



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANA CAROLINA SILVA VAZ CURADO DE AGUIAR

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MONITORAMENTO DO CONSUMO HÍDRICO EM BEZERRAS LEITEIRAS**

2025
Recife - Pernambuco

ANA CAROLINA SILVA VAZ CURADO DE AGUIAR

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MONITORAMENTO DO CONSUMO HÍDRICO EM BEZERRAS LEITEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como um dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida

2025
Recife - Pernambuco

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

A283d Aguiar, Ana Carolina Silva Vaz Curado de.
Desenvolvimento de um sistema automatizado
para monitoramento do consumo hídrico em
bezerras leiteiras / Ana Carolina Silva Vaz Curado
de Aguiar. – Recife, 2025.
44 f.; il.

Orientador(a): Gledson Luiz Pontes de Almeida.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental,
Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Bebedouros . 2. Instalação para animal . 3.
Sensoriamento remoto. 4. Ambiência (Biotérios) 5.
Abastecimento de água. I. Almeida, Gledson Luiz
Pontes de, orient. II. Título

CDD 628

ANA CAROLINA SILVA VAZ CURADO DE AGUIAR

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MONITORAMENTO DO CONSUMO HÍDRICO EM BEZERRAS LEITEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovado em: 12/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profª. Dra. Cristiane Guiselini (Examinadora Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Héilton Pandorfi (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Victor Wanderley Costa de Medeiros, (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a Deus, fonte de toda graça que ilumina meu caminho. Carrego no nome Ana, “abençoada por Deus”, um propósito que minha mãe fez questão de me dar e que se cumpriu em cada etapa da minha vida. Sou profundamente abençoada porque nunca caminhei sozinha: Ele colocou ao meu redor pessoas que são abrigo, força e sentido.

À minha mãe, Simone, que me ensinou que amor é ação e que fez do meu nome uma promessa; ao meu pai, Júlio, cuja lucidez e coragem moldaram minha visão de mundo; às minhas irmãs, Ana Beatriz e Ana Julia, que me lembram quem eu sou sempre que esqueço; ao meu amor, Bruno, pela leveza dividida; às minhas avós, à minha família, aos mestres e amigos que sustentaram minha jornada, a todos vocês dedico esta conquista. Porque tudo o que sou floresceu no solo fértil das bênçãos que recebi.

AGRADECIMENTOS

Como mostra Evangelion, é no olhar do outro que reencontramos nosso nome, nossa identidade e nosso sentido. E, como lembra Fullmetal, cada pessoa que atravessa nossa vida compõe uma parcela essencial do que somos. Se hoje chego até aqui, é porque muitas mãos, histórias e afetos se entrelaçaram ao longo do caminho. Por isso, estes agradecimentos começam reconhecendo aquilo que essas obras ensinam e que a própria vida confirma: ninguém caminha só, e é através do outro que continuamos existindo.

Agradeço, antes de tudo, à minha mãe, Simone Lúcia, que carregou o mundo nas costas para que eu pudesse caminhar leve. Me ensinou, com sua força silenciosa, que resiliência é florescer mesmo depois do inverno. É o maior símbolo de amor que conheço e ela mesma sempre disse que amor não é verbo, é ação, algo que confirma diariamente. Fez de tudo para que eu pudesse me dedicar aos estudos, porque acredita no poder transformador do conhecimento, e onde chega leva vida, alegria e a rara capacidade de fazer pessoas e lugares florescerem.

Agradeço ao meu pai, Julio Alberto, cuja vida sempre foi marcada pelo valor do trabalho honesto. “A vida é dura, liga”, costuma dizer, um ensinamento que herdou de meu avô, que aprendi a ressignificar, a dureza do mundo não precisa ser um fardo, mas um chamado à coragem, à lucidez e ao crescimento. Foi ele quem me ensinou a pensar com clareza e a analisar o mundo com racionalidade. Dele herdei a curiosidade e o impulso de buscar respostas.

Às minhas irmãs, Ana Beatriz e Ana Julia, meu espelho e minhas raízes. São parte de tudo que sou; cada conquista minha só encontra sentido porque compartilho com elas. Minhas cúmplices, minhas melhores amigas, minhas eternas companheiras.

À minha avó Maria Lúcia, que com amor puro me ofereceu abrigo, cuidado e um lugar seguro no mundo, onde sempre me senti amada e aceita, e à minha avó Jupory.

Ao meu amor, Bruno Mendes, que caminhou comigo por todas as fases, das mais luminosas às mais cinzentas. Obrigada por transformar pesos em leveza, por sorrir comigo e por mim, e por fazer dessa jornada algo muito mais doce.

À minha tutora, professora e amiga Cristiane Guiselini, que me enxergou quando eu mal conseguia me reconhecer. Ela me ensinou, profissionalmente e humanamente, como ninguém jamais fez, abrindo portas dentro de mim que eu nem sabia existir.

Ao meu orientador, Gledson Almeida, pelos ensinamentos e pelo apoio durante minha passagem pelo GPESA. A todo o grupo, minha gratidão. Ao DEINFO, pela parceria; ao professor Victor Wanderley, por acreditar em mim e me fazer sentir capaz; e ao graduando Luiz, pela ajuda constante e pela generosidade intelectual.

Ao PET AgroEnergia, minha segunda casa desde o segundo período. Foi lá que reaprendi quem sou, descobri minhas habilidades, encontrei propósito e compreendi, de uma vez por todas, que posso chegar onde eu quiser, basta querer e trabalhar por isso.

Agradeço a toda minha família materna e paterna: tios, tias, primos e primas, que formaram a base sólida sobre a qual trilhei este caminho. Cada um, à sua maneira, construiu um pedaço da história que hoje me sustenta.

E deixo, por fim, um agradecimento especial à memória daqueles que se foram, mas permanecem vivos em mim: meu primo Renãh, minha tia Lucinha e meu tio Luiz. Que estejam em paz. Suas existências ecoam na minha, e suas lembranças caminham comigo. Porque, afinal, como já disse a ficção e confirma a vida, ninguém chega ao fim de uma jornada sozinho.

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de leite do mundo, mas ainda depende de importações, registrando em 2023 um déficit superior a 1 bilhão de dólares. Nesse cenário, o Agreste Pernambucano destaca-se como um polo leiteiro em ascensão, impulsionado pelo avanço tecnológico e pelo aumento da produtividade nacional, que mais que triplicou nas últimas décadas, mesmo com menos vacas ordenhadas. A incorporação de tecnologias também fortalece a pecuária de precisão, permitindo o monitoramento individual das bezerras, sendo o controle do consumo de água essencial por melhorar a digestibilidade e o desenvolvimento inicial. Entretanto, a confiabilidade limitada dos sensores em condições reais evidencia a necessidade de sistemas mais robustos e calibrados para um monitoramento hídrico eficaz. Desta forma, objetivou-se desenvolver, calibrar e validar um sistema de monitoramento automatizado do consumo hídrico para bezerras leiteiras na fase de aleitamento. A pesquisa foi conduzida em duas etapas complementares: a fase laboratorial, realizada na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), destinada à calibração, validação e desenvolvimento do sistema; e a fase em campo, realizada no Bezeireiro Tropical da Fazenda Almeida, em Capoeiras-PE, onde o sistema foi instalado e avaliado em condições reais de operação. Foram selecionados quatro sensores de fluxo (YF-S201, YF-S401, YF-B1 e YF-B4) e calibrados em ambiente controlado por meio de um protótipo integrado a um microcontrolador ESP32, no qual foram registradas 60 leituras por sensor (30 contínuas e 30 intermitentes). O sensor com melhor desempenho foi instalado no bezeireiro e incorporado a um sistema IoT, responsável pela aquisição, processamento e transmissão Wi-Fi dos dados para um dashboard de monitoramento. A calibração em campo foi implementada no próprio firmware, permitindo o envio dos pulsos ao servidor e o retorno automático dos parâmetros ajustados. Após quatro meses de operação, a estabilidade do sensor foi reavaliada com a passagem de 1 L de água, no qual foram registradas 24 leituras (12 contínuas e 12 intermitentes) e todas as etapas, laboratoriais e de campo, foram analisadas por estatística descritiva e representadas por boxplots. Os quatro sensores analisados apresentaram média igual a 1 nos regimes contínuo e intermitente, indicando calibração centralizada. A análise estatística mostrou que o fluxo contínuo gera menor variabilidade. Considerando variabilidade, estabilidade da mediana, controle dos valores extremos e presença reduzida de outliers, o sensor YF-B4 foi o mais adequado ao monitoramento hídrico em condições reais. Em campo, o sistema IoT com ESP32 e ThingsBoard operou de forma contínua, registrando e transmitindo dados em tempo real. O modo de calibração em campo permitiu ajustes diretos, com passagem de 1 L e leitura imediata dos pulsos, garantindo precisão sem necessidade de laboratório. Após quatro meses, a primeira calibração apresentou grande variação, atribuída ao longo período sem manutenção, mas os valores se estabilizaram nos dias seguintes, evidenciando que calibrações periódicas são essenciais para manter a acurácia. Conclui-se que o YF-B4 apresentou o melhor desempenho geral, que o sistema automatizado foi eficiente para monitorar o consumo hídrico e que a calibração recorrente é indispensável para assegurar confiabilidade dos dados em ambientes reais de produção.

Palavras-Chave: Bebedouros Inteligentes, ambiência animal, sensoriamento, pecuária de precisão.

ABSTRACT

Brazil is one of the world's largest milk producers, yet it still depends on imports, recording in 2023 a deficit exceeding 1 billion dollars. In this context, the Agreste region of Pernambuco has emerged as an expanding dairy hub, driven by technological advances and by the national increase in productivity, which has more than tripled in recent decades despite a reduction in the number of lactating cows. The incorporation of modern technologies has also strengthened precision livestock farming, enabling individual monitoring of calves, for which the control of water intake is essential, as it improves digestibility and early development. However, the limited reliability of sensors under real operating conditions highlights the need for more robust and calibrated systems for effective water-intake monitoring. Therefore, this study aimed to develop, calibrate, and validate an automated system for monitoring water consumption in dairy calves during the pre-weaning phase. The research was conducted in two complementary stages: a laboratory phase at the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), dedicated to calibration, validation, and system development; and a field phase at the Tropical Calf Barn of Fazenda Almeida, in Capoeiras-PE, where the system was installed and evaluated under real operating conditions. Four flow sensors (YF-S201, YF-S401, YF-B1, and YF-B4) were selected and calibrated in a controlled environment using a prototype integrated with an ESP32 microcontroller, in which 60 readings per sensor (30 continuous and 30 intermittent) were recorded. The best-performing sensor was then installed in the calf barn and incorporated into an IoT system responsible for data acquisition, processing, and Wi-Fi transmission to a monitoring dashboard. Field calibration was embedded directly into the firmware, enabling the transmission of pulse data to the server and the automatic retrieval of adjusted parameters. After four months of operation, sensor stability was reassessed by passing 1 L of water through the system, yielding 24 readings (12 continuous and 12 intermittent). All laboratory and field datasets were analyzed using descriptive statistics and visualized through boxplots. The four sensors exhibited a mean of 1 under both flow regimes, indicating centralized calibration. Statistical analysis showed that continuous flow generated lower variability. Considering variability, median stability, control of extreme values, and reduced presence of outliers, the YF-B4 sensor demonstrated the best suitability for real-world water-intake monitoring. In the field, the IoT system with ESP32 and ThingsBoard operated continuously, recording and transmitting real-time data. The embedded calibration mode allowed direct adjustments through the passage of 1 L and immediate pulse reading, ensuring accuracy without the need for laboratory intervention. After four months, the initial field calibration showed high variation due to the long period without maintenance, but values stabilized in subsequent days, highlighting the importance of periodic calibrations to maintain accuracy. In conclusion, the YF-B4 sensor exhibited the best overall performance, the automated system proved effective for monitoring water intake, and recurrent calibration is essential to ensure data reliability under real production conditions.

Keywords: Smart Drinkers, Animal Ambience, Sensing, Precision Livestock Farming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Localização do Município de Capoeiras, Estado de Pernambuco, Brasil.....	21
Figura 02 - Modelos dos sensores utilizados no teste comparativo: YF-S201 (A); YF-S401 (B); YF-B1 (C) e YF-B4 (D).....	22
Figura 03 - Protótipo para calibração desenvolvido em laboratório (A) e bebedouro utilizado na dessedentação dos animais no Bezerreiro Tropical da Fazenda Almeida (B).....	23
Figura 04 - Sistema de aquisição de dados: (A) microcontrolador ESP32; (B) conexão com o computador; (C) display exibindo as leituras em tempo real.....	24
Figura 05 - Estrutura desenvolvida em campo para monitoramento automatizado, integrando sensor, microcontrolador e servidor online.....	25
Figura 06 - ThingsBoard.....	26
Figura 07 - Boxplots do fluxo contínuo e intermitente dos sensores de fluxo de água modelo YF-S201(A); YF-S401(B); YF-B1(C) e YF-B4(D).....	30
Figura 08 -Dashboard do bezerreiro com todas unidades de bebedouro (A); Gráfico disponível no dashboard do bezerreiro sobre consumo de água ao longo do tempo (B); página do bebedouro 07 (C) e consumo de água dos último 140 dias de todos os bebedouros (D).....	32
Figura 9 - Dispositivo de calibração: Luz azul que sinaliza modo de calibração ativado (A), botão para ativar modo de calibração (B) e interruptor para reiniciar (C)	33
Figura 10 - Método de calibração em campo: Pressão no bico para passagem de água (A), becker utilizado na medição (B) e Dashboard retornando os valores dos pulsos gerados (C)....	34
Figura 11 - <i>Boxplots</i> da estatística descritiva em regime de fluxo contínuo e intermitente do sensor de fluxo de água YF-B4, nos dias 20/08 à 25/08 de 2025.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos sensores de fluxo de água YF-S201, YF-S401, YF-B1 e YF-B2 em condição de fluxo contínuo e intermitente.....	29
Tabela 2 - Estatística descritiva da Calibração do Sensor de Fluxo YF-B4, em condição de fluxo contínuo e intermitente, durante o período de 6 dias consecutivos.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEA - Bem-estar Animal
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
DEINFO - Departamento de Estatística e Informática
DP - Desvio Padrão
ESP32 - Microcontrolador com conectividade Wi-Fi e Bluetooth
FAO - Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura)
GPESA - Grupo de Pesquisa em Ambiência Animal
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT - Internet of Things (Internet das Coisas)
MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
OIE - World Organisation for Animal Health (Organização Mundial de Saúde Animal)
PLF - Precision Livestock Farming (Pecuária de precisão)
Wi-Fi - Wireless Fidelity (Rede local sem fio)
YF-B1 - Sensor de fluxo de água por turbina
YF-B4 - Sensor de fluxo de água por turbina
YF-S201 - Sensor de fluxo de água por turbina
YF-S401 - Sensor de fluxo de água por turbina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral.....	13
2.2	Objetivos Específicos.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Ambiência animal.....	14
3.2	Bem-estar animal.....	14
3.3	Métodos de criação de bezerras.....	15
3.4	Fornecimento de água na bovinocultura.....	15
3.5	Tipos de bebedouros usados na pecuária.....	16
3.6	Período de Aleitamento e desenvolvimento de bezerras.....	17
3.7	Relevância de disponibilidade de água no desenvolvimento de bezerras..	17
3.8	Internet das Coisas (Internet of Things–IoT).....	18
3.9	Precision Livestock Farming (PLF).....	19
4	MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1	Local do estudo.....	21
4.2	Fase Laboratorial.....	21
4.3	Fase em campo	24
4.3.1	Sistema de Monitoramento Automatizado	24
4.3.2	Método de calibração em campo	26
4.3.3	Avaliação da estabilidade e variabilidade dos sensores	27
4.4	Análise Estatística.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	Fase Laboratorial.....	28
5.2	Fase em campo	31
5.2.1	Sistema de monitoramento automatizado (Dashboard)	31
5.2.2	Modo de calibração em campo	33
5.2.3	Avaliação da estabilidade e variabilidade dos sensores	34
6	CONSIDERAÇÕES	37
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se mundialmente como um dos principais produtores de leite, com produção estimada em 35,37 bilhões de litros em 2023, o que representa um crescimento de 2,38% em relação ao ano anterior (HOTT et al., 2025). Apesar do elevado volume produzido, o país ainda apresenta déficit na balança comercial de lácteos desde 2009, alcançando em 2023 um saldo negativo superior a 1 bilhão de dólares, decorrente da importação de aproximadamente 2,18 bilhões de litros equivalentes de leite, principalmente na forma de leite em pó, queijos e soro (LEITE et al., 2025). Esse cenário evidencia a necessidade contínua de ganhos em eficiência produtiva, qualidade e competitividade da cadeia leiteira nacional.

No contexto regional, o Agreste Pernambucano tem se consolidado como um importante polo leiteiro do Nordeste. Entre 2013 e 2023, a região apresentou crescimento expressivo, passando a figurar entre as dez maiores mesorregiões produtoras do país, superando áreas tradicionalmente reconhecidas pela produção leiteira, como o Oeste de Minas e o Leste Rondoniense (HOTT et al., 2025). Esse avanço está associado ao aumento da produtividade nacional, que mais que triplicou nas últimas décadas, impulsionado pela incorporação de inovações em genética, nutrição, mecanização, automação e gestão da produção (OLIVEIRA et al., 2025).

Entre 1980 e 2023, o número de vacas ordenhadas no Brasil reduziu-se de 17 para 16 milhões, enquanto a produção diária aumentou de 30 para 97 milhões de litros de leite. Como resultado, a produtividade média passou de 676 litros por vaca em 1980 para 2.259 litros em 2023, evidenciando ganhos significativos de eficiência produtiva (LEITE et al., 2025). Esses avanços caracterizam a transição para sistemas produtivos cada vez mais intensivos em tecnologia, alinhados aos princípios da Agricultura 5.0, marcada pela integração entre biotecnologia, ciência da informação e automação inteligente.

Nesse contexto de intensificação tecnológica, a Precision Livestock Farming (PLF) emerge como um paradigma estratégico, permitindo a gestão individualizada dos animais por meio da coleta, transmissão e análise automatizada de dados. Entre as aplicações da PLF, o monitoramento do consumo hídrico assume papel relevante, inclusive nas fases iniciais da vida produtiva. Embora a literatura indique que o consumo voluntário de água por bezerras em aleitamento seja relativamente baixo quando comparado a categorias mais avançadas, essa fase representa uma janela fisiológica crítica, na qual pequenas variações no acesso e no consumo hídrico podem exercer impactos significativos sobre o desenvolvimento ruminal, a digestibilidade dos nutrientes e o desempenho futuro do animal (WICKRAMASINGHE et al., 2019).

Nesse contexto, o monitoramento do consumo de água adquire relevância não pelo volume absoluto ingerido, mas por seu valor como indicador precoce de bem-estar, saúde e eficiência do manejo. Alterações sutis no padrão de ingestão hídrica podem sinalizar precocemente falhas no fornecimento, estresse ambiental ou distúrbios sanitários, possibilitando intervenções preventivas com elevado potencial de retorno produtivo e econômico. Assim, o investimento em tecnologias de monitoramento hídrico para bezerras em aleitamento justifica-se

não apenas pela gestão do recurso água, mas pelo seu papel estratégico na redução de perdas zootécnicas e na qualificação do desempenho ao longo da vida produtiva do animal.

O fornecimento adequado de água, além de atender a uma exigência fisiológica básica, constitui elemento central para o bem-estar e o desempenho zootécnico. Animais submetidos a condições de desconforto tendem a reduzir a ingestão de alimento, resultando em perda de peso e atraso na idade ao primeiro parto (VIÉGAS, 2010). Nessa perspectiva, a escolha e o manejo dos bebedouros assumem grande relevância, uma vez que o tipo de equipamento influencia diretamente o consumo hídrico, o comportamento ingestivo e o desperdício de água. Estudos demonstram que diferentes modelos de bebedouros apresentam desempenhos distintos, afetando a eficiência do uso da água e o manejo ambiental (TAVARES et al., 2015), princípio igualmente aplicável às bezerras, especialmente durante a fase de aleitamento, quando a motivação para comportamentos de sucção é elevada.

Além disso, práticas adequadas de manejo são essenciais para garantir a saúde e reduzir a mortalidade de bezerras (CAIXETA; CARMO, 2020). A escolha dos equipamentos utilizados nos sistemas de criação, sejam eles individuais ou coletivos, exerce impacto direto sobre o comportamento oral e o bem-estar animal (SAMPAIO ISSAKOWICZ et al., 2020). Em sistemas coletivos, por exemplo, há maior risco de ocorrência de mamada cruzada, que pode resultar em lesões e inflamações (BITTAR, 2016; LAUKKANEN et al., 2010), reforçando a necessidade de estruturas que atendam às exigências fisiológicas e comportamentais dessa categoria animal.

Apesar dos avanços associados à PLF, sua aplicação prática ainda enfrenta desafios, especialmente no que se refere à confiabilidade dos dados gerados por sensores em condições reais de criação. Falhas operacionais, deriva de calibração e valores atípicos podem comprometer a precisão das informações e limitar seu uso como ferramenta de apoio à tomada de decisão (SELLE et al., 2023). Essa fragilidade torna-se particularmente relevante no monitoramento hídrico de bezerras em aleitamento, para o qual ainda são escassos sistemas automatizados robustos, calibrados e validados especificamente para essa fase produtiva.

Diante da importância estratégica da pecuária leiteira, da relevância do manejo hídrico na fase inicial da vida dos animais e da lacuna tecnológica existente, torna-se fundamental desenvolver, calibrar e validar um sistema de monitoramento automatizado do consumo hídrico para bezerras em aleitamento. Tal sistema deve conciliar precisão, aplicabilidade prática e adequação ao comportamento natural dessa categoria animal, contribuindo não apenas para a gestão do recurso água, mas também para o aprimoramento do bem-estar, da eficiência produtiva e do desempenho futuro dos animais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver, calibrar e validar um sistema de monitoramento automatizado do consumo hídrico para bezerras leiteiras na fase de aleitamento.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar e comparar o desempenho inicial de diferentes modelos de sensores de fluxo (YF-S201, YF-S401, YF-B1 e YF-B4);
- Desenvolver sistema de monitoramento automatizado adaptado às condições de consumo hídrico de bezerras na fase de aleitamento, integrando sensores de fluxo e plataforma de aquisição de dados.
- Desenvolver metodologia para calibração em campo do sistema de monitoramento automatizado do consumo hídrico das bezerras.
- Monitorar e analisar a estabilidade e a variabilidade dos sensores selecionados ao longo do período de uso, quando submetidos às condições reais de um bezerreiro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ambiência animal

A ambiência animal refere-se ao conjunto de fatores ambientais que influenciam direta ou indiretamente os animais, sem envolver aspectos genéticos, sendo compreendida como a interação bidirecional entre o animal e o ambiente em que vive (BROOM; MOLENTO, 2004; SILVA, 2000; SILVA, 2008). Esse conceito engloba tanto o espaço físico quanto o social, incluindo elementos estruturais das instalações, práticas de manejo e a interação com o ser humano, configurando-se como o “ambiente em que vive o animal” e tudo o que nele está inserido (SILVA et. al 2010).

A literatura destaca que fatores climáticos, como temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, ventos, nebulosidade e pluviosidade, atuam de forma isolada ou combinada sobre os animais, especialmente em sistemas não estabulados, podendo alterar diretamente seu comportamento, bem-estar e desempenho produtivo (NÃÃS, 1989; SILVA, 2012). A inadequada interação entre animal e ambiente pode resultar em estresse térmico, uma das principais causas de redução da produtividade em diferentes sistemas de criação (NÃÃS, 1989; SILVA, 2012).

Assim, o adequado controle desses fatores ambientais é fundamental para favorecer o conforto e a eficiência produtiva, permitindo que os animais expressem seu potencial de forma saudável. Embora a ambiência esteja diretamente relacionada ao bem-estar, não se confunde com ele, tampouco se limita apenas ao conforto térmico, abrangendo um espectro mais amplo de condições ambientais que afetam a resposta fisiológica e comportamental dos animais (BROOM; MOLENTO, 2003; SILVA, 2008). Dessa forma, compreender e manejar corretamente a ambiência constitui uma estratégia essencial para promover sustentabilidade e eficiência nos sistemas pecuários.

3.2 Bem-estar animal

O bem-estar animal (BEA) é um conceito que busca garantir condições físicas, ambientais e comportamentais adequadas aos animais, permitindo que expressem seus comportamentos naturais e mantenham boa saúde física e mental (BROOM, 1991; DUNCAN; FRASER, 1997). A crescente industrialização da pecuária levou à intensificação dos sistemas

produtivos, o que, embora tenha aumentado a eficiência, também trouxe desafios relacionados ao estresse, à restrição de movimento e à perda de conforto (HOTZEL; MACHADO FILHO, 2004).

Com a conscientização social e o avanço do consumo ético, o BEA passou a ser um requisito de qualidade e competitividade, principalmente no mercado internacional, que valoriza produtos provenientes de sistemas sustentáveis e humanitários (VELONI, 2013). Segundo Grandin (2014), o bem-estar baseia-se nas chamadas “Cinco Liberdades”, que asseguram aos animais a ausência de fome, sede, dor, doenças, medo e desconforto, além da possibilidade de expressar comportamentos naturais.

Organismos internacionais, como a *Food and Agriculture Organization* (FAO) e a *World Organization for Animal Health* (OIE), reconhecem o BEA como um componente essencial da sustentabilidade pecuária. Em bovinos leiteiros, seu manejo adequado influencia diretamente o desempenho produtivo, a qualidade do leite e a longevidade dos animais. Dessa forma, promover o bem-estar não é apenas uma questão ética, mas também uma estratégia técnica e econômica para sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

3.3 Métodos de criação de bezerras

A criação de bezerras no Brasil, segundo Coelho, Campos, Azevedo & Rotta (2024), pode ser organizada em três sistemas de manejo principais. No primeiro, as bezerras são criadas em piquetes, com aleitamento ao pé da vaca: os bezerros estimulam a descida do leite e podem mamar diretamente ou somente consumir o residual, recebendo também pequenas quantidades de concentrado e acesso ao volumoso. No segundo sistema, utilizam-se casinhas individuais ou bezerreiros tropicais/argentinos, com aleitamento individualizado; as bezerras são separadas das mães logo após o nascimento (entre 2-24 horas) e alimentadas com leite de descarte (ou, menos frequentemente, sucedâneos/mamadeiras), na faixa de 4 a 8 litros por dia, além de concentrado (e volumoso, em alguns casos); o aleitamento costuma durar 60 a 90 dias. No terceiro método, gaiolas em galpão são usadas para aleitamento individual, também com leite de descarte, aqui o volume oferecido varia de 6 a 10 litros/dia, e são oferecidos concentrado e, ocasionalmente, feno, com desmame por volta de 60 a 90 dias. Coelho et al. (2024) destacam ainda que, nos sistemas de piquete, casinha e bezerreiros tropicais, as bezerras enfrentam variações térmicas significativas, o que exige gasto energético para termorregulação (por calor ou frio) e pode comprometer o ganho de peso, especialmente em sistemas que fornecem apenas 4 L/dia; porém, muitas fazendas já oferecem 6 litros ou mais por dia para melhorar esse desempenho.

3.4 Fornecimento de água na bovinocultura

A oferta de água aos bovinos pode ocorrer a partir de diferentes fontes disponíveis na propriedade, como açudes, lagoas, rios, riachos, poços, nascentes ou, em alguns casos menos comuns, pela rede pública de abastecimento. O consumo pode ocorrer diretamente nesses reservatórios naturais ou artificiais, ou ainda por meio de bebedouros instalados especificamente para essa finalidade (PORATH et al., 2002).

O acesso direto dos bovinos aos reservatórios pode comprometer a qualidade da água utilizada na propriedade, razão pela qual é recomendada a restrição por meio de cercas (WRIGHT, 2007). Quando esse controle não é adotado, os animais costumam entrar em açudes,

lagoas e riachos para se refrescar, o que pode causar problemas de casco e contaminação da água por fezes e urina, elevando o risco de patógenos para animais e humanos (WRIGHT, 2007).

A literatura sobre comportamento ingestivo de bovinos demonstra que vacas adultas apresentam preferências claras em relação às fontes de água. Estudos indicam que esses animais preferem beber em bebedouros maiores em vez de menores (Machado Filho et al., 2004; Teixeira et al., 2006) e optam por bebedouros em vez de riachos naturais, possivelmente por maior facilidade de acesso e estabilidade do fluxo hídrico (Sheffield et al., 1997). Esses trabalhos evidenciam que a ergonomia, o espaço disponível e a facilidade de aproximação são fatores determinantes na preferência de vacas adultas, apontando para a importância do desenho dos bebedouros no comportamento de consumo.

No entanto, essas evidências não podem ser automaticamente extrapoladas para bezerros, pois o volume de pesquisas dedicadas especificamente a essa categoria ainda é reduzido. A literatura aponta que, durante o aleitamento, o consumo voluntário de água é geralmente baixo e pouco influenciado pelo tipo de bebedouro. Nesse sentido, Hepola et al. (2008) demonstraram que bezerros submetidos ao fornecimento de água em balde ou bico apresentaram consumos semelhantes, sem indicar preferência consistente entre as estruturas. Os autores também destacam que, nessa fase, o comportamento ingestivo é altamente condicionado pelo estágio de desenvolvimento e pela prioridade fisiológica voltada ao consumo de leite.

Diversos métodos podem ser utilizados para o fornecimento de água a bezerros em aleitamento, cada um com características específicas que influenciam o acesso, o comportamento e a higiene. Determinados modelos de instalações podem ser mais adequados às demandas comportamentais dos animais, por oferecerem maior possibilidade de movimento e reduzirem a ocorrência de comportamentos estereotipados. Segundo Caixeta e Carmo (2020), a adoção de boas práticas de manejo na criação de bezerros contribui significativamente para a melhoria das condições de saúde e para a diminuição das taxas de mortalidade.

Mesmo assim, permanece a especulação de que bezerros poderiam se beneficiar de fontes de água mais acessíveis ou visualmente abertas, como baldes. Contudo, a literatura disponível oferece resultados heterogêneos, e ainda é cedo para afirmar padrões claros de preferência. Estudos como o de Hepola et al. (2008) reforçam essa incerteza ao mostrar que fatores comportamentais influenciam diretamente a interação dos animais com diferentes sistemas de fornecimento de água. Diante disso, torna-se evidente que a compreensão das escolhas hídricas de bezerros em aleitamento permanece limitada, o que ressalta a necessidade de pesquisas mais integradas que avaliem simultaneamente comportamento, desempenho e bem-estar.

3.5 Tipos de bebedouros usados na pecuária

Diversos modelos de bebedouros são empregados na pecuária, e a escolha do tipo mais adequado depende do sistema de produção, da categoria animal e das condições ambientais. Entre os modelos mais tradicionais encontram-se o bebedouro australiano, caracterizado por sua forma circular e elevada capacidade de armazenamento, podendo atingir milhares de litros. Construídos, em geral, em metal ou polietileno, são recomendados para sistemas extensivos e pastejo rotacionado, nos quais atendem grandes lotes de animais com eficiência. (Portal Comprerural; 2025)

Os bebedouros automáticos com boia representam uma alternativa que visa manter o nível de água constante e reduzir desperdícios. Presentes tanto em sistemas intensivos quanto extensivos, podem ser fabricados em plástico, concreto ou aço inox. Em instalações mais tecnificadas, também são adotados os bebedouros de pressão ou válvula, nos quais a água é liberada quando o animal aciona uma válvula. Esse sistema, utilizado com maior frequência na suinocultura e em bovinos jovens, favorece a higiene e reduz a contaminação hídrica. (Portal Comprerural; 2025)

Para a fase inicial da criação, utilizam-se bebedouros individuais para bezerros, como baldes com suporte, baldes com bico (tetina) ou sistemas automáticos individuais, que permitem maior controle do consumo e favorecem o manejo sanitário. Em estruturas mais tecnificadas, também podem ser adotados mecanismos de liberação por pressão, semelhantes aos empregados na suinocultura, como os modelos bite ball e convencional. No primeiro, a água é liberada quando o animal morde o pequeno cano metálico (chupeta), pressionando uma esfera interna que aciona o fluxo. Já no modelo convencional, o acionamento ocorre quando o animal pressiona a válvula interna com a língua ou o focinho, permitindo a saída da água. Esses sistemas reduzem desperdícios e contribuem para maior higiene no fornecimento hídrico. (EMBRAPA, 2025)

3.6 Período de Aleitamento e desenvolvimento de bezerras

O período de aleitamento corresponde à fase inicial de vida dos bezerros, na qual o leite ou o sucedâneo lácteo constitui a principal fonte de nutrientes para o animal. Nessa etapa, que dura aproximadamente até a terceira semana de vida, os bezerros são classificados como pré-ruminantes, pois, embora os quatro compartimentos do estômago, rúmen, retículo, omaso e abomaso, já estejam formados, apenas o abomaso se encontra plenamente funcional (COELHO, 2005).

Durante esse período, ocorre o reflexo da goteira esofágica, mecanismo fisiológico que conduz o leite diretamente ao omaso e ao abomaso, evitando o rúmen. Assim, a digestão é predominantemente enzimática, ocorrendo no abomaso e no intestino delgado, e a energia necessária para o crescimento é obtida principalmente a partir da lactose e dos ácidos graxos presentes na dieta líquida. O nitrogênio utilizado para a formação tecidual é proveniente, em sua maior parte, das proteínas de origem láctea (DAVIS; CLARK, 1981; DAVIS; DRACKLEY, 1998, apud COELHO, 2005).

Durante o aleitamento, o consumo de alimentos sólidos ainda é reduzido, e o rúmen passa por um processo gradual de desenvolvimento anatômico e funcional. Esse amadurecimento envolve o crescimento dos pré-estômagos, o estabelecimento da microbiota e a transformação do epitélio ruminal, preparando o animal para a digestão de alimentos fibrosos. Portanto, o manejo adequado nessa fase é fundamental para assegurar o bom desenvolvimento inicial e favorecer o desempenho produtivo nas etapas subsequentes da criação.

3.7 Relevância de disponibilidade de água no desenvolvimento de bezerras

O fornecimento de água limpa e fresca desde os primeiros dias de vida é indispensável para o bom desenvolvimento dos bezerros, sobretudo durante o período de aleitamento. A presença de água no rúmen favorece o crescimento e a multiplicação das bactérias responsáveis

pela digestão dos alimentos, sendo fundamental para o início da atividade fermentativa e o amadurecimento do sistema digestivo (QUIGLEY, 1998). Quando a ingestão hídrica é insuficiente, o desenvolvimento microbiano é prejudicado, o que compromete a eficiência da digestão e o desempenho animal.

É relevante destacar que o leite e os sucedâneos lácteos não suprem essa necessidade hídrica, pois passam pela goteira esofágica e seguem diretamente para o omaso e o abomaso, sem atingir o rúmen (QUIGLEY, 1997). Por esse motivo, é indispensável garantir que os bezerros tenham livre acesso à água desde o nascimento, favorecendo o desenvolvimento do rúmen e estimulando o consumo de concentrado sólido.

De acordo com Kertz et al. (1984), o fornecimento irrestrito de água está diretamente relacionado a melhores índices de desempenho em bezerros. Cada litro adicional de água ingerida pode resultar em um aumento médio de 82 g/dia no consumo de matéria seca e 56 g/dia no ganho de peso, enquanto a restrição hídrica pode reduzir esses parâmetros em até 31% e 38%, respectivamente. Além disso, o consumo de água tende a aumentar em situações de diarreia, funcionando como um mecanismo compensatório de hidratação. Corroborando esses achados, estudos demonstram que o acesso precoce à água potável contribui significativamente para o desenvolvimento corporal dos bezerros, promovendo maior altura do quadril (0,8 cm a mais na 4ª semana), maior comprimento corporal (1,2 cm superior) e melhor digestibilidade dos nutrientes (15% superior) em comparação àqueles com acesso tardio à água (WICKRAMASINGHE et al., 2019).

Estudos conduzidos por Coelho (1999) e Bernardes et al. (2007) também demonstraram uma correlação positiva entre o consumo de água e o consumo de matéria seca ($p < 0,05$), reforçando que a ingestão adequada de água contribui diretamente para o desempenho e o bem-estar dos bezerros. Assim, o acesso contínuo à água de qualidade é indispensável para o crescimento eficiente, o bom funcionamento do rúmen e a formação de animais mais resistentes e produtivos nas fases subsequentes da criação.

3.8 Internet das Coisas (*Internet of Things–IoT*)

Tecnicamente, a IoT pode ser definida como um ecossistema de rede que interliga objetos físicos dotados de capacidade computacional, os quais, através de protocolos de comunicação sem fio ou cabeados, trocam dados e processam informações de maneira autônoma (TAN; WANG, 2010). Este conceito, porém, é frequentemente inserido em um quadro teórico mais amplo. Bradley et al. (2013) propõe a *Internet of Everything* (IoE) como um marco conceitual superior, que abarca a integração inteligente de quatro dimensões: pessoas, processos, dados e coisas. Sob esta ótica, a *IoT* consolida-se como a infraestrutura tecnológica fundamental que materializa a conexão da dimensão "coisas", servindo assim de alicerce para a *IoE*.

O reconhecimento de seu potencial disruptivo tem motivado ações concretas de nações hegemônicas e emergentes. Países como Estados Unidos, China, Reino Unido e Brasil têm alocado expressivos recursos financeiros e intelectuais no desenvolvimento de ecossistemas de *IoT*. A relevância atribuída à tecnologia é tamanha que os Estados Unidos a classificaram entre as seis tecnologias civis com poder de impactar a dinâmica do poder nacional. Em sintonia com essa visão estratégica, o Estado brasileiro estruturou um Plano de Ação Nacional. Publicado em 2018 por meio do BNDES e do MCTIC, o documento vai além do diagnóstico e estabelece

diretrizes concretas para fomentar a tecnologia. Ele identifica setores-chave para investimento e desenvolvimento de soluções de *IoT*, com foco em Cidades, Saúde, Agronegócio e Indústria. O objetivo é criar um ecossistema propício para que a aplicação da *IoT* nesses ambientes priorizados impulse a competitividade do país na Quarta Revolução Industrial (BRASIL, 2018; GERSHENFELD; KRIKORIAN; COHEN, 2004).

As projeções econômicas valem essa aposta estratégica. Estudos de consultorias e empresas globais quantificam o impacto esperado. Pesquisa da Accenture (PURDY et al, 2015) prevê uma contribuição cumulativa da *IoT* para a indústria global na casa dos 10,6 trilhões de dólares. Dados da IHS Technology (MORELLI et al, 2017) indicam que o segmento industrial será responsável por cerca de um terço de todos os novos dispositivos conectados implantados na década entre 2015 e 2025. Já no setor da saúde, estimativas da General Electric (EVANS et al, 2012) apontam para economias potenciais superiores a 63 bilhões de dólares com a adoção de soluções conectadas.

No agronegócio brasileiro, pesquisas da Embrapa Gado de Corte apontam a *IoT* como um vetor relevante de transformação produtiva, com potencial para contribuir para a segurança alimentar até 2040 (MALAFAIA et al., 2021). Entretanto, essa perspectiva deve ser relativizada à luz das desigualdades regionais e produtivas do país. A adoção de soluções baseadas em *IoT* ainda é concentrada em sistemas de produção mais capitalizados, enquanto pequenos e médios produtores enfrentam barreiras como custos elevados, baixa conectividade no meio rural e carência de assistência técnica especializada. Dessa forma, embora a *IoT* apresente potencial para aumentar a eficiência e a sustentabilidade do agronegócio, sua difusão irrestrita não é garantida e pode, inclusive, aprofundar assimetrias já existentes no setor. (MORCHID et al, 2023).

3.9 Precision Livestock Farming (PLF)

De acordo com Araújo S. (2021), a Agricultura 4.0 representa a transição para um setor agrícola progressivamente digitalizado, caracterizado pela incorporação de tecnologias como Internet of Things (IoT), sensores, robótica, inteligência artificial, big data e computação em nuvem. Embora esse paradigma seja frequentemente apresentado como um avanço inevitável e necessário, sua implementação não ocorre de forma homogênea nem isenta de restrições. Conforme destaca Boldrini (2021), ao analisar a relevância da Agricultura 4.0 na pecuária, as tecnologias digitais apresentam potencial para contribuir com a eficiência produtiva e a qualidade dos sistemas agropecuários, especialmente no que se refere à gestão de recursos, como o fornecimento de água. No entanto, esse potencial depende fortemente da infraestrutura disponível, do nível de capacitação técnica dos produtores e da viabilidade econômica das soluções adotadas, fatores que ainda limitam sua difusão em muitos contextos produtivos, sobretudo em sistemas de menor escala.

No âmbito da Agricultura 4.0, destaca-se a Precision Livestock Farming (PLF), ou pecuária de precisão, cujo objetivo, segundo Vranken (2016), é promover uma produção mais sustentável sob as perspectivas econômica, ambiental e social. Apesar desse enfoque, a PLF também impõe novos desafios à gestão da produção animal, uma vez que a intensificação do monitoramento individual dos animais resulta em grande volume de dados, demandando sistemas confiáveis de processamento, interpretação e tomada de decisão. Ademais, a crescente

dependência de tecnologias digitais pode reduzir a autonomia do produtor e aumentar sua vulnerabilidade a falhas técnicas, problemas de conectividade e custos de manutenção, o que relativiza os ganhos operacionais frequentemente associados a essa abordagem.

A integração da IoT à PLF é frequentemente apontada como elemento central desse avanço tecnológico. Por meio de sensores e dispositivos de rastreamento, torna-se possível a coleta de dados em tempo real sobre o comportamento, a saúde e as condições ambientais dos animais, favorecendo decisões mais informadas e uma gestão potencialmente mais precisa da criação. Contudo, conforme discutido por Morrone S. (2022), embora a PLF avance em consonância com os princípios da Indústria 4.0, os benefícios associados à eficiência produtiva e ao bem-estar animal não são automáticos, estando condicionados à qualidade dos dados coletados, à confiabilidade dos dispositivos e à capacidade de interpretação dos sistemas e dos operadores humanos.

No que se refere ao gerenciamento hídrico, as soluções propostas pela Agricultura 4.0 permitem o monitoramento e o controle em tempo real do abastecimento de água, incluindo o fornecimento adequado aos bezerros, aspecto essencial para o crescimento e o bem-estar animal. Todavia, a adoção dessas tecnologias exige rigor técnico na implantação, especialmente no que diz respeito à calibração dos dispositivos de medição. Conforme ressalta Feng (2005), a ausência de calibração adequada pode comprometer a precisão das leituras, resultando em desperdício de água, aumento dos custos de produção e impactos negativos sobre a sustentabilidade ambiental. Assim, a eficiência atribuída à Agricultura 4.0 e à PLF não decorre exclusivamente da adoção de tecnologias digitais, mas da integração criteriosa entre equipamentos confiáveis, procedimentos técnicos adequados e gestão qualificada dos sistemas produtivos.

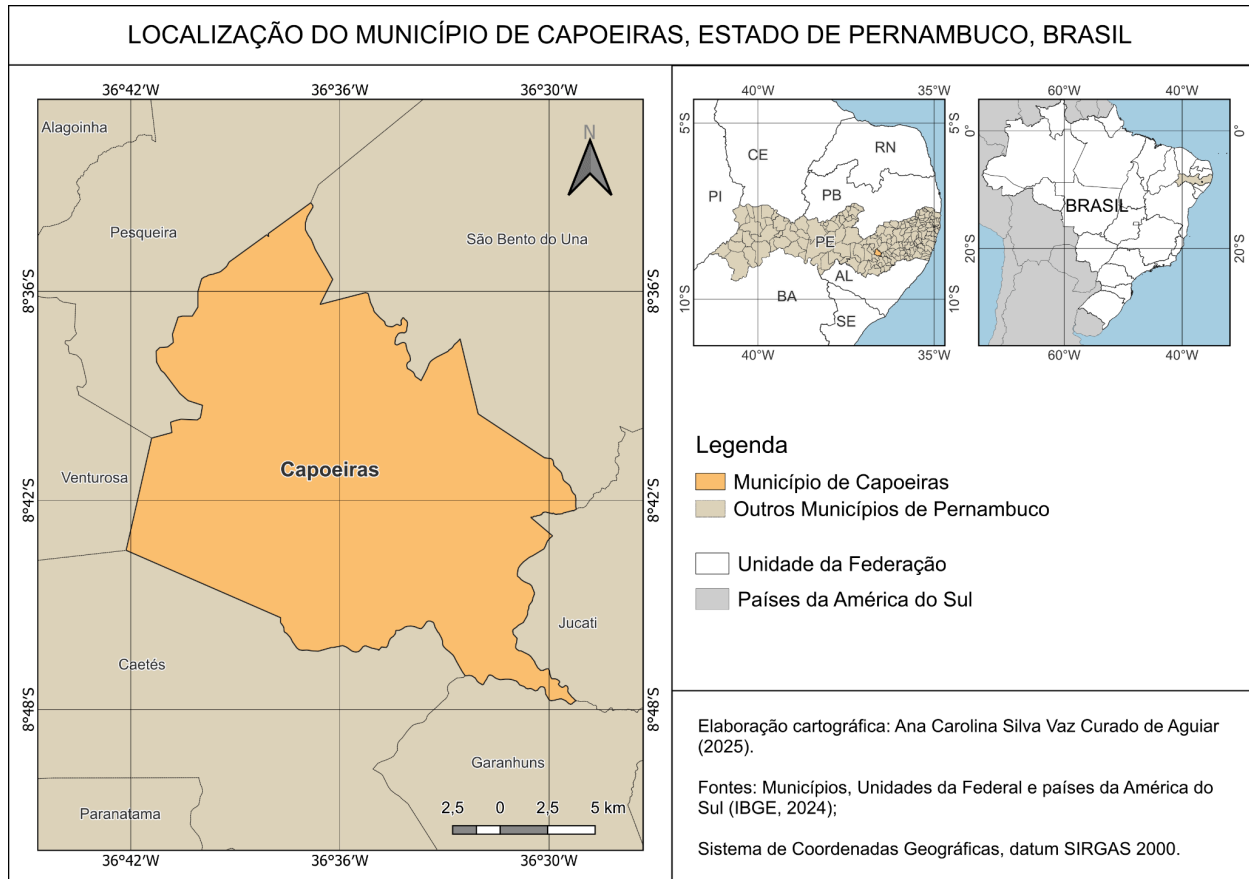
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do estudo

A pesquisa foi conduzida em duas etapas distintas, contemplando atividades em ambiente de laboratório e em campo. A primeira etapa, de caráter experimental e de desenvolvimento tecnológico, foi realizada nos laboratórios do Grupo de Pesquisa em Ambiência Animal (GPESA) e do Departamento de Estatística e Informática (DEINFO), ambos pertencentes à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Recife-PE. Nessa fase, foram conduzidos os testes de calibração e validação dos sensores, bem como o desenvolvimento e a programação do sistema automatizado de monitoramento.

A segunda etapa foi desenvolvida em campo, no Bezerreiro Tropical da Fazenda Almeida, localizado no município de Capoeiras, pertencente à Mesorregião do Agreste e à Microrregião do Vale do Ipojuca, no Estado de Pernambuco (Figura 1), situado a uma latitude de 08°44'05" S, longitude 36°37'36" O e altitude média de 888 m. Onde o sistema automatizado foi instalado e monitorado sob condições reais de funcionamento.

Figura 1 -Localização do Município de Capoeiras, Estado de Pernambuco, Brasil

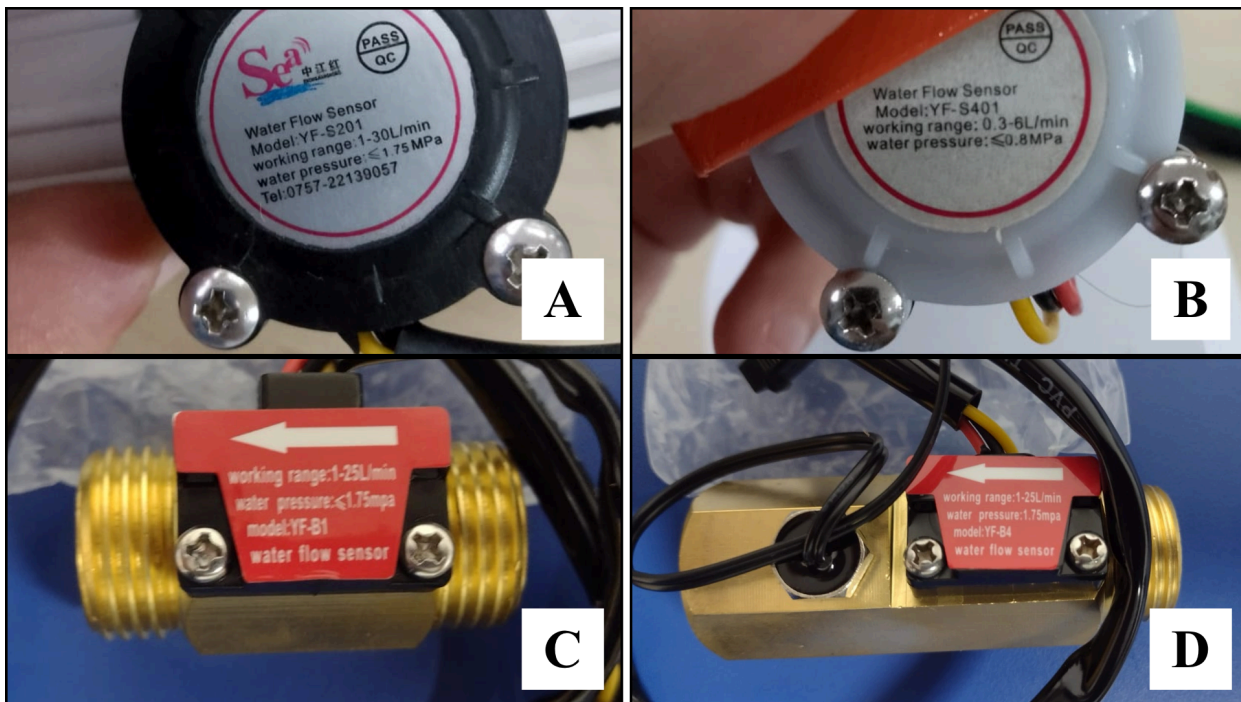


Fonte: Autora (2025), com base em dados do IBGE (2024).

4.2 Fase Laboratorial

Foram selecionados quatro modelos de sensores de fluxo de água, todos baseados no efeito Hall com microturbina, amplamente utilizados na medição de líquidos devido à sua precisão, estabilidade de sinal e facilidade de integração a sistemas embarcados: YF-S201, YF-S401, YF-B1 e YF-B4 (Figura 2). A escolha dos sensores baseou-se em critérios técnicos, operacionais e de viabilidade econômica, visando sua aplicabilidade prática em sistemas pecuários. Os modelos diferem quanto à faixa de vazão e à resistência térmica, permitindo a avaliação do desempenho sob diferentes regimes de escoamento e condições ambientais. O sensor YF-S201 apresenta faixa de medição de 1 a 30 L min⁻¹, enquanto o YF-S401 opera entre 0,3 e 6 L min⁻¹, sendo mais adequado a baixos fluxos, compatíveis com o consumo hídrico individual de bezerras em aleitamento. Já os sensores YF-B1 e YF-B4 possuem faixas de 1 a 25 L min⁻¹ e destacam-se pela maior robustez e resistência térmica, suportando temperaturas de até 60 °C e 80 °C, respectivamente, o que os torna apropriados para sistemas instalados em ambientes externos e expostos à radiação solar direta. Além disso, a ampla disponibilidade comercial e o baixo custo relativo desses sensores favoreceram sua seleção, garantindo a replicabilidade do sistema em propriedades rurais.

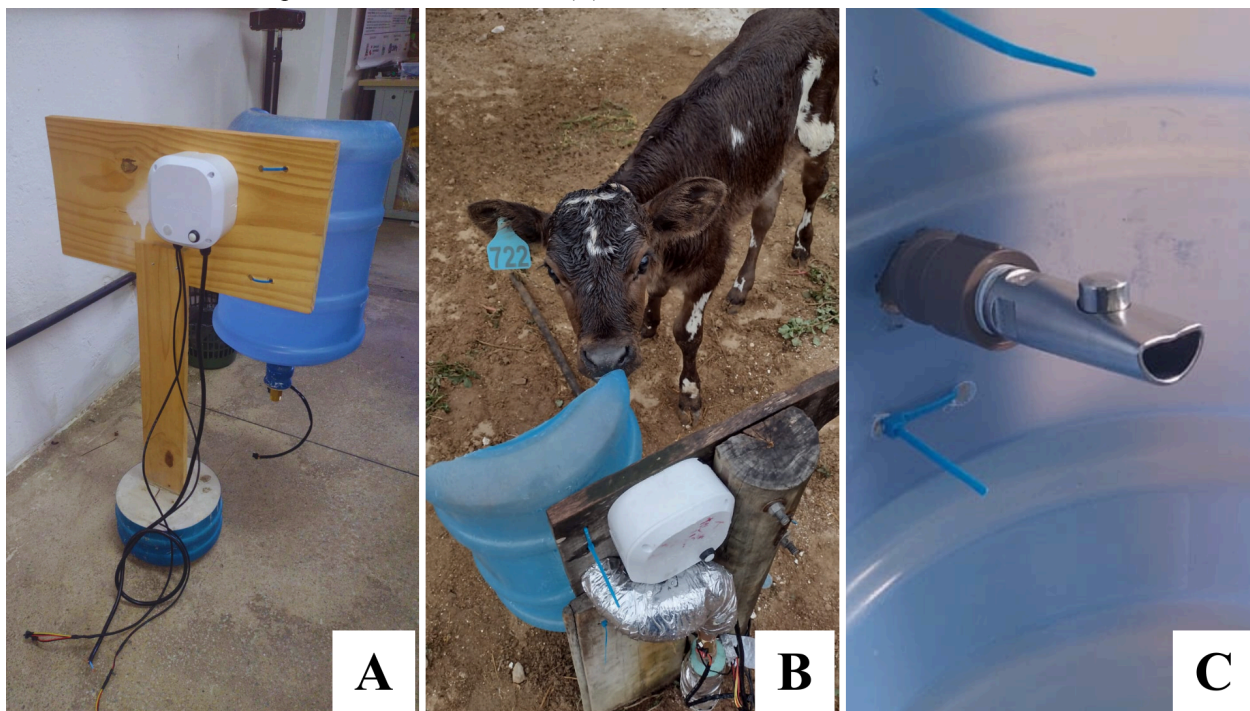
Figura 2 - Modelos dos sensores utilizados no teste comparativo: YF-S201 (A); YF-S401 (B); YF-B1 (C) e YF-B4 (D).



Fonte: Autora, 2024.

Para avaliar e comparar o desempenho inicial de diferentes modelos de sensores de fluxo, foi realizada a calibração em ambiente controlado. Para isso, desenvolveu-se um protótipo que reproduz as condições operacionais dos bebedouros utilizados na dessedentação das bezerras no Bezerreiro Tropical da Fazenda Almeida. (Figura 3A e 3B). O fornecimento de água às bezerras é realizado por meio de bebedouros individuais do tipo bico, especificamente o modelo *Bit Ball* (Figura 3C), que opera por acionamento mecânico. Nesse sistema, conhecido como *nipple drinker*, a liberação da água ocorre mediante pressão exercida pelo próprio animal sobre o mecanismo, permitindo um fluxo controlado e higienicamente mais seguro. Esse tipo de bebedouro contribui para reduzir desperdícios, manter a qualidade da água e favorecer um consumo mais adequado, uma vez que a oferta é disponibilizada conforme a demanda de cada bezerra.

Figura 3 - Protótipo para calibração desenvolvido em laboratório (A) e bebedouro utilizado na dessedentação dos animais no Bezerreiro Tropical da Fazenda Almeida (B).

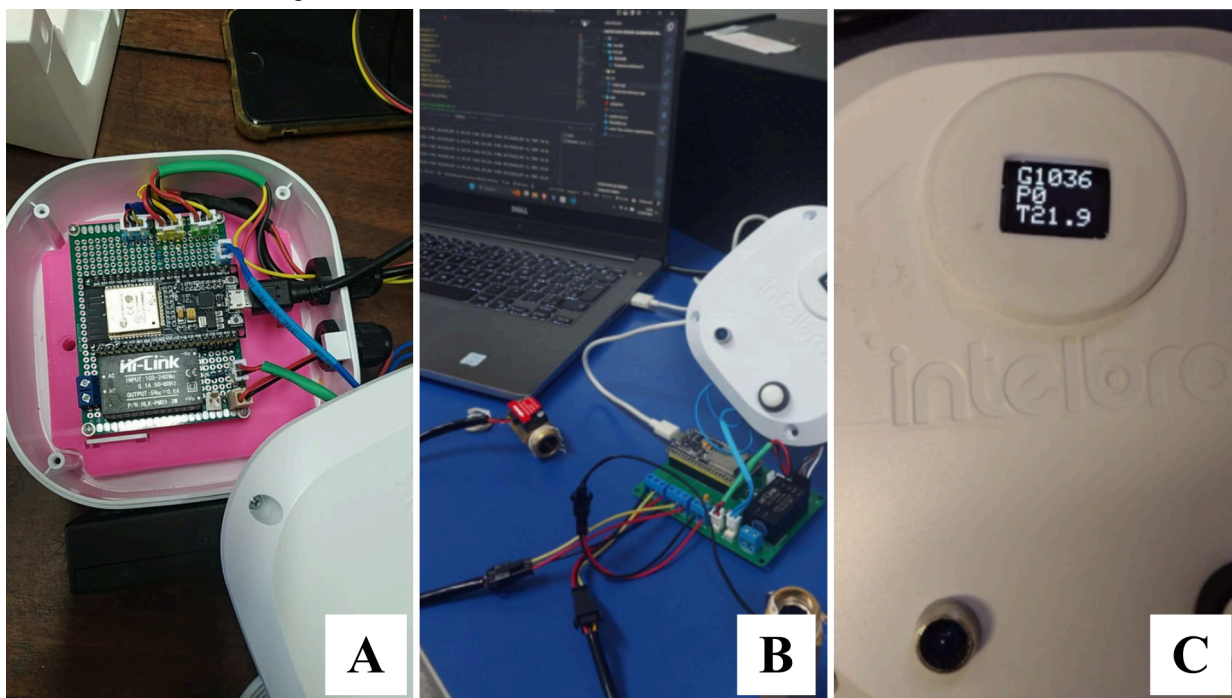


Fonte: Autora, 2024.

O sistema foi construído considerando os fluxos de entrada e saída de água, a altura manométrica das mangueiras e as dimensões das bezerras na fase de crescimento. Esses parâmetros foram cuidadosamente ajustados para garantir o posicionamento adequado e ergonômico dos bebedouros, possibilitando uma calibração precisa dos sensores em condições equivalentes às de uso real.

O protótipo desenvolvido foi equipado com um sistema de aquisição de dados projetado para registrar, processar e visualizar as medições obtidas pelos sensores de fluxo. Utilizou-se um microcontrolador ESP32, instalado em uma estrutura protetora, responsável pela leitura dos sinais emitidos pelos sensores e pela transmissão das informações para processamento (Figura 4A). A comunicação entre o ESP32 e o computador foi estabelecida por meio da porta serial, garantindo estabilidade na transmissão dos dados e possibilitando o monitoramento em tempo real das medições (Figura 4B). As leituras sensoriais foram exibidas exclusivamente no display acoplado ao protótipo, onde os valores eram apresentados de forma contínua durante os testes (Figura 4C).

Figura 4 - Sistema de aquisição de dados: (A) microcontrolador ESP32; (B) conexão com o computador; (C) display exibindo as leituras em tempo real.



Fonte: Autora, 2024.

O sistema foi controlado por um script de programação desenvolvido especificamente para a aquisição e o tratamento dos sinais, permitindo o registro automático dos pulsos gerados pelo fluxo de água e a conversão desses sinais em valores numéricos representativos.

O programa implementado no microcontrolador é estruturado em duas partes principais: a função *setup()*, executada imediatamente após o dispositivo ser ligado, e a função *loop()*, responsável por rodar continuamente. No *setup()* são configurados todos os parâmetros essenciais do sistema, incluindo conexão à rede, inicialização dos sensores e definição dos comandos. Já no *loop()* o dispositivo executa repetidamente as ações definidas, como leitura dos sensores e envio de dados.

Durante os ensaios, realizou-se a passagem de 1 litro de água por cada sensor, utilizando uma proveta graduada para assegurar precisão no volume aferido. Foram obtidas 60 leituras por sensor, sendo 30 em fluxo contínuo e 30 em fluxo intermitente, o que possibilitou a análise comparativa quanto à estabilidade e repetibilidade das respostas registradas.

4.3 Fase em campo

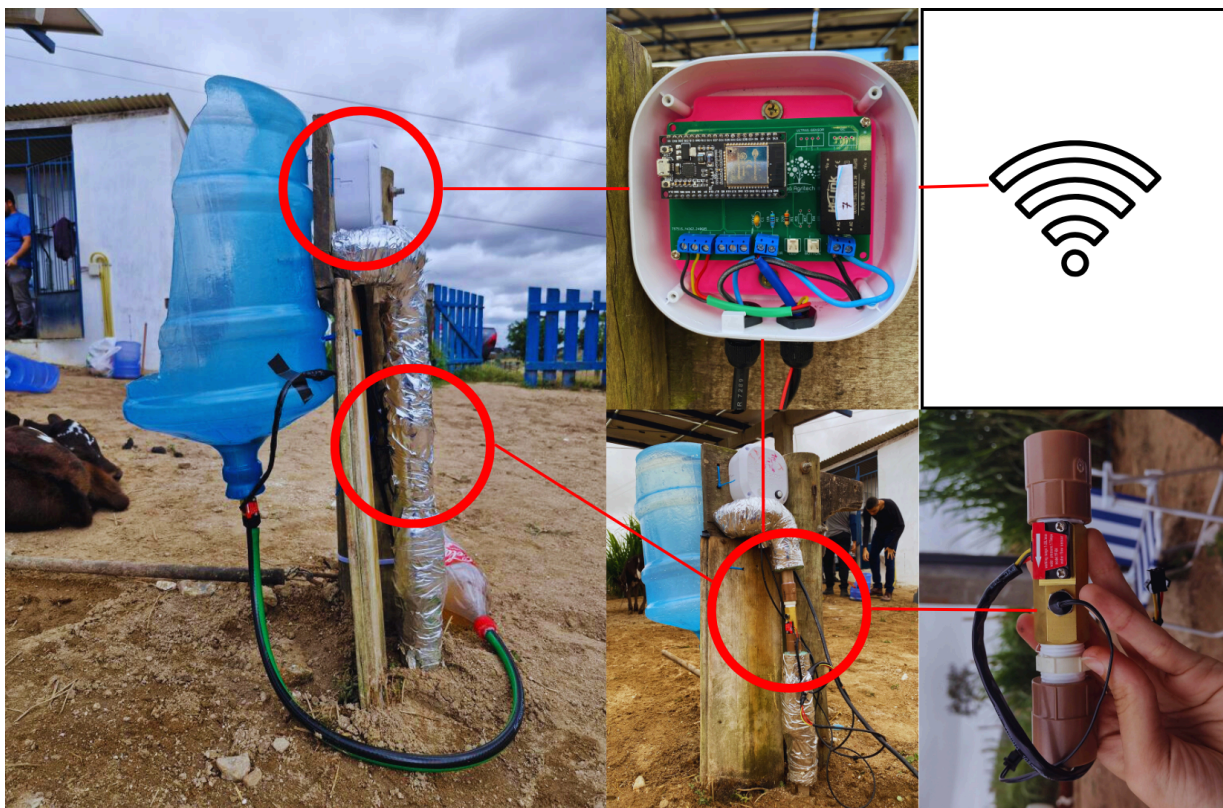
4.3.1 Sistema de Monitoramento Automatizado

Após a etapa de calibração em laboratório, o sistema de aquisição e processamento de dados foi adaptado e instalado em condições reais no bezerreiro tropical da Fazenda Almeida. O

sensor de fluxo selecionado para essa fase foi aquele que apresentou melhor desempenho durante os testes laboratoriais, sendo integrado à tubulação de entrada de água dos bebedouros para registro do volume total de água fornecido aos animais durante o processo de dessedentação.

A estrutura desenvolvida em campo contou com isolamento térmico, a fim de minimizar a influência do aquecimento da água por radiação solar e garantir maior estabilidade nas medições. O sensor foi conectado a um microcontrolador *ESP32*, no qual é responsável pela leitura, processamento inicial e transmissão dos sinais coletados. Para isso, o dispositivo foi programado por meio do ambiente *PlatformIO*, integrado ao editor *Visual Studio Code*, que permitiu a gravação do código operacional no microcontrolador e a comunicação entre o dispositivo físico e o sistema computacional (Figura 5).

Figura 5 - Estrutura desenvolvida em campo para monitoramento automatizado, integrando sensor, microcontrolador e servidor online.



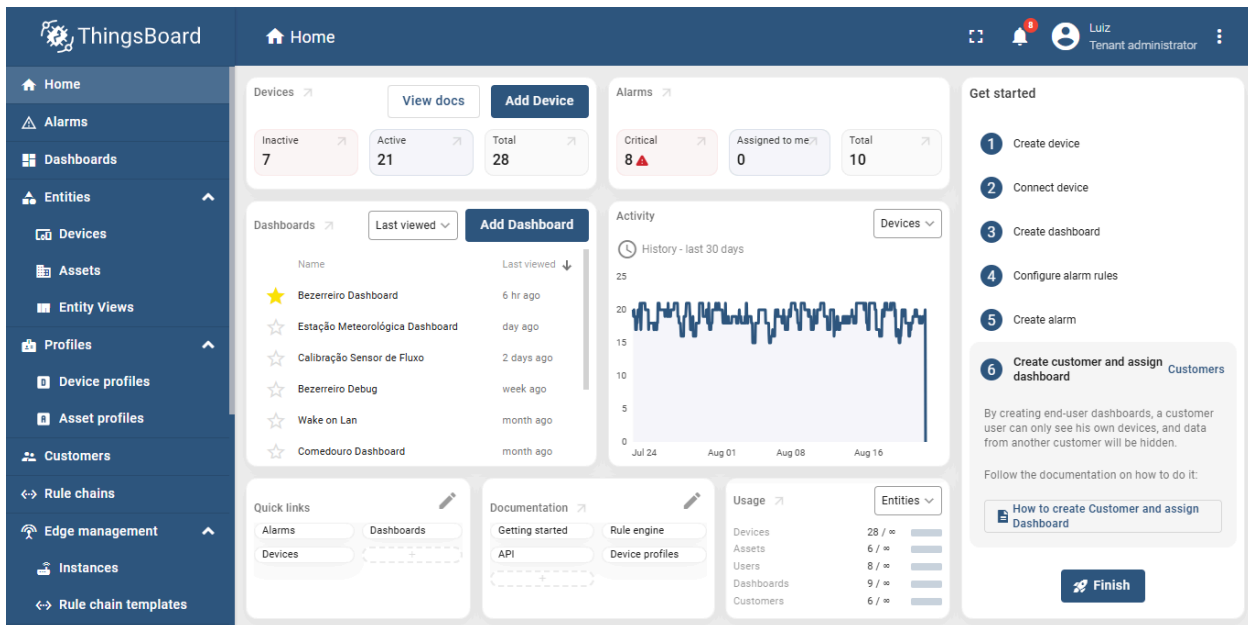
Fonte: Autora, 2025.

O sistema foi configurado para enviar os dados via rede *Wi-Fi* a um servidor online, permitindo o armazenamento, o processamento remoto e o monitoramento contínuo das informações (Figura 5). Nessa configuração, o *ESP32* transmite automaticamente as leituras dos sensores para a plataforma, garantindo atualização frequente dos registros e maior confiabilidade no acompanhamento das variações de consumo hídrico pelas bezerras.

A arquitetura do sistema foi estruturada com base em uma plataforma de Internet das Coisas (*IoT*) implementada no *ThingsBoard*, ferramenta de código aberto voltada à integração, visualização e gerenciamento de dispositivos conectados. A Figura 6 evidencia a interface geral da plataforma *IoT* utilizada, exibindo o painel principal do *ThingsBoard*, responsável por gerir dispositivos, *dashboards*, alarmes e rotinas de aquisição. Observa-se que o ambiente fornece uma

visão centralizada dos equipamentos conectados, incluindo métricas de atividade, diagnósticos operacionais e acesso rápido aos dados enviados pelo ESP32. Esse painel funcionou como o núcleo de gerenciamento do sistema, possibilitando acompanhar o estado de comunicação do sensor, verificar eventuais falhas e garantir a consistência do fluxo de dados.

Figura 6 - *ThingsBoard*.



Fonte: Autora, 2025.

Por meio dessa plataforma, foi desenvolvido um *dashboard* interativo específico para o bezerreiro, o qual possibilitou a visualização em tempo real do fluxo de água nos bebedouros, o acompanhamento do status operacional do sistema e o subsídio à análise de desempenho sob condições reais de uso.

4.3.2 Método de calibração em campo

A calibração em campo foi implementada diretamente no mesmo sistema descrito no item 4.3.1 (Sistema de Monitoramento Automatizado), utilizando o mesmo microcontrolador *ESP32*, o mesmo ambiente de programação (*PlatformIO*) e o mesmo código-base. Para essa etapa, acrescentou-se ao *firmware* uma nova funcionalidade dedicada exclusivamente ao processo de calibração, estruturada como uma função adicional executada mediante comando do operador.

Essa função de calibração foi integrada ao conjunto de rotinas que já fazem parte da arquitetura do código, baseadas nas funções *setup()* e *loop()*. A lógica de acionamento foi condicionada ao botão físico instalado no dispositivo: diferentes padrões de clique (como clique simples ou duplo clique) foram definidos no código para ativar funções específicas, entre elas o modo de calibração.

Uma vez acionado, o modo de calibração faz com que o dispositivo execute uma sequência de procedimentos programados, os quais incluem a leitura bruta gerada pelos pulsos do sensor de fluxo e o envio imediato dessas informações para o servidor configurado na

plataforma *ThingsBoard*. O *ThingsBoard* recebe os dados, armazena os valores enviados e os disponibiliza para consulta e processamento.

Após a calibração ser realizada no *dashboard*, os parâmetros resultantes (atributos específicos de calibração) ficam registrados no servidor. Para aplicá-los no dispositivo instalado em campo, o *ESP32* foi programado para, sempre que ligado, realizar automaticamente uma solicitação de atributos ao *ThingsBoard*. Essa solicitação retorna ao microcontrolador os valores calibrados previamente definidos no *dashboard*.

Uma vez recebidos, esses atributos são armazenados internamente no dispositivo, substituindo valores antigos e garantindo que o sistema opere com o parâmetro de calibração mais atualizado. A partir desse momento, todas as leituras de fluxo realizadas pelo sensor passam a ser processadas com base nesses valores ajustados.

Assim, a calibração em campo ocorreu de forma integrada ao próprio sistema embarcado, sem necessidade de intervenção adicional na estrutura física. O processo combinou o acionamento local via botão, a transmissão dos dados ao servidor e o retorno automático dos atributos calibrados ao dispositivo, assegurando que os sensores funcionassem continuamente com precisão adequada às condições reais de operação.

Durante a etapa em campo, foi implementado um procedimento de calibração destinado a assegurar que o sistema mantivesse a precisão das medições mesmo após sua instalação. A coleta de dados ocorreu por meio do sistema *IoT* desenvolvido para a pesquisa. Na plataforma *ThingsBoard*, estruturou-se um servidor online responsável pelo monitoramento e processamento das informações transmitidas pelos sensores.

4.3.3 Avaliação da estabilidade e variabilidade dos sensores

A estabilidade e a variabilidade dos sensores de fluxo de água foram avaliadas em condições reais de uso no bezerreiro tropical, utilizando o método de calibração em campo desenvolvido na etapa anterior. Essa abordagem permitiu verificar a manutenção da precisão e da confiabilidade das medições após o uso prolongado do sistema em ambiente sujeito a interferências externas.

O experimento foi conduzido após quatro meses de operação contínua do sistema de monitoramento, período no qual os sensores permaneceram expostos às condições ambientais reais do bezerreiro, incluindo variações de temperatura e umidade, deposição de poeira e vibrações decorrentes da movimentação dos animais. As calibrações foram realizadas durante o período de aleitamento das bezerras, entre os dias 20 e 25 de agosto de 2025. Até esse momento, o bebedouro utilizado nas coletas de dados encontrava-se em operação contínua, sendo utilizado para a dessedentação das bezerras desde sua implantação no sistema.

As análises foram realizadas com base em calibrações executadas diretamente em campo, por meio da ativação do modo de calibração disponível no *dashboard* da plataforma *ThingsBoard*. Com o sistema em modo de calibração, procedeu-se à passagem de 1 litro de água pelo bico do bebedouro, aferido com o auxílio de um béquer graduado. O *dashboard*, acessado por dispositivo móvel conectado ao sistema, armazenava automaticamente o número de pulsos gerados pelo sensor de entrada.

Os pulsos obtidos constituíram a base de dados para a determinação da relação entre pulsos e volume de água, permitindo identificar variações no comportamento dos sensores ao

longo do tempo. Foram realizadas 24 leituras por sensor, sendo 12 em regime contínuo e 12 em regime intermitente, este último simulando de forma mais próxima o padrão de consumo dos animais.

4.4 Análise Estatística

Os dados obtidos nas fases laboratorial e em campo foram submetidos a uma análise estatística descritiva, com o objetivo de avaliar o desempenho e a consistência das leituras registradas pelos sensores. A análise contemplou o cálculo da média, como medida de tendência central; do desvio padrão, representando a variabilidade dos dados; da mediana, como valor típico da distribuição; além da determinação dos valores mínimos e máximos, que expressam a amplitude das observações, e da identificação de possíveis *outliers* (valores atípicos).

Os valores apresentados nas estatísticas descritivas não representam diretamente os volumes medidos, mas sim valores normalizados, calculados pela divisão de cada medição pela média de sua respectiva série. Após essa etapa, os valores tornam-se adimensionais, expressando apenas a variação relativa das leituras em torno da média. Assim, um valor igual a 1 indica medição exatamente igual ao valor médio; valores acima ou abaixo de 1 representam desvios positivos ou negativos em relação ao esperado. Essa normalização foi adotada como forma de comparar sensores com diferentes faixas e respostas de leitura sob a mesma escala, permitindo avaliação rigorosa da estabilidade de cada modelo.

Inicialmente, os dados brutos (quantidade de pulsos registrada pelos sensores) foram organizados em planilhas eletrônicas no *Google Sheets* e posteriormente importados para o *Google Colab*, onde foram estruturados em *DataFrames* separados por sensor e por condição de fluxo (contínuo ou intermitente). A partir desses dados brutos, foram elaborados boxplots, que permitem visualizar a dispersão, simetria e presença de valores extremos nas leituras reais de pulsos de cada sensor em cada condição de operação.

Em seguida, com o objetivo de realizar análises comparativas detalhadas da precisão de cada sensor, os valores brutos foram normalizados e submetidos ao cálculo de estatísticas descritivas (mediana, quartis, valores extremos e desvio-padrão), além da determinação do erro padrão da média, indicador da confiabilidade das estimativas normalizadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fase Laboratorial

A Tabela 1 mostra que todos os sensores apresentaram média igual a 1 em ambos os regimes de fluxo (contínuo e intermitente), indicando calibração centralizada. Embora essa medida isoladamente pouco informe sobre a variabilidade. Outros parâmetros estatísticos fornecem informações mais robustas sobre o comportamento dos sensores, como o desvio padrão, os valores extremos (mínimo e máximo) e os quartis, que permitem avaliar a dispersão, a estabilidade e a presença de possíveis *outliers* nas leituras, indicados na tabela 1.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos sensores de fluxo de água YF-S201, YF-S401, YF-B1 e YF-B2 em condição de fluxo contínuo e intermitente.

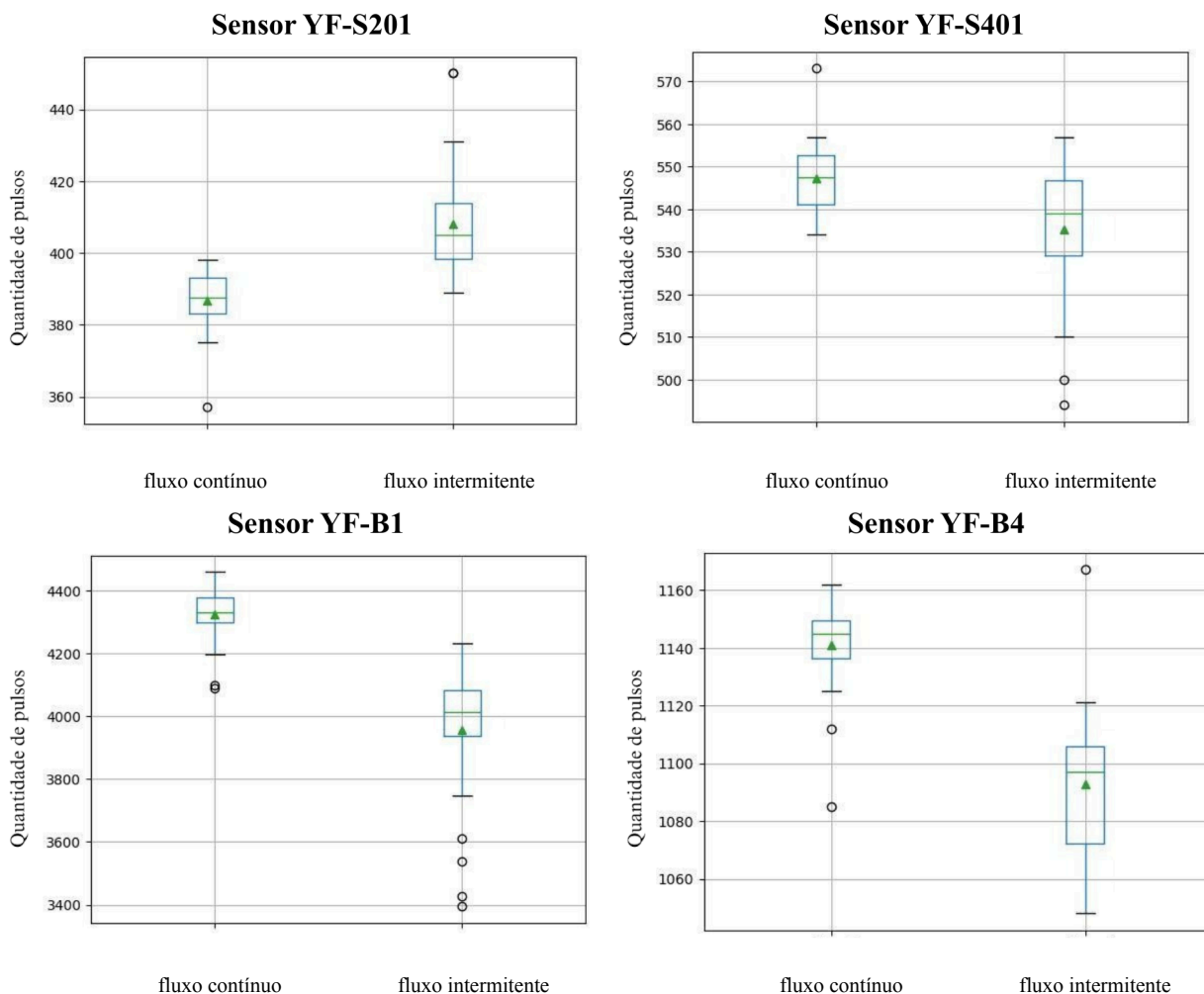
	YF-S201		YF-S401		YF-B1		YF-B4	
	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente
Quantidade de leituras	30	30	30	30	30	30	30	30
Média	1	1	1	1	1	1	1	1
Desvio Padrão	0,021952	0,036894	0,020103	0,054116	0,015426	0,029428	0,013133	0,022583
Valor Mínimo	0,922799	0,953042	0,946204	0,857822	0,975937	0,922847	0,951004	0,959004
25% Primeiro Quartil (Q1)	0,990651	0,975704	0,994151	0,995316	0,989187	0,988698	0,995924	0,981195
50% Segundo Quartil (Q2)	1,001637	0,992242	1,001843	1,014524	1,000609	1,006912	1,003594	1,003843
75% Terceiro Quartil (Q3)	1,015854	1,014292	1,012311	1,031585	1,010204	1,021390	1,007538	1,012079
Valor Máximo	1,028778	1,102491	1,031340	1,069876	1,047213	1,040538	1,018494	1,067899

Fonte: Autora, 2025.

Os valores das medianas para os quatro sensores são representadas na tabela 1 como “50% Segundo Quartil (Q2)” no qual podemos averiguar algumas diferenças, como a tendência dos sensores YF-S401 e YF-B1 a captarem pulsos mais altos em condições não contínuas (1,014524 e 1,006912 respectivamente) possivelmente devido a picos momentâneos. Em contraste, os sensores YF-S201 e YF-B4 mostram uma maior consistência, com valores da mediana iguais a 0,992242 e 1,003843 respectivamente, especialmente o YF-B4, que quase não apresenta diferença entre as medianas nas duas condições. McGrath et al. (2018), argumentam que métodos baseados em mediana são mais eficazes para analisar dados onde a distribuição pode ser distorcida. A mediana, ao ser menos influenciada por valores extremos, fornece uma medida central mais robusta, especialmente em contextos em que a precisão é essencial. Assim, a escolha da mediana como métrica central neste estudo não apenas esclarece as diferenças de desempenho entre os sensores, mas também se alinha com as recomendações metodológicas para assegurar uma análise mais precisa e confiável (McGrath et al., 2018).

O desvio padrão (DP) indica a dispersão dos dados em relação à média, expressando a variabilidade dentro de uma amostra (Barde e Barde, 2012). Um desvio padrão menor indica que os dados estão mais próximos da média, enquanto um desvio padrão maior, uma maior dispersão dos dados. Os *boxplots* ilustrados na figura 7 destacam as dispersões entre os sensores em condições de fluxo diferentes (contínuo e intermitente). Ao observarmos os valores do desvio padrão para os diferentes regimes de fluxos de água, podemos inferir que o fluxo contínuo apresenta uma menor dispersão das leituras em comparação com o fluxo intermitente. Isso significa que, durante o fluxo contínuo, as leituras dos sensores tendem a ser mais consistentes e previsíveis, com uma menor variabilidade entre as medições. Palenzuela et al. (2005), corrobora com essa tendência, constatando em sua pesquisa, a eficácia dos sensores com fluxo contínuo na obtenção de medidas mais precisas em comparação com outros métodos de análise.

Figura 7 - *Boxplots* do fluxo contínuo e intermitente dos sensores de fluxo de água modelo YF-S201(A); YF-S401(B); YF-B1(C) e YF-B4(D).



Fonte: Autora, 2025.

A análise dos valores extremos (mínimos e máximos) fornece informações importantes sobre a variabilidade e a sensibilidade dos sensores a flutuações rápidas do fluxo. Mesmo quando a mediana se mantém estável, picos ou quedas momentâneas podem indicar instabilidade no desempenho geral do sensor.

Os valores mínimo e máximo (Tabela 1) complementam a interpretação da mediana. O YF-S201, por exemplo, exibe maior amplitude de variação na condição de fluxo intermitente (mínimo de 0,953042 e máximo de 1,10249), evidenciando maior suscetibilidade a leituras extremas. De modo semelhante, o YF-S401 também demonstra maior sensibilidade a flutuações sob fluxo intermitente.

O sensor YF-B1, por sua vez, apresenta comportamento distinto: sua maior amplitude de medições ocorre no regime de fluxo contínuo, sugerindo que sua variabilidade não está diretamente relacionada à natureza intermitente do fluxo. Já o YF-B4, embora apresente medianas estáveis, mostra certa variabilidade nos valores extremos sob regime de fluxo

intermitente. Ainda assim, entre todos os sensores analisados, o YF-B4 é o que apresenta a menor amplitude de valores extremos nessa condição, variando de 0,959004 a 1,067899, reforçando seu melhor desempenho geral em termos de estabilidade.

Nos *boxplots* ilustrados na figura 7 podemos observar a presença de *outliers*, no qual são representados por pontos individuais, cada ponto fora da “cauda” representa um *outlier*, um valor considerado atípico ou discrepante, no qual pode indicar um erro na coleta de dados, um fenômeno raro, um ponto de interesse que merece investigação. O YF-B1, devido ao maior número de *outliers*, é o menos confiável em termos de consistência.

De acordo com os resultados apresentados o sensor YF-B4 é o mais adequado para aplicações que requerem alta consistência nas medições, especialmente em fluxo contínuo. Em contraste, o YF-S401 é o menos adequado em situações em que a precisão é crítica, devido à sua alta variabilidade no fluxo intermitente. Em termos de mediana, o YF-B4 é novamente o sensor mais consistente, sendo o mais adequado para aplicações que demandam estabilidade nas medições centrais. O YF-S401 e o YF-B1, ao captarem pulsos mais altos, podem ser mais adequados para detectar variações rápidas no fluxo. Em relação aos valores mínimos e máximos, o YF-B4, apesar de apresentar maior variabilidade nos valores extremos na condição de fluxo intermitente, ainda se destaca por sua estabilidade. O YF-S401, com grande amplitude de valores na condição de fluxo intermitente, é o menos adequado para situações em que a estabilidade é crucial.

No cenário presente, os sensores foram utilizados para medir o consumo de água em bebedouros de um bezerreiro tropical, no qual o fluxo de água é intermitente, já que os animais bebem em momentos variados, causando interrupções no fluxo. Essa condição impõe desafios específicos para os sensores de fluxo de água, que precisam fornecer medições precisas mesmo em condições não contínuas. Considerando as características dos sensores YF-S201, YF-S401, YF-B1 e YF-B4 analisados, o YF-B4 é o sensor mais adequado e assim foi utilizado nas etapas seguintes. Ele oferece a melhor combinação de baixa variabilidade, mediana estável e valores extremos controlados, garantindo medições confiáveis e consistentes. Por outro lado, o YF-S401 é o menos adequado, devido à sua alta variabilidade e sensibilidade a picos e quedas abruptas, o que pode resultar em medições imprecisas e inconsistentes. O YF-S201 e o YF-B1 também apresentam desafios em termos de estabilidade e precisão, mas são opções intermediárias, com o YF-S201 sendo ligeiramente preferível ao YF-S401 devido à menor variabilidade.

5.2 Fase em campo

5.2.1 Sistema de monitoramento automatizado (*Dashboard*)

O Sistema de monitoramento automatizado foi pensado para implementação em condições reais no bezerreiro no qual permitiu avaliar o desempenho do sensor selecionado e a eficiência do processo de aquisição, transmissão e visualização dos dados. Após a instalação no ambiente de campo, o dispositivo apresentou funcionamento estável, permitindo o monitoramento contínuo do fluxo de água durante os períodos de dessedentação das bezerras.

Na Figura 8A apresenta-se o dashboard geral desenvolvido para o bezerreiro, no qual cada bebedouro é identificado individualmente, permitindo o monitoramento simultâneo de todas as unidades instaladas no setor. Ao selecionar qualquer bebedouro, o usuário é direcionado ao

respectivo painel específico; a Figura 8C ilustra esse comportamento, exibindo como exemplo a Unidade Experimental 07. Nesse painel, observa-se que o sistema foi capaz de registrar, processar e disponibilizar, de forma organizada e intuitiva as informações referentes ao consumo hídrico. Dessa forma, o usuário dispõe de subsídios imediatos para avaliar o comportamento de ingestão de água dos animais e o desempenho operacional do bebedouro monitorado.

Além do acompanhamento individual, o sistema também possibilita a análise integrada de todo o bezerreiro. Nas Figuras 8B e 8D, observa-se o comportamento de consumo hídrico considerando todos os bebedouros instalados na propriedade, oferecendo uma visão global do manejo hídrico do setor. Enquanto o gráfico da Figura 8D apresenta o consumo de água registrado nos últimos 140 dias, permitindo identificar variações recentes e padrões de curto prazo, o gráfico da Figura 8B exibe a evolução mensal do consumo, abrangendo o período de junho a setembro de 2025. Essa distinção entre escalas temporais possibilita ao usuário analisar tanto tendências de longo prazo quanto alterações mais imediatas no consumo hídrico do bezerreiro.

Figura 8 - Dashboard do bezerreiro com todas unidades de bebedouro (A); Gráfico disponível no dashboard do bezerreiro sobre consumo de água ao longo do tempo (B); página do bebedouro 07 (C) e consumo de água dos último 140 dias de todos os bebedouros (D).



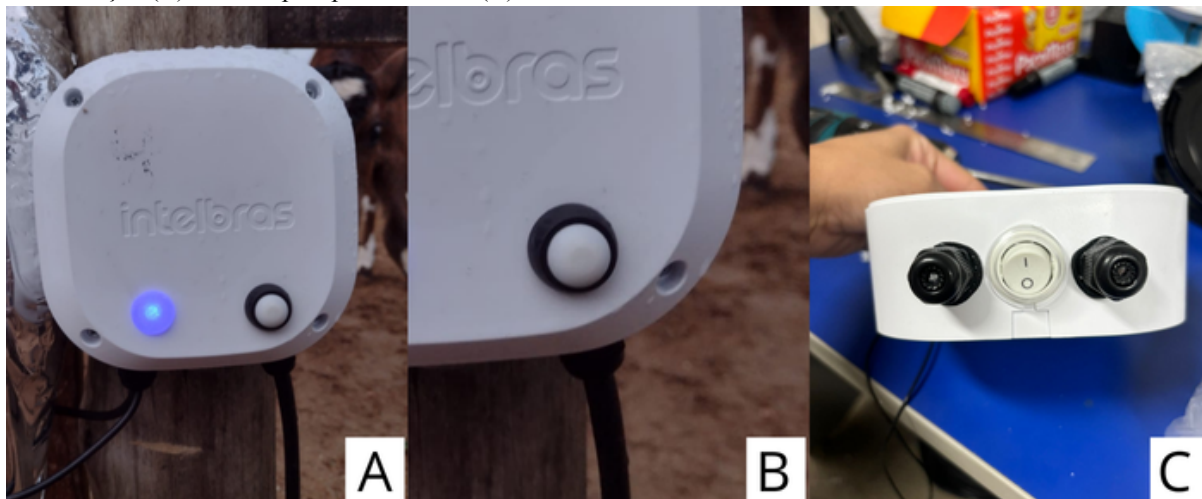
Fonte: Autora, 2025.

A consistência das leituras ao longo do período monitorado confirma que o sensor escolhido apresentou desempenho satisfatório em condições reais, corroborando os resultados obtidos na etapa de calibração laboratorial. A transmissão via *Wi-Fi* mostrou-se estável, sem perdas significativas de pacotes, e a integração com o *ThingsBoard* permitiu a visualização instantânea das informações, atendendo ao objetivo de disponibilizar dados em tempo real. Além disso, o *dashboard* específico do bezerreiro demonstrou potencial para subsidiar estudos sobre padrões de dessedentação, identificar variações anormais no fluxo e apoiar estratégias de manejo hídrico e de bem-estar animal.

5.2.2 Modo de calibração em campo

No painel de controle (*dashboard*), incorporou-se um modo de calibração que pode ser ativado diretamente no dispositivo instalado em campo. A ativação ocorre mediante o reinício do sistema e a manutenção do botão pressionado até que o indicador luminoso azul passe a piscar, sinalizando a entrada no modo de calibração (Figura 9 ABC).

Figura 9 - Dispositivo de calibração: Luz azul que sinaliza modo de calibração ativado (A), botão para ativar modo de calibração (B) e interruptor para reiniciar (C)



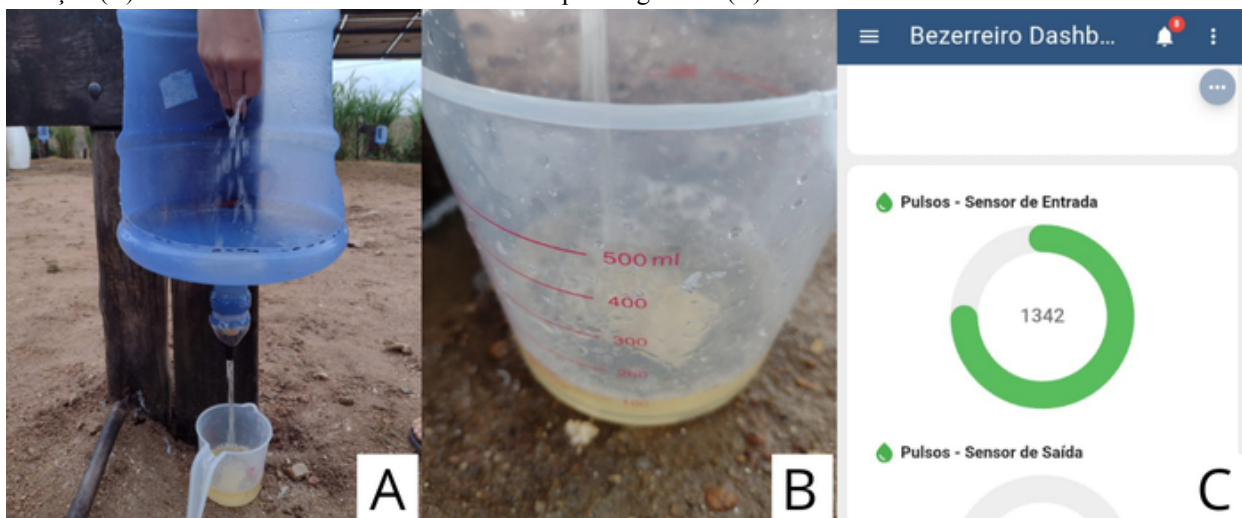
Fonte: Autora, 2025.

Com o modo de calibração ativado, o sistema inicia a contagem dos pulsos gerados pelo sensor de entrada, os quais são registrados automaticamente no *dashboard* em tempo real. Esses pulsos representam a resposta do sensor à passagem de água e constituem a base para o estabelecimento da relação entre o número de pulsos e o volume correspondente, procedimento semelhante ao descrito por Si Thu et al. (2018), que utilizaram um método volumétrico baseado na contagem de pulsos do sensor YF-S201 para determinar o fator de calibração do dispositivo.

O método desenvolvido possibilita a calibração periódica e descentralizada dos sensores, garantindo a confiabilidade dos dados obtidos em condições operacionais reais, sem a necessidade de procedimentos laboratoriais adicionais. Esse enfoque prático está alinhado às recomendações de Si Thu et al. (2018), que destacam que a calibração por volume conhecido pode ser executada em campo sempre que necessário, desde que o fluxo seja monitorado de forma estável e o número de pulsos seja precisamente registrado pelo microcontrolador.

Com o modo de calibração ativado no *dashboard*, foi realizada a passagem de um volume conhecido de água. Para validação, utilizou-se 1 litro, medido com auxílio de um béquer de 500 mL. Após cada litro conduzido pelo bico do bebedouro, é acionado o botão de calibração a fim de executar uma nova passagem do mesmo volume. A cada acionamento do botão, o *dashboard* acessado pelo dispositivo móvel informava a quantidade de pulsos gerados pelo sensor de entrada (YF-B4), (Figura 10).

Figura 10. Método de calibração em campo: Pressão no bico para passagem de água (A), becker utilizado na medição (B) e Dashboard retornando os valores dos pulsos gerados (C).



Fonte: Autora, 2025.

5.2.3 Avaliação da estabilidade e variabilidade dos sensores

Após um período de quatro meses de exposição a diversos fatores ambientais, incluindo variações de temperatura, umidade, presença de poeira e vibrações provocadas pelos animais, foram conduzidas as calibrações. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para o regime de fluxo contínuo e intermitente utilizando o sensor YF-B4.

Tabela 2. Estatística descritiva da Calibração do Sensor de Fluxo YF-B4, em condição de fluxo contínuo e intermitente, durante o período de 6 dias consecutivos.

	20/08		21/08		22/08		23/08		24/08		25/08	
	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente	Contínuo	Intermitente
Quantidade de leituras	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Média	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Desvio Padrão	0,081253	0,034775	0,027235	0,032066	0,018996	0,042379	0,012154	0,026693	0,031183	0,058789	0,06770	0,051039
Valor Mínimo	0,785813	0,957298	0,951981	0,942191	0,963095	0,916473	0,969956	0,969859	0,922938	0,902928	0,985778	0,873146
25% Primeiro Quartil (Q1)	1,001612	0,975349	0,951981	0,942191	0,963095	0,916473	0,969956	0,978253	0,989635	0,957242	0,996222	0,995716
50% Segundo Quartil (Q2)	1,016582	0,991460	1,008858	0,999020	0,999111	1,006293	1,002288	0,998474	1,008562	0,994607	1,000889	1,012404
75% Terceiro Quartil (Q3)	1,041916	1,015916	1,022844	1,024299	1,013339	1,029542	1,006274	1,008394	1,018702	1,042,758	1,003556	1,021803
Valor Máximo	1,090742	1,059783	1,026573	1,051930	1,029791	1,067497	1,014247	1,060664	1,034700	1,086287	1,013333	1,074936

Fonte: Autora, 2025.

Em campo, assim como observado na etapa laboratorial, as leituras obtidas sob ambos os regimes de operação (contínuo e intermitente) apresentaram média igual a 1. Esse resultado evidencia que, independentemente das condições de funcionamento, as medições permaneceram centradas no mesmo valor de referência, indicando estabilidade na resposta dos sensores. Entretanto, a média por si só não expressa a amplitude das variações encontradas, tornando

necessária a análise da distribuição dos dados.

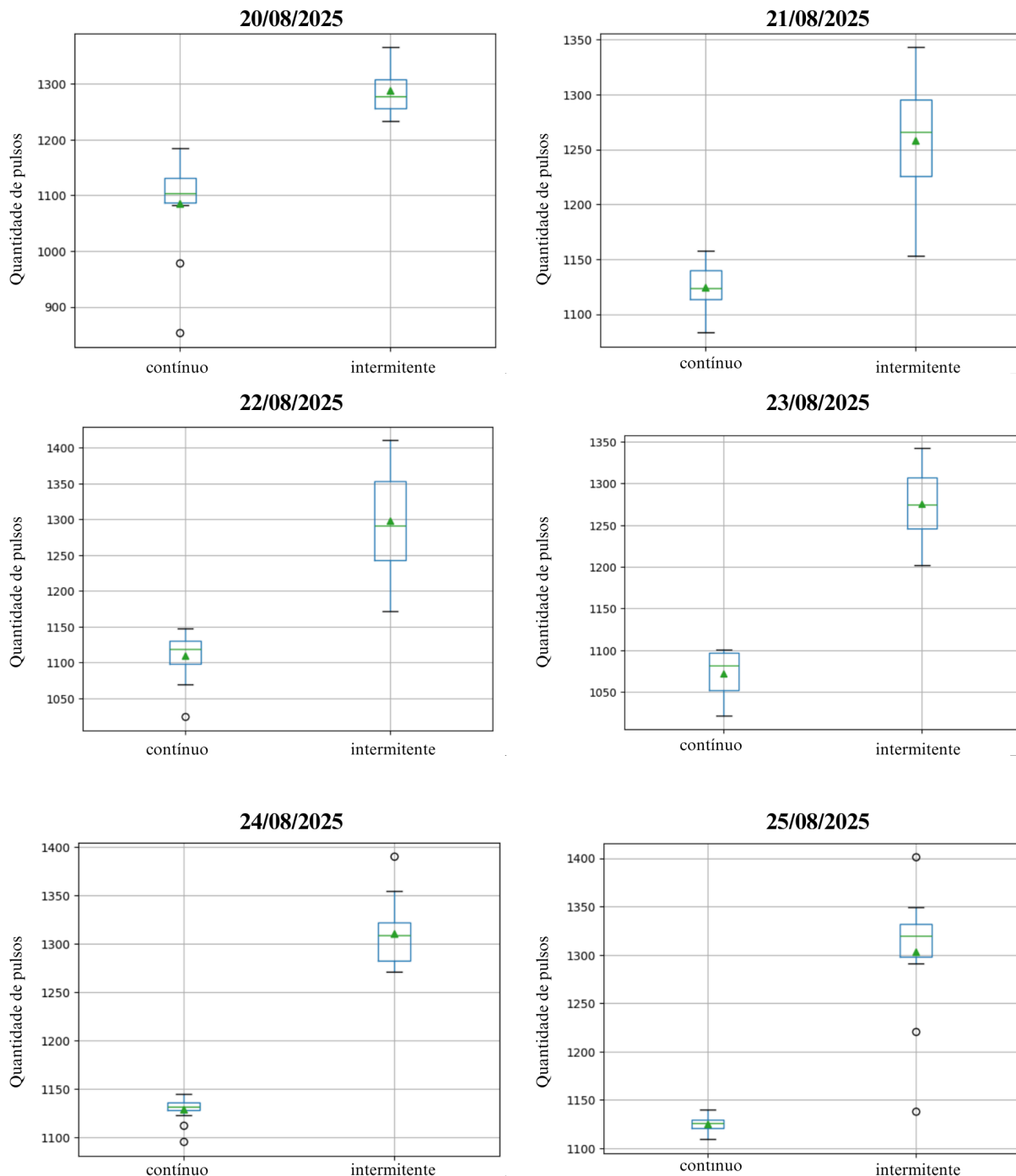
Observou-se que o regime de fluxo contínuo proporcionou menor variabilidade das leituras, refletida em valores reduzidos de desvio padrão e maior estabilidade entre mínimo e máximo registrados. Essa característica é amplamente documentada na literatura para sensores do tipo turbina com detecção Hall, cujo princípio de funcionamento é equivalente ao do sensor estudado. Bezerra et al. (2018) demonstram que, sob fluxo contínuo e estabilizado, o sensor utilizado em sua pesquisa (YF-S201) apresenta baixa dispersão e comportamento previsível, com desvio padrão de apenas 2,63 cm³/s em condições controladas.

No entanto, no primeiro dia de calibração (20/08), verificou-se uma anomalia expressiva: o desvio padrão do fluxo contínuo (0,81253) superou significativamente o do fluxo intermitente (0,34775), além de registrar o maior valor de DP de todo o experimento. Esse comportamento atípico é explicado pela condição operacional singular daquele dia, no qual tratava-se da primeira calibração após aproximadamente quatro meses sem uso. Em sensores mecânicos com hélice, longos períodos de inatividade tendem a favorecer o acúmulo de impurezas, a formação de micro travas e o desalinhamento inicial do rotor, gerando variações importantes nos pulsos detectados. Esse fenômeno é amplamente relatado por Si Thu et al. (2018), os quais destacam que a precisão do sensor utilizado em sua pesquisa (YF-S201) pode ser significativamente comprometida antes da estabilização do movimento da turbina, especialmente após períodos de desuso ou quando sujeita a obstruções parciais

A estabilização progressiva observada nos dias subsequentes confirma essa interpretação. Com o funcionamento contínuo, as partículas residuais foram gradualmente removidas e o rotor recuperou seu comportamento dinâmico ideal, fazendo com que os valores de desvio padrão diminuíssem e os extremos (mínimos e máximos) se aproximassem das faixas consideradas normais. Esse padrão é coerente ainda com o estudo de Djalilov et al. (2023), que verificaram erro médio de apenas 0,5% no sensor YF-S201 após estabilização do fluxo e correta calibração, reforçando que o desempenho desses transdutores melhora substancialmente após um período inicial de operação hidráulica balanceada.

A seguir, são apresentados os *boxplots* (figura 12) referentes às leituras dos sensores sob diferentes regimes de fluxo. Esses gráficos permitem uma visualização clara da dispersão dos dados, facilitando a comparação da variabilidade entre as condições analisadas.

Figura 11. *Boxplots* da estatística descritiva em regime de fluxo contínuo e intermitente do sensor de fluxo de água YF-B4, nos dias 20/08 à 25/08 de 2025.



Fonte: Autora, 2025.

Diante do exposto, em relação ao regime de fluxo intermitente, nota-se que os valores de desvio padrão permaneceram consistentemente elevados ao longo de todos os dias, independentemente do período de uso ou de calibrações sucessivas. Esse resultado confirma que a variabilidade observada decorre essencialmente da natureza irregular do escoamento intermitente, e não de falhas ou degradação do sensor. Tanto Bezerra et al. (2018) quanto Djalilov et al. (2023) destacam que turbulências, oscilações de pressão e mudanças rápidas no padrão de escoamento afetam diretamente a estabilidade dos sensores de turbina, dificultando a

manutenção de leituras consistentes sob tais condições . A ausência de tendência linear entre os dias, isto é, sem aumento nem diminuição progressiva, fortalece essa conclusão: a dispersão é intrínseca à dinâmica hidráulica intermitente.

No que se refere aos valores mínimos e máximos registrados, o comportamento identificado reforça a influência das condições iniciais do sistema. No fluxo contínuo, o mínimo do dia 20/08 (0,785813) destoou amplamente dos demais, indicando um desalinhamento operacional correlato ao período de inatividade. Nos demais dias, tanto mínimos quanto máximos estabilizaram-se em faixas estreitas, compatíveis com a resposta linear e previsível atribuída aos sensores com efeito Hall, conforme documentado por Djalilov et al. (2023), que demonstraram que a relação frequência–vazão do YF-S201 segue modelo matemático linear após estabilidade do sistema, com curva característica definida e baixa histerese.

Por outro lado, no regime intermitente, os valores mínimos oscilaram de forma mais ampla (0,873146 a 0,969859), assim como os máximos (1,051930 a 1,086287), indicando maior sensibilidade às variações da turbulência instantânea. Tal comportamento é consistente com estudos que alertam para a necessidade de trechos retos de tubulação a montante e jusante a fim de reduzir fluxos turbulentos, condição destacada tanto por Si Thu et al. (2018) quanto por Djalilov et al. (2023), e difícil de atender em um regime intermitente por natureza.

Os dados obtidos evidenciam claramente a influência da falta de calibração por períodos prolongados sobre o desempenho do sensor. No primeiro dia de medições, após aproximadamente quatro meses sem calibração, o sensor apresentou valores mínimos significativamente fora do padrão, alcançando 0,785813 no fluxo contínuo, associados a um elevado desvio padrão. Tal comportamento é compatível com o observado por Deme (2020), que demonstra que sistemas de medição de vazão tendem a apresentar aumento de incertezas e influência mais significativa de fatores ambientais após longos períodos sem calibração adequada, resultando em perda de precisão inicial .

Nos dias subsequentes, com a realização de calibrações diárias, observou-se uma estabilização gradual dos valores mínimos e máximos, indicando recuperação do desempenho, fenômeno igualmente descrito no estudo, no qual o processo de calibração contínua reduz a influência dos erros dinâmicos e das fontes externas.

Esses resultados sugerem que o período sem calibração interfere na precisão das leituras, aumentando a probabilidade de desvios e leituras extremas. Assim, conforme apontado no estudo de Deme (2020), a calibração periódica é imprescindível para a manutenção da confiabilidade, reforçando a necessidade de protocolos regulares de ajuste para garantir a acurácia ao longo do tempo.

6. CONCLUSÕES

O sistema de monitoramento automatizado do consumo hídrico para bezerras em aleitamento foi desenvolvido, calibrado e avaliado em condições reais de uso, apresentando funcionamento estável e capacidade de gerar dados confiáveis ao longo do período experimental. Contudo, os resultados obtidos referem-se a testes realizados em um único bezerreiro, sob condições específicas de manejo, clima e infraestrutura, o que limita a extrapolação direta dos resultados para outros sistemas produtivos. Dessa forma, a aplicabilidade do sistema em

diferentes contextos depende de validações adicionais que considerem distintas raças, regimes climáticos e modelos de manejo.

A análise comparativa dos sensores de fluxo demonstrou que todos os modelos avaliados são tecnicamente viáveis para o monitoramento hídrico, embora apresentem diferenças de desempenho. O sensor YF-B4 destacou-se por maior estabilidade e menor variabilidade, especialmente em condições de fluxo intermitente. O YF-S401 apresentou maior sensibilidade a flutuações hidráulicas, enquanto os sensores YF-S201 e YF-B1 mostraram desempenho intermediário. Assim, a escolha do sensor deve considerar o regime de escoamento, o nível de precisão requerido e os custos envolvidos.

A metodologia de calibração em campo mostrou-se simples, prática e adequada ao ambiente operacional, permitindo ajustes periódicos sem a necessidade de procedimentos laboratoriais. O acompanhamento ao longo de quatro meses evidenciou que a calibração regular é essencial para manter a precisão e a estabilidade dos sensores, especialmente devido à influência de fatores ambientais. Observou-se que a variabilidade das medições aumenta após períodos prolongados sem calibração, sendo o fluxo contínuo mais estável que o intermitente, cujas dispersões estão associadas às características hidráulicas do sistema.

Embora o sistema permita a visualização dos dados em tempo real por meio do dashboard, sua efetividade no manejo depende da conversão dessas informações em ações práticas. Os dados possibilitam a identificação de falhas no fornecimento de água, alterações no padrão de consumo e potenciais desperdícios; entretanto, o sistema ainda não dispõe de alertas automáticos, o que constitui uma limitação operacional relevante.

Do ponto de vista econômico, não foi realizada análise detalhada de custos e retorno financeiro, o que limita a avaliação da viabilidade de adoção pelo produtor. Ademais, o sistema não diferencia, em sua configuração atual, o consumo efetivo das bezerras de perdas por desperdício ou vazamentos, tampouco foi integrado a outras tecnologias de pecuária de precisão.

Como perspectivas futuras, destacam-se a validação do sistema em diferentes condições produtivas, a implementação de alertas automáticos, a integração com sensores de atividade, comedouros inteligentes e sensores ambientais, bem como o desenvolvimento de métodos para distinguir consumo real de perdas hídricas. Esses avanços podem ampliar a aplicabilidade do sistema e consolidá-lo como ferramenta de apoio ao manejo hídrico na pecuária de precisão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, S.; PERES, R.; BARATA, J.; LIDON, F.; RAMALHO, J. **Characterising the Agriculture 4.0 Landscape: Emerging Trends, Challenges and Opportunities.** *Agronomy*, v. 11, n. 4, p. 667, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>. Acesso em: 05 dez. 2025.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The Internet of Things: a survey**. Computer Networks, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>. Acesso em: 21 set. 2025.

BARDE, M.; BARDE, P. **What to use to express the variability of data: standard deviation or standard error of mean?** Perspectives in Clinical Research, v. 3, p. 113–116, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4103/2229-3485.100662>. Acesso em: 28 fev. 2024.

BERNARDES, E. B.; COELHO, S. G.; CARVALHO, A. U.; OLIVEIRA, H. N.; REIS, R. B.; SATURNINO, H. M.; SILVA, C. A.; COSTA, T. C. **Efeito da substituição do feno de Tifton 85 pelo caroço de algodão como fonte de fibra na dieta de bezerras**. Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia, v. 59, p. 955–964, 2007.

BEZERRA, M. C. M.; DUARTE, F. L. C.; SOUSA JUNIOR, A. M. de. **Análise do uso dos sensores de fluxo de água YF-S201 e de distância HC-SR04 para o desenvolvimento de um sistema de informações hidrográficas residencial**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC'2018, Maceió. Anais... Maceió: CONFEA/CREA, 2018.

BITTAR, C. M. M. **Instalações para bezerras leiteiras**. Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia, n. 81, p. 26–44, 2016.

BOLDRINI, D.; MARIANO, G. **Inteligência Artificial Agro 4.0**. Jundiaí: Fundação de Ensino Octávio Bastos – UNIFEOB, 2021. Relatório de Pesquisa. Disponível em: <http://localhost:8080/handle/prefix/2419>. Acesso em: 18 abr. 2024.

BRADLEY, J.; REBERGER, C.; DIXIT, A.; GUPTA, V. **Internet of Everything: A \$4.6 Trillion Public-Sector Opportunity**. Cisco White Paper, 2013.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). **Internet das Coisas: um plano de ação para o Brasil**. Brasília, DF: BNDES, 2018. Disponível em:

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/pesquisaedados/estudos/estudo-internet-das-coisas-iot/estudo-internet-das-coisas-um-plano-de-acao-para-o-brasil>
. Acesso em: 05 dez. 2025.

BROOM, D. M. **Animal welfare: concepts and measurement**. Journal of Animal Science, v. 69, n. 10, p. 4167–4175, 1991.

BROOM, D. M.; MOLENTO, C. F. M. **Bem-estar animal: conceito e questões relacionadas – revisão**. Archives Veterinary Science, v. 9, n. 2, p. 1–11, 2004.

CAIXETA, D. G.; CARMO, J. P. do. **Criação de bezerros neonatos: manejo e bem-estar**. Scientia Generalis, v. 1, n. 3, p. 92–103, 2020.

COELHO, S. G. **Ganho de peso e desenvolvimento do estômago de bezerros desaleitados aos trinta dias de idade e alimentados com concentrado e com ou sem feno**. 1999. 123 f. Tese (Doutorado em Nutrição Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

COELHO, S. G. **Concentrado e água para bezerros**. Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia, n. 81, 2005.

COELHO, S. G. et al. Bezerras leiteiras. In: BORGES, A. L. da C. C. et al. (eds.). **Exigências Nutricionais de Zebuínos Leiteiros e Cruzados – BR-LEITE**. São Carlos: Scienza, 2024. p. 44–65. DOI: 10.26626/9786556682075.2024.C004.p.44-65.

COMPRERURAL. **Quais são os tipos de bebedouro para o gado? 2025**. Disponível em: <https://www.comprerural.com/quais-sao-os-tipos-de-bebedouro-para-o-gado/>
. Acesso em: 05 dez. 2025.

DAVIS, C. L.; CLARK, J. H. **Ruminant digestion and metabolism**. Developments in Industrial Microbiology, v. 22, p. 247–259, 1981.

DEME, I. **Estimation of measurement uncertainty in an automated flowmeter calibration system**. Brazilian Journal of Radiation Sciences, v. 9, n. 2C, p. 1–13, 2021.

DJALILOV, A. et al. **Research of water flow measuring device based on Arduino platform.** E3S Web of Conferences, v. 401, p. 04039, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202340104039.

DUNCAN, I. J. H.; FRASER, D. **Understanding animal welfare.** In: APPLEBY, M. C.; HUGHES, B. O. (eds.). Animal Welfare. Wallingford: CAB International, 1997. p. 19–31.

EMBRAPA. **Bebedouros — Gestão da água para suínos.** Disponível em: <https://www.atermaisdigital.cnptia.embrapa.br/web/suinos/gestao-da-agua/bebedouros>. Acesso em: 05 dez. 2025.

EVANS, P. C.; ANNUNZIATA, M. **Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines.** General Electric White Paper, 2012.

FENG, J.; POTKONJAK, M. **Caracterização e calibração de erros de sensores estatísticos transitivos.** IEEE Sensors, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2005.1597763>

GERSHENFELD, N.; KRIKORIAN, R.; COHEN, D. **The internet of things.** Scientific American, v. 291, n. 4, p. 76–81, 2004.

GRANDIN, T. **Animal welfare and society concerns: finding the missing link.** Meat Science, v. 98, p. 461–469, 2014.

HALACHMI, I.; GUARINO, M. **Pecuária de precisão: uma abordagem “por animal” usando tecnologias avançadas de monitoramento.** Animal, v. 10, n. 9, p. 1482–1483, 2016.

HEPOLA, H. et al. **Effects of providing water from a bucket or a nipple on the performance and behavior of calves fed ad libitum volumes of acidified milk replacer.** Journal of Dairy Science, v. 91, n. 4, p. 1486–1496, 2008.

HOTT, M. C. et al. **Distribuição da produção de leite no Brasil nas duas últimas décadas.** In: Anuário Leite 2025. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025. p. 12–15.

HOTZEL, M. J.; MACHADO FILHO, L. C. P. **Bem-estar animal na agricultura do século XXI.** Revista de Etologia, v. 6, n. 1, p. 3–15, 2004.

KERTZ, A. F.; REUTZEL, L. F.; MAHONEY, J. H. **Ad libitum water intake by neonatal calves.** Journal of Dairy Science, v. 67, p. 2964–2969, 1984.

LAUKKANEN, H.; RUSHEN, J.; DE PASSILLÉ, A. M. **Which dairy calves are cross-sucked?** Applied Animal Behaviour Science, v. 125, p. 91–95, 2010.

LEITE, J. L. B.; OLIVEIRA, L. A. A.; STOCK, L. A. B. **Balança comercial de produtos lácteos.** In: Anuário Leite 2025. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025. p. 28–30.

MACHADO FILHO, L. P. et al. **Designing better water troughs.** Applied Animal Behaviour Science, v. 89, p. 185–193, 2004.

MALAFAIA, G. C. et al. **The Brazilian beef cattle supply chain in the next decades.** Livestock Science, v. 253, p. 104704, 2021.

MCGRATH, S. et al. **Meta-análise da diferença de medianas.** Revista Biométrica, v. 62, p. 69–98, 2018.

MORCHID, A. et al. **Applications of internet of things (IoT) and sensors technology.** Ain Shams Engineering Journal, 2023.

MORRONE, S. et al. **Indústria 4.0 e Pecuária de Precisão (PLF).** Sensors, v. 22, 2022.

NAÃS, I. A. **Princípios de conforto térmico na produção animal.** São Paulo: Ícone, 1989.

OLIVEIRA, S. J. M.; CARVALHO, G. R.; LOURES, E. **Concentração espacial da produção leiteira**. In: Anuário Leite 2025. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025. p. 32–33.

PALENZUELA, B. et al. **Determinação do dióxido de enxofre no vinho**. *Analytica Chimica Acta*, v. 535, p. 65–72, 2005.

PORATH, M. L. et al. **Off-stream water and trace mineral salt**. *Journal of Animal Science*, v. 80, n. 2, p. 346–356, 2002.

PURDY, L.; DAVARZANI. **The Growth Game-Changer**. Accenture Strategy White Paper, 2015.

QUIGLEY III, J. D.; DREWRY, J. J. **Nutrient and immunity transfer**. *Journal of Dairy Science*, v. 81, p. 2779–2790, 1998.

SAMPAIO ISSAKOWICZ, A. C. K.; TOLEDO, L. M.; AMBROSIO, L. A. **Boletim de Indústria Animal**, v. 77, p. 1–17, 2020.

SELLE, M. et al. **Monitoramento em tempo real**. *Sustainability*, v. 15, n. 21, p. 15527, 2023.

SHEFFIELD, R. E. et al. **Off-stream water sources**. *Transactions of the ASAE*, v. 40, n. 3, p. 595–604, 1997.

SI THU, M.; AUNG, N.; MAUNG, K. K. **A calibration technique for water flow sensor YF-S201**. *International Journal of Trend in Research and Development*, v. 5, n. 5, p. 261–264, 2018.

SILVA, I. J. O. **Ambiência pré e pós-porteira**. In: SIMCRA, Viçosa, 2012.

SILVA, L. L. G. G. et al. **Avaliação de conforto térmico**. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, v. 18, n. 3–4, p. 87–95, 2010.

SILVA, R. G. **Introdução à bioclimatologia animal**. São Paulo: Nobel, 2000.

SILVA, R. G. **Biofísica ambiental**. São Paulo: Nobel, 2008.

TAN, L.; WANG, N. **Future internet: The internet of things**. In: ICACTE 2010. IEEE, 2010.

TAVARES, J. M. R. et al. **Gestão da água na suinocultura industrial**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2015.

THU, S.; AUNG, N.; MAUNG, K. K. **A calibration technique for water flow sensor YF-S201**. International Journal of Trend in Research and Development, v. 5, n. 5, p. 152–154, 2018.

VELONI, M. L. et al. **Bem-estar animal aplicado**. Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária, n. 21, 2013.

VIÉGAS, J. **Manejo de novilhas leiteiras**. In: SANTOS, G. T. et al. Bovinocultura Leiteira. Maringá: EDUEM, 2010. p. 79–107.

VRANKEN, E.; BERCKMANS, D. **Pecuária de precisão para suínos**. Animal Frontiers, v. 7, 2017.

WICKRAMASINGHE, H.; KRAMER, A.; APPUHAMY, J. **Drinking water intake of newborn dairy calves**. Journal of Dairy Science, v. 102, n. 1, p. 377–387, 2019.

WRIGHT, C. L. **Management of water quality for beef cattle**. Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice, v. 23, n. 1, p. 91–103, 2007.