

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE
DO NORTE

RICARDO LUIZ VIEIRA DE FRANÇA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE CAPTURA E
ARMAZENAMENTO DE PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES CLIMATIZADOS**

NATAL/RN

2024

RICARDO LUIZ VIEIRA DE FRANÇA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE CAPTURA E
ARMAZENAMENTO DE PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES CLIMATIZADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, na linha de pesquisa de Sustentabilidade e Gestão de Recursos Naturais, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. André Luiz Lopes Toledo.
Coorientador: Dr. Gabriel Constantino de Lima

NATAL
2024

França, Ricardo Luiz Vieira de.
F815d Desenvolvimento de um sistema autônomo de captura e armazenamento de parâmetros para análise de eficiência energética e qualidade do ar em ambientes climatizados / Ricardo Luiz Vieira de França. – 2024.
87 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

Orientador: Dr. André Luiz Lopes Toledo.

Coorientador: Dr. Gabriel Constantino de Lima.

1. Qualidade do ar- ambientes climatizados. 2. Eficiência energética- prédios escolares 3. Desenvolvimento de sistema. 4. Sustentabilidade - energia elétrica. I. Título.

CDU: 502:37

RICARDO LUIZ VIEIRA DE FRANÇA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE CAPTURA E
ARMAZENAMENTO DE PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES CLIMATIZADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de pesquisa de Sustentabilidade e Uso de Recursos Naturais.

Orientador: Dr. André Luiz Lopes Toledo.
Coorientador: Dr. Gabriel Constantino de Lima.

Dissertação apresentada e aprovada em 10/10/2024, pela seguinte Banca Examinadora:

Dr. André Luiz Lopes Toledo – Orientador – Presidente
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dr. Gabriel Constantino de Lima – Coorientador – Presidente
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dra. Luciana de Castro Medeiros – Examinadora interna ao programa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dr. Renato Samuel Barbosa de Araújo – Examinador externo ao programa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dr. Jacques Cousteau da Silva Borges – Examinador externo ao programa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dedico a Deus, aos meus amigos e a todos que lutam por um mundo mais justo e fraterno.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram durante esta árdua jornada, em especial a minha mãe Ivoni Vieira de França, a professora Luzia Vieira de França, a minha esposa Mariuchi Gonzaga de Siqueira e as minhas três filhas, Maria, Lua e Sol.

RESUMO

A qualidade do ar e o conforto térmico no ambiente de trabalho podem exercer um impacto significativo na saúde, na qualidade de vida e no rendimento do trabalhador. Dessa forma, o monitoramento desses parâmetros é de vital importância para usuários em ambientes climatizados. Os parâmetros de eficiência de climatização se somam a esse contexto, no que diz respeito à sustentabilidade, indicando o desperdício de energia elétrica e a necessidade de manutenção dos equipamentos de climatização. Nesse contexto, o presente projeto tem por objetivo desenvolver um protótipo de sistema de monitoramento de baixo custo de desenvolvimento e aplicação, para climatizadores de ar instalados em salas de ambiente climatizados, cujo dispositivo consiste em um sistema de sensoriamento eletrônico capaz de coletar, armazenar e exibir, em tempo real, na plataforma *Web ThingSpeak*, os parâmetros de temperatura de insuflamento, de retorno, tensão e corrente elétrica, umidade relativa do ar e temperatura do ambiente, além dos parâmetros ambientais de dióxido de carbono (CO₂) e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC). Por meio deste trabalho, foi possível proporcionar o monitoramento contínuo das variáveis em ambiente escolar, de modo a permitir uma avaliação mais precisa e possibilitar intervenções rápidas e eficazes para corrigir desvios, promovendo ambientes de trabalho mais saudáveis e eficientes.

Palavras-chave: eficiência energética; condicionadores de ar; qualidade interna do ar; IoT.

ABSTRACT

Air quality and thermal comfort in the workplace can have a significant impact on workers' health, quality of life and performance. Monitoring these parameters is therefore vitally important for users in air-conditioned environments. Air conditioning efficiency parameters add to this context in terms of sustainability, indicating the waste of electricity and the need for maintenance of air conditioning equipment. In this context, the aim of this project is to develop a low-cost monitoring system prototype for air conditioners installed in air-conditioned rooms, whose device consists of an electronic sensing system capable of collecting, storing and displaying, in real time, on the ThingSpeak web platform, the parameters of supply temperature, return temperature, electrical voltage and current, relative humidity and room temperature, as well as the environmental parameters of carbon dioxide (CO₂) and Total Volatile Organic Compounds (TVOC). Through this work, it was possible to provide continuous monitoring of the variables in a school environment, so as to allow a more accurate assessment and enable quick and effective interventions to correct deviations, promoting healthier and more efficient working environments.

Keywords: energy efficiency; air conditioners; indoor air quality; IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeitos da exposição aos poluentes atmosféricos na saúde humana	28
Figura 2 – Ábaco Temperatura efetiva	34
Figura 3 – Nomograma de Temperatura efetiva	34
Figura 4 – Placa ESP32	40
Figura 5 – PZEM-004T-10A módulo 1	41
Figura 7 – Sensor DS18B20	43
Figura 8 – Sensor CCS811 conectado ao ESP32 (WROOM)	44
Figura 9 – Sensor DHT11	45
Figura 10 – Adaptador de Cartão Micro SD	46
Figura 11 – Módulo GSM/GPRS SIM800L	48
Figura 12 – Protótipo do sistema de monitoramento	49
Figura 13 – Visão frontal do protótipo do sistema de monitoramento	50
Figura 14 – Temperaturas de entrada e de saída do ar e ambiente, climatizador convencional	54
Figura 15 – Umidade	56
Figura 16 – Tensão da rede	57
Figura 17 – Corrente em função do tempo (sistema convencional)	58
Figura 18 – Corrente (sistema inverter)	59
Figura 19 – Temperaturas de entrada e de saída do ar, do ambiente e corrente (sistema convencional)	60
Figura 20 – TVOC	61
Figura 21 – CO ₂	62
Figura 22 – Umidade, corrente e temperatura ambiente	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Cerest	Centro de Referência em Saúde do Trabalhador
CNAT	Campus Natal Central
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPU	Unidade Central de Processamento
DPOC	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
ESF	Estratégia Saúde da Família
Feimec	Feira Internacional de Máquinas e Equipamentos
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> (Sistema Global para Comunicações Móveis, tradução nossa)
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> (Serviço de Rádio de Pacote Geral, tradução nossa)
GTA	Grupo de Trabalho da Sociedade Civil
IBUTG	Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo
IEA	Agência Internacional de Energia
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> (liderança em energia e design ambiental, tradução nossa)
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
MME	Ministério de Minas e Energia
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de temperatura negativo, tradução nossa)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas, tradução nossa)
OLEL	<i>Observatório de La Economía Latinoamericana</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OMS	Organização Mundial de Saúde

OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PC	<i>Personal Computer</i> (computador pessoal, tradução nossa)
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
QAI	Qualidade do Ar Interno
QoS	Qualidade de Serviço
QVT	Qualidade de Vida no Trabalho
RFID	Identificação por Radiofrequência
Renast	Rede Nacional de Atenção Integral à Saúde do Trabalhador
SD	<i>Secure Digital</i> (Digital Seguro, tradução nossa)
SMS	<i>Short Message Service</i> (serviço de mensagens curtas, tradução nossa)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface periférica serial, tradução nossa)
SUS	Sistema Único de Saúde
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i> (Lógica Transistor-Transistor, tradução nossa)
TVOC	Compostos Orgânicos Voláteis Totais
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (Receptor/transmissor assíncrono universal, tradução nossa)
UBS	Unidades Básicas de Saúde
USB	Universal Serial Bus
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis
WHO	<i>World Health Organization</i> (Organização Mundial de Saúde, tradução nossa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E DA PROBLEMÁTICA	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVOS GERAIS	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 JUSTIFICATIVA	15
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.1 SUSTENTABILIDADE.....	17
4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PRÉDIOS ESCOLARES	18
4.3 INDÚSTRIA 4.0 E INTERNET DAS COISAS	19
4.4 SOFTWARES E HARDWARES: COMPREENSÃO DOS CONCEITOS	23
4.5 SELO PROCEL EDIFICA	24
4.6 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E A QUALIDADE INTERNA DO AR	26
4.7 QUALIDADE DO AR INTERNO NA SAÚDE DOS TRABALHADORES.....	29
4.8 CALOR OCUPACIONAL.....	32
4.9 TEMPERATURA EFETIVA	33
4.10 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS TOTAIS (TVOC).....	35
5 METODOLOGIA.....	37
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	37
5.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	39
5.2.1 Placa ESP32.....	39
5.2.2 PZEM	40
5.2.3 Sensor DS18B20	42
5.2.4 Sensor CCS811.....	43
5.2.5 Sensor DHT11	45
5.2.6 Placa leitora de cartão de memória Micro SD	46
5.2.7 Módulo GSM/GPRS SIM800L	47
5.3 PROTÓTIPO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO	48
5.4 LOCAIS DE TESTE DO PROTÓTIPO.....	52
5.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	52
6 RESULTADOS	53
7 CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS	67
ANEXOS	73

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética emerge como um tema intrinsecamente ligado a discussões de grande relevância, uma vez que abrange uma diversidade de variáveis interligadas nas esferas econômica, social e ambiental. A crescente demanda por energia impõe às entidades públicas e privadas o desafio de empregar esse recurso de maneira eficiente. Sendo assim, este desafio assume proporções significativas, considerando a sua implicação direta no desenvolvimento de um país. Em um contexto mais amplo, o progresso econômico e tecnológico da sociedade encontra-se inextricavelmente vinculado ao incremento da demanda por energia (Santos, Carniello; Rodrigues, 2021).

Doravante, a eficiência energética está intrinsecamente vinculada à qualidade do ar, a qual influencia diretamente a ocorrência de diversas doenças respiratórias e até cardiovasculares. Conforme dados da Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2022), quase a totalidade da população mundial, cerca de 99% (noventa e nove por cento) está exposta a níveis de poluição do ar que ultrapassam os limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS), resultando em impactos adversos à saúde (*National Geographic Brasil*, 2023). Diante desses fatores, a questão da qualidade do ar emerge como uma problemática significativa a ser abordada no âmbito da saúde pública.

Nesse contexto, é crucial ressaltar a pertinência dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), delineados pela Organização das Nações Unidas (ONU), que, no âmbito desta pesquisa, de acordo com o Grupo de Trabalho da Sociedade Civil (GTA) (s.d.), vinculam-se especialmente aos objetivos 3 (Saúde e Bem-estar), 7 (Energia Limpa e Acessível) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Nesse contexto, o ODS 3, referente à saúde e bem-estar, está diretamente ligado à qualidade do ar, uma vez que visa a prevenir doenças respiratórias e cardiovasculares. Já o ODS 7, que aborda energia acessível e limpa, destaca-se pela sua relação com a melhoria da eficiência energética. Por fim, o ODS 12, centrado em consumo e produção responsáveis, assume relevância ao buscar estabelecer padrões sustentáveis tanto para o consumo quanto para a produção (GTA, s.d.).

Nessa perspectiva, de acordo com informações do Ministério de Minas e Energia (MME), a conscientização sobre a questão energética no Brasil ganhou destaque na década de 1970, em resposta à crise do petróleo. Diante desse cenário, a primeira intervenção governamental na área ocorreu em 1981, por meio do Programa Conserve, sob a égide do referido Ministério. Inicialmente, o objetivo primordial era promover a eficiência energética no setor industrial (MME, 2023).

Posteriormente, em 1984, surgiram desafios críticos relacionados ao fornecimento de energia elétrica, levando o governo a instituir o Programa Brasileiro de Etiquetagem. Esse programa, coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), tinha como propósito informar aos consumidores sobre a eficiência energética de diversos equipamentos. Subsequentemente, foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), sob gestão da Eletrobrás.

Sendo assim, o Procel abrangiu subprogramas que promoviam a adoção de iluminação eficiente, equipamentos elétricos e eletrodomésticos eficazes. Além disso, incorporou diversas iniciativas de auditoria e treinamento, juntamente com a introdução do Selo Procel, visando a estabelecer um padrão de controle de eficiência energética (MME, 2023).

Nessa ótica, a elaboração de métodos para reduzir e otimizar o consumo de energia, por meio da implementação de sistemas de monitoramento e controle, e a promoção de alterações comportamentais em relação ao uso consciente de dispositivos elétricos são elementos fundamentais que concorrem para aprimorar o estado do meio ambiente.

De acordo com o relatório do Instituto Escolhas (2020), no período compreendido entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro experimentou um aumento significativo, aproximadamente 61% (sessenta e um por cento), sendo os aparelhos de ar-condicionado os principais responsáveis por esse crescimento, apresentando um notável aumento de 237% (duzentos e trinta e sete por cento). Essa constatação reforça a pertinência da implementação de sistemas voltados para a melhoria da eficiência energética desses dispositivos.

É salutar apontar que, os ambientes fechados e equipados com sistemas de ar-condicionado estão intrinsecamente vinculados à temática da qualidade do ar, apresentando uma correlação direta com problemas de saúde, especialmente os respiratórios (Silva, 2022). Locais fechados com inadequada ou nula renovação de ar frequentemente se tornam desconfortáveis e potencialmente insalubres. Tais questões são exacerbadas pela acumulação de poluentes, que favorecem a propagação de doenças respiratórias por meio dos próprios dutos de ar-condicionado (Santos *et al.*, 2020).

Nessa perspectiva, os efeitos decorrentes da exposição crônica à poluição, tanto atmosférica quanto em ambientes fechados, têm sido correlacionados ao aumento da mortalidade por doenças cardiorrespiratórias, incluindo infarto do miocárdio e arritmia cardíaca. Além disso, há uma elevação na incidência de asma e câncer de pulmão, bem como uma redução na função pulmonar. Um exemplo disso são as crianças que crescem em ambientes urbanos poluídos, que podem apresentar *déficits* no desenvolvimento pulmonar.

Adicionalmente, a exposição crônica está associada ao aumento na incidência de Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). Essas constatações ressaltam os impactos abrangentes e severos da poluição do ar na saúde humana, abordando uma variedade de condições médicas.

Mediante esses fatos, o presente estudo tem por objetivo desenvolver um protótipo de sistema de monitoramento de baixo custo de desenvolvimento e aplicação para climatizadores de ar instalados em salas de ambiente climatizados, cujo dispositivo consiste em um sistema de sensoriamento eletrônico capaz de coletar, armazenar e exibir, em tempo real, na plataforma *Web ThingSpeak*, os parâmetros de temperatura de insuflamento, temperatura de retorno, tensão elétrica, corrente elétrica, umidade relativa do ar e temperatura do ambiente, além dos parâmetros ambientais de dióxido de carbono (CO₂) e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E DA PROBLEMÁTICA

O tema proposto surgiu ao observar uma indevida desatenção, por parte dos trabalhadores, em relação às condições climáticas e à qualidade do ar interno de onde eles passam aproximadamente um terço do seu dia envolvidos nas atividades laborais. Essa falta de atenção pode derivar tanto do desconhecimento das condições ambientais quanto das possíveis consequências associadas à má Qualidade do Ar Interno (QAI) (Lacerda; Leroux; Morata, 2005).

Diante desse cenário, esta pesquisa visa a proporcionar uma experiência prática interdisciplinar para os profissionais ligados à saúde e à segurança do trabalhador, a gestores de organizações e àqueles envolvidos na manutenção de sistemas. A motivação está relacionada à promoção de um ambiente de trabalho mais seguro e saudável, ao mesmo tempo em que se busca aprimorar a eficiência energética das instituições.

Dessa forma, esta pesquisa almeja contribuir de maneira positiva para o meio ambiente de trabalho, englobando aspectos relacionados à saúde, segurança e sustentabilidade (Brugge; Lane, 2018).

De acordo com o GeoBrasil (2002), os efeitos agudos da poluição atmosférica não se restringem apenas a doenças respiratórias, abrangendo também condições cardiovasculares. Adicionalmente, já é possível estabelecer uma associação entre a exposição crônica à contaminação e o desenvolvimento de neoplasias e asma. Nestes casos, grupos mais vulneráveis incluem crianças, idosos e mulheres grávidas, os quais podem experimentar alterações na função pulmonar como resultado da exposição prolongada a poluentes atmosféricos. Essa

perspectiva ressalta a complexidade dos impactos da poluição do ar sobre diferentes faixas etárias e grupos populacionais.

Nesse sentido, os efeitos decorrentes da exposição crônica à poluição atmosférica têm sido correlacionados ao aumento da mortalidade por doenças cardiorrespiratórias, incluindo infarto do miocárdio e arritmia cardíaca. Além disso, há uma elevação na incidência de asma e de câncer de pulmão, bem como uma redução na função pulmonar. Crianças que crescem em ambientes urbanos poluídos podem apresentar *déficits* no desenvolvimento pulmonar.

Adicionalmente, a exposição crônica está associada ao aumento na incidência de DPOC. Essas constatações ressaltam os impactos abrangentes e severos da poluição do ar na saúde humana, abordando uma variedade de condições médicas.

Em consequência do exposto, este trabalho alude abordar a seguinte problemática de pesquisa: **de que maneira o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em climatizadores de ar contribui para aprimorar a eficiência energética e a saúde dos trabalhadores?** Esse questionamento é central para explorar soluções inovadoras que não apenas atendam às demandas energéticas crescentes, mas também considerem o bem-estar e a saúde ocupacional dos indivíduos que interagem cotidianamente com esses sistemas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este projeto tem como objetivo principal desenvolver um protótipo de sistema de monitoramento de baixo custo para ambientes climatizados. Utilizando sistemas de sensoriamento eletrônico e comunicação com *software web*, o sistema será capaz de capturar e armazenar parâmetros físicos e concentração de gases relacionados à eficiência de climatização e à qualidade do ar em ambientes monitorados, durante períodos pré-determinados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo geral desta pesquisa, os objetivos específicos são os seguintes:

a) com base na revisão bibliográfica, estabelecer a estrutura de *hardware* e de *software* para o controle, formando a base do projeto do protótipo;

b) projetar e construir o protótipo do sistema de monitoramento, levando em consideração a viabilidade técnica e econômica;

c) implementar um circuito eletrônico capaz de medir parâmetros relevantes para a eficiência da climatização, como temperatura, umidade e consumo de energia, aliado a um código de programação capaz de indicar as variações dos parâmetros indicados;

d) instalar e operacionalizar o protótipo autônomo portátil em diferentes ambientes climatizados;

e) realizar testes práticos do protótipo em ambientes climatizados reais, avaliando sua eficácia e identificando possíveis melhorias.

3 JUSTIFICATIVA

A proposta deste sistema de monitoramento surgiu a partir da identificação de limitações evidenciadas por outros estudos. A busca por soluções mais eficientes e abrangentes é crucial para superar essas limitações e promover avanços na área de eficiência energética e qualidade do ar em ambientes climatizados.

Diante do cenário apresentado no Balanço Energético Nacional de 2022, em que a geração de energia elétrica no Brasil atingiu 656,1 TWh (seiscentos e cinquenta e seis vírgula um terawatts/hora) em 2021, um aumento de 4% (quatro por cento) em relação a 2020, a importância de estratégias voltadas para a otimização do consumo energético se torna evidente. Entre os dados apresentados, destaca-se a participação expressiva das centrais elétricas, responsáveis por 82,6% (oitenta e dois vírgula seis por cento) da geração total.

A redução da geração hídrica, principal fonte no país, e o aumento da geração a partir de fontes não renováveis reforçam a necessidade de aprimorar a eficiência no consumo de energia elétrica, especialmente em ambientes que dependem intensamente de climatização, como salas de aula.

Paralelamente, o impacto da poluição atmosférica na saúde humana é alarmante. Segundo a OPAS (2022), a poluição atmosférica resultou em 3,6 (três vírgula seis) milhões de mortes em 2012, refletindo um aumento em relação a anos anteriores (*World Health Organization*, 2014). No Brasil, a qualidade do ar tem sido associada a um expressivo número de doenças respiratórias e mortes, especialmente nas grandes cidades (GeoBrasil, 2002).

A exposição prolongada a altos níveis de poluentes atmosféricos contribui para uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias crônicas, cardiovasculares e certos tipos de câncer. Em crianças, idosos e gestantes, os efeitos são ainda mais pronunciados,

aumentando a vulnerabilidade a condições como asma, doenças cardíacas e redução da função pulmonar.

Nesse sentido, a implementação de um sistema de monitoramento de baixo custo em ambientes climatizados no Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) se torna uma iniciativa vital para melhorar a eficiência energética e a qualidade do ar. Utilizando sensores eletrônicos e uma plataforma *web*, o sistema permitirá captura e armazenagem de dados essenciais referentes à climatização e à qualidade interna do ar, auxiliando na redução do consumo de energia elétrica, bem como na melhoria do bem-estar dos ocupantes do recinto.

O proposto projeto possui potencial de replicação e escalabilidade, permitindo que, após a validação no IFRN, o sistema seja implementado nas outras 22 (vinte duas) unidades da referida instituição federal. A modularidade do sistema facilita sua adaptação a diferentes contextos, desde escolas, hospitais, salas de recepção, ambientes corporativos e outros.

Dessa forma, o projeto não só contribui para a sustentabilidade energética, mas também para a saúde ocupacional, oferecendo uma solução prática e eficaz para o monitoramento da qualidade do ar e a eficiência energética em diversos ambientes.

Considerando os desafios e as mudanças no panorama energético nacional, a implementação desse sistema se torna fundamental para promover uma gestão mais eficiente do consumo de energia, alinhada às demandas contemporâneas de conservação de recursos e mitigação dos impactos ambientais.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este segmento destaca-se ao apresentar alguns fundamentos teóricos consolidados por meio de uma breve revisão de algumas métricas relevantes para a compreensão de sistemas de monitoramento de parâmetros de eficiência energética e de qualidade do ar em ambientes climatizados. A leitura dessas informações contribui para fundamentar parte das discussões abordadas nos resultados deste estudo.

Nesse contexto, são explorados os seguintes temas: sustentabilidade, eficiência energética em edifícios escolares, internet das coisas e indústria 4.0, poluição atmosférica e qualidade interna do ar, impacto da qualidade do ar interno na saúde dos trabalhadores, estresse térmico ocupacional, temperatura efetiva, compostos orgânicos voláteis e totais.

4.1 SUSTENTABILIDADE

A temática da sustentabilidade em ambientes de trabalho está intrinsecamente ligada às condições climáticas e à qualidade do ar interno. Condições climáticas adequadas não apenas promovem o bem-estar dos trabalhadores, mas também têm um impacto significativo na eficiência e na produtividade (Sinharay, 2018).

Dito isto, estratégias sustentáveis para controle térmico, como o uso eficiente de sistemas de climatização, tornam-se cruciais. Para tal, adotar medidas que minimizem o consumo energético, como o uso de tecnologias ecoeficientes, contribui para a sustentabilidade ambiental e econômica desses espaços.

A qualidade do ar interno é um aspecto vital para o ambiente de trabalho e para a saúde dos ocupantes (Nemery, 2015). Estratégias sustentáveis incluem a implementação de sistemas de ventilação eficazes e a adoção de materiais de construção e mobiliário que não emitam substâncias prejudiciais à saúde. Além disso, a promoção do transporte sustentável para os trabalhadores, como bicicletas e veículos elétricos, contribui para a redução das emissões de poluentes atmosféricos, melhorando a qualidade do ar externo e, por conseguinte, do ambiente interno.

A busca por ambientes de trabalho sustentáveis alinha-se com a responsabilidade ambiental e social das organizações. Desse modo, a implementação de práticas sustentáveis não apenas melhora as condições climáticas e a qualidade do ar, mas também agrega valor à imagem corporativa e atrai profissionais comprometidos com a responsabilidade socioambiental (Chaves *et al.*, 2014). É crucial integrar políticas que incentivem ações sustentáveis, como a certificação de edifícios verdes, promovendo não apenas a eficiência operacional, mas também o compromisso com a saúde e o bem-estar dos colaboradores.

Dados estatísticos prévios à última atualização sugerem que práticas sustentáveis têm ganhado terreno nas políticas empresariais. Pesquisas indicam que ambientes internos inadequadamente climatizados podem resultar em uma queda de até 10% (dez por cento) da produtividade dos trabalhadores (Nemery, 2015).

A adoção de sistemas de climatização eficientes e a certificação de edifícios sustentáveis têm apresentado crescimento significativo em várias regiões. Em 2021, o uso de tecnologias ecoeficientes e práticas para melhorar a eficiência energética em ambientes corporativos aumentou em cerca de 15% (quinze por cento), de acordo com relatórios setoriais.

No que diz respeito à qualidade do ar interno, estatísticas indicam que, em muitos escritórios, a concentração de poluentes pode ser até cinco vezes maior do que a registrada no

ar externo. Estratégias sustentáveis, como a introdução de plantas e de sistemas de ventilação de última geração, demonstraram uma redução significativa da presença de substâncias prejudiciais, resultando em ambientes de trabalho mais saudáveis.

Além disso, em diversos setores, a conscientização sobre a relação entre qualidade do ar e produtividade tem aumentado. Empresas que investem em ambientes de trabalho sustentáveis relatam uma diminuição significativa no número de licenças médicas e um aumento perceptível na satisfação e no engajamento dos funcionários. Isso destaca a importância de estratégias sustentáveis não apenas para o meio ambiente, mas também para o sucesso e bem-estar das organizações e seus colaboradores.

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PRÉDIOS ESCOLARES

Demonstra-se evidente a importância crescente da eficiência energética em prédios escolares, não apenas no que diz respeito aos aspectos ambientais, mas também em relação ao conforto dos alunos e profissionais que frequentam esses espaços educacionais. Estudos demonstram que prédios escolares eficientes energeticamente contribuem significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo a sustentabilidade ambiental.

A eficiência energética em prédios escolares não se limita apenas ao consumo de energia, mas também desempenha um papel crucial nas condições climáticas internas. Sistemas de climatização eficientes garantem ambientes mais confortáveis, influenciando diretamente o desempenho acadêmico e o bem-estar dos alunos. A manutenção de temperaturas adequadas e a implementação de estratégias sustentáveis, como o uso de fontes renováveis, podem criar ambientes propícios ao aprendizado.

No contexto específico da qualidade do ar interno em espaços escolares, prédios eficientes em energia têm a capacidade de proporcionar ambientes mais saudáveis. A adequada circulação de ar e a filtragem de poluentes contribuem para a redução de problemas respiratórios entre os ocupantes, melhorando assim as condições de aprendizado. Estratégias como a introdução de sistemas de ventilação eficazes têm demonstrado não apenas aprimorar a qualidade do ar, mas também aumentar a concentração e o desempenho acadêmico dos alunos.

Com base nas diretrizes da OPAS (2022), destaca-se que ambientes internos saudáveis são cruciais para prevenir doenças e melhorar a qualidade de vida. Prédios escolares energeticamente eficientes podem contribuir diretamente para esses objetivos, minimizando a exposição a poluentes do ar interno e proporcionando condições climáticas confortáveis.

A OPAS (2022) ressalta a importância de estratégias que visem à redução da exposição a poluentes do ar interno, como partículas finas, dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis. A implementação de sistemas de ventilação adequados, aliada a práticas construtivas sustentáveis, pode contribuir para ambientes escolares mais seguros e saudáveis. Dados indicam que melhorar a qualidade do ar interno pode ter impactos significativos na redução de problemas respiratórios, alergias e até mesmo no desempenho acadêmico.

Além disso, a eficiência energética em prédios escolares está intrinsecamente ligada aos ODS estabelecidos pela ONU. O ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), que busca garantir acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia, está alinhado com as práticas de eficiência energética. A implementação de fontes renováveis e a otimização do consumo energético não apenas atendem a esses objetivos globais, mas também promovem a responsabilidade ambiental e social no âmbito educacional.

Pesquisas apontam para um aumento no investimento em eficiência energética em instituições educacionais. Sendo assim, as escolas que adotam práticas sustentáveis não apenas economizam recursos financeiros a longo prazo, mas também desempenham um papel significativo na formação de uma geração consciente sobre questões ambientais.

A implementação bem-sucedida dessas práticas não só reflete o comprometimento com a sustentabilidade, mas também molda ambientes educacionais mais saudáveis e inspiradores.

4.3 INDÚSTRIA 4.0 E INTERNET DAS COISAS

A denominação “Indústria 4.0” foi concebida e desenvolvida em 2011, na Alemanha, por um grupo de representantes do governo, empresas e academia. Esse grupo promoveu a ideia de uma abordagem que visava a aprimorar a competitividade da indústria alemã. Dessa forma, o governo alemão anunciou que esse conceito seria parte integrante da *High-Tech Strategy 2020 for Germany*, cujo objetivo era posicionar a Alemanha como líder em inovação tecnológica (Kagermann *et al.*, 2013).

A Indústria 4.0 trouxe à tona a necessidade global de desenvolver ações estratégicas nas áreas de ciência, tecnologia e inovação, com o propósito de integrar tecnologias avançadas que garantam maior confiabilidade nas tomadas de decisões. Isso é alcançado através da velocidade na análise de processos por meio de plataformas ciberfísicas de simulação assistida em tempo real, especialmente no campo das energias.

Já o termo “Internet das Coisas” (IoT) teve sua origem por volta dos anos 2000, no centro de desenvolvimento de Identificação por Radiofrequência (RFID) no Instituto de

Tecnologia de Massachusetts (MIT). Inicialmente, o termo estava associado ao RFID, mas sua evolução foi significativa ao longo do tempo.

O impacto da Indústria 4.0 no contexto industrial moderno é discutido por Klaus Schwab, em seu livro “*The Fourth Industrial Revolution*”. Nesta obra, o referido autor identifica quatro principais alterações esperadas na indústria em geral: mudanças nas expectativas dos clientes, produtos mais inteligentes e produtivos, novas formas de colaboração e parcerias, e a transformação do paradigma operacional em um modelo digital (Schwab, 2017).

Venturelli (2021) destacou diversas vantagens decorrentes da implementação da Indústria 4.0, entre elas:

- a) redução de custos: a otimização dos processos proporcionada pela Indústria 4.0 resulta em uma redução significativa dos custos operacionais, tornando as operações mais eficientes e econômicas;
- b) economia de energia: a implementação de tecnologias inteligentes permite um uso mais eficiente da energia, contribuindo para a sustentabilidade e reduzindo os custos associados;
- c) aumento da segurança: a automação e a conectividade possibilitam a criação de ambientes de trabalho mais seguros, com a minimização de riscos e a rápida detecção de potenciais perigos;
- d) conservação ambiental: a eficiência energética e a redução do desperdício não apenas resultam em benefícios econômicos, mas também contribuem para a preservação ambiental, alinhando-se a práticas sustentáveis;
- e) redução de erros: a automação dos processos na Indústria 4.0 reduz a probabilidade de erros humanos, garantindo maior precisão e qualidade nos resultados;
- f) fim do desperdício: a utilização inteligente dos recursos, aliada à capacidade de monitoramento em tempo real, permite a eliminação de desperdícios ao longo da cadeia produtiva;
- g) transparência nos negócios: a integração de sistemas e a disponibilidade de dados em tempo real proporcionam uma visão transparente e abrangente das operações, facilitando a tomada de decisões e o gerenciamento eficaz;
- h) maior qualidade de vida: a automação de tarefas repetitivas libera os profissionais para atividades mais estratégicas, contribuindo para uma melhor qualidade de vida no ambiente de trabalho.

Essas vantagens destacam a transformação abrangente e positiva que a Indústria 4.0 pode trazer para diversos setores da sociedade e da economia. No Brasil e no âmbito acadêmico, a Indústria 4.0 é comumente denominada como Manufatura Avançada, termo divulgado durante a Feira Internacional de Máquinas e Equipamentos (FEIMEC) de 2016.

Esse conceito caracteriza uma abordagem industrial que se destaca pelos seguintes aspectos: i) personalização de produtos, considerando suas características individuais e mantendo uma comunicação eficiente com as máquinas; ii) integração sincronizada entre o mundo real e virtual para proporcionar uma representação precisa e em tempo real dos processos industriais; e iii) comunicação intensiva entre máquinas, permitindo decisões colaborativas sobre as ações a serem executadas.

Além disso, destaca-se a conexão abrangente ao longo da cadeia de valor, desde a produção até a entrega final, promovendo uma visão integrada e interconectada dos processos. A interconectividade resulta na geração de grandes volumes de dados (*Big Data*), cuja análise, por meio de *analytics*, identifica tendências e antecipa ações futuras. Nessa perspectiva, a Manufatura Avançada posiciona o ser humano como elemento central, reconhecendo sua capacidade criativa e seu papel fundamental na gestão estratégica dos recursos industriais.

Destaca-se a transformação profunda proposta pela Manufatura Avançada, em que a personalização, a conectividade e a centralidade do ser humano são elementos fundamentais para o progresso na indústria.

Conforme destacado no relatório “Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil” da Confederação Nacional da Indústria (CNI), em 2016, várias tecnologias habilitadoras associadas à quarta revolução industrial foram identificadas. Entre as mais significativas estão: i) Internet das Coisas (IoT); ii) *Big Data* e *analytics*; iii) computação em nuvem; iv) robótica avançada; v) inteligência artificial (*machine learning*); vi) novos materiais; e vii) manufatura aditiva e híbrida.

No escopo desta dissertação, foca-se especificamente em *IoT*, *Big Data* e *analytics*, computação em nuvem e inteligência artificial (*machine learning*). Essas tecnologias emergentes desempenham papéis cruciais no contexto da Indústria 4.0, contribuindo para a transformação e para o avanço dos processos industriais.

O interesse em Internet das Coisas (IoT) tem experimentado um crescimento notável nos últimos anos, abrangendo empresas, organizações, governos e academias. Atualmente, a quantidade de dispositivos conectados à internet já ultrapassa em 50% (cinquenta por cento) o número de seres humanos.

Projeções indicam que, até 2025, esse número poderá ser mil vezes superior ao de indivíduos, atingindo a marca de 7 (sete) trilhões de dispositivos (Borgia, 2014). Esses dados revelam um potencial comercial exponencial, conforme observado por pelo referido autor. A ascensão constante da IoT sugere sua relevância e impacto significativo nas esferas tecnológicas e econômicas. O referido autor (2014) identificou seis condições fundamentais para o pleno êxito na implementação da IoT:

- a) escalabilidade: a viabilidade de conectar uma grande quantidade de dispositivos à internet depende crucialmente da alta escalabilidade do sistema IoT. Isso implica configurações flexíveis, endereçamento adaptável, capacidade de reação a estímulos e processamento automático de dados;
- b) heterogeneidade: dada a diversidade de dispositivos conectados, cada um possuindo diferentes capacidades de processamento, autonomia, mobilidade e comunicação, o sistema IoT deve gerenciar uma variedade de tecnologias e protocolos de comunicação, interconectando-os conforme necessário;
- c) custo mínimo: a dimensão da IoT só será economicamente viável se os custos de aquisição e manutenção de dispositivos e infraestrutura forem mínimos, de modo que os benefícios econômicos superam consideravelmente os custos associados;
- d) flexibilidade: o sistema deve ser capaz de acomodar dispositivos dinâmicos, que se movimentam por diferentes redes, e dispositivos que se desconectam e conectam várias vezes para otimizar o consumo de energia;
- e) qualidade de serviço (QoS): a qualidade de serviço deve ser cuidadosamente gerenciada, garantindo que as aplicações tenham latência, disponibilidade, confiabilidade e prioridade adequadas;
- f) segurança: a segurança representa um requisito crítico e desafiador no desenvolvimento da IoT. O sistema precisa ser robusto contra ataques de comunicação, garantir autenticação eficiente e preservar a privacidade dos dados.

4.4 SOFTWARES E HARDWARES: COMPREENSÃO DOS CONCEITOS

No desenvolvimento de um sistema de monitoramento eficiente, a integração entre *hardware* e *software* desempenha um papel essencial. Compreender os conceitos fundamentais e justificar a escolha dos dispositivos utilizados é crucial para garantir o sucesso do protótipo (Souza, 2021).

O *software* é fundamental para a operação e a análise dos dados coletados pelo *hardware*. Ele inclui o *firmware* que roda no microcontrolador, os aplicativos para interface do usuário e as plataformas de armazenamento e análise de dados. Vale salientar que o *firmware* é o *software* embutido no microcontrolador que controla a operação dos sensores e módulos de comunicação.

Desse modo, ele é responsável por executar tarefas como a leitura periódica dos sensores, o processamento dos dados e o envio das informações para a plataforma central. A programação do *firmware* deve ser otimizada para garantir eficiência e precisão na coleta e transmissão dos dados (Carvalho *et al.*, 2024).

As plataformas de armazenamento e análise de dados permitem que os dados coletados sejam armazenados e analisados de forma centralizada. Sistemas baseados em nuvem são frequentemente utilizados para armazenar grandes volumes de dados, oferecendo escalabilidade e acessibilidade. O *software* de análise pode incluir algoritmos para processamento de dados, visualização gráfica e geração de relatórios, permitindo aos usuários interpretar e agir com base nas informações recebidas.

Além disso, interfaces de usuário são desenvolvidas para permitir que os usuários interajam com o sistema de monitoramento. Essas interfaces podem incluir *dashboards*, gráficos e alertas que informam sobre as condições atuais do ambiente e destacam quaisquer anomalias detectadas (Agostinho *et al.*, 2023).

O *hardware* de um sistema de monitoramento é composto por sensores, microcontroladores e módulos de comunicação, cada um com funções específicas que contribuem para o funcionamento global do sistema (Rocha *et al.*, 2019).

Os sensores são dispositivos responsáveis pela coleta de dados ambientais. Eles medem variáveis físicas, como temperatura, umidade e concentração de poluentes no ar. Sensores de temperatura, por exemplo, utilizam termistores ou termopares para medir variações térmicas e convertê-las em sinais elétricos que podem ser interpretados pelo sistema (Descovi *et al.*, 2023).

Ainda, segundo Descovi *et al.* (2023), sensores de umidade, por sua vez, utilizam tecnologias como capacitores ou resistores para determinar a quantidade de vapor d'água no ar. A escolha de sensores deve considerar fatores como precisão, intervalo de medição e resposta rápida para assegurar dados confiáveis.

O microcontrolador atua como o núcleo de processamento do sistema. Ele recebe os sinais dos sensores e os converte em informações digitais que podem ser analisadas. Comumente, os microcontroladores possuem múltiplos núcleos de processamento e interfaces

de comunicação, permitindo a execução simultânea de diversas tarefas, como a leitura dos sensores, processamento dos dados e controle de outros dispositivos (Nascimento, 2013).

A escolha de um microcontrolador adequado envolve a avaliação de sua capacidade de processamento, quantidade de memória e compatibilidade com os sensores e módulos de comunicação.

Os módulos de comunicação são responsáveis pela transmissão dos dados coletados para um servidor ou plataforma de análise. Tecnologias sem fio, como *Wi-Fi* e *Bluetooth*, são frequentemente utilizadas para permitir a comunicação remota. O *Wi-Fi*, por exemplo, oferece uma largura de banda significativa e alcance maior, ideal para transmissão de grandes volumes de dados.

O *Bluetooth* é adequado para conexões de curto alcance e menor consumo de energia. Em alguns casos, módulos *Global System for Mobile Communications (GSM)/General Packet Radio Service (GPRS)* podem ser utilizados para enviar dados através de redes móveis, proporcionando flexibilidade em áreas com cobertura celular (Morais *et al.*, 2022).

A integração eficaz entre *software* e o *hardware* é essencial para o desempenho do sistema. Sensores devem ser escolhidos e configurados para garantir que os dados sejam precisos e confiáveis. O microcontrolador deve ser capaz de processar esses dados de forma eficiente e comunicá-los de maneira adequada para a plataforma de armazenamento.

Módulos de comunicação devem ser selecionados com base na necessidade de alcance, largura de banda e consumo de energia, garantindo que a transmissão de dados seja contínua e estável.

4.5 SELO PROCEL EDIFICA

O Selo Procel Edifica é uma importante certificação nacional concedida pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), desenvolvido pelo governo brasileiro. Esse selo é parte de uma estratégia voltada para promover a eficiência energética em edificações, especialmente no que diz respeito ao uso racional de energia elétrica.

A certificação é concedida a projetos de edificações que apresentam soluções inovadoras e eficientes em termos de consumo de energia, incluindo o uso de sistemas de climatização eficientes (Silva, 2021). Dessa forma, tal certificação tem como objetivo principal incentivar práticas de construção sustentável e otimizar o uso de energia em ambientes corporativos, residenciais e comerciais (Neto *et al.*, 2021).

Dentro desse contexto, os climatizadores de ar desempenham um papel significativo tanto no consumo de energia global quanto no impacto ambiental, especialmente em relação ao efeito estufa. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA) (s.d.), o uso de aparelhos de ar-condicionado e climatizadores representa aproximadamente 10% (dez por cento) do consumo global de eletricidade, um número que tende a aumentar, impulsionado por uma maior demanda em regiões de clima quente e um aumento no padrão de vida em países em desenvolvimento.

Os climatizadores de ar não só aumentam o consumo de energia elétrica, mas também contribuem diretamente para o efeito estufa. Isso ocorre devido à utilização de gases refrigerantes, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), que possuem um Potencial de Aquecimento Global (PAG) extremamente elevado. Esses gases, quando liberados na atmosfera, contribuem significativamente para o aquecimento global, já que possuem um efeito estufa milhares de vezes mais potente que o dióxido de carbono (CO₂). Como resultado, a crescente demanda por climatização, especialmente em áreas urbanas, cria um ciclo que amplifica os desafios do consumo energético e da sustentabilidade ambiental (Braga, 2022).

O uso inadequado de sistemas de climatização ineficientes em edifícios aumenta desnecessariamente a carga sobre as redes de energia e pode resultar em maiores emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa. Portanto, o Selo Procel Edifica é um instrumento essencial para mitigar esses impactos, incentivando a adoção de tecnologias mais eficientes e ambientalmente amigáveis.

A implementação de sistemas de climatização certificados, que atendem aos critérios de eficiência energética e sustentabilidade, contribui diretamente para a redução da pegada de carbono e para um futuro energético mais sustentável (Moraes; Librelotto; Aguiar, 2010).

4.6 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E A QUALIDADE INTERNA DO AR

A poluição atmosférica é caracterizada como a presença de qualquer substância no ar que, devido à sua concentração, pode tornar-se inadequada, prejudicial ou ofensiva à saúde, resultando em não conformidades ao bem-estar público, danos materiais, impactos negativos na fauna e flora, ou representando ameaças à segurança. A intensidade da poluição atmosférica é determinada pela quantidade de poluentes presentes no ar, sendo categorizados, de maneira simplificada, em primários (CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂, entre outros) e secundários (HNO₃, H₂SO₄, O₃, entre outros) (Cetesb, 2015).

A poluição atmosférica em ambientes urbanos resulta de uma combinação de atividades industriais, domésticas e processos naturais, sendo influenciada por fatores como emissões de poluentes, características geográficas, propriedades químicas e condições meteorológicas (Viana, 2015).

Esses poluentes, provenientes de fontes tanto externas quanto internas, podem originar-se de variados contextos, como, por exemplo, em um ambiente de escritório. Nesse cenário, materiais de construção e mobiliário, sistemas de ar-condicionado, impressoras a laser e práticas de limpeza podem desempenhar papéis significativos na propagação de agentes biológicos, partículas em suspensão e/ou substâncias químicas.

A Resolução CONAMA n° 003/1990 estabelece regulamentações para a qualidade do ar, definindo seus principais indicadores. Esses indicadores compreendem: material particulado, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e óxido de nitrogênio (Brasil, 1990).

Esses parâmetros são essenciais para avaliar e monitorar a qualidade do ar, fornecendo critérios específicos para limitar a concentração desses poluentes e, assim, proteger a saúde humana e o meio ambiente.

Material Particulado é a denominação dada a um conjunto de poluentes compostos por poeiras, fumaças e diversos tipos de materiais sólidos e líquidos que permanecem suspensos na atmosfera devido às suas diminutas dimensões (Cetesb, 2019). As principais fontes de emissão desse material particulado incluem veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa, poeira do solo e condições ambientais adversas, entre outros (Viana, 2015). Essas partículas podem ter impactos significativos na qualidade do ar e representam uma preocupação tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente.

O tamanho das partículas revela-se como um fator significativo na intensificação dos impactos na saúde, uma vez que, dependendo do tamanho, essas partículas são categorizadas quanto à sua inalabilidade. As partículas inaláveis, com diâmetro de até 10 (dez) micrômetros, podem ser classificadas como PM₁₀, compreendendo partículas inaláveis de 2,5 (dois vírgula cinco) a 10 (dez) micrômetros, conhecidas como partículas inaláveis grossas, e PM_{2,5}, referentes a partículas inaláveis finas, com diâmetro inferior a 2,5 (dois vírgula cinco) micrômetros. Destaca-se que as partículas PM_{2,5} apresentam um maior risco à saúde, uma vez que afetam diretamente os alvéolos pulmonares (Cetesb, 2015). Esse fato ressalta a importância de considerar o tamanho das partículas ao avaliar os potenciais impactos na qualidade do ar e na saúde humana.

A OPAS (2022) indica valores aceitáveis de concentração máxima dos principais poluentes ambientais, de acordo com o Quadro 1, se seguir.

Quadro 1 – Valor da concentração máxima dos poluentes recomendados pela OMS

Poluente	Tempo de amostragem	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MP ₁₀	Anual	20
	24 horas	50
MP _{2,5}	Anual	10
	24 horas	25
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	24 horas	20
	10 minutos	500
Monóxido de Carbono (CO)	8 horas	10.000 (9 ppm)
	1 hora	30.000 (26 ppm)
	20 minutos	60.000 (52 ppm)
	15 minutos	100.000 (87 ppm)
Ozônio (O ₃)	8 horas	100
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Anual	40
	1 hora	200

Fonte: *World Health Organization* (2011).

Conforme Bridgman (1990), as principais fontes de dióxido de enxofre (SO₂) no ambiente urbano derivam de atividades relacionadas à queima de combustíveis fósseis, particularmente em indústrias e usinas que utilizam óleo combustível e carvão como fontes energéticas. Esse poluente possui alta solubilidade nas vias úmidas do aparelho respiratório, resultando no aumento da produção de muco e, conseqüentemente, na resistência à passagem do ar.

Isso pode ocasionar problemas respiratórios, alterações na defesa pulmonar, agravamento de doenças cardiovasculares, bem como irritação nos olhos, nariz e garganta (Derisio, 2000). Tais impactos reforçam a importância de monitorar e controlar as emissões de dióxido de enxofre para preservar a qualidade do ar e a saúde pública.

O monóxido de carbono (CO), como descrito por Braga, Pereira e Saldiva (2002), é um gás incolor e inodoro originado pela queima incompleta de combustíveis fósseis e biomassa. Esse gás é um dos poluentes mais comuns nas áreas urbanas, predominantemente gerado por veículos automotores. A exposição a concentrações elevadas desse gás pode resultar em conseqüências graves, incluindo a possibilidade de óbito, redução de reflexos e comprometimento da acuidade visual (Bridgman, 1990). Essa ameaça à saúde destaca a importância de monitorar e controlar as emissões de monóxido de carbono para preservar a qualidade do ar e a segurança pública.

O ozônio (O_3), composto por três moléculas de oxigênio, quando presente em concentrações superiores aos limites estabelecidos pela OMS, pode causar irritação nos olhos, redução da capacidade pulmonar, agravamento de doenças respiratórias como a asma, envelhecimento precoce, náuseas, dores de cabeça e falta de ar (Derisio, 2000). O óxido de nitrogênio (NO_x) é um gás formado durante o processo de combustão em veículos automotores, sendo associado a efeitos nocivos à saúde humana, especialmente em relação a infecções pulmonares, como edemas, lesões e broncopneumonia (Roseiro, 2003).

Os problemas de saúde decorrentes da poluição do ar têm gerado um aumento significativo no número de consultas em serviços de urgência/emergência, internações hospitalares e mortes por diversas doenças respiratórias (Viana, 2015). Essas observações reforçam a urgência de abordar e controlar a poluição atmosférica para preservar a saúde pública. A Figura 1 demonstra tais efeitos.

Figura 1 - Efeitos da exposição aos poluentes atmosféricos na saúde humana



Fonte: Acervo do autor (s.d.).

Conforme Viana (2015), estudos recentes, conforme indicado no Quadro 2, têm destacado a associação entre o aumento da exacerbação e da incidência de doenças cardiorrespiratórias com a residência próxima a vias com tráfego intenso de veículos. O risco é ainda maior quanto mais próximo da via a pessoa reside. Essas constatações reforçam a importância de compreender e mitigar os impactos da poluição do ar nas comunidades urbanas.

Quadro 2 – Poluentes urbanos e seus efeitos

Poluentes	Origem	Efeitos
Pb, Cb, Cu, Zn, Hg, Mn	Veículos, metalúrgicas e galvanoplastia.	Atacam o sistema nervoso, causam perda de mobilidade e memória, destroem os glóbulos vermelhos, cumulativos.
Partículas pretas e brancas	Indústrias de cimento, minas, combustão de carvão e óleos.	Degradam as vias respiratórias, aumentam a incidência de doenças respiratórias crônicas e o risco de câncer.
Adeídos (formaldeído e acetaldeído)	Indústrias e produtos químicos, queima de combustíveis fósseis e de etanol.	Suspeito de causar câncer, presentes nas névoas ácidas.
Benzeno, Metano, Hidrocarbonetos	Produtos químicos, gás natural, petróleo, gasolina.	Câncer das vias respiratórias e digestivas, mutação.
SO ₂	Combustão de carvão, petróleo, metalúrgicas, veículos.	Asma e chuvas ácidas.
NO _x	Veículos, combustão de petróleo.	Problemas respiratórios, chuvas ácidas, formação de O ₃ em baixa altitude.
CO	Veículos, aciarias, combustão de petróleo e carvão.	Vertigens, dor de cabeça, ataca o sistema nervoso central.
CO ₂	Processos de combustão e biodegradação.	Efeitos indiretos na saúde humana, implicados no efeito estufa.
Ozônio (baixa altitude)	Reação de O ₂ com os NO _x e hidrocarbonetos sob a ação do sol.	Asma, irritação dos olhos e garganta.
Asbesto	Material insulante, lonas de freios, telhas, dentre outros.	Cicatrizes no pulmão, cancerígeno.

Fonte: Viana (2015).

4.7 QUALIDADE DO AR INTERNO NA SAÚDE DOS TRABALHADORES

A saúde ocupacional dos indivíduos é de extrema importância para garantir a realização eficaz do trabalho. Nesse contexto, a qualidade do ar interno emerge como um fator crucial. Conforme dados da plataforma Conforlab (2023), estudos indicam que a poluição do ar em ambientes fechados apresenta riscos à saúde mais significativos em comparação com a poluição do ar externo.

Isso ocorre devido à menor renovação do ar em espaços fechados, resultando em maior concentração de agentes poluentes e microrganismos prejudiciais à saúde humana, incluindo vírus, bactérias e fungos.

Atualmente, os trabalhadores têm uma crescente preocupação com as condições de trabalho, uma vez que esses fatores influenciam diretamente na qualidade e na eficiência da entrega de seus serviços. Diante desse cenário, torna-se imperativo que instituições públicas e privadas estejam comprometidas em proporcionar ambientes seguros e saudáveis para seus colaboradores. Essa abordagem não apenas promove o bem-estar dos trabalhadores, mas também contribui para a eficácia e produtividade das organizações.

De fato, no Brasil, a partir do cenário econômico, social e político dos anos 1980, tem-se observado a estruturação de uma rede de serviços integrada ao Sistema Único de Saúde (SUS) voltada para a assistência aos trabalhadores afetados por agravos à saúde. Essa rede visa a não apenas atender aos trabalhadores que enfrentam problemas de saúde relacionados ao trabalho, mas também identificar a conexão entre esses agravos e as condições laborais.

Além da assistência direta, essa estrutura busca realizar registros epidemiológicos, que são essenciais para compreender a incidência de doenças e condições de saúde associadas ao ambiente de trabalho. Ademais, são promovidas ações de vigilância nos ambientes laborais, visando a prevenir e controlar riscos à saúde dos trabalhadores. Essa abordagem integrada reflete o compromisso do sistema de saúde brasileiro em cuidar da saúde ocupacional da população trabalhadora.

Atualmente, as ações relacionadas à saúde dos trabalhadores no SUS têm evoluído para uma abordagem mais abrangente, não se limitando mais a um único órgão, como era o caso do Centro de Referência em Saúde do Trabalhador (Cerest). Essa mudança de enfoque está alinhada com as diretrizes da Rede Nacional de Atenção Integral à Saúde do Trabalhador (Renast) e com os princípios do SUS, conforme estabelecido em legislações nacionais ao longo dos anos.

Os Centros de Referência em Saúde do Trabalhador têm a responsabilidade de integrar a saúde dos trabalhadores em diferentes níveis de atenção à saúde, abrangendo desde a atenção básica, com unidades como as Unidades Básicas de Saúde (UBS) e a Estratégia Saúde da Família (ESF), até os serviços de média e alta complexidade. Essa abordagem integrada reflete o compromisso em incorporar a saúde ocupacional de forma mais abrangente no âmbito do SUS.

Dessa forma, essa disseminação busca implementar ações que extrapolam a assistência direta, abrangendo a prevenção, promoção da saúde, vigilância e um sistema de informação

robusto. A ideia é fornecer dados sobre as condições de trabalho e saúde, aprimorando a capacidade de orientar intervenções mais eficazes na prevenção de problemas de saúde relacionados ao ambiente de trabalho.

Essa abordagem ampliada reflete o comprometimento em criar estratégias abrangentes para abordar os desafios de saúde ocupacional e fornecer um suporte mais eficiente aos trabalhadores.

A saúde do trabalhador, segundo a plataforma Prana Air (2023), abrange tanto a saúde quanto a segurança ambiental. Essa área engloba o estudo das tendências relacionadas ao bem-estar da força de trabalho em um determinado ambiente, envolvendo a análise crítica das condições de trabalho.

Além disso, incorpora estratégias preventivas e de mitigação para lidar com incidentes indesejados no local de trabalho em diversos níveis. Assim, destaca-se a importância da identificação de riscos potenciais e perigos iminentes que possam tornar o ambiente prejudicial à saúde do trabalhador. Conforme Fakhoury (2017), acerca da QAI, o termo

[...] refere-se às características do ar no interior dos edifícios, o qual pode afetar a saúde humana, o conforto e o desempenho do trabalho. A qualidade do ar depende de alguns parâmetros: biológicos, como exemplo os fungos e bactérias; químicos, como exemplo o CO₂ e aerodispersóides; e físicos, como exemplo a temperatura, umidade e velocidade do ar (Fakhoury, 2017, p. 27).

Dentro desse contexto, as características essenciais para a avaliação da QAI incluem as concentrações de poluentes no ar, temperatura e umidade. Além disso, outros parâmetros como a presença de poluentes em superfícies, níveis de iluminação e condições acústicas do local estudado podem ser considerados.

É importante destacar que a taxa de renovação do ar também desempenha um papel crucial na avaliação da QAI (Fakhoury, 2017). Assim, torna-se imperativo realizar controles e medições periódicas, garantindo uma avaliação sistemática da qualidade do ar interno nas instituições. Isso visa a prevenir a proliferação de doenças e assegurar a saúde dos trabalhadores.

4.8 CALOR OCUPACIONAL

A termorregulação humana desempenha um papel essencial na manutenção da homeostase térmica, de modo a afetar tanto a função fisiológica quanto o conforto subjetivo. Logo, a busca por fontes de calor, bem como as diferentes estratégias para mitigar o excesso

térmico, remonta aos primórdios da humanidade. Além disso, o aquecimento térmico sofre influência de uma complexa interação de eventos, individuais e ambientais.

De fato, a compreensão da termodinâmica nos ambientes industriais tornou-se crucial após a Revolução Industrial. Essa compreensão é essencial para garantir condições de trabalho seguras e produtivas. Como resultado desse desenvolvimento, foram estabelecidos padrões de conforto térmico e limites de exposição térmica por agências reguladoras de saúde e segurança do trabalho. Estes padrões visam a proporcionar ambientes de trabalho adequados, promovendo o bem-estar e a segurança dos trabalhadores.

Na análise do estresse térmico no ambiente de trabalho, é crucial distinguir entre conforto térmico um conceito subjetivo influenciado por fatores individuais e ambientais, e a sobrecarga térmica, determinada por critérios técnicos bem definidos. Esta última é representativa da quantidade de energia que o organismo deve dissipar para manter a homeostase térmica, levando em consideração a produção interna de calor metabólico resultante da atividade celular. A dissipação eficaz desse calor metabólico é essencial para a manutenção do equilíbrio térmico, cujas trocas de calor com o ambiente desempenham um papel fundamental.

Os organismos humanos são afetados pelo calor ambiental por meio de três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Cada um desses mecanismos desempenha um papel significativo nas interações entre o corpo humano e o ambiente térmico, influenciando o desempenho das atividades relacionadas ao trabalho.

O estudo do conforto térmico tem como objetivo estabelecer critérios para condições ideais de um ambiente termicamente confortável, proporcionando comodidade e satisfação às pessoas que o ocupam. O conforto térmico é crucial para medir a eficiência do trabalho, seja intelectual ou físico, uma vez que o desempenho humano em determinadas atividades tem uma influência direta com o bem-estar. A sensação de conforto ou desconforto resultante do ganho ou perda de calor pode impactar negativamente.

O conforto humano depende de três fatores ambientais: temperatura, umidade relativa e movimento do ar. A temperatura ambiental é um dos principais indicadores de conforto térmico, e pesquisas têm buscado determinar uma zona de conforto térmico para o ser humano. No contexto brasileiro, essas investigações são relativamente recentes e há uma escassez de dados relevantes, o que torna necessário o uso de parâmetros específicos.

O Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) tem como objetivo avaliar a condição de sobrecarga térmica em determinadas atividades, proporcionando uma forma de calcular o tempo ideal de descanso em tais situações. Dessa forma, o IBUTG foi proposto em

1957 por Yaglou e Minard, com o intuito de prevenir que indivíduos sofram danos relacionados à carga térmica em centros de treinamento militar.

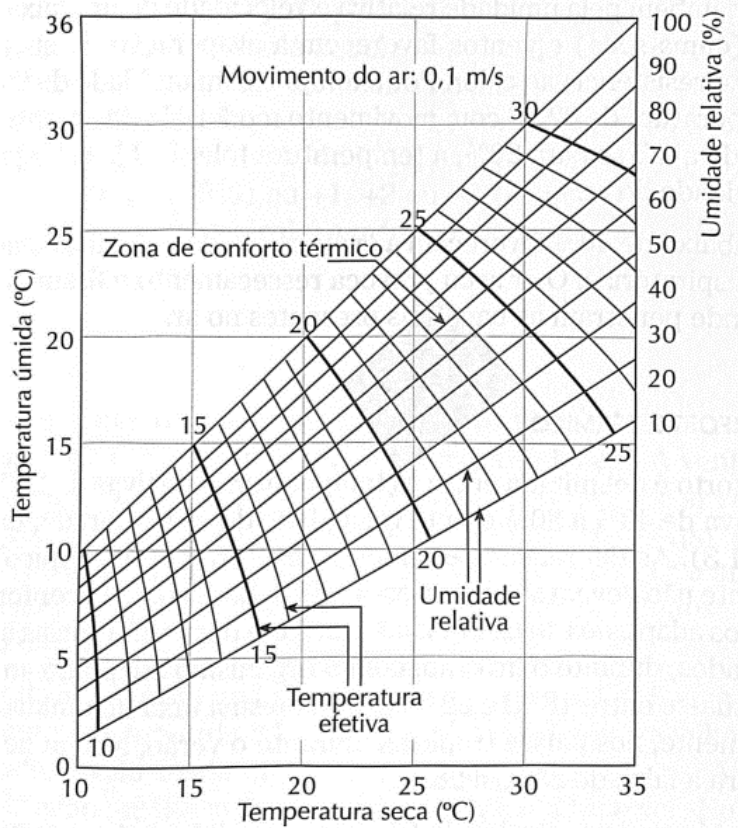
4.9 TEMPERATURA EFETIVA

A temperatura efetiva é aquela que produz sensação térmica equivalente à de uma temperatura medida com o ar saturado, de 100% (cem por cento) de umidade relativa e praticamente parado (sem vento). Em outras palavras, uma temperatura efetiva de 25 °C (vinte e cinco graus Celsius) é aquela que gera a mesma sensação térmica que uma temperatura de 25 °C (vinte e cinco graus Celsius) com 100% (cem por cento) de umidade e o ar calmo. Essa temperatura efetiva corresponde, portanto, a todas as combinações das três variáveis (temperatura ambiental, umidade relativa do ar e velocidade do ar) que produzem a mesma sensação térmica. Se a umidade diminuir ou a velocidade do ar aumentar, facilitando a evaporação do suor, a mesma temperatura efetiva pode ser representada por uma temperatura ambiental maior.

Na prática, a medição da umidade relativa é substituída pelas medidas de duas temperaturas, uma com o bulbo seco e a outra com o bulbo úmido. Se o ar estiver saturado, as duas medidas deverão coincidir. À medida que o ar fica mais seco, as diferenças entre essas duas temperaturas aumentam. Por exemplo, a temperatura efetiva de 25 °C (vinte e cinco graus Celsius) a 100% (cem por cento) de umidade relativa coincide com os mesmos 25 °C (vinte e cinco graus Celsius) marcados no bulbo seco. No outro extremo, com 10% (dez por cento) de umidade relativa, essas temperaturas serão, respectivamente, 15,5 °C (quinze vírgula cinco graus Celsius) e 34 °C (trinta e quatro graus Celsius).

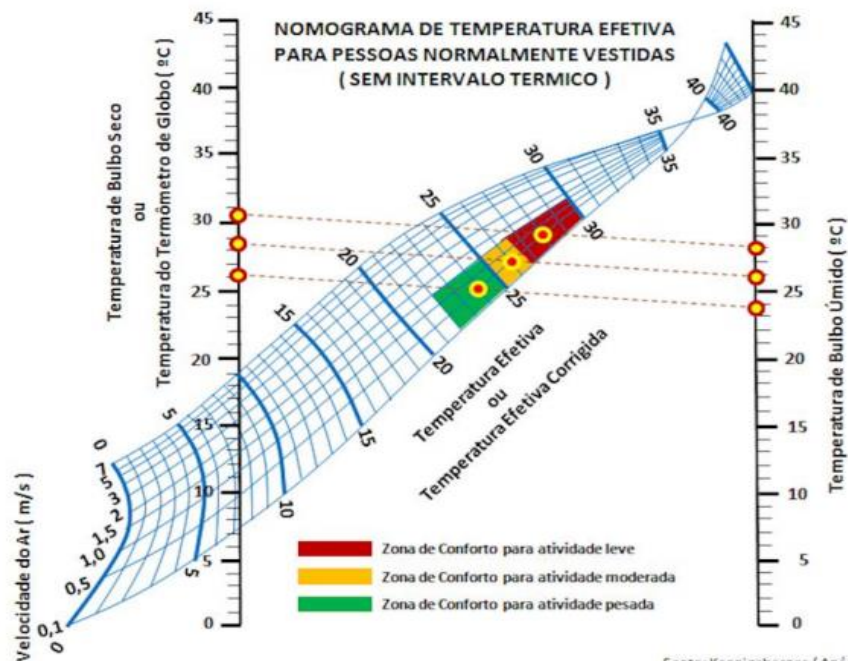
Para avaliação da temperatura efetiva e conforto térmico em humanos, utiliza-se a análise com o ábaco, o chamado Índice de Yaglou, como ilustrado nas Figuras 2 e 3. Nele, deve-se imputar o valor da velocidade do ar. Do lado esquerdo tem-se a temperatura do bulbo seco e, do lado direito, do bulbo úmido. Assim, basta inserir os números e traçar uma linha do bulbo seco, do bulbo úmido e que acompanhe o percurso.

Figura 2 – Ábaco Temperatura efetiva



Fonte: Acervo do autor (s.d.).

Figura 3 – Nomograma de Temperatura efetiva



Fonte: Acervo do autor (s.d.).

Além das informações fornecidas na NR 17, pode-se utilizar como referência o livro Ergonomia Prática, de Dul e Weerdmeester (2012). É preciso salientar que a tabela utilizada

possui valores analisados nos Estados Unidos, portanto, para aplicá-la ao Brasil, deve-se considerar o conforto térmico, mesmo se estiver de 3 (três) a 5 (cinco) graus acima desses valores informados. Dessa forma, os valores para conforto térmico são: trabalho intelectual, sentado, de 18 (dezoito) a 24°C (vinte e quatro graus Celsius); trabalho manual leve, sentado, de 16 (dezesesseis) a 22°C (vinte e dois graus Celsius); trabalho manual leve, em pé, de 15 (quinze) a 21°C (vinte e um graus Celsius); trabalho manual pesado, em pé, de 14 (catorze) a 20°C (vinte graus Celsius); trabalho pesado, de 13 (treze) a 19°C (dezenove graus Celsius).

Quando se avalia um ambiente que tenha ar-condicionado com a manutenção em dia, mas esteja fora dos 20 (vinte) a 23 (vinte e três) graus recomendados pela NR 17, não se deve pontuar como desconforto térmico ou risco ergonômico para temperatura na ergonomia. Se o trabalhador pode regular a temperatura com um controle, por exemplo, ele está regulando de acordo com o que ele prefere e se sente confortável. Dessa forma, não existe risco ergonômico, afinal, a ergonomia é sobre adaptar o ambiente de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores. E ao regular a temperatura com o ar-condicionado, os trabalhadores estão fazendo essa adaptação psicofisiológica para seus níveis de conforto, de acordo com o dia, horário e estação do ano.

4.10 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS TOTAIS (TVOC)

Ao considerar a presença de TVOC no ambiente de trabalho, torna-se evidente a importância de monitorar e controlar essas substâncias para garantir condições climáticas e qualidade do ar interno adequadas (Machado, 2003). Os TVOC englobam uma variedade de compostos químicos que podem ser liberados a partir de materiais de construção, mobiliário e produtos de limpeza, entre outros (Patiño Guío, 2014). Essas substâncias podem impactar negativamente a saúde dos trabalhadores, contribuindo para problemas respiratórios, irritações e desconforto geral.

Dados epidemiológicos indicam uma correlação direta entre a exposição prolongada a altas concentrações de TVOC e efeitos adversos à saúde, incluindo sintomas como dores de cabeça, fadiga, irritação ocular e respiratória. Em ambientes de trabalho, onde os funcionários passam grande parte do dia, a gestão dos níveis de TVOC torna-se crucial para assegurar um local saudável e produtivo. A OMS fornece diretrizes e limites recomendados para alguns compostos orgânicos voláteis, destacando a importância de manter esses ambientes dentro de padrões aceitáveis.

Com a evolução das práticas de construção sustentável, há uma crescente conscientização sobre a necessidade de escolher materiais e produtos de baixa emissão de compostos orgânicos voláteis. Certificações e selos ambientais, como o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), promovem a utilização de materiais de construção e mobiliário que contribuam para a qualidade do ar interno. Essas práticas visam a criar ambientes de trabalho mais saudáveis, atendendo não apenas às exigências regulatórias, mas também ao bem-estar e à produtividade dos colaboradores.

Ao analisar os dados estatísticos, observa-se uma tendência ascendente na implementação de medidas para reduzir a exposição aos TVOC em ambientes de trabalho (Souza *et al.*, 2023). Empresas estão adotando abordagens proativas, realizando avaliações periódicas da qualidade do ar interno e investindo em tecnologias e práticas que visam a minimizar a emissão desses compostos. A busca por ambientes de trabalho mais saudáveis reflete não apenas a preocupação com a conformidade regulatória, mas também a compreensão do impacto positivo na saúde e no desempenho dos colaboradores (Vieira; De Oliveira Souza; Canela, 2019).

Em síntese, o controle de Compostos Orgânicos Voláteis Totais em ambientes de trabalho é um componente crucial da gestão da qualidade do ar interno. Os esforços para reduzir emissões, escolher materiais sustentáveis e adotar práticas construtivas conscientes repercutem não apenas na saúde dos trabalhadores, mas também na criação de ambientes propícios ao bem-estar e à eficiência laboral (Pantoja; Nascimento; Nunes, 2015). O monitoramento constante e a busca por soluções inovadoras continuarão a moldar a abordagem empresarial em direção a ambientes de trabalho mais saudáveis e sustentáveis.

A implementação de sistemas de monitoramento interno para controle dos parâmetros de condições climáticas e da qualidade do ar em ambientes de trabalho é crucial para garantir ambientes saudáveis e produtivos. Esses sistemas oferecem a capacidade de avaliar, em tempo real, fatores como temperatura, umidade, níveis de poluentes e compostos orgânicos voláteis, proporcionando uma visão abrangente das condições ambientais.

Ao disponibilizar dados precisos e atualizados, os sistemas de monitoramento permitem uma resposta imediata a desvios nos padrões aceitáveis, possibilitando a implementação de medidas corretivas antes que impactem negativamente a saúde e o conforto dos colaboradores.

Além disso, essas soluções tecnológicas desempenham um papel fundamental na promoção da eficiência energética, uma vez que permitem ajustes precisos nos sistemas de climatização e ventilação, otimizando o consumo de energia. Em um contexto mais amplo,

esses sistemas contribuem para a criação de ambientes de trabalho sustentáveis, alinhando-se a normativas de saúde ocupacional e elevando a qualidade de vida dos ocupantes.

5 METODOLOGIA

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa busca a realização de uma análise sobre o desenvolvimento, implementação, instalação e testes de um protótipo para captura e armazenamento de parâmetros de eficiência energética e qualidade do ar em climatizadores, além da validação dos dados obtidos em comparação aos medidos em equipamentos comerciais.

Desse modo, trata-se de um estudo de caso e se enquadra como pesquisa exploratória, descritiva e explicativa, tendo em vista que foram realizadas observações e aprofundamentos a partir das análises realizadas nos experimentos do equipamento em condicionadores de ar.

De acordo com Alexandre (2003), a pesquisa exploratória visa a esclarecer conceitos, por meio de estudo bibliográfico, estudo de caso e entrevistas; a pesquisa descritiva, tem como foco apresentar as características de determinada população por meio da relação entre variáveis; e explicativa, que identifica fatores que geram impacto nos fenômenos estudados.

Nesse contexto, o estudo de caso é considerado uma estratégia de investigação em que são apresentados grandes resultados para os estudos no qual são empregados (Fernandes, 2017).

Na presente investigação, foram coletadas amostras, por meio das salas de teste e sistemas de ar-condicionado, visando a observar o desempenho do equipamento em relação ao sistema desenvolvido. Além disso, foram conduzidas avaliações da qualidade do ar no ambiente estudado por meio dos testes realizados. Conforme Almeida (2019), amostra refere-se à parcela da população que fornecerá os dados necessários para a pesquisa.

Nessa perspectiva, o presente estudo adota uma abordagem qualitativa, pois examinará aspectos teóricos associados ao tema em discussão. Adicionalmente, terá um enfoque quantitativo, uma vez que utilizará gráficos, cálculos matemáticos e procedimentos estatísticos para análise dos dados coletados.

Conforme Almeida (2019), a abordagem quantitativa caracteriza-se pelo uso de ferramentas estatísticas para o tratamento dos dados, visando a mensurar as relações existentes entre fatores ou variáveis. Segundo Yin (2015), a pesquisa qualitativa possibilita estudos aprofundados sobre uma variedade de tópicos, de maneira simples e cotidiana, conferindo maior liberdade na seleção de temas de interesse.

No âmbito da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), esta pesquisa se enquadra, em sua aderência, na linha de pesquisa em Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais com ampla aplicabilidade. Como impacto, este estudo possui grande relevância, considerando que o problema real abordado neste projeto está relacionado à qualidade do ar em ambientes climatizados, onde trabalhadores e estudantes passam longos períodos.

Sendo assim, a necessidade de criar um sistema de monitoramento e controle dos parâmetros de climatização surge a partir da observação de que as condições climáticas internas afetam diretamente a saúde, o bem-estar e a produtividade dos usuários. Com isso, a falta de monitoramento adequado da eficiência energética e da qualidade do ar pode resultar em ambientes insalubres e no aumento de doenças ocupacionais, além de gerar custos elevados com o consumo de energia e absenteísmo dos servidores.

Quanto à inovação, já existem sistemas semelhantes ao do projeto desenvolvido, entretanto, o projeto em questão inova em relação aos outros por ser de baixo custo e com algumas funções inovadoras, tais como envio de alertas em tempo real por *Short Message Service* (SMS). Já a complexidade deste estudo é considerada alta, tendo em vista que envolve conhecimentos teóricos e práticos em Eletrônica, programação de *software* e prototipagem.

A partir desses conhecimentos, foi desenvolvido um sistema de sensoriamento eletrônico, cujo objetivo é adquirir os parâmetros de temperatura de insuflamento, de retorno, tensão e corrente elétrica, umidade relativa do ar e temperatura do ambiente, além dos parâmetros ambientais de CO₂ e TVOC. Ademais, o sistema realiza o armazenamento e a exibição de dados obtidos, em tempo real, na plataforma *Web ThingSpeak*, a fim de proporcionar melhor eficiência energética dos climatizadores, bem como maior conforto térmico e qualidade do ar nos recintos climatizados.

Sendo assim, o sistema é composto de várias placas e sensores eletrônicos interligados que interagem por meio de diversos protocolos de comunicação e tem como suporte um código de programação que reside na placa principal, onde se encontra o microcontrolador.

5.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Na condução deste estudo, a metodologia adotada desempenha um papel crucial ao definir os procedimentos e estratégias empregados para alcançar os objetivos propostos. No escopo desta pesquisa, um dos focos centrais é a construção do protótipo do sistema de

monitoramento, uma tarefa que demanda a especificação minuciosa e a implementação de dispositivos capazes de medir parâmetros relevantes para a eficiência da climatização.

Neste contexto, esta seção visa a fornecer uma descrição detalhada das especificações dos dispositivos utilizados na construção do protótipo. A escolha desses dispositivos é fundamentada em uma revisão bibliográfica abrangente e no desempenho de suas funções após os testes, com as tecnologias disponíveis para as medições das variáveis como temperatura, umidade e consumo de energia, considerando o menor custo possível, visando a alcançar a melhor viabilidade econômica do projeto.

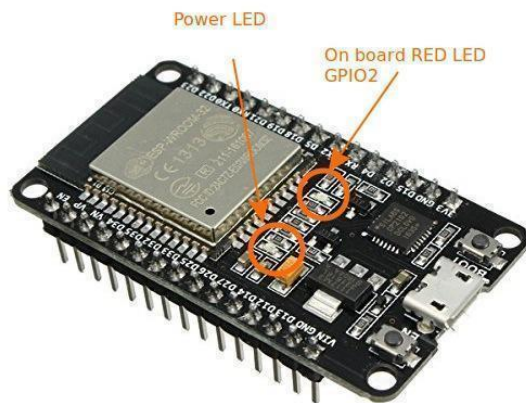
Ao delinear detalhadamente as características e funcionalidades desses dispositivos, pretende-se proporcionar uma base sólida para a compreensão da infraestrutura subjacente ao sistema de monitoramento. Essa abordagem permitirá não apenas a replicabilidade do estudo, mas também oferecerá uma visão clara das ferramentas utilizadas, fomentando a transparência e a validade científica do processo de construção do protótipo.

Com essa premissa, a metodologia busca ser uma referência compreensível e abrangente, proporcionando *insights* sobre as escolhas técnicas e estratégicas na implementação dos dispositivos, fundamentais para o sucesso da pesquisa.

5.2.1 Placa ESP32

A ESP32-WROOM-32 foi escolhida como unidade central do sistema por suas diversas características que a tornam a mais adequada para este tipo de aplicação. Ela possui um microcontrolador avançado que integra suporte a *Wi-Fi*, *Bluetooth* e *Bluetooth Low Energy* (BLE), de acordo com a Figura 4. Essa versatilidade permite que o sistema tenha diferentes formas de conectividade, essenciais para ambientes educacionais onde é importante manter o sistema sempre conectado à rede para o monitoramento remoto de dados.

Figura 4 – Placa ESP32



Fonte: Circuits4you (s.d.).

Além disso, a ESP32 é equipada com dois núcleos de Unidade Central de Processamento (CPU), que podem operar com frequências ajustáveis de 80 MHz (oitenta Megahertz) até 240 MHz (duzentos e quarenta Megahertz), oferecendo flexibilidade para atender a diferentes demandas de processamento. A capacidade de operar em modo de baixa potência (*Deep Sleep*), com consumo de menos de 5 μA (cinco Microampère), é crucial para aplicações que exigem eficiência energética, permitindo que o sistema continue funcionando por longos períodos sem necessidade de manutenção frequente, mesmo em áreas onde há limitações de infraestrutura elétrica. A escolha da ESP32 se deve ainda à sua integração fácil com uma vasta gama de sensores, o que a torna escalável e capaz de monitorar múltiplos parâmetros de interesse de maneira eficiente.

Sua conectividade *Wi-Fi* permite que os dados capturados sejam enviados diretamente para o servidor em nuvem (*ThingSpeak*), garantindo o monitoramento em tempo real da eficiência energética e qualidade do ar nas salas de aula. Em situações em que o *Wi-Fi* não esteja disponível, a ESP32 também pode utilizar o módulo GSM SIM800L (descrição a seguir, na seção 5.2.7) para enviar dados via rede móvel, garantindo uma cobertura completa em diversas condições operacionais.

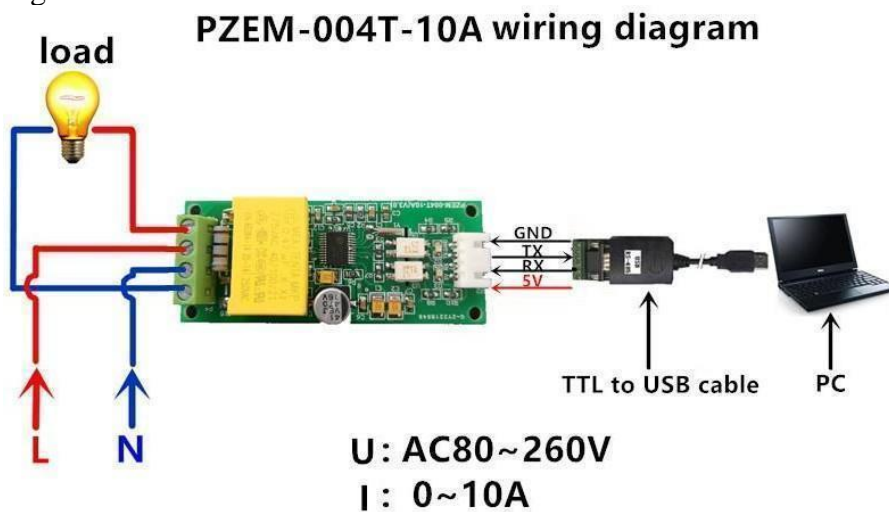
5.2.2 PZEM

O PZEM-004T foi escolhido para a medição precisa de parâmetros elétricos como tensão, corrente, potência ativa e fator de potência nos sistemas de climatização, que são grandes consumidores de energia em ambientes escolares. Esse módulo foi selecionado por sua capacidade de medição de até 100A (cem ampères) e por sua precisão, com erros de leitura

de apenas $\pm 1\%$ (mais ou menos um por cento) para tensão e corrente, e $\pm 2\%$ (mais ou menos dois por cento) para potência e energia.

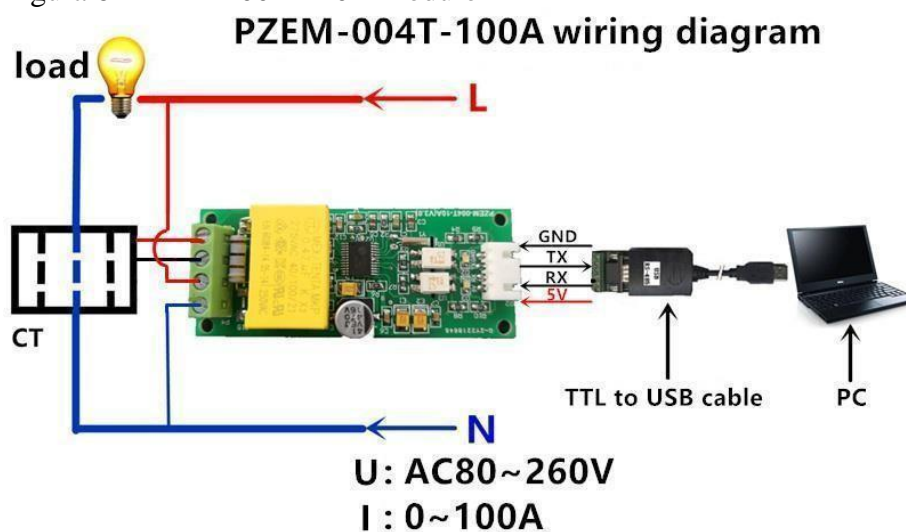
Na Figura 5, é possível observar o PZEM a forma de operação que se utiliza de uma interface *Transistor-Transistor Logic* (TTL) para *Universal Serial Bus* (USB) e os dados são carregados diretamente no *Personal Computer* (PC) e a captura de corrente é no modo invasivo, em que os fios do circuito medido passam através da placa. Já na Figura 6, a medição é feita de forma não invasiva, em que o fio por onde circula a corrente a ser medida passa através de um sensor indutivo.

Figura 5 – PZEM-004T-10A módulo 1



Fonte: *Innovators Guru* (s.d.).

Figura 6 – PZEM-004T-10A módulo 2



Fonte: *Innovators Guru* (s.d.).

A medição precisa da energia elétrica consumida pelos climatizadores é essencial para identificar pontos de ineficiência e ajudar na otimização do uso de recursos. A capacidade de comunicação via serial TTL permite que o módulo se integre facilmente à ESP32, transmitindo dados em tempo real para análise.

A integração desse módulo ao sistema também proporciona uma plataforma escalável, em que é possível monitorar vários circuitos simultaneamente ou em diferentes ambientes, garantindo uma visão global do consumo energético em um edifício inteiro, o que pode facilitar intervenções direcionadas para aumentar a eficiência energética.

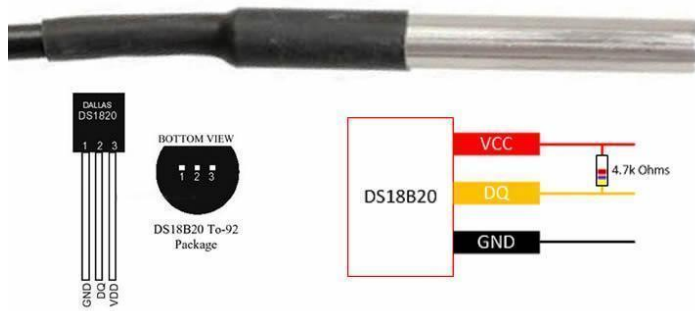
Outra característica importante do PZEM-004T é a sua flexibilidade no método de medição, podendo realizar tanto medições invasivas quanto não invasivas. Na medição invasiva, os fios do circuito medido passam diretamente pela placa do módulo, o que pode ser útil para instalações permanentes em baixa corrente, de até 10 A (dez ampères), ou quando há acesso direto aos fios. Já na medição não invasiva, utiliza-se um sensor indutivo que se coloca ao redor do fio condutor, o que facilita a instalação e reduz o risco de interferências na rede elétrica.

Esses componentes, quando combinados, constituem uma solução completa e confiável, de baixo custo para o monitoramento preciso de energia elétrica em diversos contextos. A precisão, a versatilidade e a facilidade de integração destacam esse conjunto como uma ferramenta valiosa para projetos que exigem medições detalhadas e confiáveis de consumo de energia elétrica.

5.2.3 Sensor DS18B20

O DS18B20 é um tipo de sensor que fornece leituras de temperatura de 9 (nove) a 12 (doze) bits, como observado na Figura 7. Esses valores mostram a temperatura de um determinado dispositivo ou ambiente. A comunicação desse sensor pode ser feita por meio de um protocolo de barramento de um fio que usa uma linha de dados para se comunicar com um microprocessador interno. Além disso, esse sensor obtém a fonte de alimentação diretamente da linha de dados, de modo que a necessidade de uma fonte de alimentação externa pode ser eliminada. As aplicações do sensor de temperatura DS18B20 incluem sistemas industriais, produtos de consumo, sistemas termicamente sensíveis, controles termostáticos e termômetros.

Figura 7 – Sensor DS18B20



Fonte: 14core (s.d.).

O princípio de funcionamento do sensor DS18B20 é como um sensor de temperatura. A resolução padrão usada para ligar é de 12 (doze) bits. Esse sensor obtém energia em uma condição inativa de baixa energia. A medição da temperatura, bem como a conversão de A-D, podem ser feitas com um comando *convert-T*. As informações de temperatura resultantes podem ser armazenadas no registro de 2 (dois) bytes do sensor e, após isso, esse sensor retorna ao seu estado inativo.

O sensor DS18B20 foi incorporado ao sistema para realizar a medição da temperatura interna nos ambientes climatizados. O controle preciso da temperatura é essencial tanto para garantir o conforto dos alunos e professores quanto para otimizar o uso dos climatizadores. Ao manter a temperatura dentro de uma faixa ideal, é possível reduzir o consumo excessivo de energia elétrica, evitando tanto o subuso quanto o sobreuso dos aparelhos de climatização.

Esse sensor se destaca pela sua alta precisão, apesar do seu baixo custo, de alta confiabilidade e margem de erro mínima. Sua comunicação simplifica a conexão com a ESP32, reduzindo a quantidade de fios e, conseqüentemente, o risco de falhas. Outra vantagem do DS18B20 é a possibilidade de ser alimentado diretamente pela linha de dados, dispensando a necessidade de uma fonte de alimentação externa e simplificando o projeto de *hardware*.

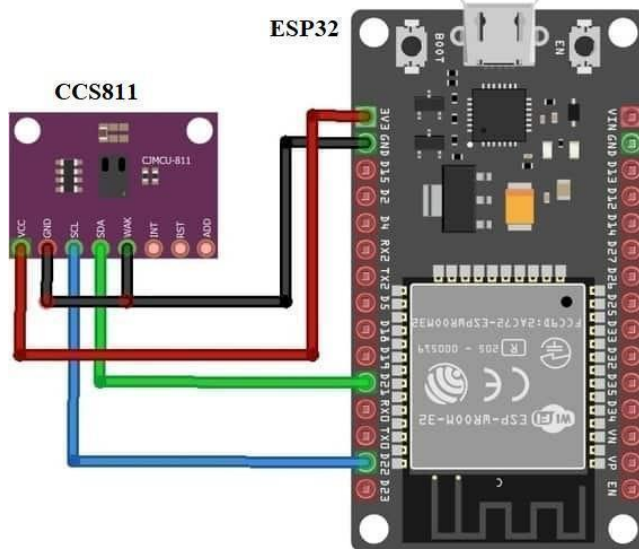
A escolha desse sensor foi baseada em sua robustez, durabilidade e capacidade de operar de forma eficiente em uma variedade de ambientes, desde salas de aula até laboratórios e outros locais que exigem monitoramento ambiental preciso.

5.2.4 Sensor CCS811

O sensor de dióxido de carbono (sensor CCS811) e um microcontrolador de 8 (oito) bits, demonstrado na Figura 8, é um dispositivo digital de baixo consumo de energia que integra um conversor analógico-digital para medição de parâmetros de qualidade do ar, neste caso: CO₂

e TVOC. Esse sensor tem a capacidade de detectar CO₂ e uma ampla gama de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), tornando-se uma solução versátil para monitorar a qualidade do ar em dispositivos pessoais, como *smartphones* e *smartwatches*, com a vantagem de ser alimentado por bateria.

Figura 8 – Sensor CCS811 conectado ao ESP32 (WROOM)



Fonte: How2electronics (s.d.).

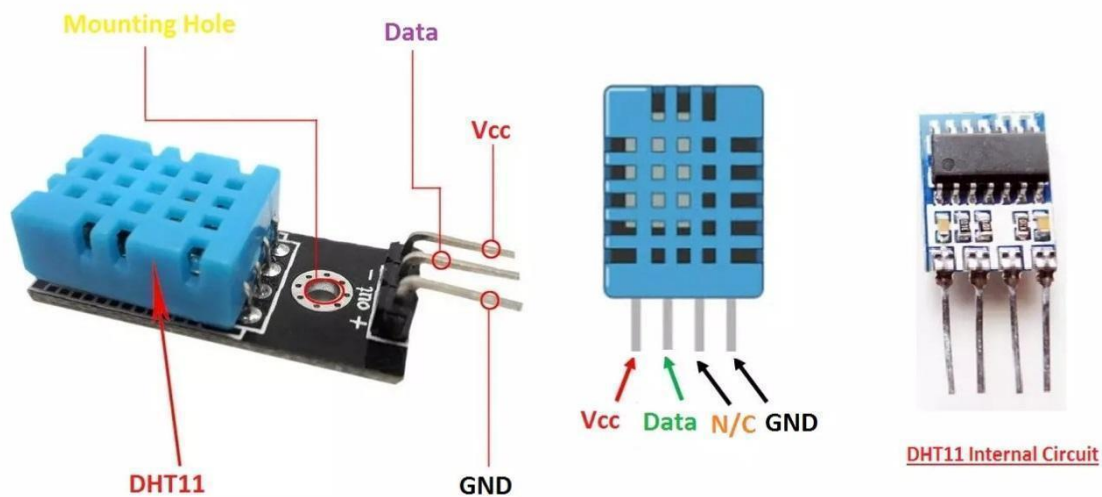
O sensor CCS811 foi escolhido para monitorar os seguintes parâmetros de qualidade do ar interno: concentração de CO₂ e VOCs. A presença desses poluentes no ar é prejudicial à saúde dos ocupantes, especialmente em salas de aula, onde o tempo de exposição pode ser prolongado. A implementação desse sensor tem como objetivo garantir que os níveis de CO₂ e VOCs estejam dentro dos limites aceitáveis, evitando possíveis problemas de saúde e promovendo um ambiente mais seguro e saudável.

O CCS811 é um dispositivo de baixo consumo de energia e possui uma interface I2C, que facilita sua integração com o microcontrolador ESP32. Ele possui algoritmos embutidos para a conversão analógica-digital dos dados, o que o torna altamente preciso e adequado para ambientes onde a qualidade do ar precisa ser monitorada de forma contínua e precisa. A adição desse sensor no sistema permite uma abordagem abrangente do controle ambiental, não se limitando apenas à temperatura, mas também considerando a composição do ar, o que é crucial em ambientes fechados com grande circulação de pessoas.

5.2.5 Sensor DHT11

O sensor digital de temperatura e umidade DHT11 é um dispositivo composto, projetado para proporcionar uma saída de sinal digital calibrada para medição de temperatura e umidade, como demonstrado na Figura 9. Emprega uma tecnologia dedicada de coleta de módulos digitais e detecção de temperatura e umidade, assegurando alta confiabilidade e excelente estabilidade a longo prazo. Sua construção inclui componentes sensíveis à umidade e dispositivos de medição de temperatura *Negative Temperature Coefficient* (NTC), sendo conectado a um microcontrolador de 8 (oito) bits de alto desempenho. Esse arranjo estrutural e tecnológico proporciona ao produto a capacidade de oferecer leituras precisas e confiáveis de temperatura e umidade em diversas aplicações.

Figura 9 – Sensor DHT11



Fonte: *The Engineering Projects* (2019).

O sensor DHT11 é responsável pela medição tanto da temperatura quanto da umidade relativa do ar. Embora seja um sensor mais simples em comparação com o DS18B20, ele possui a capacidade de fornecer dados adicionais que são cruciais para o controle do clima interno, especialmente a umidade, que afeta diretamente o conforto térmico e a eficiência dos sistemas de climatização. O controle da umidade é fundamental, pois níveis inadequados podem prejudicar o conforto térmico dos ocupantes do ambiente e até mesmo causar danos aos equipamentos eletrônicos.

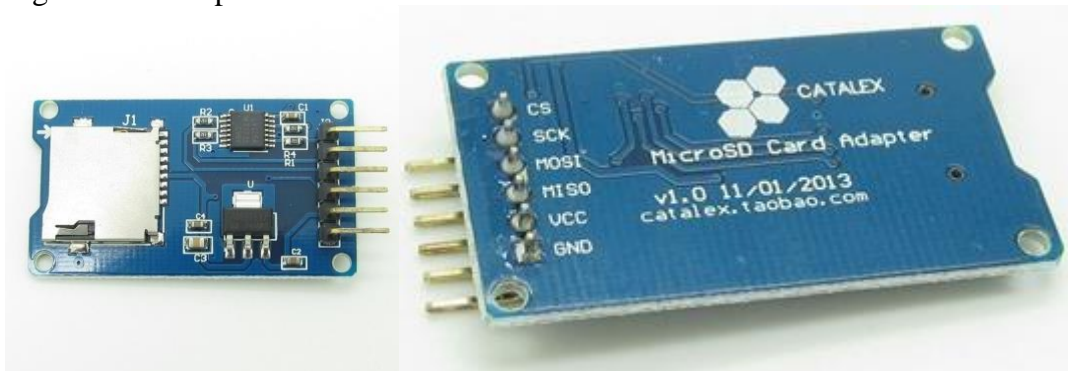
O DHT11 oferece uma boa confiabilidade, com precisão suficiente para a maioria das aplicações de monitoramento ambiental em ambientes educacionais. Sua conexão simples e baixa demanda de processamento faz dele uma excelente escolha para integração ao sistema

ESP32, complementando os dados fornecidos pelos outros sensores e proporcionando uma visão mais completa do ambiente.

5.2.6 Placa leitora de cartão de memória Micro SD

O módulo Adaptador de Cartão Micro SD (*Secure Digital*) atua como um leitor de cartão Micro SD, de acordo com a Figura 10, facilitando a leitura e a gravação por meio do sistema de arquivos e do driver de interface SPI. O módulo é compatível com cartões Micro SD e cartões Micro SDHC, incluindo os de alta velocidade. Com circuito integrado regulador de tensão, oferece compatibilidade de interface tanto em níveis de 5V (cinco volts) quanto de 3,3V (três vírgula três volts). A faixa de fornecimento de energia é de 4,5V (quatro vírgula cinco volts) a 5,5V (cinco vírgula volts).

Figura 10 – Adaptador de Cartão Micro SD



Fonte: Awsli (s.d.).

A interface de comunicação segue o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) padrão. O módulo incorpora quatro furos de posicionamento com parafusos M2 para facilitar a instalação. A interface de controle é composta por seis pinos: GND (terra), VCC (fornecimento de energia), MISO, MOSI, SCK (SPI bus) e CS (pino de sinal de seleção de chip). O circuito regulador de 3,3V (três vírgula três volts) inclui um regulador LDO (*low dropout*¹), que fornece 3,3V (três vírgula três volts) para o chip de conversão de nível e para o fornecimento do cartão Micro SD.

O circuito de conversão de níveis garante que os sinais do cartão Micro SD sejam convertidos para 3,3V (três vírgula três volts). Isso inclui a conversão da direção do sinal MISO para 3,3V (três vírgula três volts), permitindo que os sistemas microcontroladores AVR[®] leiam

¹ Regulador LDO: regulador de tensão *low dropout*, de alto rendimento.

corretamente o sinal. O conector do cartão Micro SD é projetado para facilitar a inserção do cartão, apresentando um *deck* autoexplosivo.

O módulo está equipado com quatro furos de posicionamento para parafusos M2, cada um com um diâmetro de 2,2mm (dois vírgula dois milímetros). Esses furos facilitam a instalação e o posicionamento, permitindo uma combinação eficiente entre módulos.

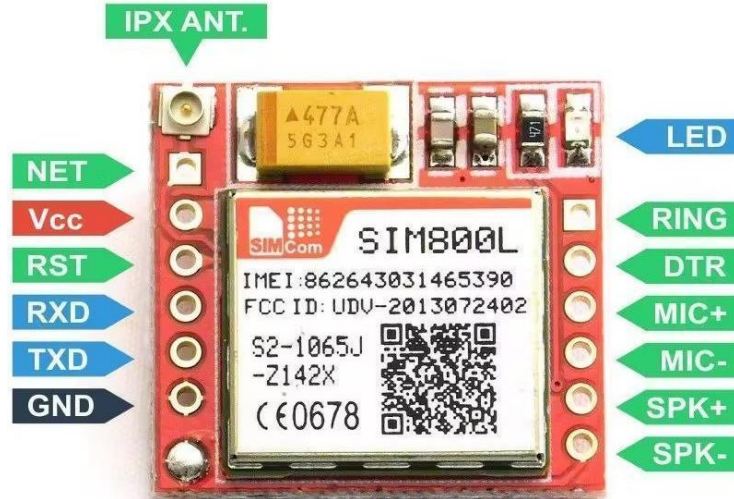
Para garantir que os dados coletados possam ser armazenados localmente, foi implementada uma placa leitora de cartão Micro SD. Esse módulo permite que o sistema funcione de maneira redundante, armazenando os dados no cartão SD sempre que houver falhas de comunicação com o servidor em nuvem. A interface de comunicação SPI é amplamente suportada pela ESP32, o que facilita sua integração no sistema.

A placa Micro SD é uma solução eficiente e de baixo custo para *backup* local de dados, especialmente em casos em que o acesso à rede pode ser intermitente, como em áreas mais remotas. Esse armazenamento local garante que nenhum dado seja perdido e que o sistema continue a operar mesmo durante falhas temporárias na conexão com a internet.

5.2.7 Módulo GSM/GPRS SIM800L

O SIM800L é um módulo GSM/GPRS *quad-band* operando nas frequências GSM850MHz, EGSM900MHz, DCS1800MHz e PCS1900MHz, demonstrado na Figura 11. Projetado para atender às demandas de espaço em dispositivos do usuário, como *smartphones*, *Personal Digital Assistant* (PDA) e outros dispositivos móveis, o módulo incorpora um *slot* para cartão microSIM, uma antena para sinal de rede, microfone, pinagem para alto-falante e anel.

Figura 11 – Módulo GSM/GPRS SIM800L



Fonte: Hackster.io (s.d.).

Para garantir seu funcionamento adequado, o SIM800L requer uma fonte de alimentação estritamente entre 3,4V (três vírgula quatro volts) e 4,4V (quatro vírgula quatro volts), com uma corrente mínima de 2 A (dois ampères). É importante observar que não deve ser conectado diretamente à placa Arduino ou a qualquer fonte de 5V (cinco volts) sem um regulador adequado, sendo necessário, também, um tradutor de tensão para facilitar a comunicação serial.

O SIM800L é um módulo de comunicação GSM/GPRS que oferece conectividade móvel para o sistema, permitindo que ele envie dados para o servidor em nuvem mesmo em locais onde não há disponibilidade de rede *Wi-Fi*. Isso é especialmente útil em áreas rurais ou em situações em que a infraestrutura de rede é limitada. Operando em frequências *quad-band*, o SIM800L garante cobertura em uma ampla gama de regiões, tornando o sistema aplicável em diferentes contextos geográficos.

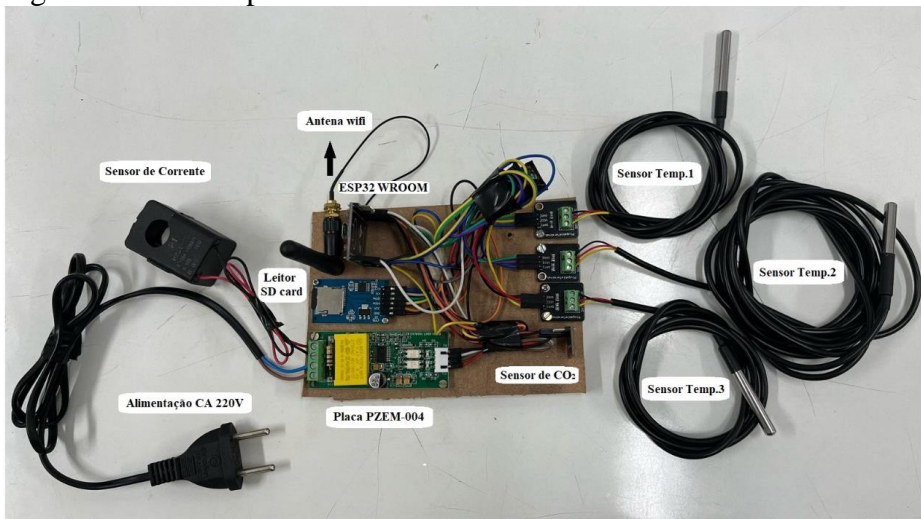
O módulo requer uma fonte de alimentação estável, que foi considerada na implementação do projeto. A utilização do SIM800L proporciona uma camada extra de redundância na comunicação, assegurando que o monitoramento dos dados ambientais e de eficiência energética seja contínuo e confiável, independentemente das limitações da infraestrutura de rede local.

5.3 PROTÓTIPO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

A integração dos dispositivos no protótipo foi cuidadosamente projetada para garantir um fluxo contínuo e eficiente de dados, utilizando interfaces de comunicação padronizadas e

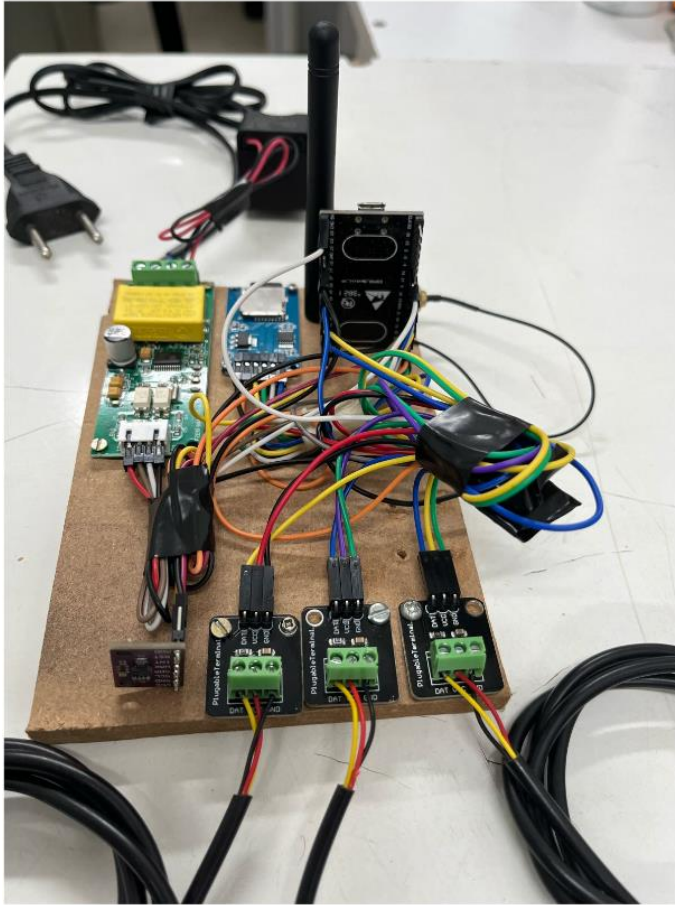
amplamente suportadas, como I2C, *Serial Peripheral Interface* (SPI), UART e barramento de um fio (*I-Wire*). Cada componente desempenha um papel crucial dentro do sistema, interagindo de forma coordenada para atender às funções esperadas de monitoramento da qualidade do ar e eficiência energética nas salas climatizadas do IFRN, sendo elas: sala de estudos do curso de engenharia de energia (tecnologia de climatizador convencional) e sala da direção do Departamento de Indústria do Campus Natal Central (tecnologia de climatizador *inverter*). A ESP32-WROOM-32 serve como o núcleo central de controle, gerenciando a coleta, processamento e transmissão dos dados para o servidor em nuvem ou, em caso de falha de rede, para um cartão Micro SD, de acordo com as Figuras 12 e 13. Na seção de Anexos, também é possível observar o diagrama esquemático do protótipo, além das vistas superiores e inferiores do projeto da placa de circuito impresso, Anexos 1, 2 e 3.

Figura 12 – Protótipo do sistema de monitoramento



Fonte: autoria própria (2024).

Figura 13 – Visão frontal do protótipo do sistema de monitoramento



Fonte: autoria própria (2024).

A ESP32, com suas múltiplas interfaces de comunicação, integra de forma eficiente os sensores ambientais e o medidor de energia. Para a medição de temperatura, o sensor DS18B20 utiliza o protocolo de barramento de um fio (*1-Wire*), que simplifica a comunicação, reduzindo o número de conexões físicas. A ESP32 pode ler diretamente os dados de temperatura do sensor, processá-los e enviá-los ao sistema central. Inicialmente, o protótipo foi montado utilizando o sensor DS18B20, que, a princípio, mediria a temperatura do ambiente externo. Surgindo a necessidade dos parâmetros de umidade relativa do ar e temperatura, optou-se pela substituição pelo sensor DHT11, que, posteriormente, também foi substituído pelo DHT22 por questões de melhoria de precisão. O referido equipamento está conectado em uma *interface* digital simples, utilizando apenas um pino de dados, o que facilita a sua integração e otimiza o uso de recursos no microcontrolador.

O sensor CCS811, responsável pela medição de CO₂ e VOCs, utiliza a interface I2C, que permite a comunicação bidirecional com a ESP32 usando apenas dois pinos (SDA e SCL). A interface I2C é eficiente em termos de uso de pinos e permite a adição de outros sensores compatíveis ao mesmo barramento, sem necessidade de alterar significativamente o *hardware*.

Essa característica torna o sistema expansível e permite monitorar novos parâmetros de qualidade do ar com mínima intervenção física.

A comunicação entre o medidor de energia PZEM-004T e a ESP32 ocorre por meio de uma *interface serial* TTL (UART). O PZEM-004T mede parâmetros críticos, como corrente, tensão, potência ativa e fator de potência, e transmite esses dados em tempo real para a ESP32. A escolha do protocolo UART se dá por sua simplicidade e confiabilidade, o que torna a comunicação direta e eficiente, permitindo que a ESP32 processe as informações do consumo energético dos sistemas de climatização de forma rápida. A coleta constante desses dados é essencial para identificar padrões de uso e possíveis ineficiências energéticas ou possíveis falhas na energia elétrica fornecida ao equipamento de climatização, permitindo ajustes na operação dos climatizadores para reduzir o consumo sem comprometer o conforto.

Além da coleta de dados, o protótipo foi equipado com uma placa leitora de cartão Micro SD conectada via interface SPI. Essa *interface* é amplamente utilizada por sua alta velocidade de transferência de dados e compatibilidade com a ESP32. O armazenamento local permite que os dados coletados pelos sensores e pelo medidor de energia sejam salvos de forma segura no cartão Micro SD em situações em que a conectividade com o servidor em nuvem seja interrompida. Esse mecanismo garante que não haja perda de dados críticos, oferecendo uma camada adicional de segurança ao sistema. Assim que a conectividade é restabelecida, os dados armazenados no cartão Micro SD podem ser sincronizados automaticamente com o servidor, mantendo a continuidade do monitoramento.

Para a transmissão de dados, a ESP32 utiliza prioritariamente sua interface *Wi-Fi*, conectando-se à rede local para enviar os dados processados ao servidor em nuvem (*ThingSpeak*). Esse envio é contínuo e em tempo real, permitindo que as informações sobre a qualidade do ar e o consumo de energia sejam acessadas remotamente por gestores e técnicos. A conectividade *Wi-Fi* foi escolhida pela sua alta taxa de transferência, de até 150 Mbps (cento e cinquenta megabits por segundo) e alcance, o que facilita o uso em ambientes internos e conectados, como salas de aula.

No entanto, para garantir redundância e operação em locais onde o *Wi-Fi* seja instável ou inexistente, pode ser incorporado ao sistema o módulo GSM/GPRS SIM800L. Esse módulo permite que a ESP32 envie dados via rede móvel GPRS, assegurando que o monitoramento não seja interrompido por falhas na rede local. A comunicação entre o SIM800L e a ESP32 também utiliza o protocolo de comunicação *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART), facilitando a integração e o gerenciamento das diferentes *interfaces* de comunicação. Em caso de falha no *Wi-Fi*, a ESP32 automaticamente alterna para a rede móvel, enviando os dados

através do SIM800L. Esse design robusto garante que o sistema seja confiável em diferentes contextos operacionais, mesmo em locais com infraestrutura de rede limitada.

A sincronização entre os diferentes sensores, medidores e *interfaces* de comunicação é gerenciada pela ESP32, que age como um *hub* central. Ela processa os dados coletados, sincroniza as leituras em intervalos regulares e executa os algoritmos de controle para garantir que as informações sejam corretamente processadas e transmitidas. A ESP32 também é responsável por tomar decisões de operação, como ativar o modo de economia de energia quando não houver necessidade de processamento intensivo ou armazenar dados localmente quando a conexão com a nuvem estiver instável.

Esse sistema integrado é automatizado, com a ESP32 gerenciando as mudanças entre as diferentes tecnologias de comunicação, tais como *Wi-Fi* e GSM, controlando a coleta de dados de acordo com a disponibilidade da rede. Além disso, a ESP32 monitora continuamente a integridade dos sensores, garantindo que leituras errôneas ou falhas sejam detectadas e corrigidas automaticamente. Os registros de montagem, instalação e funcionamento do protótipo encontram-se nos Anexos deste trabalho.

5.4 LOCAIS DE TESTE DO PROTÓTIPO

Uma vez construído o protótipo do sistema de monitoramento, com a interface de uma plataforma *web*, a fim de testar sua eficácia, foram utilizados dois diferentes ambientes climatizados, sendo um deles com um climatizador de sistema convencional (sala de estudos da engenharia de energia) e outro com climatizador de sistema inverter (sala da direção do departamento de indústria), no Campus Natal Central (CNAT) do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN). No que diz respeito à plataforma *web*, os dados coletados irão ser feitos *upload* de maneira contínua através da rede *Wi-Fi* para a plataforma *ThingSpeak*, onde serão armazenados, permitindo a plotagem e o acesso simultâneo por vários usuários.

5.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia de desenvolvimento do trabalho, inicialmente, foi alicerçada na elaboração de uma revisão bibliográfica, seguida da formulação de um plano de trabalho, sendo este último destinado à construção e implementação de um circuito eletrônico capaz de medir os parâmetros relevantes para a eficiência da climatização, como temperatura, umidade e

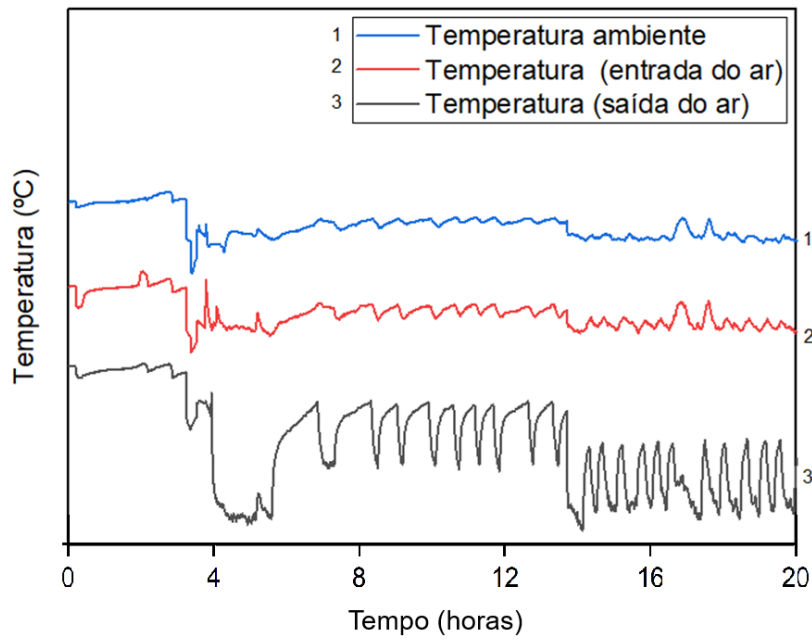
consumo de energia, além de criar o código de programação que implemente todas as funcionalidades necessárias para o funcionamento do protótipo, sempre levando em consideração a viabilidade técnica e econômica.

6 RESULTADOS

Neste tópico, serão apresentados os resultados da pesquisa, acompanhados de uma discussão que integra os dados coletados com os conceitos teóricos abordados anteriormente. A análise do desempenho do climatizador e a qualidade do ar no ambiente são fundamentais para compreender a dinâmica da termorregulação humana e a importância do conforto térmico. O controle das concentrações dos TVOC, CO₂, umidade e temperatura do ambiente desempenham um papel crucial na criação de um ambiente de trabalho saudável. Assim, ao explorar as relações entre temperatura, umidade e os parâmetros de eficiência energética, pode-se avaliar como as condições climáticas influenciam na saúde e no bem-estar dos usuários do ambiente, além de contribuir para práticas de construção sustentável e gestão ambiental eficaz. A discussão a seguir buscará conectar os dados obtidos com esses conceitos, fornecendo uma visão abrangente sobre os resultados da implementação do protótipo desenvolvido.

A análise da Figura 14 apresenta um gráfico de temperatura em função do tempo com três curvas representando a temperatura de entrada e saída do ar e a temperatura ambiente da sala de estudos dos alunos, revelando importantes *insights* sobre o desempenho do climatizador e a dinâmica térmica do ambiente monitorado.

Figura 14 – Temperaturas de entrada e de saída do ar e ambiente, climatizador convencional



Fonte: autoria própria (2024).

Inicialmente, observa-se que, no momento que o climatizador está desligado, as três temperaturas se mostram bastante semelhantes, situando-se em torno de 28 (vinte e oito) a 30 °C (trinta graus Celsius). Essa homogeneidade reflete a influência da temperatura ambiente, indicando que, sem a operação do sistema, o ambiente interno não apresenta variações significativas em relação à temperatura externa.

Ao acionar o climatizador, a curva da temperatura de saída do ar apresenta uma diminuição acentuada, superando a queda nas temperaturas de entrada e ambiente. Essa diferença é esperada, uma vez que o sensor de saída do ar está diretamente exposto ao ar refrigerado, enquanto as outras medições respondem mais lentamente às mudanças térmicas, uma vez que estão influenciadas pela temperatura do ambiente e pela quantidade de ar frio que circula.

Conforme o tempo avança e o climatizador estabiliza seus ciclos de funcionamento, nota-se que a temperatura de saída atinge valores em torno de 18 °C (dezoito graus Celsius), enquanto a temperatura ambiente e a de entrada do ar se estabilizam em aproximadamente 24 °C (vinte e quatro graus Celsius), temperatura a qual o equipamento foi ajustado pelo controle.

É relevante mencionar que a temperatura ambiente permanece de 0,5 (zero vírgula) a 1 °C (um grau Celsius) inferior à da entrada do ar. Essa variação pode ser atribuída ao efeito da ventilação proporcionada pelo climatizador, que, ao circular o ar frio, contribui para uma leve diminuição da temperatura percebida no espaço.

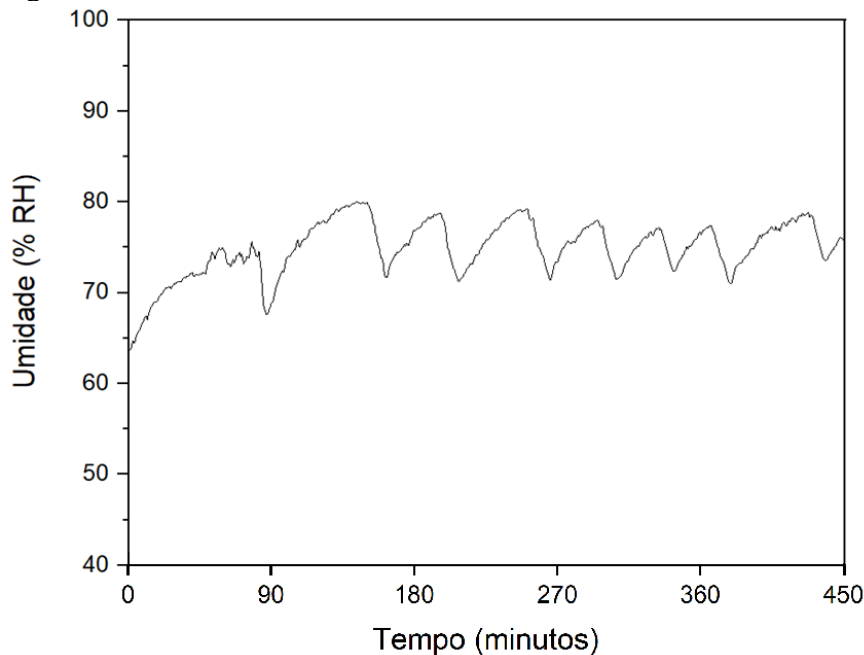
Nos primeiros ciclos de funcionamento, a elevada temperatura ambiente requer um tempo de operação significativamente maior, cerca de três vezes superior aos ciclos subsequentes.

Por fim, uma observação importante é a queda da temperatura de saída para um mínimo de 12,6 °C (doze vírgula seis graus Celsius) a partir de 3/4 (três quartos) do ciclo de refrigeração, coincidindo com o *set point* da temperatura do climatizador para 22 °C (vinte e dois graus Celsius). Esse ajuste não apenas demonstra a flexibilidade do sistema em atender às preferências do usuário, mas também enfatiza a importância de um controle dinâmico e responsivo em sistemas de climatização. A capacidade de adaptação do climatizador às mudanças nas condições térmicas sublinha o papel essencial da termodinâmica nos ambientes mais diversos e a necessidade de sistemas de monitoramento eficazes para garantir a eficiência energética e o bem-estar dos trabalhadores.

Ao analisar a Figura 15, observa-se a variação da umidade relativa (% RH) em função do tempo, revelando uma significativa correlação entre os níveis de umidade e os ciclos de temperatura do climatizador. Observa-se que os valores de umidade variam entre 65% (sessenta

e cinco por cento) e 80% (oitenta por cento), refletindo a dinâmica do sistema de climatização em resposta às mudanças térmicas. Essa sincronização entre umidade e temperatura é indicativa do funcionamento eficiente do climatizador, que não apenas refrigera o ar, mas também influencia a umidade do ambiente.

Figura 15 – Umidade



Fonte: autoria própria (2024).

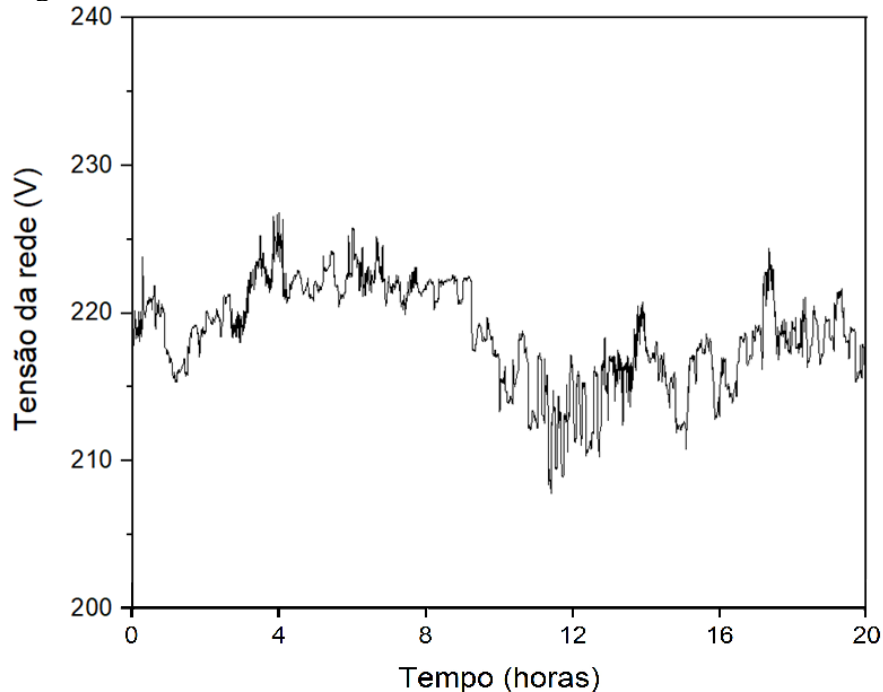
Durante os períodos em que a temperatura de saída do ar é reduzida, a umidade relativa tende a apresentar um aumento, constatando uma possibilidade de menor retenção de vapor d'água quando o ar se encontra a temperaturas mais baixas. Essa dinâmica ressalta a importância da umidade no conforto térmico, uma vez que níveis elevados de umidade podem resultar em desconforto para os ocupantes, mesmo em temperaturas agradáveis, enquanto que níveis de umidade muito baixos podem causar problemas respiratórios para eles.

Portanto, a compreensão dessa inter-relação é vital para otimizar as condições de trabalho e garantir a saúde e o bem-estar dos trabalhadores. Além disso, esta análise reforça a necessidade de um monitoramento constante dos parâmetros ambientais, pois a variação da umidade está intimamente ligada à qualidade do ar e à eficiência energética do sistema de climatização.

A análise da Figura 16, que representa a variação da tensão (V) em função do tempo, destaca um fenômeno comum observado no funcionamento de sistemas de climatização: a queda de tensão momentânea no instante em que o compressor do climatizador é acionado. Esse

comportamento é esperado, uma vez que a ativação do compressor demanda uma corrente elétrica significativa, resultando em uma breve diminuição na tensão da rede elétrica.

Figura 16 – Tensão da rede



Fonte: autoria própria (2024).

Entretanto, é importante ressaltar que a rede elétrica em questão alimenta não apenas o climatizador, mas também outros dispositivos e equipamentos simultaneamente. Portanto, não se pode estabelecer uma relação direta entre a queda de tensão observada e o funcionamento exclusivo do climatizador.

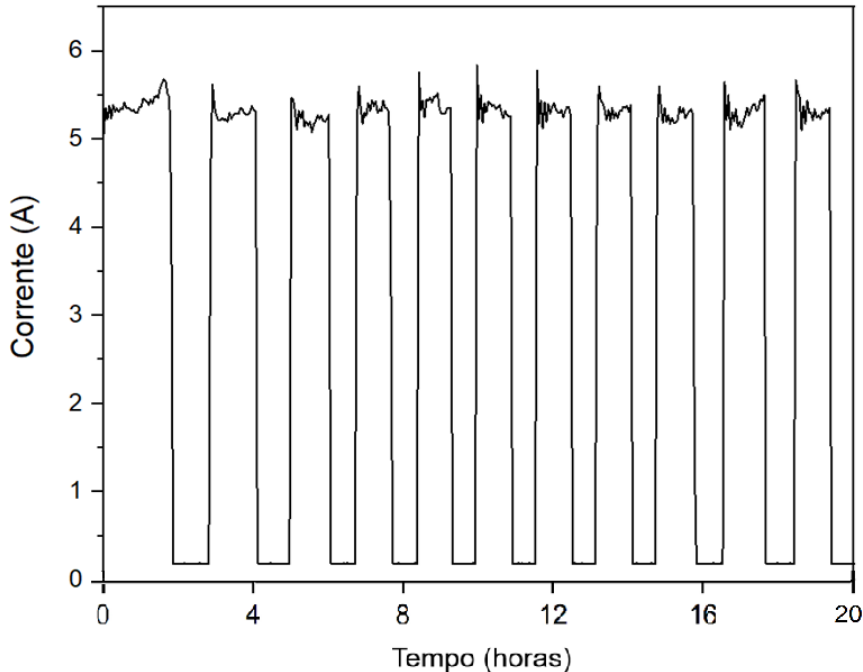
Havendo a possibilidade de que outros aparelhos conectados possam influenciar no comportamento e na variação da carga total da rede, problema bastante comum em um prédio antigo como o do IFRN/CNAT, onde o sistema foi instalado, conforme descrito anteriormente.

Essa análise sublinha a necessidade de um gerenciamento eficaz da energia elétrica em ambientes com múltiplos equipamentos, a fim de garantir que a operação do climatizador e de outros dispositivos não sejam comprometidos por flutuações de tensão. Além disso, a compreensão desse fenômeno é crucial para o desenvolvimento de soluções que visem a otimizar a eficiência energética do sistema, assegurando não apenas o conforto térmico, mas também a estabilidade e a segurança do ambiente de trabalho.

A Figura 17, que apresenta o comportamento da corrente elétrica (A) em função do tempo, revela um padrão típico de climatizadores com compressor convencional (não *inverter*). Ao longo do gráfico, observa-se que a corrente elétrica sofre um aumento significativo quando

o compressor é acionado, partindo de um valor de aproximadamente 300 mA (trezentos milliampères) e atingindo picos de até 5,5 A (cinco vírgula cinco ampères). Esse aumento brusco ocorre devido à alta demanda de energia necessária para o funcionamento do compressor.

Figura 17 – Corrente em função do tempo (sistema convencional)



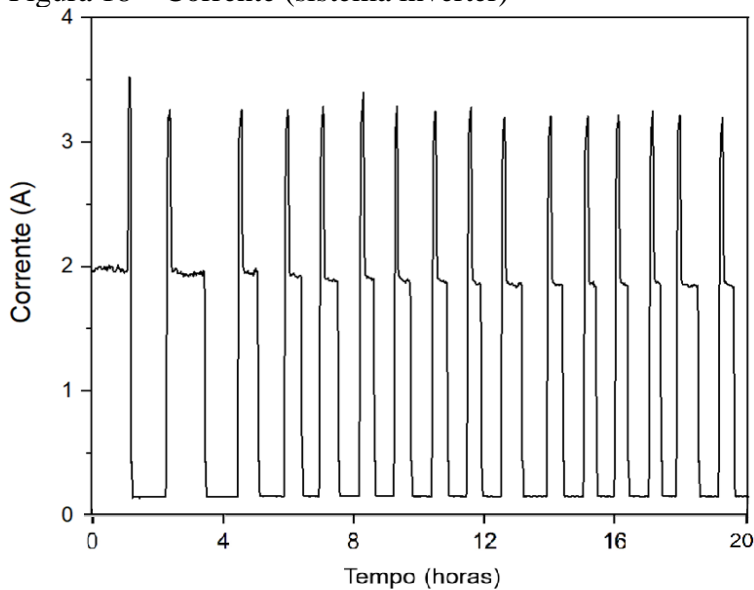
Fonte: autoria própria (2024).

Durante o período em que o compressor permanece ligado, a corrente se mantém elevada, refletindo o consumo de energia necessário para realizar o processo de refrigeração. Uma vez que a temperatura ambiente atinge o ponto de ajuste estabelecido no climatizador, o compressor desliga, e a corrente elétrica retorna ao valor inicial de 300 mA (trezentos milliampères), indicando que o sistema entra em um estado de consumo reduzido, mantendo apenas os ventiladores e placas de controle em operação.

Esse comportamento de ciclos de liga/desliga é característico de climatizadores convencionais, que trabalham em regime de acionamento total ou desligamento completo, diferentemente dos sistemas *inverter*, que ajustam continuamente a velocidade do compressor de acordo com a demanda. A análise desses ciclos é essencial para compreender o impacto desse tipo de climatizador no consumo energético, já que o consumo intermitente pode resultar em picos de demanda energética, influenciando a eficiência do sistema e os custos operacionais a longo prazo.

A Figura 18 apresenta o gráfico da corrente elétrica em função do tempo para um sistema de climatização com tecnologia *inverter*, evidenciando um comportamento distinto em relação aos sistemas convencionais. No estado de *standby*, o sistema consome uma corrente mínima de aproximadamente 15 mA (quinze milliampères), o que ressalta a eficiência energética do sistema quando não está em operação ativa. No momento da partida do compressor, o pico de corrente observado é relativamente baixo, em torno de 3,5 A (três vírgula cinco ampères), o que difere dos sistemas não-inverter, que, conforme a Figura 17, apresenta picos de corrente significativamente maiores (Marangoni *et al.*, 2015).

Figura 18 – Corrente (sistema inverter)



Fonte: autoria própria (2024).

Após esse pico inicial, a corrente diminui para aproximadamente 2 A (dois ampères), permanecendo estável durante o restante do ciclo de operação. Esse comportamento de manutenção da corrente em níveis baixos ao longo do ciclo destaca a capacidade dos sistemas *inverter* de ajustar continuamente a potência necessária para climatizar o ambiente, podendo resultar em um consumo energético mais eficiente, quando comparada a situações análogas. Assim como nos sistemas convencionais, os primeiros ciclos de operação são mais longos, o que pode ser explicado pela necessidade de reduzir uma temperatura ambiente mais elevada no momento da ativação inicial do climatizador.

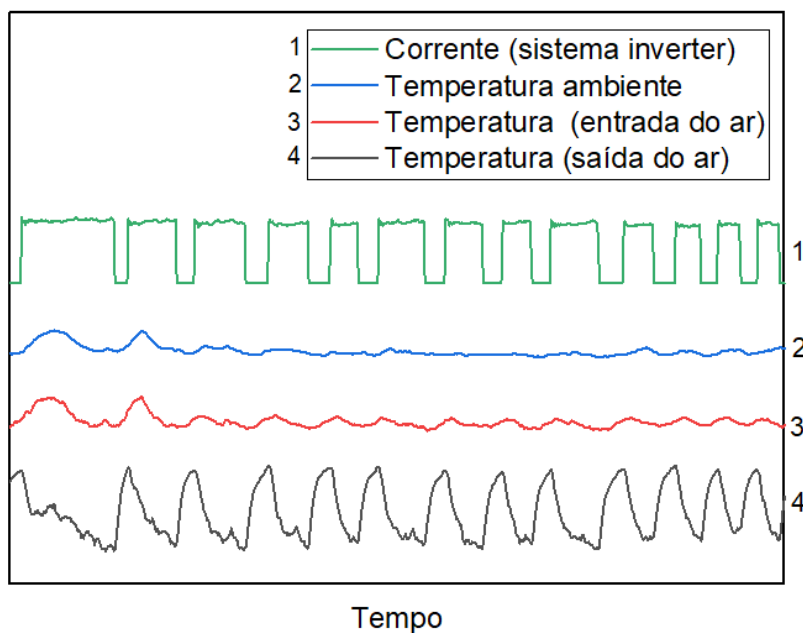
A Figura 19 apresenta uma correlação entre os parâmetros de temperatura de saída do ar, temperatura de entrada do ar, temperatura ambiente e corrente elétrica em função do tempo, permitindo uma análise abrangente do comportamento do sistema de climatização. No primeiro ciclo observado, o gráfico demonstra que o tempo de operação do compressor é

consideravelmente maior, refletindo a necessidade de resfriar um ambiente inicialmente mais quente. Como mencionado anteriormente, a temperatura ambiente estava elevada no início do processo, o que explica a maior duração do ciclo, já que o climatizador precisa operar por um período prolongado para atingir a temperatura desejada.

À medida que o sistema avança por mais ciclos, observa-se uma redução no tempo de operação. Isso ocorre porque, após o ambiente ser resfriado, há uma menor demanda de ar frio para manter a temperatura estabilizada, resultando em ciclos mais curtos. Esse comportamento evidencia a adaptação do sistema à redução gradual da carga térmica.

Outro aspecto relevante, e que é um comportamento esperado, é a sincronia clara entre os ciclos de corrente elétrica e as variações de temperatura. Quando o compressor está desligado, as temperaturas sobem, enquanto a corrente elétrica permanece próxima de zero, indicando que apenas o ventilador está em funcionamento. No momento em que o compressor é acionado, a corrente elétrica eleva-se rapidamente para cerca de 5 A (cinco ampères), e as temperaturas de saída do ar e ambiente começam a cair. Uma vez que a temperatura mínima desejada é alcançada, o compressor desliga novamente, a corrente retorna a quase zero, e o ciclo se reinicia. Essa dinâmica de funcionamento cíclico ilustra o consumo energético do climatizador e sua eficiência em ajustar o ambiente de acordo com as condições térmicas necessárias.

Figura 19 – Temperaturas de entrada e de saída do ar, do ambiente e corrente (sistema convencional)

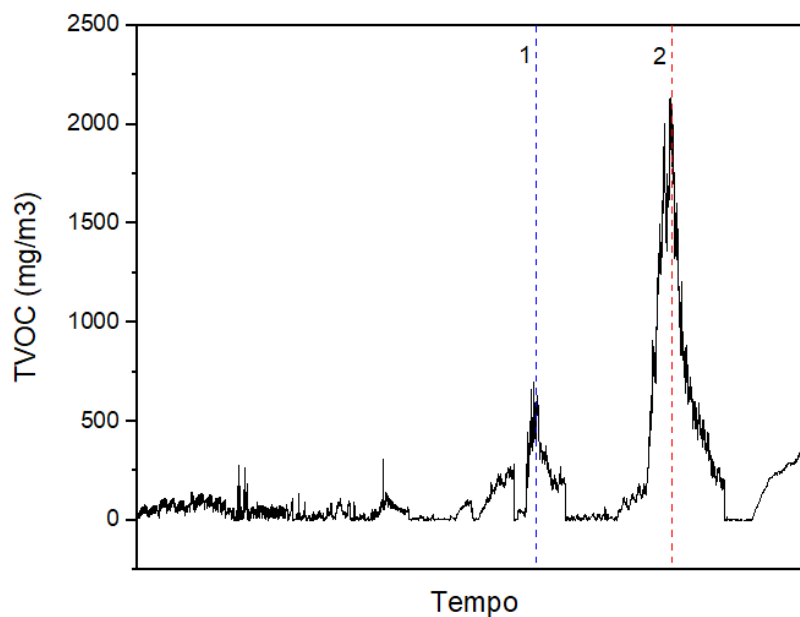


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 20, que apresenta a quantidade de TVOC em função do tempo, observa-se inicialmente uma estabilidade nos níveis de TVOC. No entanto, próximo ao instante de tempo indicado pela linha tracejada azul (1), há um aumento acentuado na concentração desses compostos, que pode ser explicado por diversos fatores, como a presença de TVOC em produtos de limpeza usados para a higienização da sala, de recintos adjacentes e do quadro branco.

Após esse pico, os níveis de TVOC retornam à normalidade, demonstrando a capacidade do sistema em monitorar e identificar rapidamente mudanças na qualidade do ar. Próximo ao evento indicado na linha tracejada vermelha (2), houve um novo aumento intencional dos níveis de TVOC quando álcool isopropanol foi borrifado no ambiente, com o objetivo de testar a resposta do sensor. Esse aumento controlado confirmou a eficácia do sensor, que registrou de maneira adequada a variação na concentração de compostos orgânicos voláteis, comprovando assim seu bom funcionamento no monitoramento da qualidade do ar em tempo real.

Figura 20 – TVOC

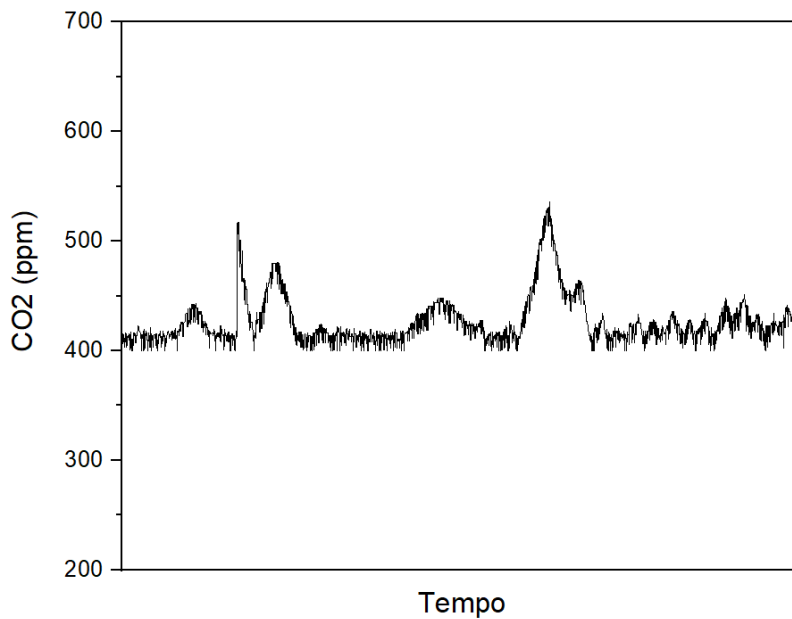


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 21, que ilustra a concentração de CO₂ em função do tempo, observa-se que os valores permaneceram majoritariamente dentro de uma faixa estável durante o período de medição. No entanto, alguns picos de variação foram registrados, indicando aumentos momentâneos na concentração do gás. Esses picos podem ser atribuídos a diversos fatores, como a poluição do ar externo, que pode ter influenciado a qualidade do ar interno, e o aumento temporário, dado a entrada de pessoas no ambiente, já que a respiração humana é uma das principais fontes de CO₂ em espaços fechados.

Esses resultados reforçam a importância de monitorar continuamente os níveis de CO₂ em ambientes climatizados, pois variações na concentração do gás podem impactar diretamente a qualidade do ar e, conseqüentemente, o bem-estar dos ocupantes. A estabilidade predominante dos níveis de CO₂ ao longo do tempo também indica que o sistema de climatização, em conjunto com o monitoramento, foi eficaz em manter as condições dentro dos limites aceitáveis para um ambiente saudável, conforme mencionado na Figura 2 (Ábaco Temperatura Efetiva).

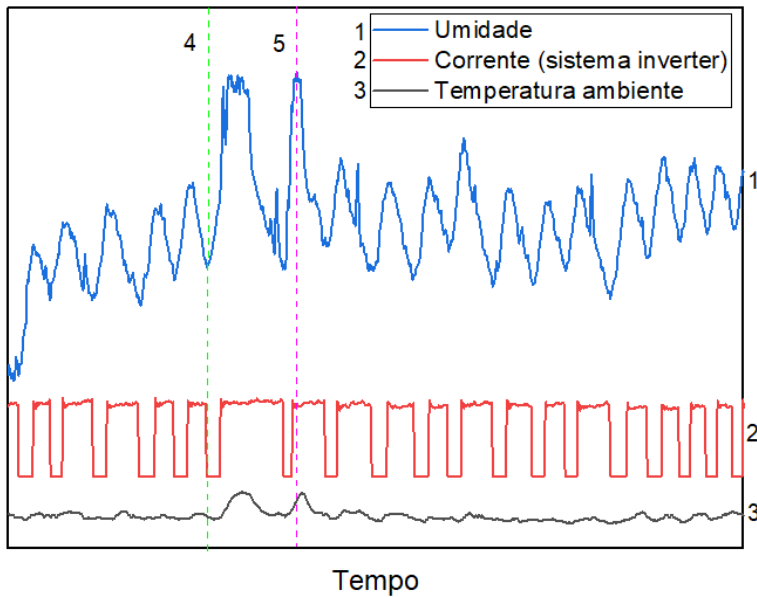
Figura 21 – CO₂



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 22 apresenta a relação entre a umidade, a corrente elétrica e a temperatura ambiente em função do tempo, revelando como o ciclo de refrigeração afeta diretamente a umidade do ambiente climatizado. Ao se aproximar da linha verde, é possível observar que a umidade está baixa, assim como a temperatura ambiente. Esse comportamento ocorre porque o compressor estava ligado previamente, resfriando o ambiente. Com o desligamento do compressor, a temperatura começa a subir gradativamente, acompanhada pela elevação da umidade, até que um novo ciclo de refrigeração seja iniciado, momento em que ambos os parâmetros voltam a cair.

Figura 22 – Umidade, corrente e temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A queda na umidade junto à temperatura é explicada pelo funcionamento do climatizador, que acaba capturando a umidade do ar durante o processo de resfriamento. Essa umidade é expelida do ambiente por meio do dreno, resultando em uma perda significativa de umidade no ambiente. Esse processo, embora eficiente no controle da temperatura, pode ser considerado prejudicial para a qualidade do ar interno, uma vez que ambientes excessivamente secos tendem a ser desconfortáveis e menos saudáveis para os ocupantes. Tal dinâmica evidencia uma ineficiência típica dos sistemas de climatização, que necessitam de um melhor controle de umidade.

Quando se atinge a área marcada pelo pontilhado rosa (5), observa-se que a umidade volta a subir, indicando que, no período em que o compressor estava desligado, não houve a condensação do ar interno e, devido a uma pequena renovação do ar interior pela entrada de ar exterior e principalmente ao calor latente dos indivíduos que estão transpirando no ambiente, a umidade volta a subir. Esse processo é essencial para manter níveis adequados de umidade e garantir um ambiente mais saudável e equilibrado em termos de qualidade do ar.

Os resultados apresentados demonstram a eficiência do sistema de monitoramento em capturar e correlacionar parâmetros críticos como temperatura, umidade, corrente elétrica, TVOC e CO₂ ao longo do tempo. Observou-se que o climatizador respondeu adequadamente às variações de temperatura e umidade. A correlação entre a corrente elétrica e a temperatura mostrou a sincronização entre o funcionamento do compressor e as variações de temperatura, evidenciando a eficácia do sistema no controle térmico.

As medições de TVOC e CO₂ mostraram variações pontuais, explicadas por eventos como o uso de produtos de limpeza e a presença de mais pessoas no ambiente, comprovando a sensibilidade dos sensores em detectar mudanças na qualidade do ar. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo para garantir a eficiência energética e a qualidade do ar em ambientes climatizados, alinhando-se aos objetivos de promover a saúde e o conforto dos trabalhadores.

7 CONCLUSÃO

Para efeito didático e explicativo, a respeito da conclusão da presente dissertação, foi adotado um modelo de fragmentação da conclusão com base nos tópicos outrora elucidados nos objetivos geral e específicos. Relacionando, portanto, o objetivo com a conclusão de cada um deles, obtêm-se os seguintes resultados:

Objetivo específico 01: com base na revisão bibliográfica, estabelecer a estrutura de *hardware* e *software* para o controle, formando a base do projeto do protótipo.

A partir do trabalho apresentado, foi realizada uma série de consultas bibliográficas, em que foi encontrada a base teórica para a seleção e teste dos dispositivos sensoriais responsáveis pela aquisição dos parâmetros físicos e químicos analisados. Além dos dispositivos elucidados, o embasamento teórico proporcionou informações relevantes para a programação do microcontrolador e comunicação com a plataforma *web* utilizada.

Objetivo específico 02: projetar e construir o protótipo do sistema de monitoramento, levando em consideração a viabilidade técnica e econômica.

No tratante ao objetivo específico citado, o protótipo de um sistema autônomo de captura e armazenamento de parâmetros para análise de eficiência energética e qualidade do ar em ambientes climatizados se mostrou viável quanto o desenvolvimento do projeto para captura e armazenamento de informações dos parâmetros físicos e químicos analisados (temperaturas, TVOC, CO₂, corrente e tensão elétrica e umidade), se mostrando possível construir um sistema de monitoramento confiável, robusto e funcional, com um baixo custo orçamentário e utilizando sistemas eletrônicos disponíveis e bastante difundidos no mercado.

Objetivo específico 03: implementar um circuito eletrônico capaz de medir parâmetros relevantes para a eficiência da climatização, como temperatura, umidade e consumo de energia, aliado a um código de programação capaz de indicar as variações dos parâmetros indicados.

A partir do desenvolvimento do protótipo, foi possível coletar e armazenar os dados dos parâmetros físicos e químicos observados com uso de uma plataforma *ThingSpeak*, onde os

dados outrora armazenados são plotados em interfaces gráficas e podem ser acessados em tempo. Utilizando um protocolo de comunicação remota, via internet, o qual possibilita que o dispositivo possa ser instalado em um local remoto e seus dados coletados em qualquer local onde se tenha acesso a rede de internet.

Objetivo específico 04: instalar e operacionalizar o protótipo autônomo portátil em diferentes ambientes climatizados do Campus Natal Central (CNAT) do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN).

O protótipo desenvolvido demonstrou que a operacionalização e instalação em recintos fechados é viável na captura e armazenamento de parâmetros essenciais, como temperatura, umidade, corrente elétrica, TVOC e CO₂, oferecendo uma análise em tempo real das condições ambientais. Esse monitoramento contínuo permite uma avaliação mais precisa das variáveis e possibilita intervenções rápidas e eficazes para corrigir desvios, promovendo ambientes de trabalho mais saudáveis e eficientes.

Objetivo específico 05: Realizar testes práticos do protótipo em ambientes climatizados reais, avaliando sua eficácia e identificando possíveis melhorias.

Os testes do protótipo para diferentes tecnologias de sistema de climatização se mostraram aceitáveis quanto ao monitoramento ambiental em tempo real, com taxa de aquisição de cinco segundos por ponto analisado (5s/ponto), demonstrando o impacto positivo que esse dispositivo pode ter para políticas de melhoria institucional na saúde ocupacional, eficiência energética e sustentabilidade dos espaços de trabalho do IFRN Campus CNAT. A replicabilidade do protótipo e os *insights* gerados abrem caminho para futuras implementações em outros contextos, em que a integração de sensores e sistemas de controle pode promover um gerenciamento ambiental mais eficaz e consciente.

Objetivo Geral: desenvolver um protótipo de sistema de monitoramento de baixo custo para ambientes climatizados. Utilizando sistemas de sensoriamento eletrônico e comunicação com *software web*, o sistema será capaz de capturar e armazenar parâmetros físicos relacionados à eficiência de climatização e qualidade do ar em ambientes monitorados, durante períodos pré-determinados.

As conclusões deste trabalho evidenciam a importância e a eficácia de um sistema autônomo de monitoramento para análise de eficiência energética e qualidade do ar em ambientes climatizados, onde foi desenvolvido um protótipo de monitoramento de baixo custo e boa confiabilidade para a coleta, armazenamento e acompanhamento dos parâmetros de temperatura, umidade, corrente elétrica, TVOC e CO₂. Sendo assim, o produto desenvolvido culminou em um registro de *software*, registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade

Industrial (INPI), com o número **BR 51 2024 002146-9**, conforme o certificado de registro em Anexo. Também foi publicado um artigo² científico em revista internacional *Observatório de La Economía Latinoamericana* (OLEL), de notória relevância na área CAPES-QUALIS de ciências ambientais (França *et al.*, 2024).

Sendo uma ferramenta interessante para o uso em políticas institucionais de Qualidade Interna do Ar (QIA), Eficiência Energética de edifícios comerciais e institucionais, além de diretrizes para programas de Qualidade de Vida no Trabalho (QVT).

Para o aprimoramento do sistema de monitoramento desenvolvido neste estudo, sugere-se a implementação de um sistema de alerta em tempo real. Esse sistema notificaria os usuários imediatamente caso algum dos parâmetros monitorados, como temperatura, umidade, níveis de TVOC ou CO₂, ultrapassassem valores pré-determinados. Esse alerta rápido poderia ser enviado via SMS, e-mail ou outro meio de comunicação direta, permitindo uma resposta imediata a eventos adversos, como falhas no sistema de climatização, condições inadequadas de qualidade do ar ou problemas de eficiência energética. Tal funcionalidade não apenas contribuiria para um ambiente mais seguro, mas também facilitaria a tomada de decisões rápidas em situações de risco para a saúde ou aumento no consumo energético.

Além do enfoque técnico, futuras pesquisas podem incorporar uma abordagem prática e qualitativa, por meio da aplicação de questionários e entrevistas semiestruturadas. Essa metodologia permitirá captar as percepções e opiniões dos usuários que frequentam os ambientes monitorados, oferecendo um entendimento mais profundo sobre o uso do equipamento e suas implicações no conforto e bem-estar. Esses questionários serão fundamentais para avaliar a aceitação do sistema, identificar possíveis melhorias e correlacionar as percepções dos usuários com os dados objetivos coletados pelos sensores. A coleta de *insights* diretamente dos usuários enriquecerá a pesquisa, proporcionando um panorama abrangente sobre as condições ambientais e a eficácia do sistema proposto, contribuindo para futuras inovações e ajustes no protótipo.

Dessa forma, essas sugestões visam a não apenas o aprimoramento técnico do sistema, mas também a ampliação do impacto prático da pesquisa, conectando as necessidades e percepções dos usuários com o desenvolvimento tecnológico.

² Revista OLEL; artigo “Desenvolvimento e implementação de um protótipo de Sistema de Monitoramento Climático para ambientes internos: concepção e especificações”: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-120>

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, IEA. (s.d.). **Resfriamento de Espaço**. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/space-cooling>. Acesso em: 1 set. 2024.
- AGOSTINHO, Vinicius Prates *et al.* (2023). Subsídios para Utilização da Energia Geotérmica Superficial na Climatização do Ambiente Construído em ouro Verde—SP: Monitoramento da Temperatura do Subsolo Local. **Rev. Caribeña Cienc. Soc**, v. 12, p. 607-626, 2023.
- ALEXANDRE, Mário Jesiel de Oliveira. (2003). **A construção do trabalho científico: um guia para projetos, pesquisas e relatórios científicos**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2003.
- ALMEIDA, Mário de Souza. (2006). **Elaboração de projeto**, TCC, dissertação e tese: uma abordagem simples, prática e objetiva. 2. ed. [4. Reimpr.]. São Paulo: Atlas, 2019.
- BAKKER, E.; QIN, Y. Electrochemical sensors. *Analytical Chemistry*, v. 78, n. 12, p. 3965-3983, 2006.
- AWSLI. (s.d.). **Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino**. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/Datasheet-MicroSD-Module.pdf>. Acesso em: 1 out. 2024.
- BORGIA, E. *The internet of things vision: Key features, applications and open issues*. Computer Communications, 2014.
- BRAGA, Alfesio; PEREIRA, Luiz Alberto Amador; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana**. Campinas: UNICAMP, 2002. v. 18. Trabalho apresentado no evento de sustentabilidade na geração e uso de energia.
- BRAGA, João Victor Batista. (2022) **Eficiência energética do bloco de aulas I Campus UFERSA Caraúbas**: análise dos requisitos para obtenção do selo Procel Edifica.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília, DF, 1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 29 fev. 2024.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia, MME. (2023). **Quem é Quem da Eficiência Energética no Brasil**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/quem-e-quem#:~:text=Bastante%20j%C3%A1%20se%20fez%20pela,red%C3%A7%C3%A3o%20de%20perdas%20e%20desperd%C3%ADcios>. Acesso em: 5 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, MMA. **Poluentes Atmosféricos**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>. Acesso em: 26 fev. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade de ar. Brasília Brasil), 2018.

BRIDGMAN, H. Global air pollution. London: Bellhaven Press; United Kingdom, 1990.

BRUGGE, D.; LANE, K. J. *Fine particle air pollution is a public health emergency hiding in plain sight*. *The Conversation*, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3aUGxJZ>. Acesso em: mar. 2019.

CARNIELLO, Mônica Franchi; RODRIGUES, Marilsa de Sá; SANTOS, Rodrigo Miguel dos. Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira. Scientia: **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 6, n. 1, p. 13-33, 2021.

CARVALHO, Francisco Manoel Portela Moura Alves de et al. **Climatização Eficaz em Data Centers: Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Controle e Monitoramento**. **Revista de Sistemas e Computação-RSC**, v. 14, n. 1, 2024.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Padrões de Qualidade do Ar**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/22-Padr?es-e-?ndices>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2024.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Padrões e Índices**. São Paulo; 2010. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_indice_padroes.asp. Acesso em: 13 de fevereiro de 2024.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2008**. São Paulo-SP; 2009. 340 p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Variáveis de qualidade das águas**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/34-Vari%C3%A1veis-deQualidade-das-%C3%81guas>. Acesso em: 5 de mar. 2024.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Qualidade do ar: poluentes**. São Paulo (Brasil), 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

CHAVES, André Luiz de Oliveira *et al*. Sustentabilidade na arquitetura e o estudo dos compostos orgânicos voláteis emitidos por pisos vinílicos em residências. **Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo** (On-line), n. 20, p. 14-29, 2014.

Circuits4you (s.d.). **De zero a herói: ESP8266**. Disponível em: <https://circuits4you.com/>. Acesso em: 1 out. 2024.

CONFORLAB. (2023). **Qualidade do Ar Interior: a importância de contar com ambientes de trabalho saudáveis**. Disponível em: <https://conforlab.com.br/qualidade-do-ar-interior-a-importancia-de-contar-com-ambientes-de-trabalho-saudaveis/#:~:text=A%20qualidade%20do%20ar%20%C3%A9,a%20polui%C3%A7%C3%A3o%20do%20ar%20externo>. Acesso em: 10 jun. 2023.

DERISIO, José Carlos. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2000.

DESCOVI, Eduardo Dal Ponte *et al.* Controle e Monitoramento Remoto da Climatização para Salas de Telecomunicações. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 8, p. 10478-10505, 2023.

DUL, Jan; WEERDMEEESTER, Bernard. (2012). **Ergonomia Prática**. São Paulo: Editora Blucher. 3ª Edição. 163 p.

FAKHOURY, Nicolas Alexandre. **Estudo Da Qualidade Do Ar Interior Em Ambientes Educacionais**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FAKHOURY, Nicolas Alexandre. **Estudo da Qualidade do Ar Interior em Ambientes Educacionais**. 2017a. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FERNANDES, Francisco das Chagas de Mariz. **Referências metodológicas para iniciantes em investigação qualitativa**: um estudo de caso. Natal: FCMF Editor, 2017.

FRANÇA, Ricardo Luiz Vieira de; TOLEDO, André Luiz Lopes; DE LIMA, Gabriel Constantino. Desenvolvimento e implementação de um protótipo de Sistema de Monitoramento Climático para ambientes internos: concepção e especificações. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 6, p. e5227-e5227, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-120>. Acesso em: 30 out. 2024.

EOBRASIL. (2002). **Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil**. Brasília, DF: IBAMA, 2002. p. 200- 218.

GRUPO DE TRABALHO DA SOCIEDADE CIVIL, GTA. (s.d.). **Objetivo 3**: assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todas e todos, em todas as idades. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/ods/ods3/>. Acesso em: 6 jul. 2023.

GRUPO DE TRABALHO DA SOCIEDADE CIVIL, GTA. (s.d.). **Objetivo 7**: assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/ods/ods7/>. Acesso em: 6 jul. 2023.

GRUPO DE TRABALHO DA SOCIEDADE CIVIL, GTA. (s.d.). **Objetivo 12**: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/ods/ods12/>. Acesso em: 6 jul. 2023.

HACKSTER.IO. (s.d.). **Py-SIM800L-USSD**. Disponível em: <https://www.hackster.io/mortadhadahmani/py-sim800l-ussd-167cc8>. Acesso em: 1 out. 2024.

HOW2ELECTRONICS. (s.d.). **Sensor CCS811**. Disponível em: <https://how2electronics.com/wp-content/uploads/2021/01/CCS811-1.jpg>. Acesso em: 25 set. 2023.

INNOVATORS GURU. (s.d.). **PZEM-004T V3**. Disponível em: <https://innovatorsguru.com/pzem-004t-v3/>. Acesso em: 20 set. 2023.

INSTITUTO ESCOLHAS. (2020). **Caminhos para a eficiência energética do ar-condicionado no Brasil**. Disponível em: https://www.escolhas.org/wp-content/uploads/2020/09/Estudo_Caminhos-para-eficiencia-do-arcondicionado-no-Brasil_RELATORIO.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.

KAGERMANN, H. *et al.* **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group**. Forschungsunion, 2013.

LACERDA, A.; LEROUX, T.; MORATA, T. *Ototoxic effects of carbon monoxide exposure: a review*. **Pró-Fono Revista de Atualização Científica**, v. 17, n. 3, p. 403-412, 2005.

MACHADO, Rogério Aparecido. **Avaliação de compostos orgânicos voláteis em ambientes interiores climatizados**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARANGONI, Filipe et al. Comparativo econômico entre condicionadores de ar com tecnologias convencional e inverter. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, v. 35, 2015.

MORAIS, Jullyanno Custodio *et al.* **Automação do Sistema de Climatização do IFG**. Câmpus Uruaçu. 2022.

MORAES, Rodrigo; LIBRELOTTO, Lisiane; AGUIAR, Andressa. (2010). **Procel Edifica**. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/245725/Procel%20Edifica_Rodrigo.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 set. 2023.

NASCIMENTO, Rafael Jullian Oliveira do. **Proposta de um sistema computacional baseado em redes de sensores sem fio para monitoramento de um sistema de climatização aplicado a indústria têxtil**. 2013. Tese de Doutorado.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 19 mai. 2023. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2023/05/oms-alerta-sobre-poluicao-atmosferica-99-da-populacao-mundial-respira-ar-insalubre>. Acesso em: 20 jun. 2023.

NEMERY, B. *Exercise and air quality: 10 top tips*. *Breathe (Sheff)*, v. 11, n. 3, p. 239-242, 2015.

NETO, José A. M. *et al.* Aplicação do selo PROCEL EDIFICA: estudo de caso realizado em uma instituição de ensino superior em Mossoró/RN. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 3, n. 2, p. 62-69, 2021.

OPAS, Organização Pan-Americana da Saúde. (2022). **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre**. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>. Acesso em 5 jul. 2023.

PANTOJA, Lydia Dayanne Maia; NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do; NUNES, Ana Bárbara de Araújo. **Investigação de compostos orgânicos voláteis fúngicos na qualidade do ar de espaços internos de uma biblioteca pública.** 2015.

PATIÑO GUÍO, Lyda Milena. **Compostos orgânicos voláteis em tintas imobiliárias: caracterização e efeitos sobre a qualidade do ar em ambientes internos construídos.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PRANA AIR. (2023). **Papel da Qualidade do Ar Interior na Saúde e Segurança Ocupacional.** Disponível em: <https://www.pranaair.com/pt-pt/blog/iaq-in-occupational-health-and-safety/>. Acesso em: 2 jul. 2023.

ROCHA, Felipe *et al.* **Um sistema de gerenciamento e automação de climatização para eficiência energética.** In: Anais do XLVI Seminário Integrado de Software e Hardware. SBC, 2019. p. 81-92.

ROSEIRO, Maria Nazareth Vianna. **Poluentes atmosféricos: algumas consequências respiratórias na saúde humana.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SAÚDE COLETIVA, 7., 2003, Brasília, DF. Anais. Brasília, DF: UnB, 2003. 12 p.

SANTOS, Michelle Ludmila Guedes dos *et al.* **Qualidade do ar interno da biblioteca de uma instituição de ensino federal.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 12, n. 1, 2020.

SANTOS, Rodrigo Miguel dos; DE SÁ RODRIGUES, Marilsa; CARNIELLO, Monica Franchi. **Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira.** *Scientia: Revista Científica Multidisciplinar*, v. 6, n. 1, p. 13-33, 2021.

SCHWAB, Klaus. *The fourth industrial revolution.* Currency, 2017.

SILVA, Francisco Robson Vieira da. **Aplicabilidade do Selo Procel Edifica em um Projeto Residencial Unifamiliar.** 2021.

SILVA, Saulo Vieira de Oliveira *et al.* **Ventilação natural e qualidade do ar em salas de aula: revisão sistemática da literatura.** *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 13, p. e022021-e022021, 2022.

SINHARAY, R. (2018). *Respiratory and cardiovascular responses to walking down a traffic-polluted road compared with walking in a traffic-free area in participants aged 60 years and older with chronic lung or heart disease and age-matched healthy controls: a randomised, crossover study.* *The Lancet*, v. 391, n. 10118, p. 339-349, 2018.

SOUZA, Andre Luis Lermen de. **Implementação de um sistema de monitoramento energético em um sistema de climatização industrial.** 2021. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal).

SOUZA, Maria Clara R. de et al. **A Influência dos Compostos Orgânicos Voláteis nas Mudanças Climáticas: uma breve revisão.** 2023.

THE ENGINEERING PROJECTS. (2019). **Introdução ao DHT11**. Disponível em: <https://www.theengineeringprojects.com/2019/03/introduction-to-dht11.html>. Acesso em: 20 set. 2024.

VENTURELLI, Márcio. (2021) **Indústria 4.0**: uma visão da automação industrial. Disponível em: <http://www.automacaoindustrial.info/industria-4-0-uma-visao-da-automacao-industrial/>. Acesso em: 21 de set. 2024.

VIANA, Marly Vieira. **Qualidade do Ar e suas Implicações na Saúde da Comunidade de Vila Maranhão, SÃO LUÍS (MA)**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saúde e Ambiente, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2015.

VIEIRA, Hellen Gonçalves; DE OLIVEIRA SOUZA, Murilo; CANELA, Maria Cristina. **Identificação dos Compostos Orgânicos Voláteis presentes em ambientes internos**. Conflict, v. 11, 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2014). *Ambient (outdoor) air quality and health: fact sheet* n° 313. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Acesso em: 6 jan. 2015.

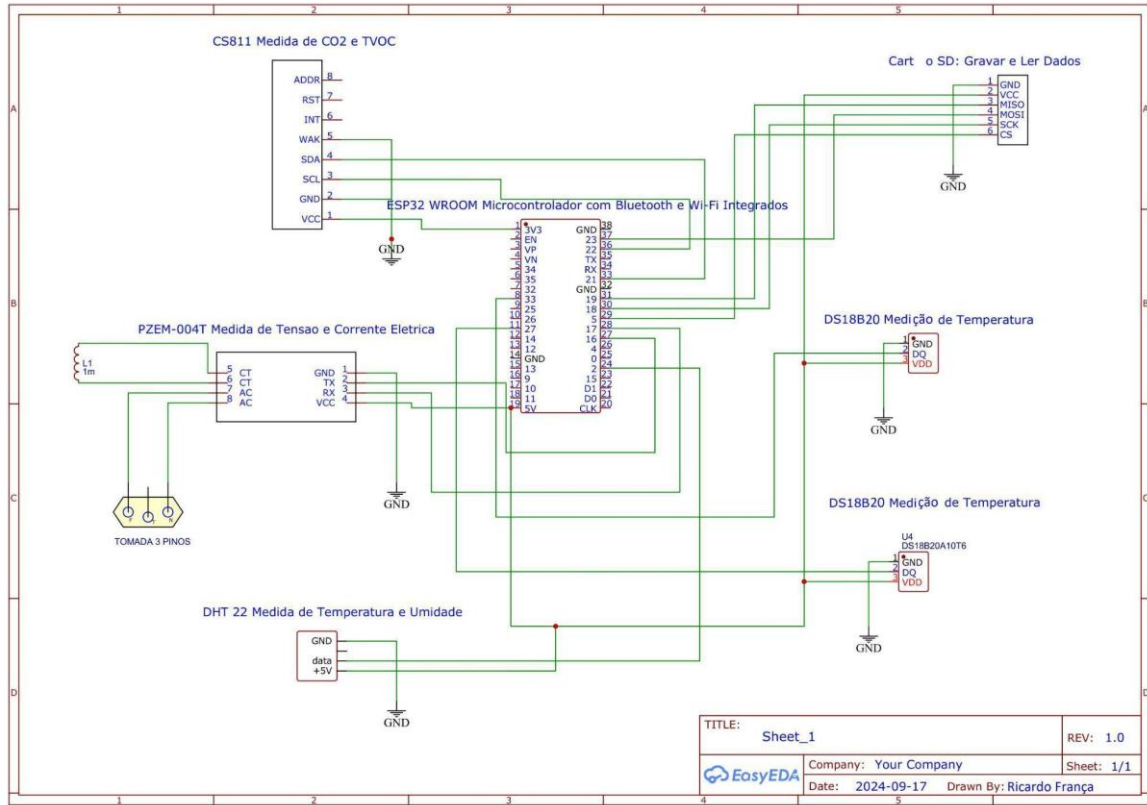
WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2011). *Health aspects related to indoor air quality: EURO Reports and Studies*, 21, 1979.

YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

14CORE. (s.d.). *Wiring The DS18B20 1-Wire Temperature Sensor*. Disponível em: https://www.14core.com/wiring-the-ds18b20-1-wire-temperature-sensor/#google_vignette. Acesso em: 25 set. 2023.

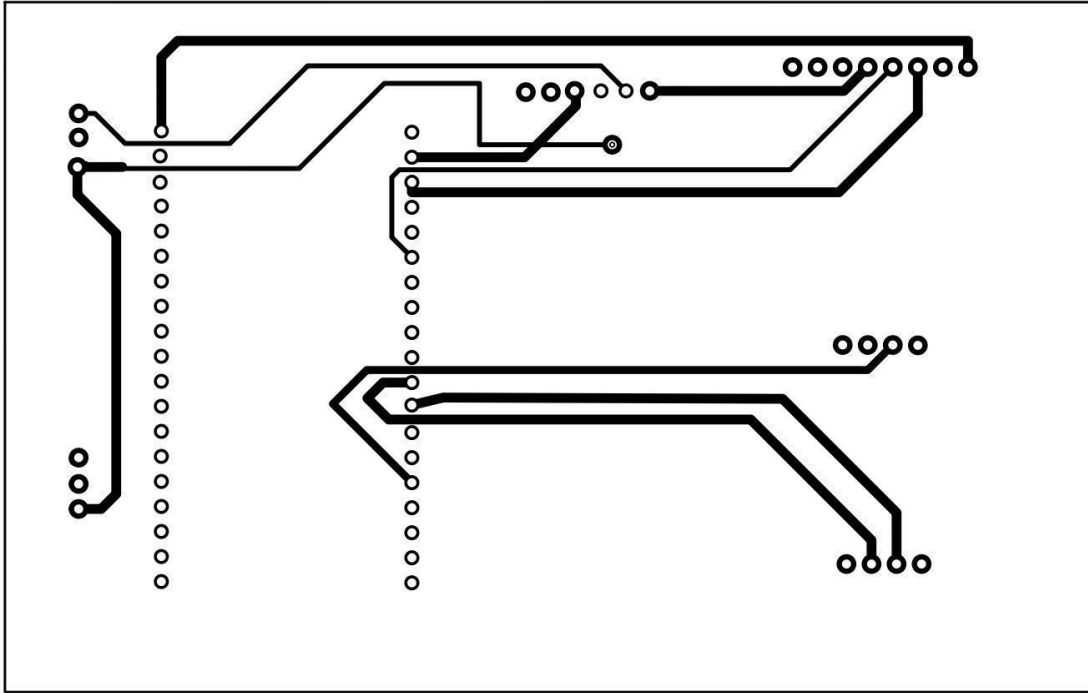
ANEXOS

ANEXO A – Diagrama esquemático do protótipo



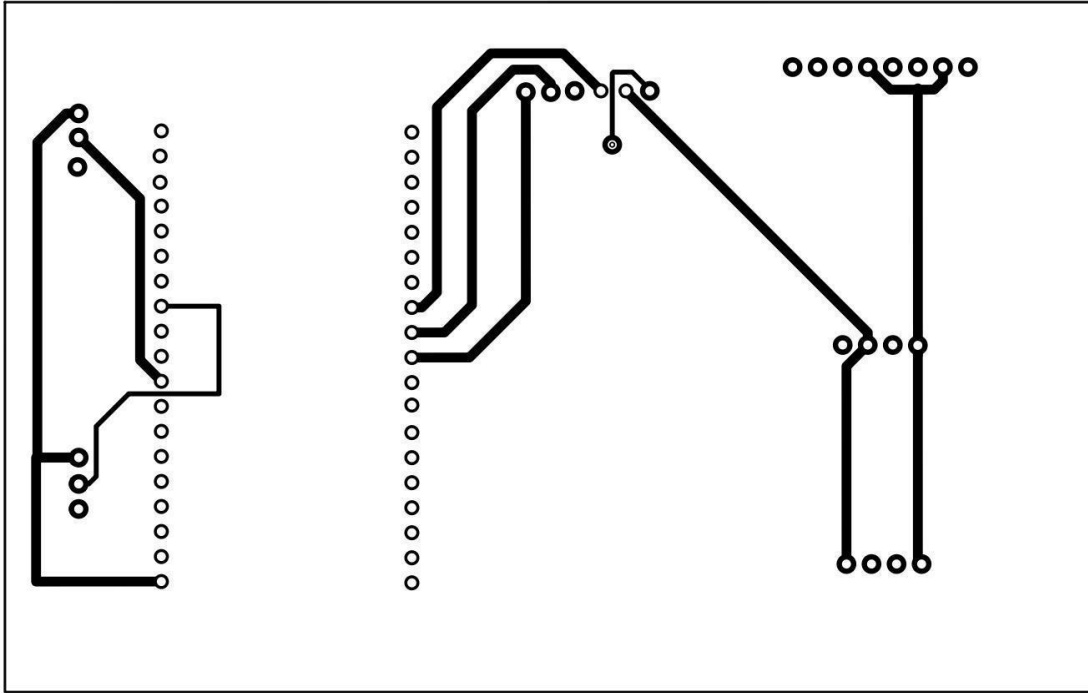
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO B – Projeto da placa de circuito impresso dupla face (vista superior)



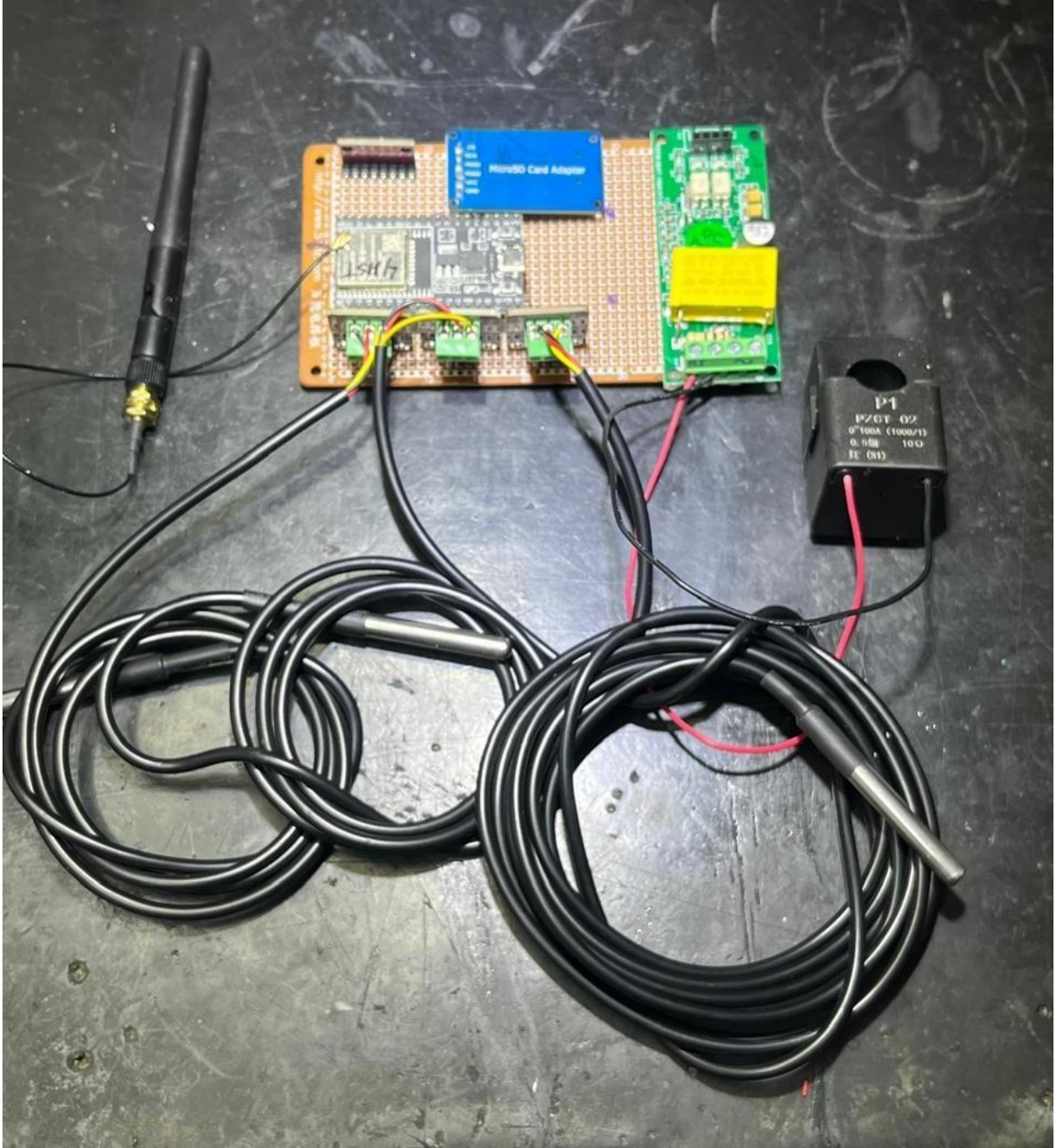
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO C – Projeto da placa de circuito impresso dupla face (vista inferior)



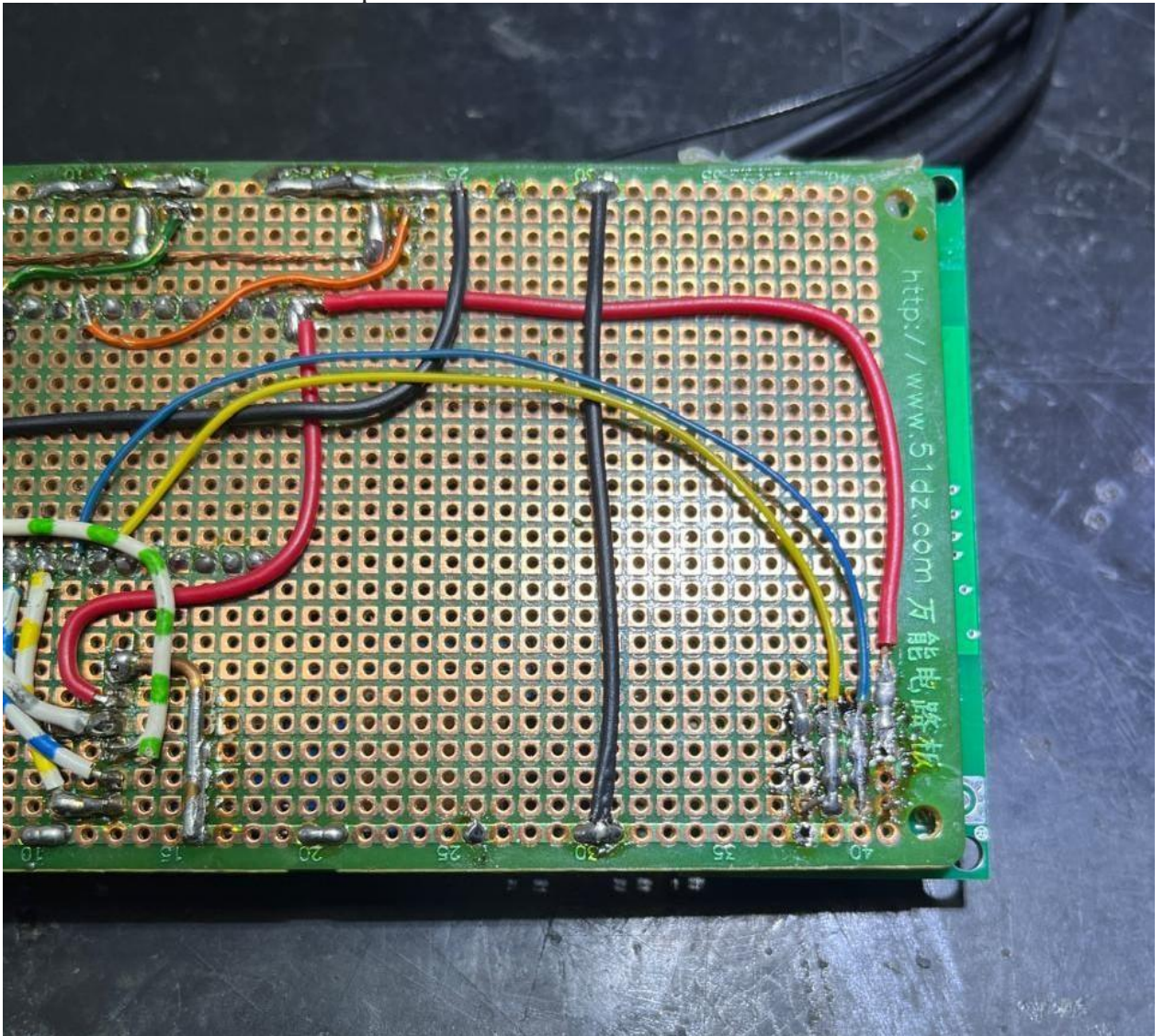
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO D – Vista superior da placa do protótipo soldada



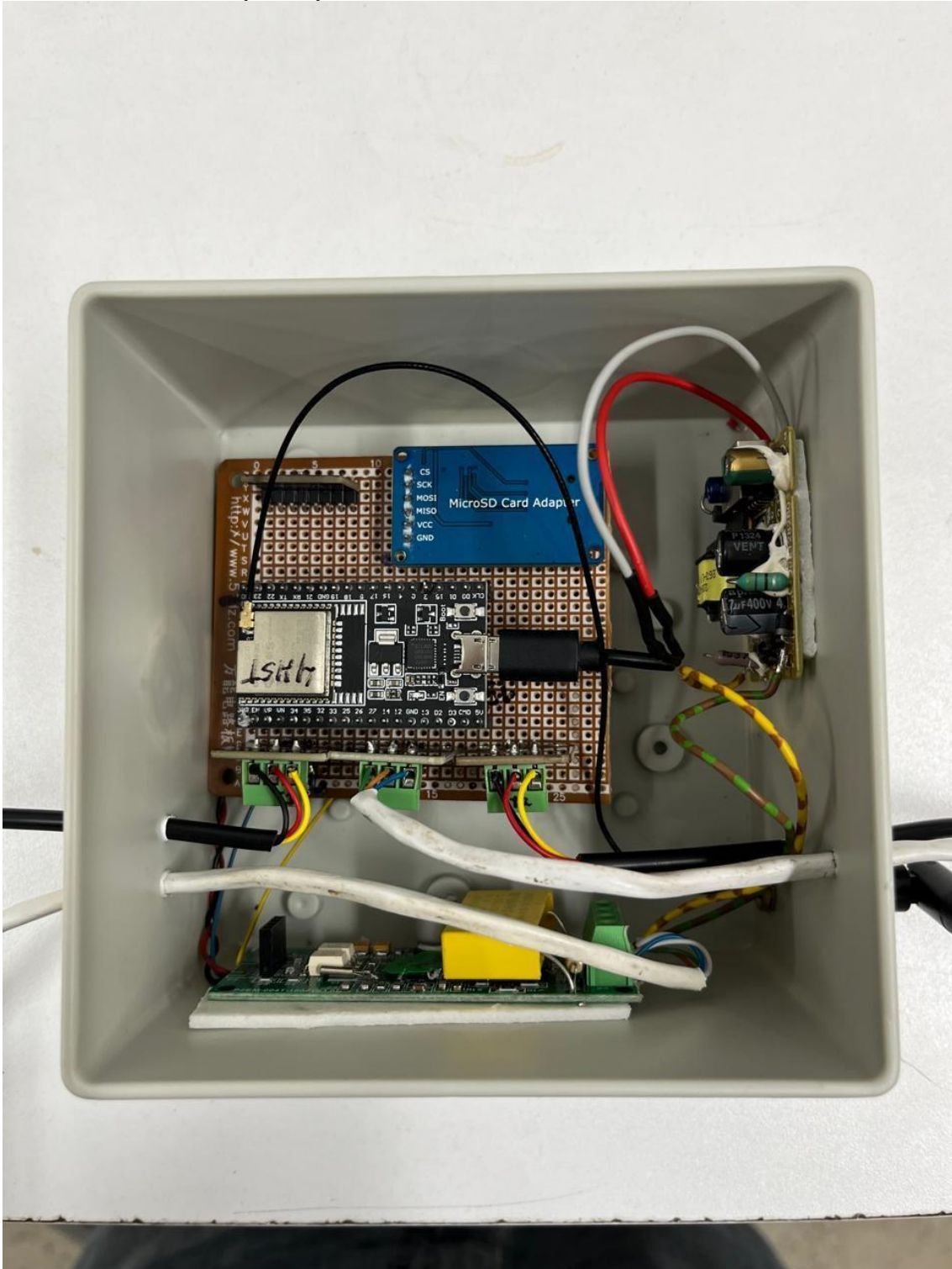
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO E – Vista inferior da placa soldada



Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO F – Vista do protótipo na caixa de armazenamento do sistema



Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO G – Vista da instalação da sonda não invasiva no circuito de alimentação do climatizador



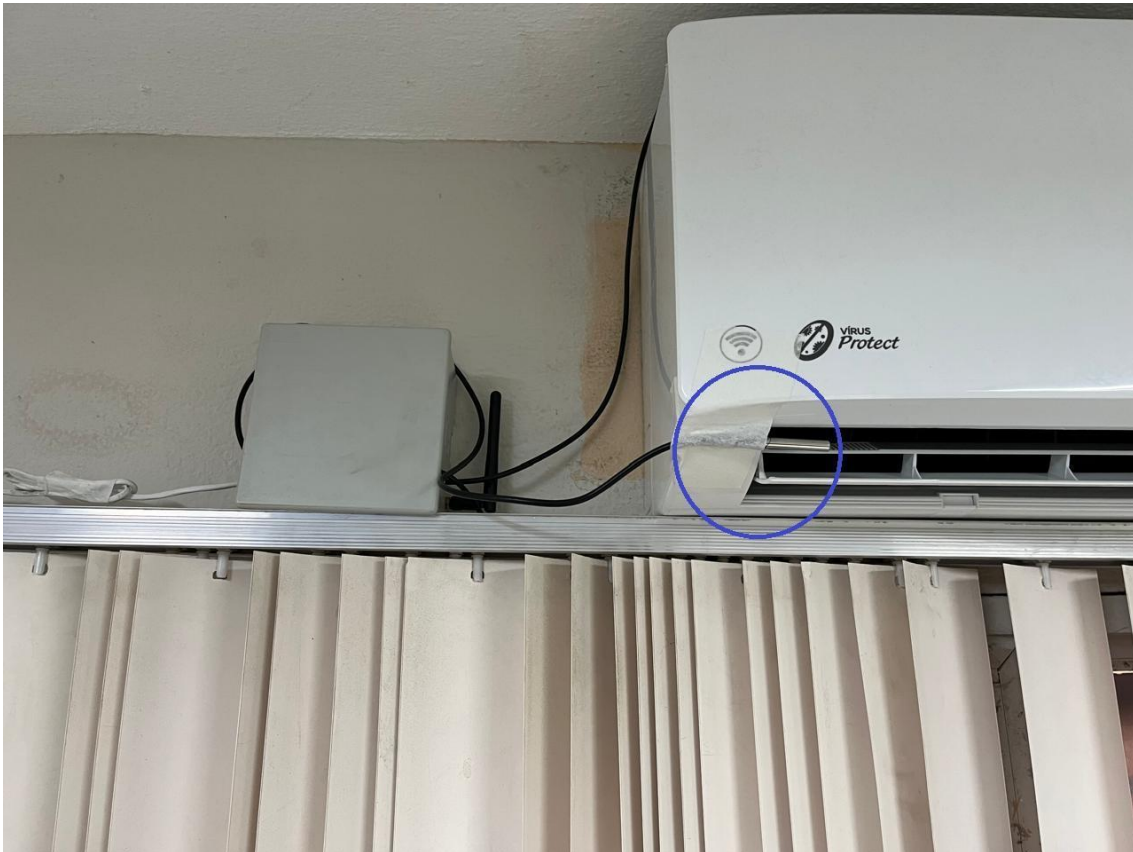
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO H – Aferição da corrente da sonda não invasiva, em torno de 4,7 A



Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO I – Equipamento instalado e em medição, onde pode-se ver a sonda de temperatura de saída do ar



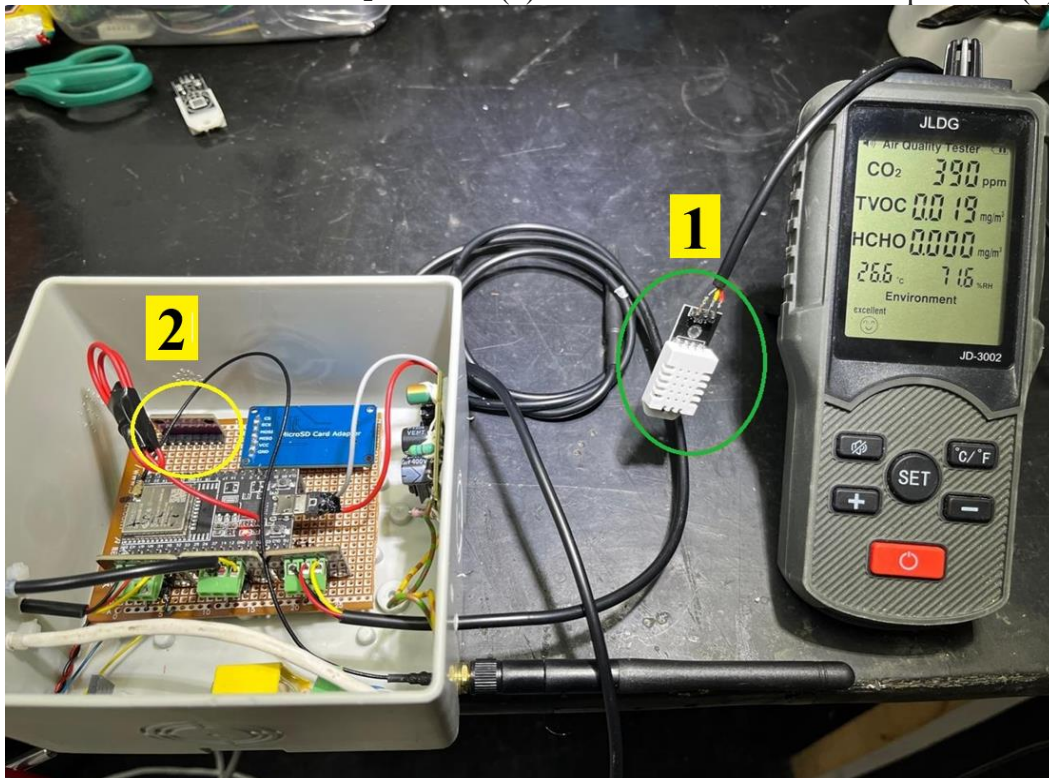
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO J – Vista superior do climatizador do anexo 9, onde pode-se ver a sonda de temperatura de entrada do ar



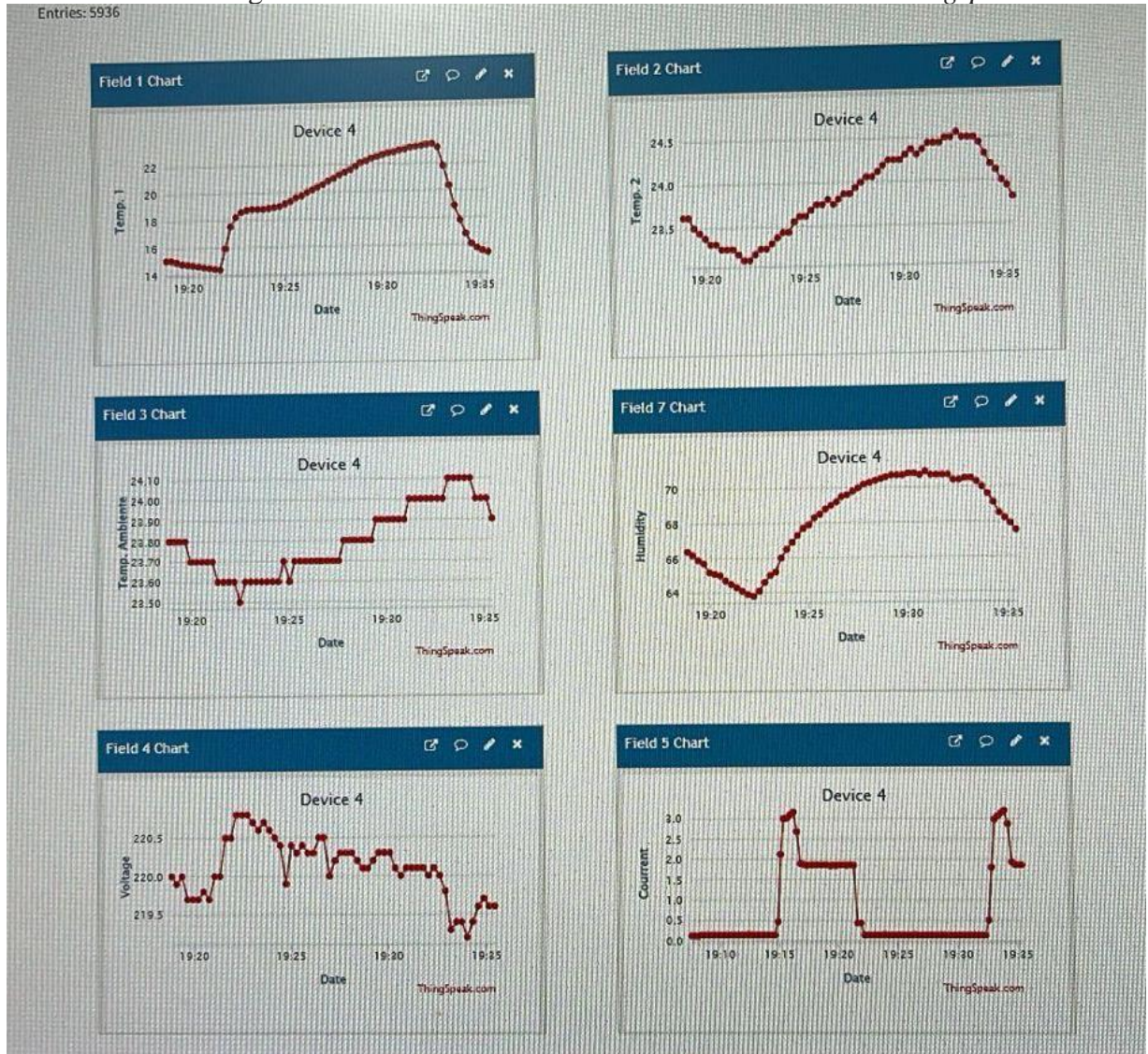
Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO L – Vista do protótipo no momento da aferição pelo equipamento comercial certificado do sensor de CO₂ e TVOC (2) e o sensor de umidade e temperatura (1)

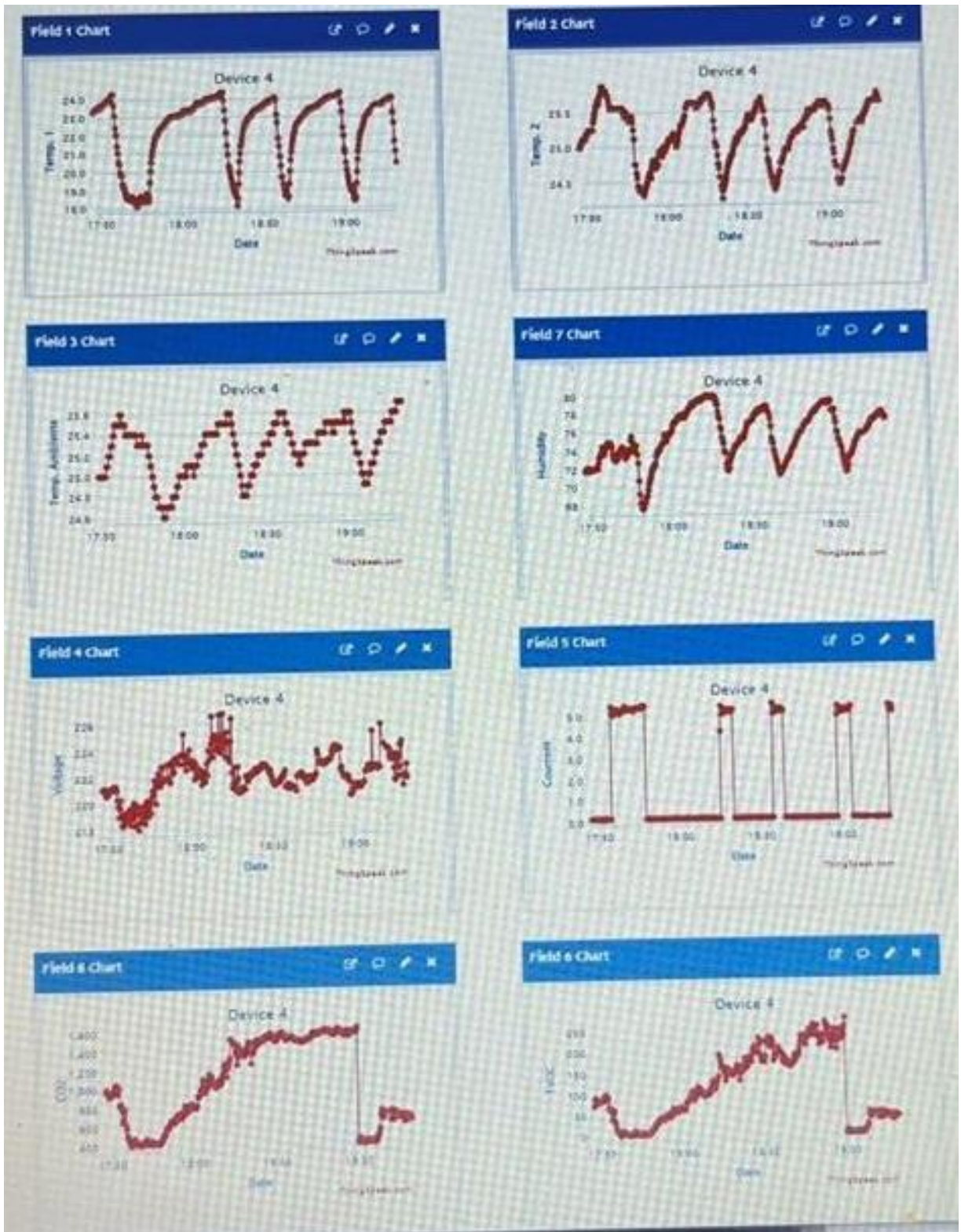


Fonte: autoria própria (2024).

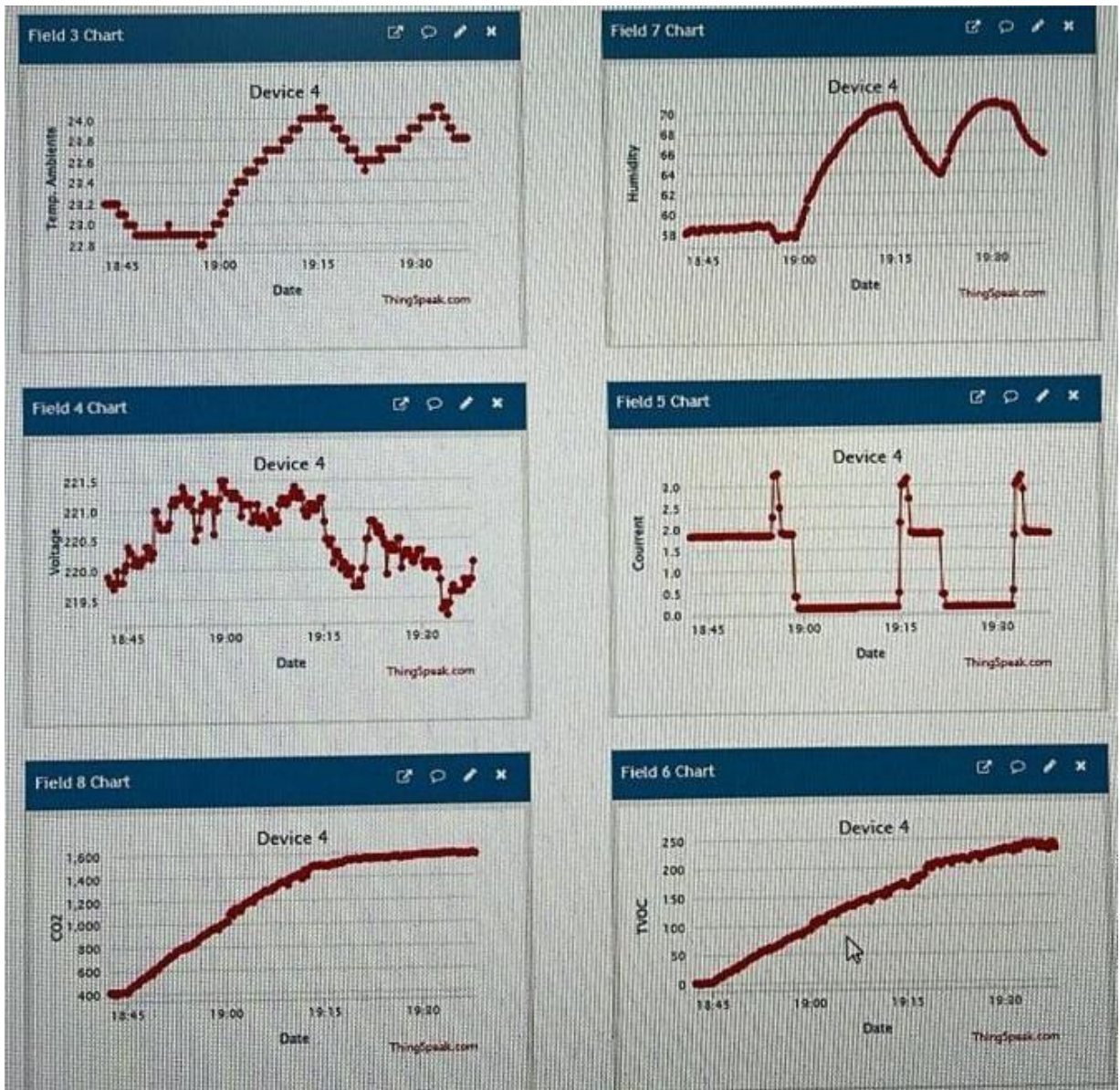
ANEXO M – Telas gráficas do sistema de armazenamento em nuvem do *Thingspeak*



Fonte: autoria própria (2024).



Fonte: autoria própria (2024).



Fonte: autoria própria (2024).

ANEXO N – Certificado de Registro de Programa de Computador





REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
 MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
 DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512024002146-9**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 21/06/2024, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: SCRAG 2024 - Sistema de captura e armazenamento de parâmetros de eficiência energética e qualidade do ar em ambientes climatizados

Data de publicação: 21/06/2024

Data de criação: 13/03/2024

Titular(es): JACQUES COUSTEAU DA SILVA BORGES; RICARDO LUIZ VIEIRA DE FRANÇA; ANDRE LUIZ LOPES TOLEDO; GABRIEL CONSTANTINO DE LIMA

Autor(es): JACQUES COUSTEAU DA SILVA BORGES; RICARDO LUIZ VIEIRA DE FRANÇA; ANDRE LUIZ LOPES TOLEDO; GABRIEL CONSTANTINO DE LIMA

Linguagem: C++

Campo de aplicação: EN-01; MA-04; TB-04

Tipo de programa: CD-03; IT-02

Algoritmo hash: SHA-512

Resumo digital hash:
 9a5afc4d5c98999b98ad6f0ba33ebd8517be58284e744efb61d0f1855efc3aa7955f8b129c6a73ffdec57eadf05995a912b927fddcd389a5783c8ea519cb9da7

Expedido em: 02/07/2024

Aprovado por:
 Carlos Alexandre Fernandes Silva
 Chefe da DIPTO

Fonte: Instituto Nacional da Propriedade Rural (2024).