

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO - 2024.2**

**JOSÉ HENRIQUE MOTA RIBEIRO**  
**NATANAEL DA SILVA MEDEIROS**  
**JOÃO VITOR DIAS PAULO**  
**ISAUQUE FELIPE CARNEIRO DOS SANTOS**  
**BRUNO DOURADO MIRANDA BOTELHO**

**CIDADES E CASAS DO FUTURO**

Controle Inteligente de Temperatura Urbana e Residencial

**CAMPINA GRANDE, PB**

\*Devido a longa implementação, o código está disposto no Google Drive: [Pasta - GermesDoRu.cpp](#) e no GitHub: [GitHub - GermesDoRu.cpp](#).

## RESUMO

O presente projeto, intitulado “Cidades e Casas do Futuro – Controle Inteligente de Temperatura Urbana e Residencial”, propõe o desenvolvimento de um sistema integrado para monitoramento e controle térmico, visando mitigar os efeitos das ilhas de calor e melhorar o conforto ambiental em áreas urbanas e residenciais. A solução é composta por duas plataformas principais: o Sistema Integrado de Resfriamento Urbano Inteligente (SIRUI) e a Rede Integrada de Sensores Residenciais e Urbanos (RISRU), que utilizam tecnologias de Internet das Coisas (IoT) para coletar dados ambientais em tempo real. Com base nesses dados, o sistema aciona dispositivos automatizados, como telhados verdes, janelas inteligentes e sistemas de resfriamento por pastilha Peltier, promovendo intervenções dinâmicas que reduzem a temperatura ambiente e otimizam o consumo de energia. O protótipo desenvolvido, representado por uma maquete de cidade inteligente, integra fontes de energia renovável e soluções de automação, demonstrando a viabilidade da aplicação dessas tecnologias em cenários reais, mesmo em contextos com recursos limitados. Os resultados obtidos indicam não só a melhoria do conforto térmico e da eficiência energética, mas também o potencial de replicação e escalabilidade da metodologia proposta, contribuindo para a criação de ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes.

**Palavras-chave:** **Palavras-chave:** Controle Inteligente de Temperatura, Cidades Inteligentes, Sustentabilidade Urbana.

## ABSTRACT

This project, titled "Cities and Homes of the Future – Intelligent Control of Urban and Residential Temperature," presents an integrated system for thermal monitoring and control aimed at mitigating urban heat islands and enhancing environmental comfort in both urban and residential settings. The solution comprises two primary platforms: the Urban Intelligent Cooling Integrated System (SIRUI) and the Residential and Urban Integrated Sensor Network (RISRU), which leverage Internet of Things (IoT) technologies to collect real-time environmental data. Based on the data acquired, the system activates automated devices, such as green roofs, intelligent windows, and Peltier-based cooling systems, to implement dynamic interventions that reduce ambient temperature and optimize energy consumption. A scale model representing a smart city was developed as a prototype, integrating renewable energy sources and automation solutions to demonstrate the feasibility of these technologies in real-world scenarios, even in resource-constrained contexts. The obtained results indicate not only improvements in thermal comfort and energy efficiency but also the potential for replicability and scalability of the proposed methodology, contributing to the development of more sustainable and resilient urban environments.

**Keywords:** Smart Temperature Control, Smart Cities, Urban Sustainability.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
3	METODOLOGIA .....	10
3.1	Estrutura de caso geral .....	10
3.1.1	Ações iniciais em âmbito urbano .....	11
3.1.2	Sistema Integrado de Resfriamento Urbano Inteligente .....	12
3.1.3	Ações iniciais em âmbito residencial .....	16
3.1.4	Rede Integrada de Sensores Residencial e Urbano .....	16
3.2	Estrutura do protótipo .....	18
3.2.1	Atuadores e soluções demonstrativas implantadas .....	19
3.2.2	Controlador .....	22
3.2.3	Rede de Sensoriamento .....	23
4	RESULTADOS .....	23
4.1	Resultados Esperados com a Aplicação da Metodologia Geral .....	24
4.2	Detalhamento do Protótipo .....	27
4.3	Diagramas UML .....	28
4.4	Lógica e Algoritmo utilizado .....	29
5	CONCLUSÃO .....	30
5.1	Síntese dos Resultados .....	30
5.2	Limitações do projeto .....	31
5.3	Sugestões para trabalhos futuros .....	31
6	Agradecimentos .....	32
	REFERÊNCIAS .....	33

\*Devido a longa implementação, o código está disposto no Google Drive: [Pasta - GermesDoRu.cpp](#) e no GitHub: [GitHub - GermesDoRu.cpp](#).

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das cidades, combinado com a impermeabilização do solo, tem gerado o aumento das temperaturas urbanas, resultando no fenômeno das ilhas de calor. Este fenômeno afeta diretamente a qualidade de vida nas áreas urbanas, criando um ambiente desconfortável e impactando a saúde pública. Com a substituição de superfícies naturais por materiais de alta capacidade térmica e a redução da vegetação, o calor acumulado nas áreas urbanas é amplificado, tornando-se um problema de difícil gestão. Segundo Grimmond (2007), a substituição de superfícies naturais por materiais de alta capacidade térmica, como concreto e asfalto, e a intensa emissão de calor antropogênico, como o calor gerado por veículos e sistemas de climatização, aumentam consideravelmente as temperaturas nos centros urbanos quando comparados às áreas periurbanas e rurais. Além disso, estima-se que as cidades sejam responsáveis por mais de 90% das emissões de carbono, principalmente oriundas do uso de combustíveis fósseis para transporte, indústrias e sistemas de climatização. A solução para essa questão passa pela busca por alternativas sustentáveis que visem o controle térmico urbano de forma eficiente e econômica.

Ademais, o controle e o monitoramento inteligente das situações termo-climáticas corrobora para a redução da artificialização do processo de climatização. Segundo Kruger e Drach (2017), em relação ao controle térmico urbano, a adoção de medidas bio sustentáveis, como a integração de vegetação e materiais naturais, têm mostrado uma alternativa mais eficiente e sustentável ao uso de sistemas de climatização artificial. Essas soluções, como telhados verdes e o uso de materiais refletivos, permitem a redução da temperatura ambiente de forma natural, por meio de processos como a evapotranspiração e a reflexão da radiação solar, em vez de depender de dispositivos que aumentam o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa. A vegetação urbana contribui significativamente para a melhoria da qualidade do ar e da sensação térmica, criando zonas de conforto em espaços abertos e ao mesmo tempo mitigando o fenômeno das ilhas de calor urbanas.

Este projeto visa desenvolver um sistema integrado de monitoramento e controle térmico para mitigar os impactos das ilhas de calor em ambientes urbanos e residenciais. Através do uso de sensores *IoT* (Internet das Coisas), o projeto coleta

dados ambientais em tempo real e ativa soluções automáticas de resfriamento, como irrigação controlada, nebulização e aplicação de materiais refletivos, com o objetivo de otimizar o conforto térmico e a eficiência energética nas cidades. As duas plataformas principais que compõem este sistema são:

- SIRUI (Sistema Integrado de Resfriamento Urbano Inteligente): Responsável pela monitorização e atuação sobre as condições térmicas no ambiente urbano, permitindo intervenções dinâmicas e automatizadas com base nos dados coletados.
- RISRU (Rede Integrada de Sensores Residenciais e Urbanos): Uma rede interligada de sensores instalados em residências, edifícios e pontos estratégicos, que alimenta o SIRUI com informações detalhadas sobre a temperatura ambiente e as condições climáticas locais.

Essa integração de plataformas visa proporcionar uma análise mais precisa e descentralizada do fenômeno das ilhas de calor, otimizando o uso de tecnologias para garantir um ambiente urbano mais confortável e sustentável.

O projeto propõe a implementação de soluções tecnológicas que integram sensores, automação e práticas ecológicas para mitigar os impactos térmicos nas cidades, promovendo maior eficiência energética, sustentabilidade e qualidade de vida para a população. As tecnologias de *IoT* e automação podem otimizar o consumo energético, reduzir a dependência de sistemas convencionais de climatização e criar ambientes urbanos e residenciais mais agradáveis.

Outrossim, segundo as Nações Unidas no Brasil (2022), as mudanças climáticas são transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima. Essas mudanças climáticas têm como consequência secas intensas, escassez de água, incêndios severos, aumento do nível do mar, inundações, derretimento do gelo polar, tempestades catastróficas e declínio da biodiversidade. Por isso, os sistemas RISRU e SIRUI se propõem a mitigar os efeitos relacionados às variações de temperatura no âmbito residencial e urbano, por meio do monitoramento dos parâmetros ligados à sensação térmica – umidade, temperatura e pressão. Com base nos parâmetros detectados por ele, o SIRUI, sistema de controle térmico, atuará a fim de manter uma temperatura estável nos âmbitos urbanos. O sistema RISRU também pode ser implementado e adaptado para outros projetos futuros, tanto em escalas maiores quanto residenciais.

Além da abordagem teórica e das soluções práticas, o projeto também prevê a construção de um protótipo de escala reduzida que servirá como uma demonstração do funcionamento do SIRUI e do RISRU em um ambiente controlado. Esse protótipo em escala reduzida demonstra o funcionamento dos sistemas SIRUI e RISRU em um ambiente controlado, utilizando um microcontrolador como Arduino Uno. O protótipo usa sensores para mapear variáveis térmicas e ambientais, como temperatura, umidade e qualidade do ar, e atuadores, como ventiladores e pastilhas Peltier, para controlar essas variáveis e manter, de forma simulada, o conforto térmico. Os sensores e atuadores serão conectados ao microcontrolador, que gerenciará as respostas por meio de técnicas como modulação de largura de pulso (*PWM*). Além disso, módulos de comunicação sem fio permitirão o monitoramento remoto. Esse protótipo fornecerá uma representação tangível das soluções propostas, possibilitando testes em um ambiente controlado antes de sua implementação em grande escala.

Portanto, o desenvolvimento do SIRUI e do RISRU propõe um novo modelo de controle térmico urbano e residencial, alinhado com os princípios de sustentabilidade, eficiência energética e uso inteligente da tecnologia. Ao integrar tecnologias de monitoramento em tempo real e soluções automatizadas de resfriamento, o projeto visa reduzir os impactos das ilhas de calor nas cidades, promovendo um ambiente mais equilibrado e habitável. Este modelo poderá servir como base para futuras políticas públicas e iniciativas privadas, contribuindo para a criação de cidades mais resilientes e preparadas para os desafios climáticos do futuro.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

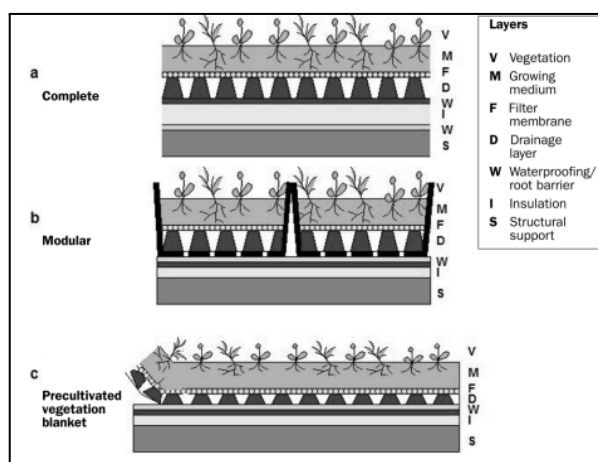
O desenvolvimento de cidades inteligentes tem se configurado como uma resposta multidimensional aos desafios contemporâneos da urbanização acelerada, demandando não apenas inovações tecnológicas, mas também uma integração profunda de estratégias de sustentabilidade, governança participativa e políticas públicas efetivas. A essência desse conceito reside na utilização de tecnologias de comunicação e de sensores distribuídos para a otimização da gestão de recursos urbanos, promovendo melhorias na eficiência dos serviços públicos e na qualidade de vida dos cidadãos. Conforme discutido por Murty et al. (2008), a implementação de plataformas como a CitySense evidencia o potencial dos sistemas

interconectados para fornecer dados em tempo real, permitindo uma tomada de decisão mais informada e ágil em contextos de segurança e monitoramento ambiental.

No cerne dessa transformação está a Internet das Coisas (*IoT*), definida como uma rede de dispositivos interligados que coletam, trocam e processam dados continuamente, permitindo a comunicação máquina a máquina e a automação de processos complexos (YASAR; GILLIS, 2024). Essa tecnologia não só possibilita o monitoramento constante de variáveis ambientais – como temperatura, umidade e qualidade do ar –, mas também viabiliza a implementação de soluções automatizadas para o controle climático em ambientes urbanos e residenciais. A capacidade da IoT de integrar dados de diferentes fontes em um ecossistema digital robusto transforma a forma como as cidades gerenciam recursos, promovendo uma redução de custos operacionais e uma otimização do consumo energético, aspectos críticos para a sustentabilidade em um cenário de mudanças climáticas.

A discussão sobre sustentabilidade urbana se aprofunda ainda mais com a incorporação de infraestruturas verdes, como os telhados verdes. Segundo Oberndorfer et al. (2007), os telhados verdes são sistemas de cobertura vegetal que oferecem múltiplos benefícios ecológicos, tais como a regulação térmica, a retenção de água pluvial e a melhoria da qualidade do ar, além de contribuírem para o aumento da biodiversidade nas áreas urbanas. A integração desses sistemas aos projetos de cidades inteligentes não apenas combate o fenômeno das ilhas de calor, mas também reforça a ideia de que a tecnologia e a natureza podem convergir para criar ambientes urbanos mais resilientes e agradáveis.

**Figura I - Green Roof, telhados verdes.**



Fonte: (Jeremy Lundholm, 2007.).



A convergência entre a *IoT* e as infraestruturas verdes revela uma sinergia essencial para a construção de um modelo urbano sustentável e inteligente. Ao permitir a coleta e análise de dados ambientais em tempo real, a *IoT* torna possível o monitoramento contínuo das condições climáticas e ambientais, que, por sua vez, informam a atuação de sistemas automatizados de controle climático. Essa integração possibilita a implementação de medidas corretivas de forma rápida e eficiente, ajustando, por exemplo, a climatização de edifícios e a irrigação de áreas verdes de acordo com as condições detectadas, contribuindo para uma melhor gestão dos recursos naturais e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Além dos aspectos tecnológicos, a efetivação de cidades inteligentes demanda uma reestruturação das políticas públicas e uma participação ativa da sociedade. A governança participativa, que incorpora a comunidade no processo decisório, é fundamental para garantir que as inovações tecnológicas atendam às reais necessidades da população. Nesse sentido, a experiência de projetos-pilotos, como o demonstrado na plataforma CitySense, serve como um laboratório vivo para testar e refinar estratégias de monitoramento e automação, proporcionando subsídios para a formulação de políticas urbanas que sejam tanto eficazes quanto inclusivas. A articulação entre governo, iniciativa privada e a sociedade civil é, portanto, imprescindível para o sucesso de qualquer empreendimento voltado à transformação digital das cidades.

Em síntese, a integração de tecnologias emergentes, como a *IoT*, com práticas sustentáveis, exemplificadas pelos telhados verdes, estabelece um paradigma inovador para a gestão urbana. Essa abordagem não só potencializa a eficiência operacional e a qualidade dos serviços públicos, como também promove a sustentabilidade ambiental e o bem-estar social. Conforme destacado por Yasar e Gillis (2024), a evolução contínua das redes de dispositivos interconectados e a capacidade de processar grandes volumes de dados em tempo real são elementos essenciais para a construção de cidades inteligentes. Paralelamente, os achados de Oberndorfer et al. (2007) reforçam a importância de se adotar soluções que integrem natureza e tecnologia, demonstrando que o desenvolvimento urbano sustentável depende da conjugação de estratégias ecológicas e digitais. Dessa forma, a convergência entre essas dimensões teóricas e práticas não só impulsiona a

inovação tecnológica, mas também pavimenta o caminho para a criação de ambientes urbanos mais resilientes, inclusivos e ecologicamente equilibrados.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste projeto fundamenta-se em um modelo experimental e tecnológico, articulado em duas frentes principais – ações urbanas e ações residenciais – que visam à implementação eficiente e eficaz de medidas de resfriamento térmico. Essa abordagem integradora contempla desde a concepção e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle térmico, utilizando sensores *IoT* e algoritmos de automação, até a validação dos resultados por meio da implementação de protótipos e análises de impacto. O método experimental aqui proposto busca não apenas a inovação tecnológica, mas também a integração de estratégias de sustentabilidade, governança participativa e parcerias interinstitucionais, estabelecendo um ambiente propício para o desenvolvimento de soluções escaláveis e replicáveis em diferentes contextos urbanos e residenciais.

Além disso, a metodologia para a construção do protótipo é explicitada detalhadamente, envolvendo uma série de métodos e materiais, especificações técnicas, etapas de desenvolvimento e valores esperados. Inicialmente, define-se o escopo funcional do protótipo, que visa validar a integração dos sistemas de monitoramento e controle térmico, utilizando sensores *IoT* e algoritmos de automação para atuar tanto em ambientes urbanos quanto residenciais. A seguir, descrevem-se os principais componentes e etapas desse processo:

#### **3.1 Estrutura de caso geral**

A primeira etapa do processo metodológico consiste na análise aprofundada do ambiente de inserção, a qual é crucial para o planejamento e a definição das intervenções. Essa análise abrange fatores como topografia, grau de urbanização, índice de impermeabilização do solo, níveis socioeconômicos, presença de áreas verdes e padrões climáticos locais. Tais variáveis determinam as especificidades do ambiente, possibilitando a adaptação das medidas de resfriamento e o direcionamento dos esforços para regiões que apresentam maior vulnerabilidade térmica. A partir desse diagnóstico, o sistema é estruturado em duas áreas principais:

- **Ações Urbanas:** Voltadas para a mitigação do efeito das ilhas de calor em espaços públicos e vias urbanas, essas ações envolvem a implementação do

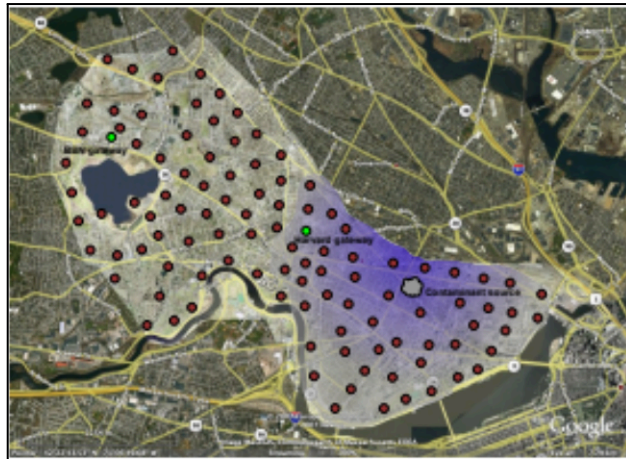
Sistema Integrado de Resfriamento Urbano Inteligente (SIRUI). Este sistema utiliza uma rede de sensores distribuídos estrategicamente e integra os dados coletados por meio da Rede Integrada de Sensores Residenciais e Urbanos (RISRU), permitindo o monitoramento contínuo das condições térmicas. Com base nessa análise, são acionadas medidas específicas, como irrigação automatizada de pavimentos, nebulização em áreas de alta retenção de calor e a aplicação de materiais refletivos, de forma a reduzir os picos térmicos e melhorar o conforto ambiental.

- **Ações Residenciais:** Direcionadas à climatização de ambientes internos e externos, as ações residenciais empregam a RISRU para monitorar parâmetros como temperatura, umidade e qualidade do ar. Este monitoramento possibilita o controle automatizado de sistemas de climatização – incluindo ventiladores, ar-condicionado e dispositivos de resfriamento – além da integração com soluções arquitetônicas sustentáveis, como telhados verdes e barreiras térmicas, garantindo assim uma resposta adaptativa e eficiente às variações ambientais.

### 3.1.1 Ações iniciais em âmbito urbano

A etapa inicial no âmbito urbano envolve o investimento em sensores de baixo custo e a coleta de dados climáticos para mapear áreas críticas de calor. Este diagnóstico preliminar é fundamental para identificar pontos de intervenção que potencializam o impacto das ações, permitindo uma alocação dinâmica e eficiente dos recursos. A partir desse mapeamento, são implementados projetos pilotos e experimentos, os quais testam, em áreas-teste – como determinados trechos de ruas ou bairros específicos – a eficácia de materiais reflexivos, sistemas de irrigação automatizada e outras tecnologias de resfriamento inteligente. Essa abordagem experimental permite a mensuração do Retorno Sobre Investimento (ROI) e a avaliação do risco financeiro e logístico, proporcionando subsídios para a expansão das intervenções em larga escala. Um exemplo de sensoriamento urbano é o do CitySense, exposto na Figura II, onde foram colocados nós na cidade de Cambridge, Massachusetts, e foram identificados as ilhas de calor (mancha roxa).

**Figura II - CitySense, sensoriamento urbano.**



**Fonte:** (Murty et al., 2008.).

Posteriormente, são conduzidos estudos de impacto que avaliam os benefícios das intervenções na qualidade de vida da população, na redução dos gastos com energia e na valorização dos imóveis e espaços públicos. Tais estudos incluem análises quantitativas e qualitativas, envolvendo pesquisas de opinião e consultas públicas, que permitem a identificação de áreas de vulnerabilidade e oportunidades de melhoria. Essa análise integrada é fundamental para embasar a tomada de decisão e para assegurar que as intervenções atendam às demandas locais, promovendo uma governança participativa e inclusiva.

Adicionalmente, a metodologia propõe a busca por parcerias público-privadas (PPPs) e o aproveitamento de linhas de crédito e incentivos fiscais, tanto nacionais quanto internacionais, voltados para a sustentabilidade. Essa estratégia financeira viabiliza o investimento inicial necessário para a implementação das ações e estimula a cooperação entre os setores público e privado, reforçando o compromisso com a inovação e a resiliência urbana.

### **3.1.2 Sistema Integrado de Resfriamento Urbano Inteligente (SIRUI)**

O Sistema Integrado de Resfriamento Urbano Inteligente (SIRUI) é concebido para reduzir as ilhas de calor em áreas urbanas por meio da integração de tecnologias de Internet das Coisas (*IoT*), automação de intervenções e aplicação de materiais reflexivos. Fundamentado em plataformas de *hardware* e *software* de código aberto – com destaque para o uso de microcontroladores *opensource*, como o Arduino ou ESP32 – o SIRUI promove ações dinâmicas que otimizam o conforto

térmico e a eficiência energética, permitindo a replicação e expansão gradual mesmo em cidades com recursos financeiros limitados.

**Componentes do sistema:** O SIRUI é composto por diversos módulos que atuam de forma integrada:

- **Rede de Sensores IoT:** Conjunto de sensores distribuídos estrategicamente em pontos críticos (ruas, calçadas, parques e paradas de transporte) para medir variáveis ambientais, tais como temperatura, umidade, radiação solar e níveis de luz. Essa rede permite a captação de dados em tempo real, essenciais para o monitoramento das condições térmicas da área urbana.
- **Plataforma de Monitoramento e Análise:** *Software open source* responsável pela coleta e processamento dos dados oriundos dos sensores. Este sistema inclui um *dashboard* interativo para visualização em tempo real e a possível implementação de algoritmos de *machine learning*, que identificam padrões de comportamento térmico e preveem picos de calor, viabilizando a tomada de decisão autônoma.
- **Módulos de Intervenção Automatizados:** Conjunto de dispositivos e atuadores que, com base na análise dos dados, executam ações corretivas – como a irrigação automatizada de pavimentos, nebulização de áreas críticas e ativação de mecanismos de resfriamento – de forma imediata e programada.
- **Integração com Infraestrutura Urbana:** O sistema é projetado para ser integrado à infraestrutura existente, utilizando materiais reflexivos e soluções arquitetônicas que potencializam a redução da temperatura ambiente, além de garantir a compatibilidade com redes de comunicação e sistemas de gerenciamento já instalados.
- **Sistema de Gerenciamento e Comunicação:** Responsável pela coordenação entre os módulos de sensores e atuadores, este sistema assegura a transmissão eficiente dos dados e a execução das intervenções através de protocolos de comunicação sem fio (como *Wi-Fi* e *LoRa*), possibilitando o monitoramento remoto e a gestão centralizada das ações.

**Métodos utilizados:** Para o desenvolvimento e implementação do SIRUI, adota-se uma abordagem experimental e iterativa que envolve:

- Levantamento e análise de dados climáticos e ambientais para a definição dos pontos de intervenção.
- Projeto e simulação dos fluxos de dados e acionamento dos atuadores, utilizando protótipos em bancada.
- Testes de campo em áreas piloto para validação dos algoritmos de detecção e intervenção, permitindo ajustes finos na calibração dos sensores e na sincronização dos módulos de automação.

**Requisitos do sistema:** O SIRUI deve atender a diversos requisitos técnicos e operacionais:

- **Precisão e Confiabilidade:** Sensores com alta acurácia (por exemplo, margem de erro inferior a 0,5°C para temperatura) e estabilidade na coleta de dados.
- **Baixa Latência:** Capacidade de processar e transmitir dados em intervalos curtos (mínimo de 1 minuto) e de acionar intervenções em tempo real, com latência inferior a 2 segundos.
- **Modularidade e Escalabilidade:** Estrutura que permite a fácil integração de novos sensores e atuadores, possibilitando a expansão do sistema sem necessidade de reconfiguração total.
- **Robustez e Durabilidade:** Componentes resistentes às condições ambientais adversas típicas de áreas urbanas, garantindo operação contínua e manutenção simplificada.

**Fluxo de operação:** O fluxo operacional do SIRUI é estruturado em etapas sequenciais:

1. **Coleta de Dados:** Os sensores captam continuamente variáveis ambientais e enviam os dados para a plataforma central.
2. **Processamento e Análise:** A plataforma de monitoramento processa as informações recebidas, aplicando algoritmos de machine learning para identificar anomalias e prever picos térmicos.
3. **Decisão e Acionamento:** Com base na análise dos dados, o sistema determina as intervenções necessárias e aciona automaticamente os módulos de intervenção (ex.: irrigação, nebulização ou ativação de dispositivos de resfriamento).

4. **Feedback e Ajuste:** Os resultados das intervenções são monitorados e comparados com os parâmetros pré-estabelecidos, permitindo ajustes e reconfigurações do sistema para aprimorar a eficiência das respostas.

**Vantagens:** Entre as principais vantagens do SIRUI destacam-se:

- A redução imediata das temperaturas em áreas críticas, melhorando o conforto térmico e a qualidade de vida dos cidadãos.
- A integração com infraestrutura urbana existente, permitindo uma implementação gradual e modular.
- A possibilidade de replicação e escalabilidade, mesmo em contextos com limitações orçamentárias.
- A promoção de um “laboratório vivo” para o desenvolvimento de novas tecnologias e parcerias entre universidades, setor público e iniciativa privada.

**Desvantagens:** Como desvantagens, podem ser consideradas:

- A necessidade de calibração constante dos sensores para manter a precisão dos dados.
- O custo inicial de implementação, mesmo com o uso de sensores de baixo custo, pode demandar investimentos consideráveis para a expansão do sistema.
- Possíveis desafios na integração de diferentes tecnologias e na interoperabilidade entre os módulos do sistema.

**Potencialização do SIRUI:** A eficácia e a ampliação do SIRUI podem ser potencializadas por:

- A disponibilidade de incentivos fiscais e financiamentos para projetos de inovação e sustentabilidade.
- Parcerias interinstitucionais com centros de pesquisa e universidades, que possam contribuir com estudos de campo e desenvolvimento de novas metodologias.
- A crescente demanda por soluções sustentáveis em áreas urbanas, que favorece a adoção de tecnologias inteligentes e a mobilização de recursos.

**Mitigação do SIRUI:** Os principais desafios e limitações que podem mitigar os resultados do SIRUI incluem:

- Restrições orçamentárias que limitem a escala e a abrangência das intervenções.
- Dificuldades na integração de sistemas legados e infraestrutura urbana existente.
- Barreiras técnicas relacionadas à manutenção e à calibração dos dispositivos em condições variáveis de operação.

### **3.1.3 Ações Iniciais em âmbito Residencial**

No âmbito residencial, as ações iniciais visam estabelecer uma base de dados robusta e promover intervenções que aprimorem a climatização dos ambientes, contribuindo para o conforto e a eficiência energética das residências. Essa fase começa com o diagnóstico e mapeamento local, etapa fundamental para compreender as condições ambientais e térmicas específicas de uma região. Por meio desse levantamento, identificam-se áreas críticas que demandam intervenções imediatas e subsidiam a elaboração de estratégias de climatização inteligentes. Em seguida, são implementados projetos pilotos em ambientes residenciais, os quais permitem testar e validar, em pequena escala, as tecnologias e metodologias propostas antes de sua ampla implantação. Paralelamente, o engajamento da comunidade e o estabelecimento de parcerias locais – envolvendo proprietários, construtoras, órgãos governamentais e instituições de pesquisa – são essenciais para adaptar as soluções às necessidades reais dos usuários, promover a aceitação social e estimular a cooperação para a expansão das iniciativas. Essas ações iniciais, ao integrar diagnóstico, experimentação e participação comunitária, criam as condições necessárias para a implementação de sistemas mais sofisticados e integrados que otimizem o ambiente residencial.

### **3.1.4 Rede Integrada de Sensores Residenciais e Urbanos (RISRU)**

A Rede Integrada de Sensores Residenciais e Urbanos (RISRU) é concebida para monitorar de forma contínua os parâmetros ambientais e térmicos em ambientes residenciais e em áreas de uso misto, possibilitando uma resposta automatizada e personalizada aos desafios de climatização. Essa rede integra diversos elementos e tecnologias, estruturada em componentes que se articulam para proporcionar uma visão abrangente e em tempo real das condições ambientais.

#### **Componentes do Sistema:**



- **Elementos de Execução:** Equipamentos de climatização, que variam conforme o nível socioeconômico da residência, como ar-condicionados (médio a alto padrão), ventiladores (diversos níveis), climatizadores, janelas com sistemas de controle térmico, aquecedores e soluções de climatização via piso e teto (destinadas a edificações de alto padrão).
- **Elementos de Sensoriamento Ativos:** Dispositivos que realizam a medição direta de variáveis ambientais, como sensores de temperatura para a avaliação da temperatura local, sensores de umidade para monitorar o nível de umidade, relógios para aferição da temperatura corporal, câmeras de monitoramento para registrar a localização e a dinâmica dos ambientes, e anemômetros para medir a velocidade do vento.
- **Elementos de Sensoriamento Passivos:** Fontes indiretas de dados, como sistemas GPS para determinar a localização pessoal, bases de dados climáticos que fornecem informações sobre temperatura e umidade regionais, e APIs de fluxo de pessoas que permitem monitorar a dinâmica local dos ocupantes.
- **Elementos de Análise e Controle:** Plataformas e algoritmos que processam os dados coletados, permitindo a análise integrada das condições ambientais e a execução de comandos para os sistemas de climatização, promovendo ajustes automáticos e otimizados.

#### **Métodos utilizados:**

- **Precisão e Confiabilidade:** Sensores com precisão adequada para captar variações sutis de temperatura e umidade, essenciais para a tomada de decisão automatizada.
- **Integração e Interoperabilidade:** Capacidade de incorporar diferentes tipos de sensores e dispositivos, garantindo a compatibilidade com sistemas de climatização e a flexibilidade para futuras expansões.
- **Baixa Latência:** Processamento rápido dos dados e resposta imediata dos atuadores, permitindo intervenções em tempo real que otimizem o conforto ambiental.
- **Escalabilidade:** Possibilidade de ampliar a rede para abranger um número maior de residências e espaços urbanos sem perda de desempenho.

#### **Fluxo de Operação:**

1. **Coleta de Dados:** Os sensores ativos e passivos capturam informações sobre a temperatura, umidade, luminosidade, fluxo de pessoas e outras variáveis ambientais.
2. **Transmissão e Consolidação:** Os dados são transmitidos para a central de monitoramento por meio dos módulos de comunicação, onde são consolidados e organizados para análise.
3. **Processamento e Análise:** Algoritmos de análise processam as informações, identificando padrões, picos e anomalias que indicam a necessidade de intervenção.
4. **Acionamento dos Dispositivos:** Com base na análise, o sistema de controle emite comandos para os dispositivos de climatização (ar-condicionado, ventiladores, climatizadores, entre outros), ajustando a operação de acordo com as condições detectadas.
5. **Feedback e Ajuste:** A resposta dos dispositivos é monitorada continuamente, permitindo ajustes finos e a melhoria contínua do sistema.

#### **Vantagens e desvantagens:**

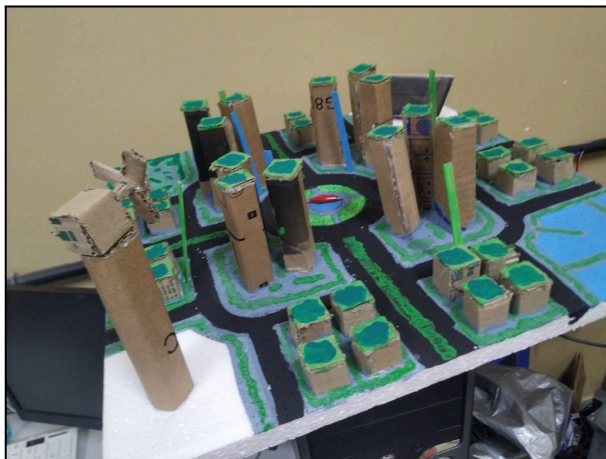
- **Vantagens:** Permite o monitoramento contínuo e em tempo real das condições ambientais em ambientes residenciais e urbanos. Facilita a integração de diferentes tecnologias de climatização, promovendo a eficiência energética e o conforto térmico. Oferece flexibilidade e escalabilidade para futuras expansões e adaptações às necessidades locais.
- **Desvantagens:** A complexidade na integração de múltiplos dispositivos e fontes de dados pode demandar calibração e manutenção contínuas. Os custos iniciais, embora mitigados pelo uso de tecnologias de código aberto, ainda podem ser um desafio para a implementação em larga escala em determinadas regiões. Dependência da infraestrutura de comunicação sem fio, que pode ser afetada por interferências ou limitações em áreas de difícil acesso.

### **3.2 Estrutura do protótipo**

O protótipo apresentado foi desenvolvido como uma maquete representativa de uma cidade inteligente, idealizando o ambiente onde os sistemas RISRU e SIRUI seriam implementados. A cidade simulada é projetada para contar com fontes de

energia renováveis, como parques de energia eólica e solar, garantindo a sustentabilidade energética das operações urbanas e residenciais.

**Figura III** - Cidade inteligente



**Fonte:** autoria própria (2025).

Neste protótipo, exposto na Figura III, a cidade possui uma infraestrutura inovadora, incorporando soluções tecnológicas e sustentáveis que não apenas mitigam os efeitos das ilhas de calor, mas também contribuem para a eficiência energética. Os sistemas RISRU e SIRUI atuam de maneira integrada para monitorar e controlar as condições térmicas, promovendo um ambiente mais agradável e saudável. Contém esboços de torres eólicas, painéis solares, demarcação de zonas críticas e raio de incidência obtidos a partir dos sistemas propostos, e a necessidade de ambientes como lagos artificiais e lagoas para regulação das características térmicas da cidade.

No tocante a fabricação do simulativo, foram utilizados alguns materiais destinados a descarte, como papelão e isopor de eletrodomésticos, bem como tintas guache e PVA para coloração dos elementos figurativos, palitos de sorvete e colas quente e Tekbond.

### **3.2.1 Atuadores e soluções demonstrativas implantadas**

Diversos atuadores foram projetados e implementados no protótipo, representando soluções para climatização inteligente e controle térmico eficiente.

**Figura IV - Telhado verde**



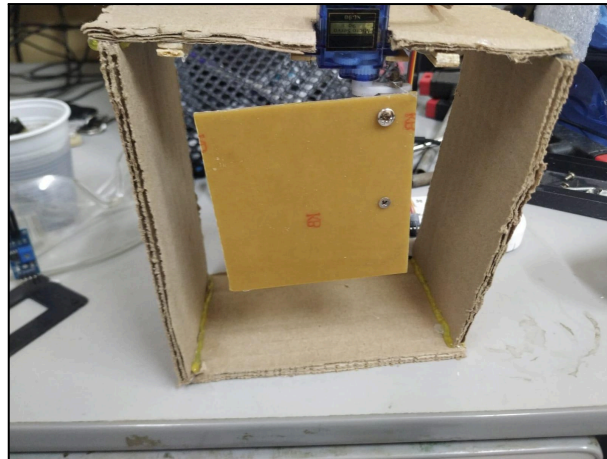
**Fonte:** autoria própria (2025).

O telhado verde, exposto na Figura IV, foi criado com o objetivo de manter a temperatura dos ambientes urbanos mais amena. Ele utiliza uma bomba d'água inteligente que é ativada conforme a umidade do solo está abaixo de um limiar específico. O telhado verde promove o resfriamento passivo dos edifícios ao reter e absorver o calor, enquanto as plantas ajudam na evapotranspiração, que naturalmente diminui a temperatura ambiente.

No tocante a fabricação do telhado verde, foi-se utilizado um motor de corrente contínua 12V obtido no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC), canudos plásticos para canulação, garrafa plástica simbolizando um reservatório de água, isopor, papelão, tintas e colas.

A janela inteligente, exposta na Figura V, foi projetada para se abrir automaticamente quando a temperatura interna de um ambiente ultrapassa um valor pré-determinado, proporcionando ventilação natural e ajudando a regular a temperatura interna. O sistema de janela inteligente foi montado para ser facilmente controlado por meio de um atuador, utilizando um controlador para simular as condições ideais de funcionamento durante a apresentação, já que não é possível controlar os parâmetros ambientais diretamente.

**Figura V - Janela inteligente**



**Fonte:** autoria própria (2025).

No tocante a fabricação da janela, foi utilizado papelão, cola, tinta, um servo motor SG90 com controle de angulação que vai de 0° a 180°, sendo perfeito para a simulação de uma janela, dobradiça improvisada, palitos de picolé e chapas PCB.

O protótipo exposto na Figura VI tem como objetivo simular um sistema de resfriamento utilizando uma pastilha Peltier, um dispositivo termoelétrico que promove o resfriamento por meio do efeito Peltier – diferença de calor gerada pela corrente elétrica em diferentes materiais. O sistema é acionado por um controlador, que gerencia a ativação da pastilha Peltier de acordo com as condições de temperatura estabelecidas. Esse tipo de resfriamento é uma solução eficaz e econômica para controlar a temperatura interna de pequenos espaços e é amplamente utilizado em sistemas de climatização de baixo consumo energético.

**Figura VI - Simulativo de climatizador**



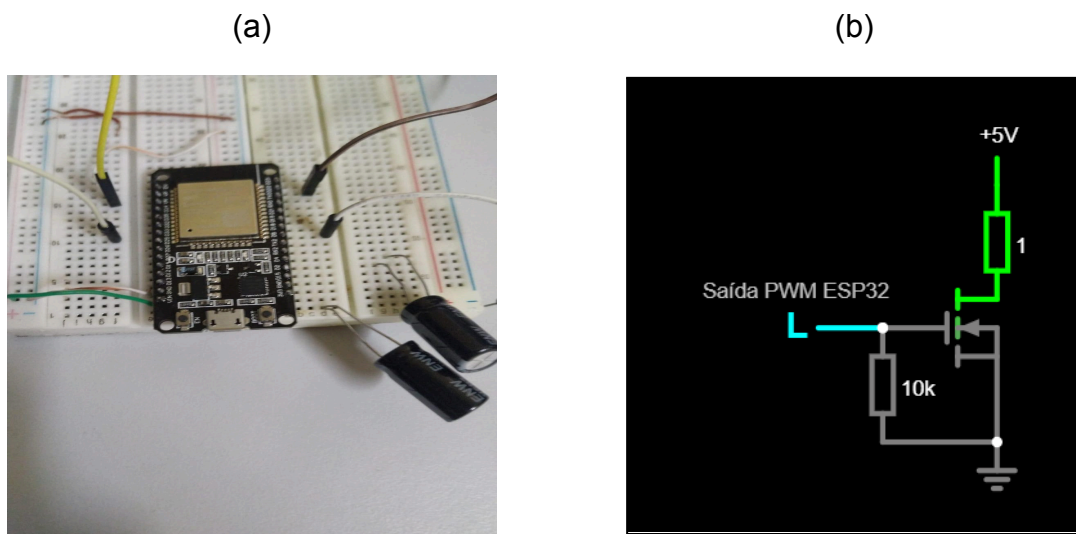
**Fonte:** autoria própria (2025).

No tocante a fabricação desse climatizador simulativo, foi-se utilizado uma pastilha Peltier TEC1-12706, alimentada com 5V e consumo variável de corrente, um *cooler* de computador 12V e 0,4A, um dissipador de alumínio e uma chapa PCB. Todos esses componentes foram obtidos do LIMC.

### 3.2.2 Controlador

Para evitar a manufatura da coleta, análise e processamento em tempo real das grandezas independentes e consequentemente o controle das grandezas dependentes, produziu-se um sistema de controle simulado, a fim de automatizar tarefas e possibilitar uma experiência inteligente. Diante disso, tem-se, na Figura VI.a, um controlador de grandezas, composto por uma ESP32, um microcontrolador versátil com um *clock* dez vezes maior que o Arduino Uno e tecnologias de comunicação integradas, como *Bluetooth* e *Wi-Fi*, uma *protoboard*, *jumpers*, resistores, MOSFET de canal N, dissipador de calor e capacitores eletrolíticos para desacoplamento.

**Figura VII - Controlador**



**Fonte:** autoria própria (2025).

Na figura VII.b, encontra-se o circuito esquemático do controlador, onde há a saída da ESP32 com *PWM* ligado ao Gate do MOSFET, bem como um resistor de pull-down entre o gate do MOSFET e o GND para evitar flutuações e possíveis conduções no MOSFET, utilizando, também, uma carga simulativa de 1  $\Omega$ , que seria a pastilha Peltier ou a bomba, e a fonte de tensão ATX de +5V, alimentando a carga.

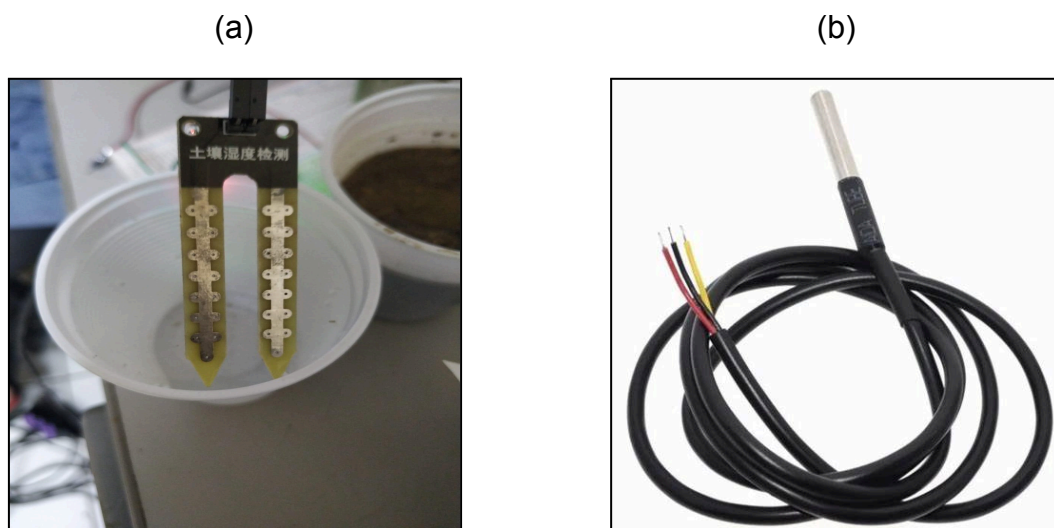


Há dois circuitos ligeiramente diferentes, onde a diferença é a frequência da *PWM*, já que a pastilha Peltier tem funcionamento difuso do motor CC da bomba d'água.

### 3.2.3 Rede de Sensoriamento

Para alimentar os dados necessários ao controle e monitoramento dos sistemas, foi construída uma rede de sensoriamento que reúne dispositivos específicos para medir as condições ambientais, como temperatura e umidade. A rede de sensoriamento desempenha um papel crucial na coleta de dados em tempo real, permitindo que o controlador tome decisões dinâmicas e acione os atuadores conforme a necessidade, simulando o funcionamento real do RISRU.

**Figura VIII - Sensores utilizados**



**Fonte:** (a) autoria própria (2025). (b) Finder (c2025).

Na Figura VIII.a, há um modelo de sensor de umidade do solo, o FC-28, que conta com transmissão analógica e digital de dados, e na Figura VIII.b, há um exemplar DS18B20, um medidor temperatura digital com protocolo OneWire, que, como o nome sugere, envia dados analógicos de forma digitalizada e codificada, usando apenas uma entrada digital. Esses sensores são responsáveis por monitorar as condições ambientais e fornecer os dados necessários para o acionamento do sistema de resfriamento e outros atuadores, garantindo que as intervenções sejam feitas de maneira inteligente e otimizada. A rede de sensoriamento se conecta diretamente ao controlador, permitindo a coleta e processamento dos dados de maneira integrada e eficaz.

## 4 RESULTADOS

A metodologia proposta visa mitigar os efeitos das ilhas de calor em áreas urbanas e residenciais, gerando resultados mensuráveis que promovem a melhoria do conforto térmico, a eficiência energética e a sustentabilidade. Os resultados esperados incluem a redução das temperaturas, a melhoria da qualidade do ar, o engajamento comunitário e a redução dos custos energéticos, com impactos positivos tanto no ambiente urbano quanto nas residências. Além disso, o projeto busca promover a escalabilidade das soluções e a colaboração entre diferentes setores para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

Para ilustrar e validar essa metodologia, o protótipo exibe sistemas automatizados de monitoramento e controle térmico, como a irrigação de telhados verdes e o uso de sistemas de resfriamento inteligentes. Com base nesse modelo, será possível observar as respostas automatizadas dos sistemas a variações ambientais, evidenciando a eficácia das soluções propostas na melhoria do conforto térmico e na eficiência energética, com o objetivo de replicá-las em contextos urbanos reais.

#### **4.1 Resultados Esperados com a Aplicação da Metodologia Geral**

A aplicação da metodologia proposta, voltada para a mitigação do efeito das ilhas de calor nas áreas urbanas e residenciais, deverá gerar uma série de resultados tangíveis e mensuráveis. Esses resultados vão desde a melhoria do conforto térmico até a promoção de uma gestão mais eficiente dos recursos urbanos, criando um ciclo de adaptação inteligente que responde às variáveis climáticas, socioeconômicas e ambientais. Os resultados esperados podem ser divididos nas duas principais áreas de intervenção:

##### **Resultados no Âmbito Urbano:**

- **Redução das Temperaturas Urbanas:** Espera-se uma diminuição significativa nas temperaturas de áreas críticas, com a implementação de tecnologias como irrigação automatizada de pavimentos, nebulização em áreas de alta retenção de calor e a aplicação de materiais reflexivos em ruas e espaços públicos. A monitorização contínua realizada pela RISRU permitirá a adaptação das intervenções em tempo real, aumentando a eficácia das ações.
- **Melhoria da Qualidade do Ar e do Conforto Térmico:** A aplicação de sistemas de resfriamento como nebulização e a utilização de materiais



refletivos contribuirão para a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas, além de proporcionar uma sensação térmica mais agradável para os habitantes e transeuntes. A redução dos picos térmicos também pode diminuir a necessidade de ar-condicionado nas áreas circundantes, contribuindo para a economia de energia.

- **Engajamento e Participação Comunitária:** A implementação de sensores de baixo custo e a promoção de ações piloto em áreas específicas resultarão em um aumento da conscientização pública sobre os impactos das ilhas de calor e as possíveis soluções. Com isso, espera-se maior participação comunitária e aceitação das tecnologias implantadas, além de um fortalecimento da governança urbana.
- **Redução dos Custos de Energia:** A eficiência energética será aprimorada à medida que as tecnologias de resfriamento inteligente contribuirão para a diminuição do uso de sistemas tradicionais de climatização. Espera-se que os investimentos em infraestrutura verde (ex.: telhados verdes, vegetação urbana) e a integração de materiais reflexivos ajudem na redução dos gastos com energia elétrica, ao longo do tempo.
- **Valorização Imobiliária e Infraestrutural:** À medida que os bairros e espaços urbanos se tornarem mais confortáveis e ambientalmente sustentáveis, é esperado um aumento na valorização dos imóveis nessas áreas. A implementação de soluções sustentáveis e de resfriamento inteligente pode atrair investimentos privados e melhorar a qualidade de vida, tornando a área mais atrativa para moradia e comércio.

#### **Resultados no Âmbito Residencial:**

- **Melhoria no Conforto Térmico Interno e Externo:** Com o uso de tecnologias de monitoramento contínuo, como a RISRU, e a integração com sistemas de climatização inteligentes, espera-se uma melhoria significativa no conforto térmico das residências. A adaptação da climatização aos dados ambientais em tempo real permitirá que os sistemas operem com maior eficiência, proporcionando um ambiente mais confortável com menor consumo energético.

- **Maior Eficiência Energética:** A utilização de dispositivos inteligentes que ajustam automaticamente a temperatura e a umidade dentro das residências, além de soluções arquitetônicas como telhados verdes e barreiras térmicas, contribuirá para uma maior eficiência energética, com um impacto direto na redução de custos com eletricidade e no uso sustentável de recursos.
- **Redução da Vulnerabilidade Social:** Ao direcionar ações de climatização adaptativas para áreas de vulnerabilidade social, espera-se uma melhoria significativa na qualidade de vida dos moradores de regiões de baixa renda. A implementação de soluções como ventiladores inteligentes, ar-condicionado de baixo consumo e sistemas de resfriamento passivos pode oferecer soluções viáveis para populações que, de outra forma, não teriam acesso a tais tecnologias.
- **Aumento da Participação Comunitária e Engajamento:** O envolvimento das comunidades nas fases de diagnóstico e experimentação proporcionará uma maior aceitação das tecnologias residenciais, além de garantir que as soluções atendam às necessidades locais. A integração de soluções sustentáveis com um sistema de monitoramento contínuo pode gerar mais interação dos moradores com as tecnologias, criando uma cultura de responsabilidade ambiental.
- **Redução do Custo de Manutenção das Soluções de Climatização:** O uso de plataformas de controle e análise de dados permitirá a manutenção preventiva e otimizada dos sistemas de climatização, reduzindo o custo geral de operação. Além disso, a adaptação das soluções a cada residência pode garantir uma maior durabilidade e menor desgaste dos dispositivos.

#### **Resultados Transversais:**

- **Escalabilidade e Replicabilidade:** A metodologia proposta permitirá que os resultados obtidos em áreas piloto possam ser ampliados e replicados em outras regiões urbanas e residenciais. A escalabilidade do sistema se baseia em sua modularidade, com a capacidade de integrar novos sensores e atuar em uma rede mais ampla, sem perder eficiência.
- **Parcerias Público-Privadas e Apoio Institucional:** A busca por parcerias público-privadas e o uso de incentivos fiscais poderão gerar o apoio financeiro necessário para expandir as intervenções em maior escala. A colaboração

entre diferentes setores (governo, iniciativa privada e academia) contribuirá para o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias e metodologias para o resfriamento urbano e residencial.

- **Sustentabilidade a Longo Prazo:** Ao utilizar tecnologias de baixo custo e promover soluções verdes, como telhados verdes, barreiras térmicas e o uso de sistemas automatizados de climatização, espera-se que o projeto proporcione um impacto positivo no longo prazo, promovendo a resiliência climática das cidades e das residências, ao mesmo tempo que reduz as emissões de carbono.

#### 4.2 Detalhamento do protótipo

O protótipo desenvolvido foi concebido para representar uma cidade inteligente ideal, onde as soluções propostas pelo (SIRUI) e pela (RISRU) são aplicadas de forma integrada. A cidade modelada neste protótipo apresenta uma combinação de tecnologias e sistemas voltados para a melhoria do conforto térmico urbano e a eficiência energética. A seguir, detalham-se os principais componentes e funcionamento do protótipo.

**Cenário e Contexto, Cidade Inteligente em Miniatura:** O protótipo é uma maquete representativa de uma cidade inteligente equipada com fontes de energia renováveis, como parques eólicos e solares. A utilização dessas fontes reflete a proposta de sustentabilidade e automação que é central no conceito de cidades inteligentes. Essa cidade ideal serve para demonstrar como os sistemas RISRU e SIRUI podem ser integrados em uma rede de monitoramento e controle térmico de forma eficiente, mitigar os efeitos das ilhas de calor e otimizar o consumo energético. A cidade foi projetada para ser um modelo replicável em áreas urbanas reais, especialmente em contextos com recursos financeiros limitados.

##### **Funcionamento Integrado:**

- **Coleta e Monitoramento:** A rede RISRU realiza a coleta de dados ambientais de maneira contínua. Sensores de temperatura, umidade e outros parâmetros são monitorados em tempo real, enviando essas informações para o controlador central.
- **Processamento e Decisão:** Com os dados coletados, o controlador central processa as informações e toma decisões baseadas em algoritmos

programados. Por exemplo, quando a temperatura interna de um ambiente ultrapassa um limite preestabelecido, o controlador pode acionar a janela inteligente para abrir e melhorar a ventilação ou o sistema de resfriamento Peltier para reduzir a temperatura.

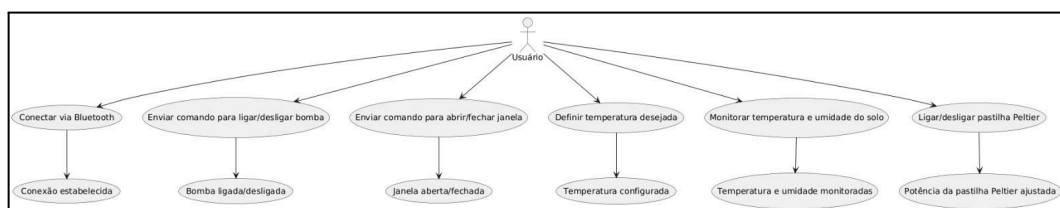
- **Ação Automatizada:** O sistema implementa a automação de forma prática: a irrigação do telhado verde é ativada quando o sensor de umidade indica níveis críticos de secura no solo; o ajuste automático da janela inteligente ocorre quando a temperatura interna atinge um ponto de desconforto térmico; o sistema de resfriamento com célula Peltier é acionado quando a temperatura ambiente é excessiva.
- **Demonstração Prática:** Em apresentações simulativas como essa, onde os parâmetros ambientais não podem ser controlados, o protótipo utiliza simuladores ou controladores para demonstrar as respostas automáticas do sistema, tornando o processo tangível para o público. Isso inclui simulações de variação de temperatura ou umidade para mostrar como os sistemas automatizados respondem de forma inteligente e eficiente.

### 4.3 Diagramas UML

Para ilustrar a arquitetura e a interação entre os componentes do sistema, foram elaborados diagramas UML utilizando a ferramenta LucidChart. Esses diagramas fornecem uma visão clara e estruturada das relações entre as classes do sistema e dos fluxos de interação com os usuários e o ambiente.

Diagrama de Casos de Uso, exposto na Figura IX: Este diagrama descreve as principais interações entre os atores (usuário, sistemas e sensores) e o sistema integrado. Ele detalha como o usuário pode interagir com os sistemas de climatização e monitoramento e como o sistema responde a diferentes eventos ambientais.

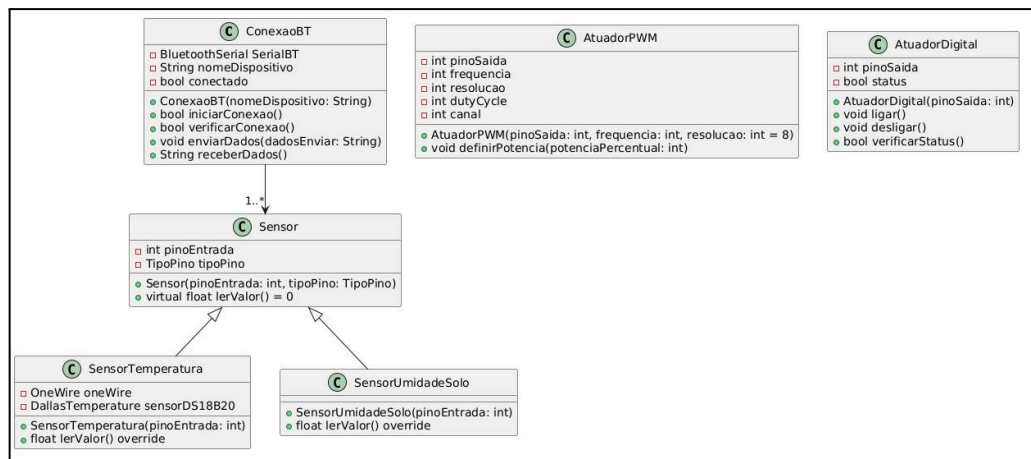
**Figura IX - Diagrama de Caso de Uso**



**Fonte:** autoria própria (2025).

Diagrama de Classes, exposto na Figura X: O diagrama de classes descreve as entidades principais do sistema (como os sensores, atuadores e o controlador) e como essas classes se relacionam entre si. Através desse diagrama, é possível entender como os dados fluem entre as classes e como elas colaboram para realizar as funções de monitoramento e automação.

**Figura X - Diagrama de Classes**




Fonte: autoria própria (2025).

#### 4.4 Lógica e algoritmo utilizado

O código implementa um sistema de automação inteligente para controle de temperatura e umidade utilizando o microcontrolador ESP32. O sistema lê constantemente a temperatura e a umidade do solo e, com base nesses dados, controla a bomba d'água, a pastilha Peltier e o servo motor da janela inteligente. A comunicação entre o ESP32 e um dispositivo móvel é realizada via Bluetooth, permitindo o controle remoto das funções. Quando a umidade do solo cai abaixo de 50%, a bomba é acionada, enquanto a pastilha Peltier ajusta a temperatura para o valor desejado, controlando sua potência via PWM. O servo motor abre ou fecha a janela conforme os comandos recebidos via Bluetooth.

No algoritmo, a leitura da umidade e temperatura é feita periodicamente, e a resposta da pastilha Peltier é ajustada com base na diferença entre a temperatura real e a desejada, utilizando um controle de potência proporcional. Para suavizar as variações rápidas de temperatura, é utilizada uma média ponderada entre as leituras anteriores e atuais. Além disso, a bomba d'água é ativada automaticamente quando a umidade do solo está abaixo do limiar de 50%. A cada 5 segundos, o sistema verifica a conexão Bluetooth e tenta reconectar automaticamente caso haja falha na

comunicação. O código permite ainda o envio de comandos para ligar/desligar a bomba e abrir/fechar a janela através do Bluetooth, com respostas enviadas de volta ao dispositivo móvel.

Por fim, os códigos em C/C++ utilizados para programação da ESP32 e de toda lógica do protótipo, devido ao longo tamanho, estão disponíveis no repositório: [Git Hub - GermesDoRu.cpp](#) e no Google Drive:  TP .

## **5 CONCLUSÃO**

O presente projeto visa a implementação de soluções inovadoras para o controle térmico e a eficiência energética em ambientes urbanos e residenciais, por meio da criação de um protótipo de cidade inteligente. Utilizando tecnologias de Internet das Coisas (*IoT*), sensores, atuadores inteligentes e sistemas automatizados, foi possível demonstrar o potencial de mitigação dos efeitos das ilhas de calor, promovendo o conforto térmico e a sustentabilidade. No entanto, como qualquer inovação tecnológica, o projeto apresenta limitações que precisam ser consideradas para sua implementação em larga escala. Este capítulo aborda os resultados obtidos, as principais limitações enfrentadas durante a execução do projeto e sugestões para trabalhos futuros, com o objetivo de aprimorar a aplicação das soluções propostas e expandir sua implementação para cenários urbanos reais.

### **5.1 Síntese dos Resultados**

O projeto demonstrou com sucesso a eficácia dos sistemas SIRUI e RISRU na criação de ambientes urbanos e residenciais mais confortáveis e energeticamente eficientes. A validação do protótipo de cidade inteligente em escala reduzida evidenciou que a integração de sensores IoT com atuadores inteligentes, como telhados verdes, janelas inteligentes e sistemas de resfriamento baseados em pastilhas Peltier, é altamente eficaz na mitigação dos efeitos das ilhas de calor. A coleta de dados em tempo real e o acionamento automatizado desses dispositivos possibilitaram a redução das temperaturas em áreas críticas, promovendo não apenas o conforto térmico, mas também uma melhoria significativa na eficiência energética e na qualidade do ar. Esses resultados indicam o alto potencial de replicação da metodologia proposta em cenários urbanos reais, oferecendo uma contribuição valiosa para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes.

## **5.2 Limitações do Projeto**

Apesar dos avanços e resultados promissores, o projeto apresenta algumas limitações que devem ser cuidadosamente consideradas. O protótipo foi desenvolvido em escala reduzida, o que pode não refletir todas as complexidades e variabilidades que surgem em ambientes urbanos de maior escala. A calibração dos sensores e o desempenho dos atuadores, que são cruciais para um controle térmico preciso, requerem manutenção constante, e sua eficácia pode ser comprometida em condições extremas ou quando aplicados em larga escala. Além disso, as restrições orçamentárias e a utilização de materiais recicláveis, embora vantajosos em termos de sustentabilidade, podem limitar a durabilidade e a robustez dos componentes. A integração com a infraestrutura urbana existente também representa um desafio significativo, demandando adaptações que podem aumentar os custos e exigir parcerias mais sólidas para uma implementação bem-sucedida em cenários reais.

## **5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Para ampliar o impacto e aprimorar os resultados deste projeto, diversas direções podem ser exploradas em trabalhos futuros. Primeiramente, realizar testes em ambientes reais e em maior escala será fundamental para validar os resultados obtidos no protótipo, permitindo uma melhor compreensão das variáveis operacionais em contextos urbanos mais complexos. A integração de algoritmos de machine learning pode otimizar o processamento dos dados, aprimorando a tomada de decisões em tempo real e aumentando a eficiência dos sistemas de controle térmico. Pesquisas sobre novos materiais e tecnologias que reduzam custos e melhorem a durabilidade dos componentes também são essenciais, possibilitando a expansão do sistema de forma mais sustentável. Por fim, o estabelecimento de parcerias com órgãos públicos, privados e instituições de pesquisa é crucial para viabilizar a implementação de projetos-piloto em cidades reais, promovendo uma governança participativa que envolva a comunidade e fortaleça as políticas públicas de sustentabilidade e eficiência energética.

## **6 AGRADecIMENTOS**

Agradecemos ao Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC) pelo fornecimento do material e do espaço para realização do projeto, além dos materiais e conhecimentos fornecidos pelos professores Carlos Diego e Fabricio.



## REFERÊNCIAS

- GRIMMOND, S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Geographical Journal*, v. 173, n. 1, p. 83-88, 2007.
- LIMA, A. B. et al. Adaptação às mudanças climáticas: estratégias sustentáveis para mitigação dos impactos ambientais em países em desenvolvimento. *IOSR Journal of Business and Management*, v. 27, n. 1, p. 59-68, jan. 2025. Disponível em: <<https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol27-issue1/Ser-1/F2701015968.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- KRUGER, Eduardo; DRACH, Patricia. Quantificação dos impactos da climatização artificial na sensação térmica de transeuntes em termos de alterações no microclima. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, ed. 9 (Supl. 1), out. 2017.
- NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. O que são as mudanças climáticas? Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- YASAR, Kinza; GILLIS, Alexander S. Internet of Things (IoT). *TechTarget*, jun. de 2024. Disponível em: <<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- MURTY, Rohan Narayana; et al. CitySense: An Urban-Scale Wireless Sensor Network and Testbed. *Proceedings of the IEEE International Conference on Homeland Security (IEEE-HST)*, [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org>>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- OBERNDORFER, E. et al. Green Roof Ecosystems. *BioScience*, v. 57, n. 10, p. 823-833, 2007. Disponível em: <<https://academic.oup.com/bioscience/article/57/10/823/234427>>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- FINDER. sensor de temperatura DS18B20, c2025. Disponível em: <OIP.vCP\_AXAACeSd\_tmb1OLTYQHaHd (474×477)>. Acesso em: 29/03/2025.