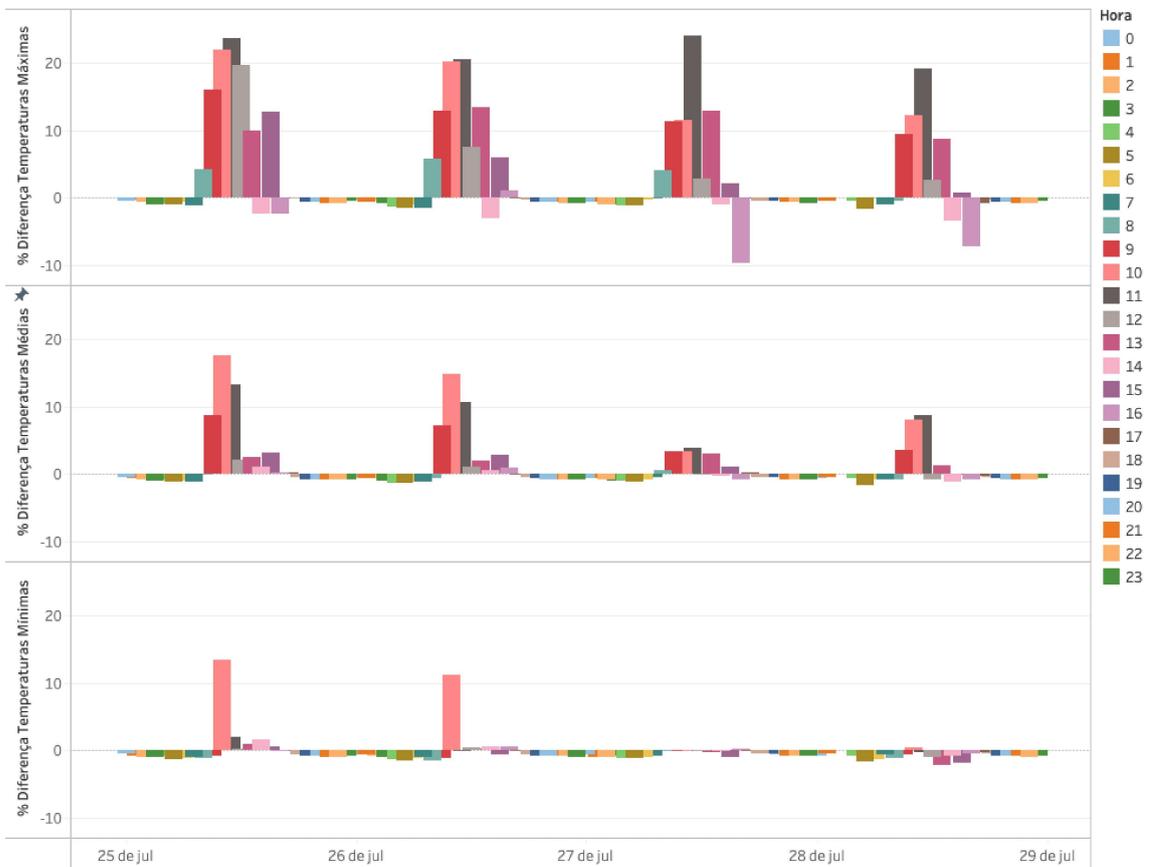
Tabela 12 – Estação Meteorológica UFC - Umidade

Dia	Umidade Mínima	Umidade Máxima	Média	Desvio Padrão	Variância
25	-	-	-	-	-
26	50,00	85,00	64,67	14,84	220,22
27	62,00	83,00	72,50	10,50	110,25
28	63,00	82,00	69,33	8,96	80,22
Todos	50,00	85,00	68,38	12,25	149,98

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 28 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Interno 1 e Sensor Externo 3

Porcentagem de Diferença entre Temperaturas do Sensor Interno 1 e Sensor Externo 3



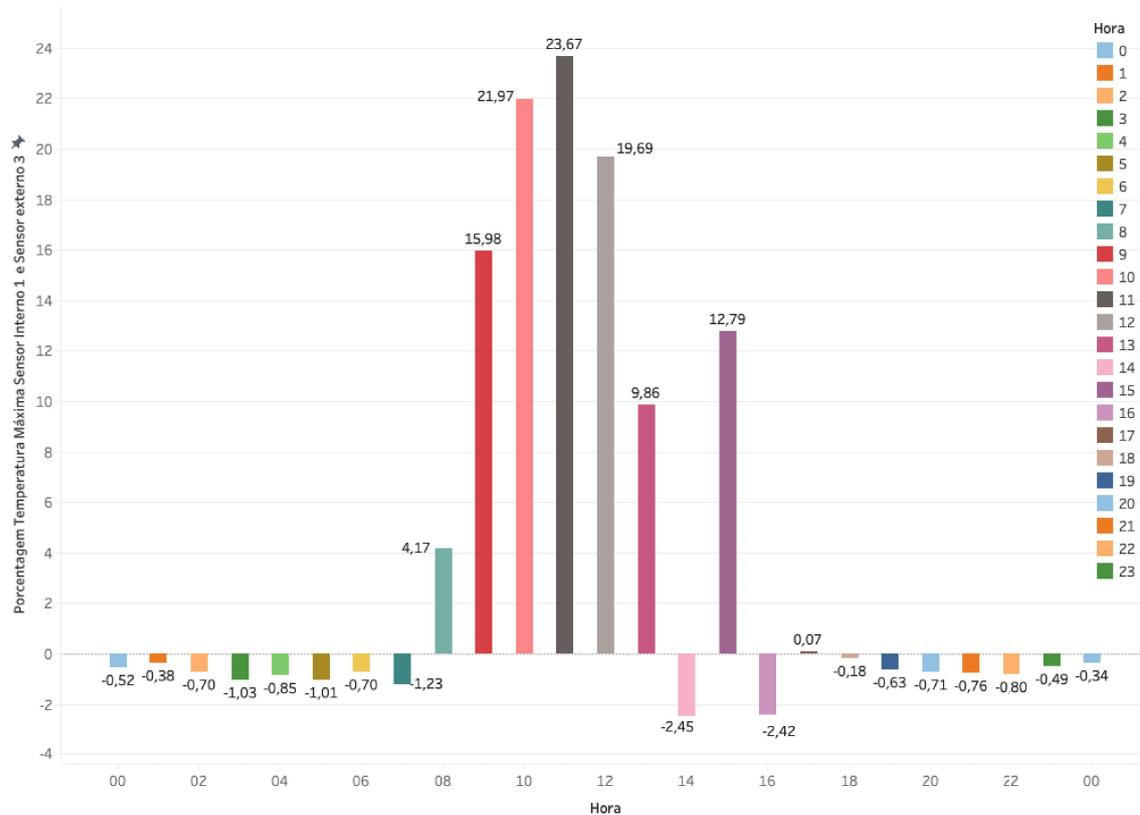
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2.4 Análises Finais

Neste experimento foram utilizados cinco sensores de temperatura e um sensor de umidade na própria planta. Observando apenas os dados gerados por eles pode-se afirmar que a posição de cada um na planta, em conjunto com a posição do sol em relação ao cajueiro, influíram diretamente na coleta de dados. No período da manhã o sensor mais externo, com incidência solar nascente, coletou temperaturas mais altas, em seguida o sensor intermediário. As menores temperaturas durante o dia foram coletadas através dos sensores internos e o sensor de temperatura do psicrômetro aspirado, mais próximo ao tronco da planta, região mais central. As diferenças entre eles percentualmente em cada dia passaram de 20% nos três primeiros dias, sendo a menor diferença máxima registrada no último dia em 19,19°. Com uma porcentagem tão alta de diferenças de temperaturas, o microclima não pode deixar de ser incluído nas análises. No período da noite as medições ficaram bem próximas, o que nos leva a afirmar que o fator de incidência solar teve vital relevância.

Figura 29 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Interno 1 e Sensor Externo 3 no dia 25

Porcentagem de Diferença entre Temperaturas Máximas do Sensor Interno 1 e Sensor Externo 3 no Dia 25



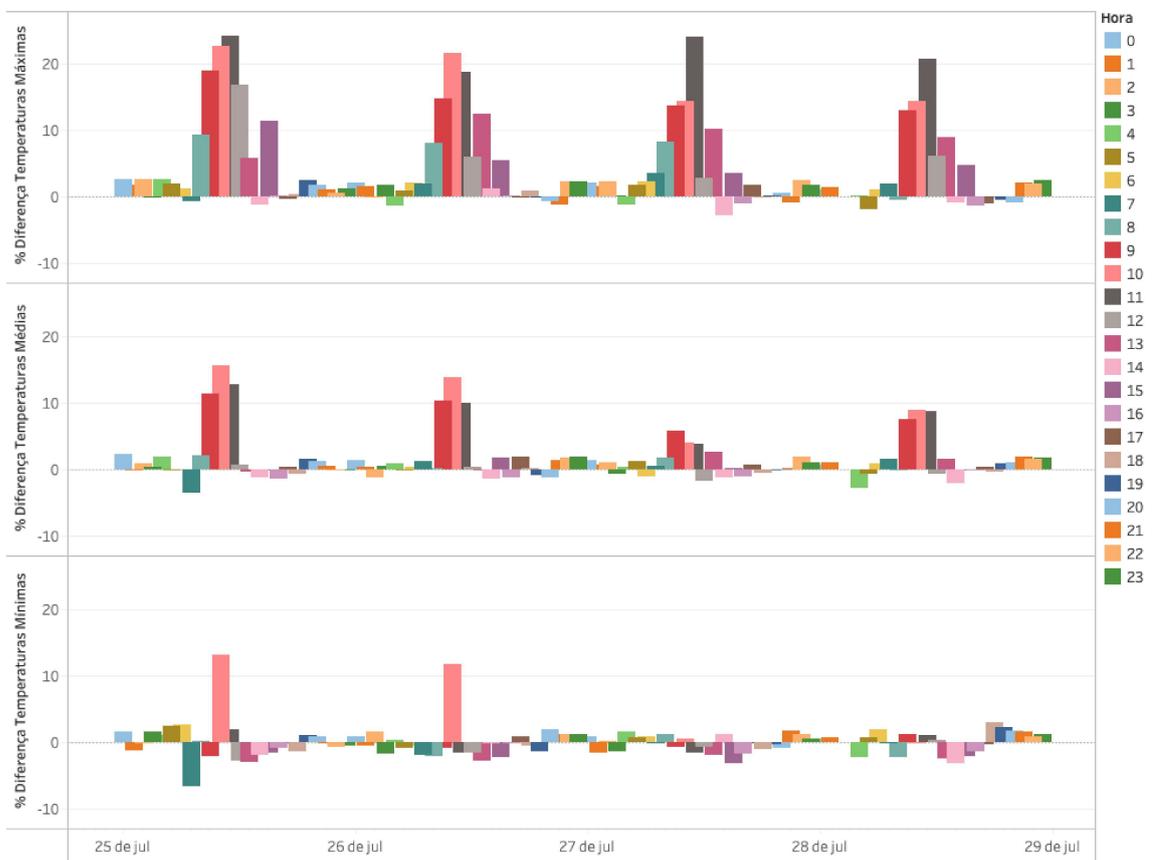
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para um melhor estudo e discussão seria interessante o uso de um outro sensor de folhas externo na região poente da planta, medindo as temperaturas com a incidência solar poente. Com mais esse dado poderia ser avaliado se existe diferenças relevantes de exposição solar entre os dois sensores externos. No caso de copas grandes, como esta planta, onde o diâmetro passa de 5 metros, a questão se torna mais necessária.

As Estações Meteorológicas próximas fornecem principalmente a validação que os dados de temperaturas e umidade coletados pelos sensores estão em uma faixa esperada, no que se refere ao sensores internos. As curvas próximas em relação ao tempo também sugerem conformidade. No entanto não deixam de haver diferenças entre o que é coletado na copa da planta nas diferentes posições com o registrado nas estações ao longo do tempo.

Figura 30 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Psicrômetro e Sensor Externo 3

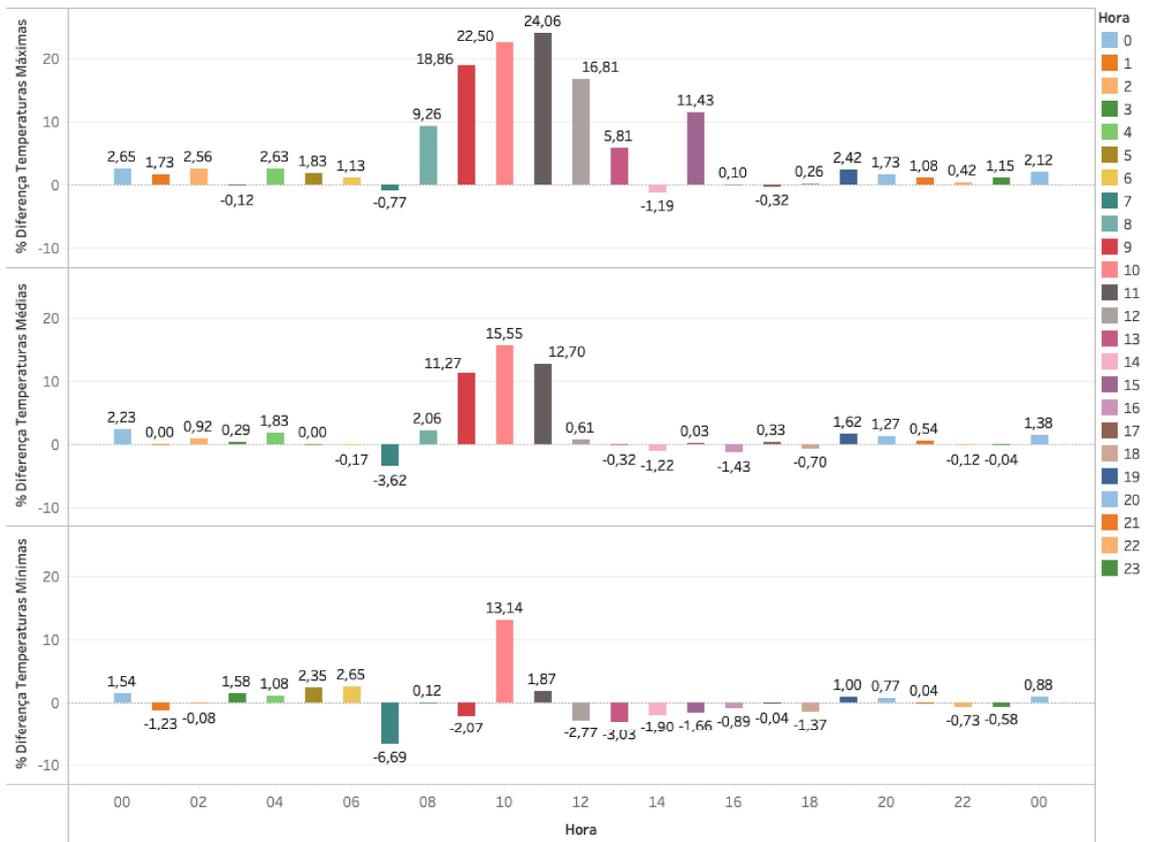
Porcentagem de Diferença entre Temperaturas do Sensor Psicrômetro e Sensor Externo 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

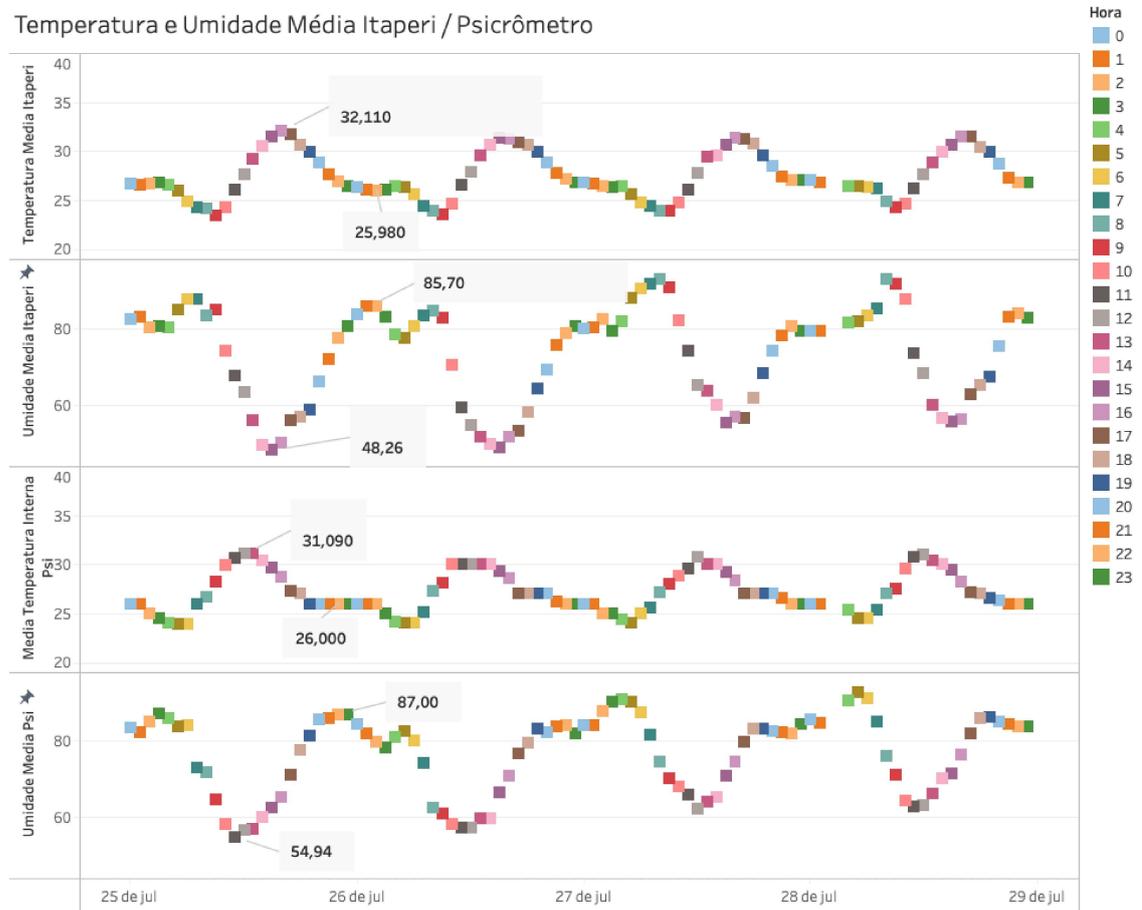
Figura 31 – Porcentagem de Diferença entre Temperatura do Sensor Psicrômetro e Sensor Externo 3 no Dia 25

Porcentagem de Diferença entre Temperaturas do Sensor Psicrômetro e Sensor Externo 3 no Dia 25



Fonte: Elaborada pelo autor.

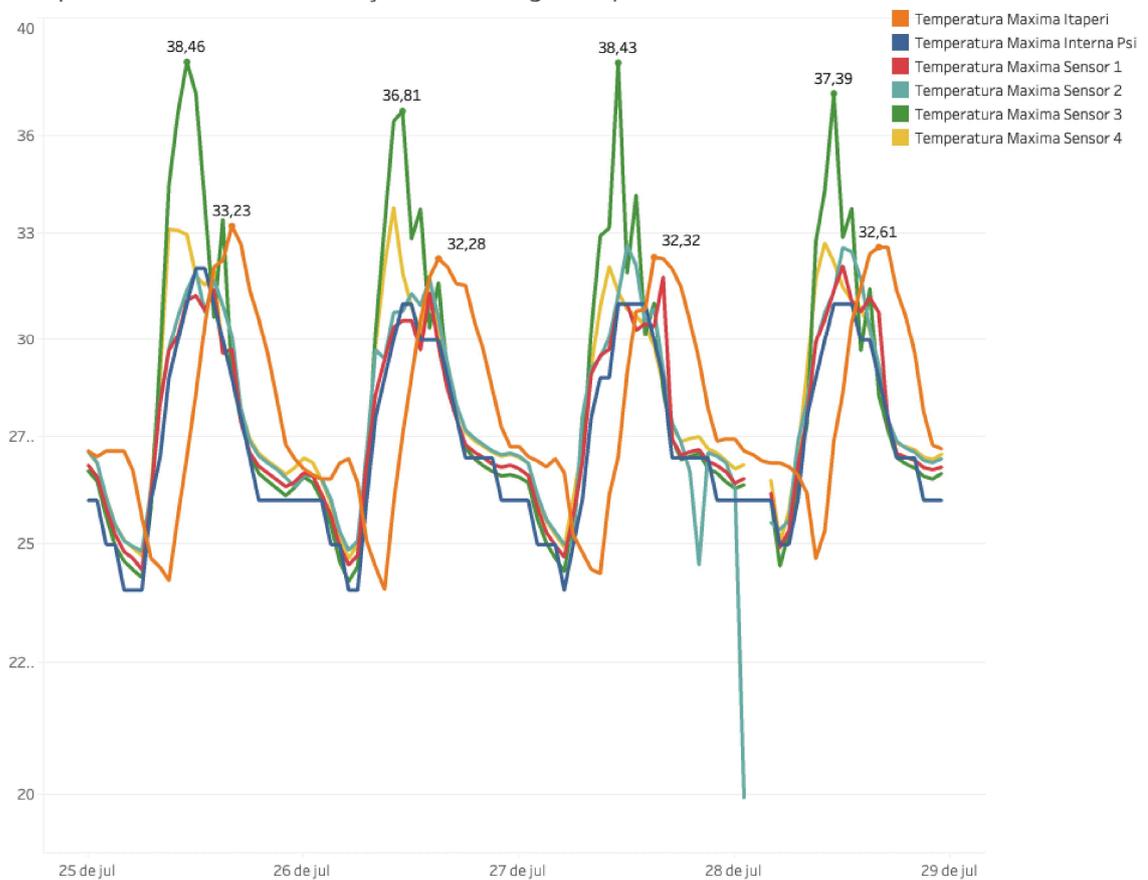
Figura 32 – Temperatura e Umidade Média Itaperi / Psicrômetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Temperaturas Máximas Itaperi / Sensores

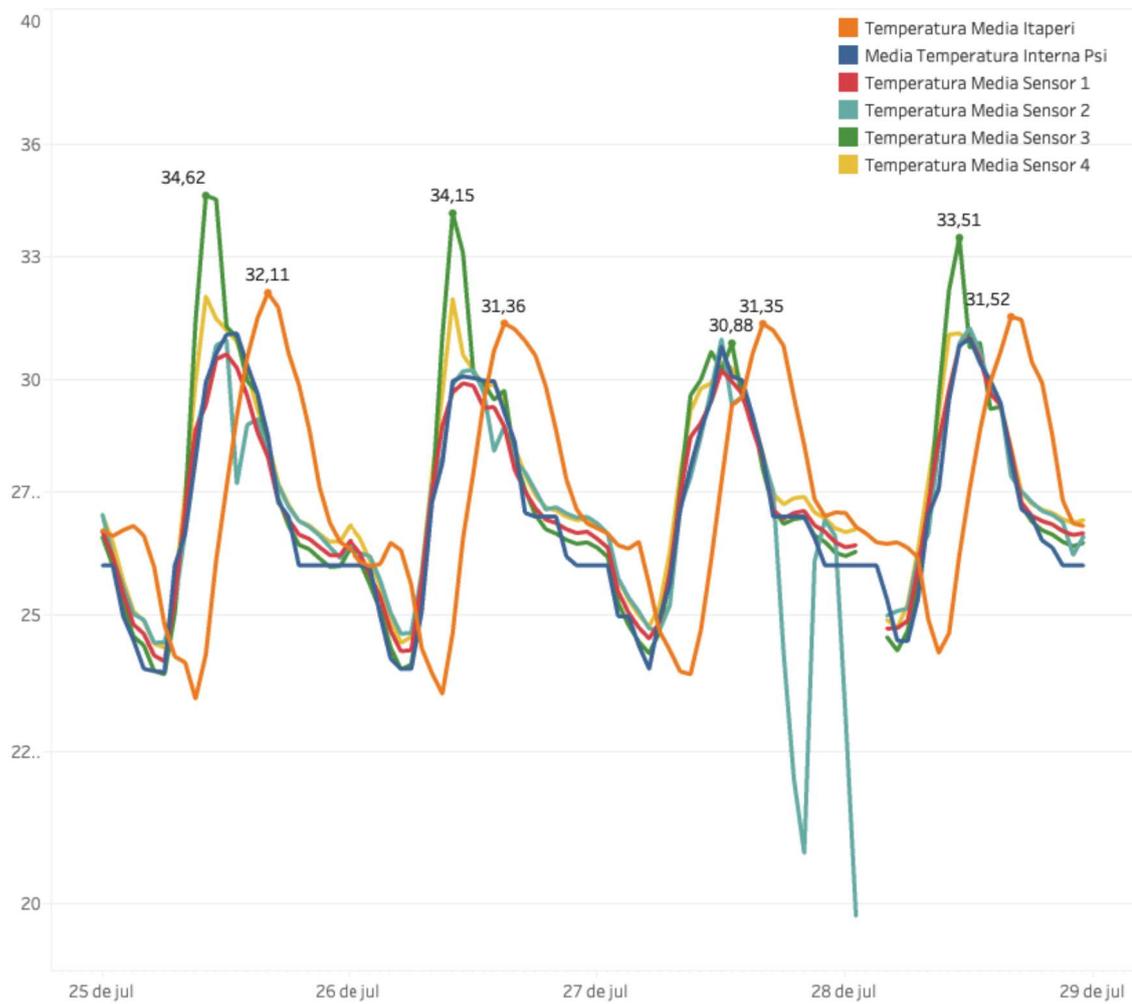
Temperaturas Máximas da Estação Meteorológica Itaperi e Sensores



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Temperaturas Médias Itaperi / Sensores

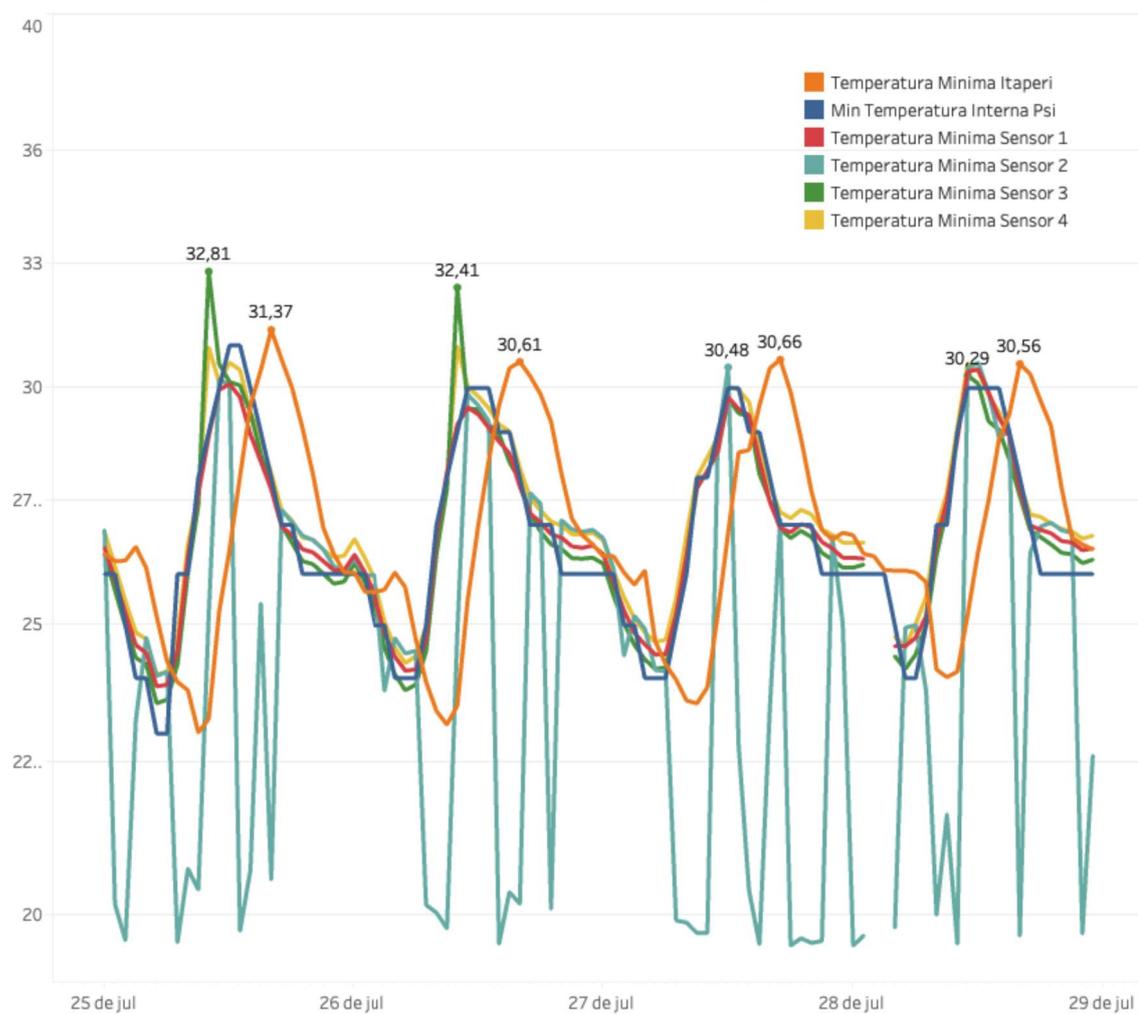
Temperaturas Médias da Estação Meteorológica Itaperi e Sensores



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 – Temperaturas Mínimas Itaperi / Sensores

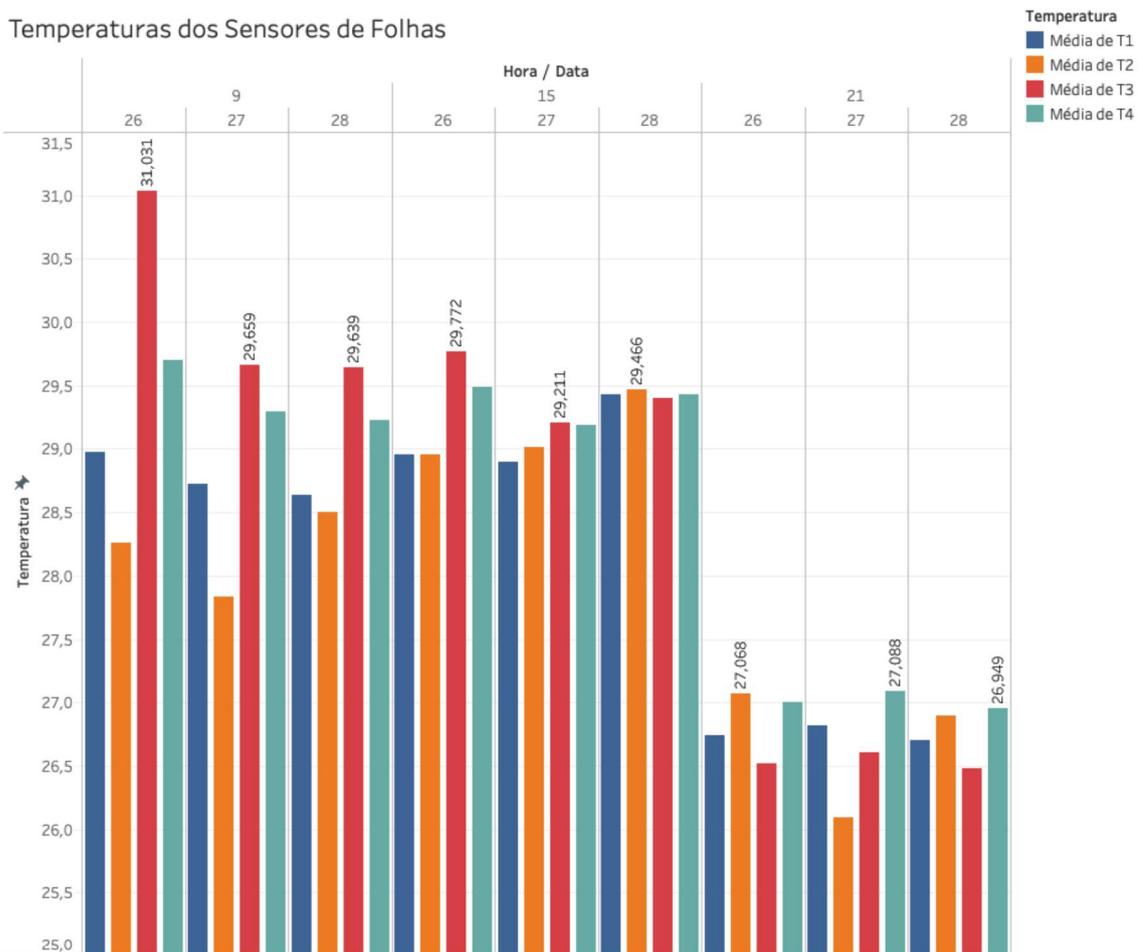
Temperaturas Mínimas da Estação Meteorológica Itaperi / Sensores



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Sensores de Temperatura

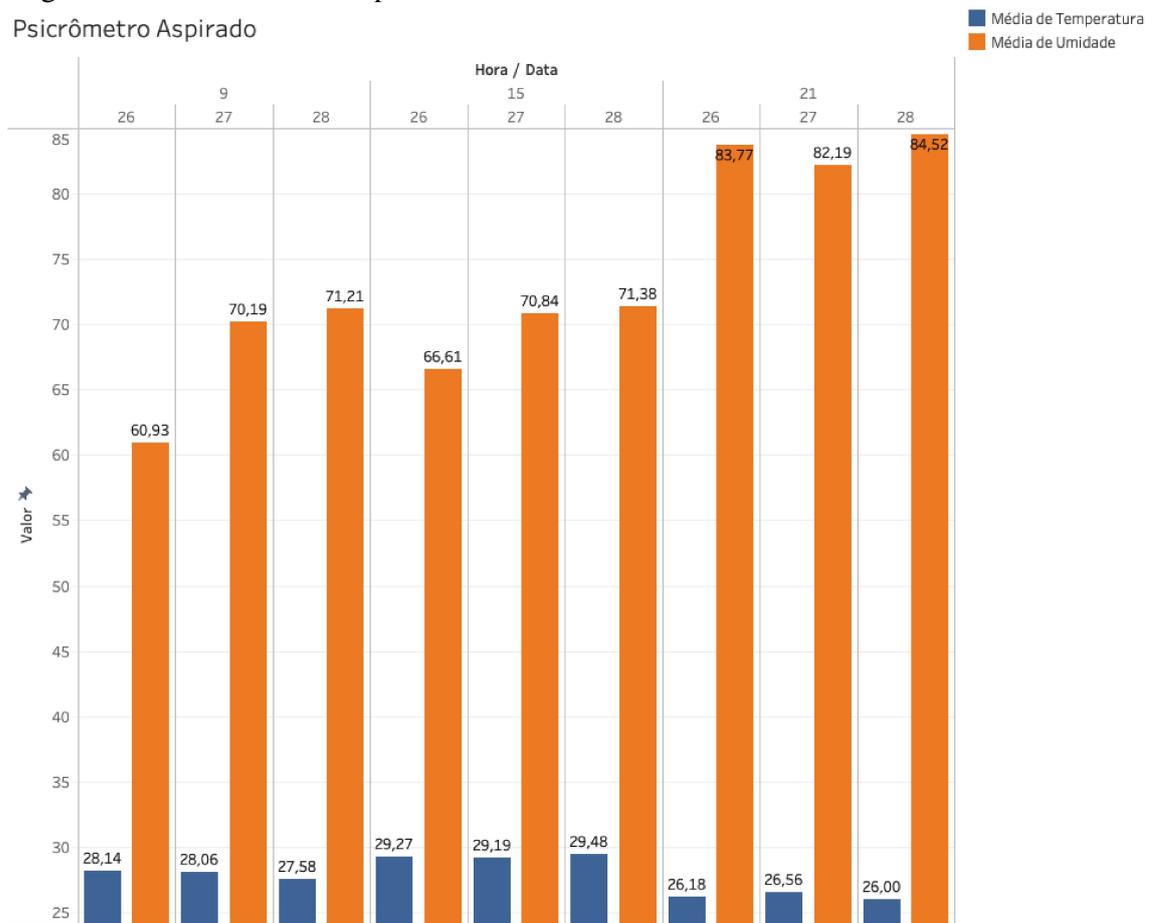
Temperaturas dos Sensores de Folhas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Psicrometro Aspirado

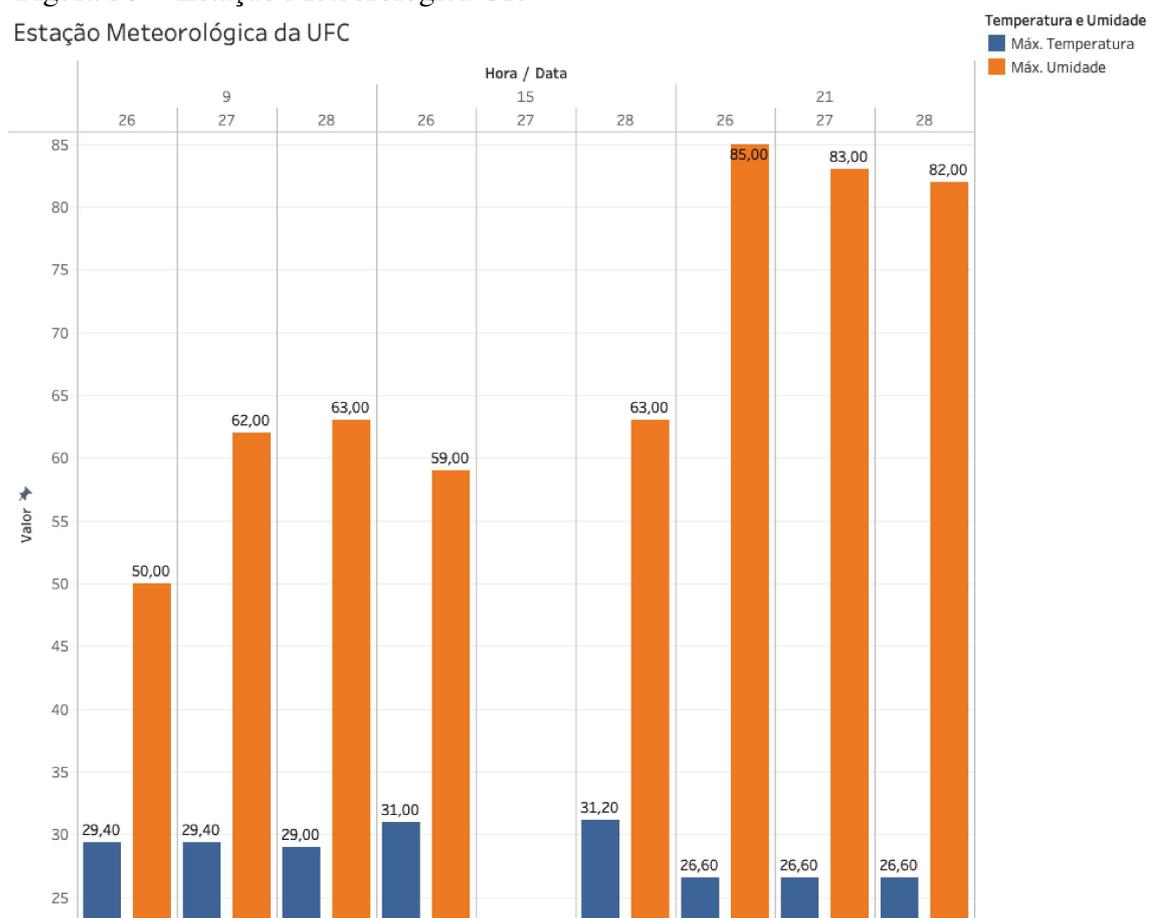
Psicrômetro Aspirado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Estação Meteorológica Ufc

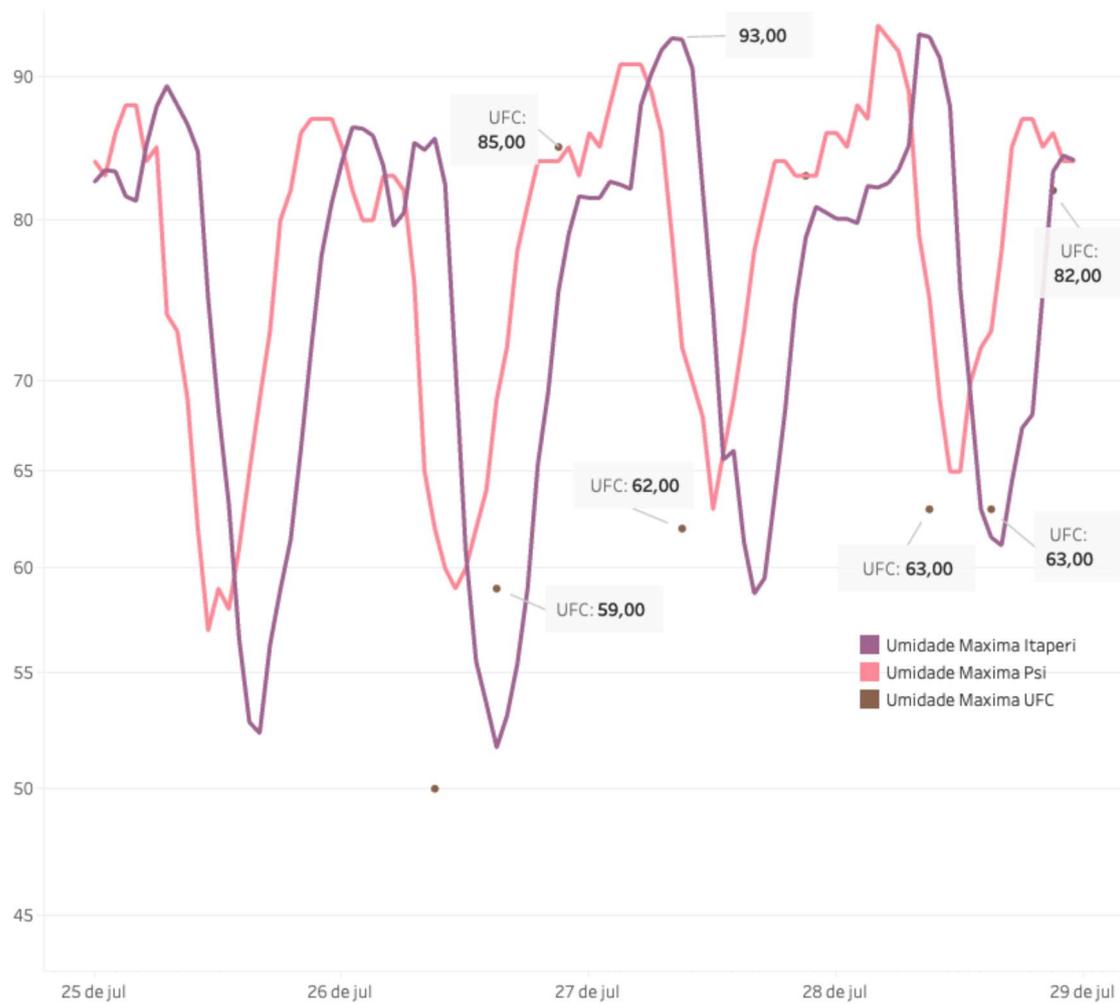
Estação Meteorológica da UFC



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Umidades Máximas Itaperi, Ufc e Psicômetro

Umidades Máximas da Estação Meteorológica Itaperi, UFC e Sensor Psicrometro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Umidades Médias Itaperi, Ufc e Psicrômetro

Umidades Médias da Estação Meteorológica Itaperi, UFC e Sensor Psicrômetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

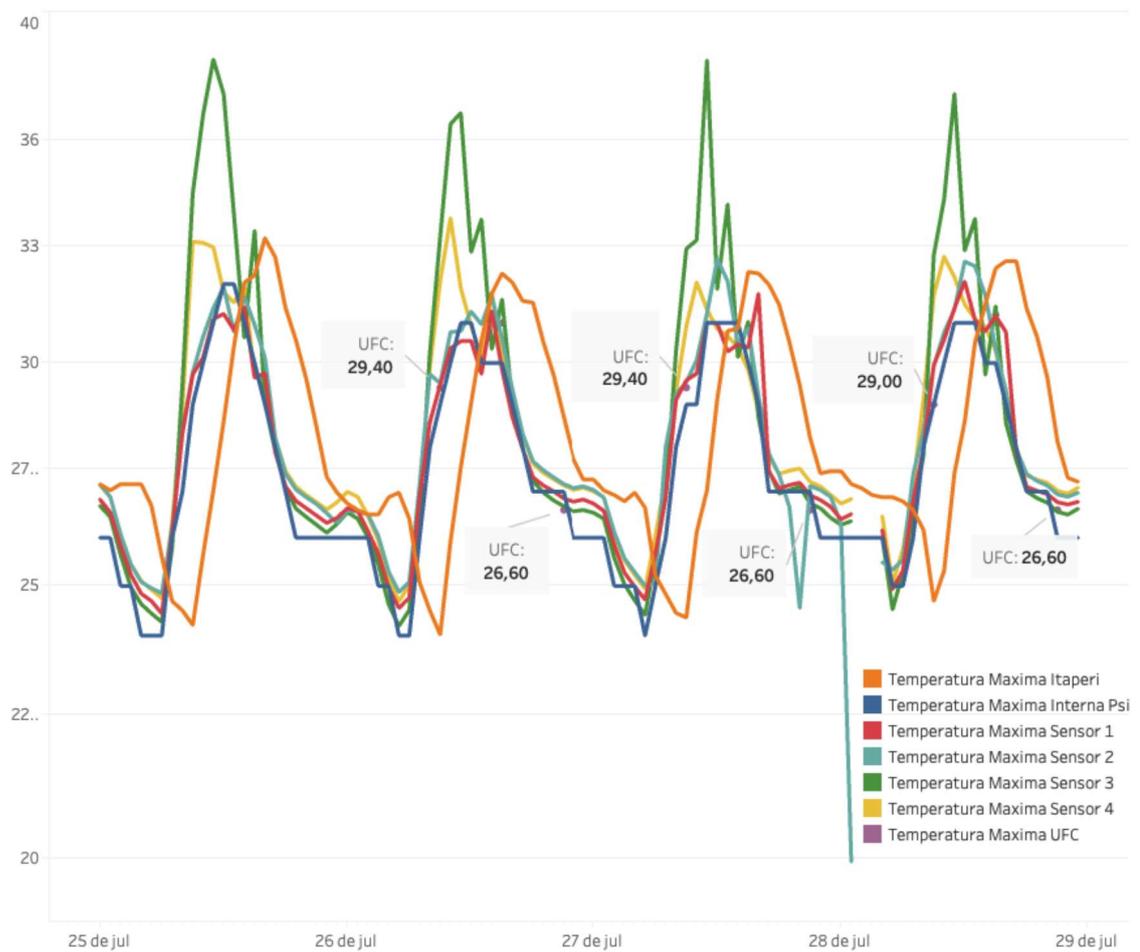
Figura 41 – Umidades Mínimas Itaperi, Ufc e Psicrômetro

Umidades Mínimas da Estação Meteorológica Itaperi, UFC e Sensor Psicrômetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42 – Temperaturas Máximas Itaperi, UFC e Sensores
 Temperaturas Máximas da Estação Meteorológica Itaperi, UFC e Sensores



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposto um Sistema de Internet das Coisas para estudo do microclima vegetal com captação de dados através de sensores vestíveis de temperatura e umidade localizados em pontos estratégicos da planta para análise do microclima vegetal. Em seguida, em conjunto com a obtenção de dados das estações meteorológicas mais próximas, foi feita a análise de variação de componentes climáticos.

Foram realizados um experimento em laboratório e um experimento real em uma planta para avaliação do microclima. No experimento real, foram utilizados cinco sensores de temperatura vestíveis e um sensor de umidade na própria planta. Observando apenas os dados gerados por eles pode-se afirmar que a posição de cada um na planta, em conjunto com a posição do sol em relação ao cajueiro, influíram diretamente na coleta de dados.

As Estações Meteorológicas próximas avaliadas forneceram principalmente a validação de que os dados de temperaturas e umidade coletados pelos sensores estão em uma faixa esperada, no que se refere aos sensores internos. As curvas próximas em relação ao tempo também sugerem conformidade. No entanto, não deixam de haver diferenças entre o que é coletado na copa da planta nas diferentes posições com o que foi registrado nas estações ao longo do tempo.

Realizar medições em pontos estratégicos da planta e fora dela, na plantação como um todo, permite uma percepção geral da dinâmica dos elementos climáticos. Neste experimento além dos dados coletados por sensores vestíveis na própria planta e do psicrômetro aspirado foram usados dados coletados de duas estações meteorológicas mais próximas.

No exemplo dado de aplicações de agricultura (controle de pragas e doenças) em que este estudo pode ser aplicado, os dados climáticos em conjunto com os dados monitorados com relação à doença ou praga estudada pode fornecer subsídios para uma melhor análise do ponto de surgimento ou aumento da severidade da doença ou praga em questão.

Apesar de neste trabalho ter sido abordado alguns detalhes de uma aplicação de doenças e pragas na agricultura, em que o conhecimento do microclima vegetal com o uso de sensores IoT pode ser usado, o conhecimento adquirido pode ser aplicado em um leque abrangente de aplicações como: irrigação de precisão, análise de solo, entre outros.

Como parte de trabalhos futuros está prevista a instalação do sistema em um campo experimental com condições climáticas adversas (campo aberto, presença de abelhas, borboletas, vento, entre outros elementos), além de mais pontos de medição em mais plantas, com mais

sensores em cada planta, e em outros pontos do campo experimental. Dessa forma, pode-se ampliar os resultados obtidos neste trabalho que foram realizados em laboratório e também em campo com uma planta, gerando ganhos para a agricultura essenciais para o momento atual, onde há constantes mudanças climáticas.

Em paralelo, pretende-se realizar o monitoramento de uma doença do cajueiro, o oídio. O monitoramento do microclima será importante para auxiliar na descoberta da doença em seu estágio inicial, o que possibilitará um manejo preventivo de controle da doença com menor uso de produtos fitossanitários. É interessante também avaliar o custo econômico de um sistema desse porte para determinar a viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- A, J. G. M. *et al.* Microclimate monitoring system for irrigation water optimization using IoT. *Measurement: Sensors*, Elsevier Ltd, v. 27, 6 2023. ISSN 26659174.
- Agrios,G.N. *Plant Pathology*. fifth ed., p. 952. [S. l.]: Academic Press, 2006. ISBN 9780120445653.
- AUST, H.-J.; HOYNINGEN-HUENE, J. V. MICROCLIMATE IN RELATION TO EPIDEMICS OF POWDERY MILDEW Federal Republic of Germany. [S. l.], 1986. v. 24, 491–510 p. Disponível em: www.annualreviews.org.
- CAFFARRA, Amelia *et al.* Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: european grapevine moth and powdery mildew. ***Agriculture, Ecosystems & Environment***, [S.L.], v. 148, p. 89-101, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.017>.
- CHEN, Wen-Liang *et al.* RiceTalk: rice blast detection using internet of things and artificial intelligence technologies. ***Ieee Internet Of Things Journal***, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 1001-1010, fev. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jiot.2019.2947624>.
- HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. MODELING LEAF WETNESS IN RELATION TO PLANT DISEASE EPIDEMIOLOGY. [S. l.], 1992. v. 30, 553–77 p. Disponível em: www.annualreviews.org.
- JOHANNES, Alexander *et al.* Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case. *Computers And Electronics In Agriculture*, [S.L.], v. 138, p. 200-209, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.013>.
- KASSAB, Wafa'A *et al.* A–Z survey of Internet of Things: architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal Of Network And Computer Applications*, [S.L.], v. 163, p. 102663, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102663>.
- KIM, Sehan *et al.* IoT-Based Strawberry Disease Prediction System for Smart Farming. ***Sensors***, [S.L.], v. 18, n. 11, p. 4051, 20 nov. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18114051>.
- KOUR, V. P.; ARORA, S. Recent Developments of the Internet of Things in Agriculture: A Survey. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. 129924–129957 p.
- MARTINS, Marlon *et al.* Temperatura e Umidade Relativa nos Processos de Infecção do Agente Causal do Oídio do Cajueiro - BOLETIM DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO 203 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agroindústria Tropical Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2020. ISSN 1679-6543. Disponível em: www.embrapa.br/agroindustria-tropical.
- MASSRUHA, S.; LEITE, M. AGRO 4.0-RUMO À AGRICULTURA DIGITAL. [S. l.], 2014.

MESQUITA, Lindemberg *et al.* Pragas do Cajueiro - Sistema de Produção do Caju - Sumário Dados Sistema de Produção - Embrapa Agroindústria Tropical. 2016. ISSN 1678-8702. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao1f6_1gal1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7705&p_r_p_-996514994_topicoId=10319.

NAIMAN, Robert J. *et al.* Biotic Functions of Riparia. Riparia, [S.L.], p. 125-158, 2005. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-012663315-3/50006-x>.

NAVARRO, Emerson *et al.* A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming. **Sensors**, [S.L.], v. 20, n. 15, p. 4231, 29 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s20154231>.

NETO, Francisco *et al.* Desempenho Agrônômico de Clones de Cajueiro no Litoral do Ceará - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 163. 2018. ISSN 1679-6543. Disponível em: www.embrapa.br/agroindustria-tropical.

Semtech. LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. [S. l.], 2020. Disponível em: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf.

SHOMARIA, S. H.; KENNEDY, R. Survival of *Oidium anacardii* on cashew (*Anacardium occidentale*) in southern Tanzania. *Plant Pathology*, v. 48, p. 505–513, 1999.

SINHA, B. B.; DHANALAKSHMI, R. Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems*, North-Holland, v. 126, p. 169–184, 1 2022. ISSN 0167-739X.

SOUZA, Kleber *et al.* Agricultura digital: definições e tecnologias. [S. l.], 2020.

STEINHART, J. S.; HART, S. R. INSTRUMENTS AND METHODS Calibration curves for thermistors. [S. l.], 1968. v. 15, 497 p.

TOCCO, Joshua di *et al.* Plant-Wear: a multi-sensor plant wearable platform for growth and microclimate monitoring. **Sensors**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 549, 3 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s23010549>.