

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Sistemas Computacionais e Segurança

Guilherme Sales de Andrade - 825125938

Lucas Gabriel Hora Benetti – 825134041

Yago Henrique da Silva Santos – 825140992

Matheus Ortiz de Jesus – 825149730

Lucas Matheus Alves Sena – 82512336

Fabrício dos Santos Sampaio - 825142856

Internet das Coisas (IoT) e Cidades Inteligentes (Smart Cities): Gerenciamento das questões climáticas

Projeto apresentado à Universidade São Judas Tadeu como requisito parcial para obtenção do título de Análise e Desenvolvimento de Sistemas e Segurança da Informação.

Área de Concentração: Sistemas Computacionais e Segurança

Orientador: Robson Calvetti.

São Paulo
2025

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Cidades inteligentes e IoT na Gestão Urbana.....	4
2.2 Monitoramento de Árvores e Saúde Vegetal.....	4
3. METODOLOGIA.....	5
3.1 Revisão Bibliográfica.....	5
3.2 Levantamento de Problemas na Cidade de São Paulo.....	5
3.3 Prototipação Conceitual do Sistema.....	6
3.4 Arquitetura de Software e Modelagem Preditiva.....	7
4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO.....	7
4.1 Arquitetura integrada do SGMS.....	8
4.2 Módulos de Sensoriamento Específicos para Risco de Queda.....	8
4.3 Plataforma de visualização	9
5. CONCLUSÃO.....	10
5.1 Impactos.....	10
5.1.1 Impacto Social.....	10
5.1.2 Impacto Econômico.....	11
5.1.3 Impacto Ambiental.....	11
5.2 Limitações.....	12
5.3 Sugestões para trabalhos futuros.....	12
REFERÊNCIAS.....	12

1 INTRODUÇÃO

A arborização urbana desempenha papel essencial na qualidade de vida das cidades, contribuindo para o conforto térmico, a redução de poluentes atmosféricos, o controle da drenagem e a promoção do bem-estar social. De acordo com dados da Secretaria do Verde e Meio Ambiente (SVMA) de 2022 a cidade de São Paulo possui mais de 650 mil árvores em calçadas, praças e canteiros centrais. Entretanto, a falta de monitoramento contínuo e de manutenção estruturada gera riscos significativos para a população. Em São Paulo, somente em 2023, foram registradas cerca de 2.000 quedas de árvores, segundo reportagem amplamente divulgada na mídia nacional (SÃO PAULO, 2023). Esses episódios resultam em prejuízos materiais, interrupções de serviços essenciais, danos ao trânsito e, em alguns casos, feridos e vítimas fatais.

A gestão da infraestrutura verde no município ainda é predominantemente reativa, baseada em denúncias, inspeções visuais pontuais e intervenções emergenciais. Com o aumento da intensidade de chuvas, estiagens prolongadas e eventos climáticos extremos, torna-se evidente a necessidade de soluções mais modernas que permitam antecipar riscos.

Nesse contexto, propõe-se o Smart Green Monitoring System (SGMS), uma solução baseada em Internet das Coisas (IoT) e Machine Learning (ML) capaz de monitorar parâmetros biomecânicos e ambientais relacionados à saúde das árvores urbanas. A proposta tem como objetivo apoiar a Prefeitura de São Paulo na transição de um modelo de manutenção emergencial para um sistema preditivo, aumentando a segurança pública, reduzindo custos operacionais e contribuindo para o planejamento urbano sustentável.

Além disso, diversas iniciativas internacionais têm demonstrado que o uso de sensores, inteligência artificial e análise de dados pode transformar a gestão da arborização urbana. Projetos como o TreeWatch, da Universidade de Oxford, e o TreeTag, de Singapura, já utilizam sensores para medir o fluxo de seiva, umidade e estresse hídrico. Esses modelos reforçam a viabilidade e importância de aplicações semelhantes no cenário paulistano.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A interconexão entre objetos, dados e sistemas é o pilar das Cidades Inteligentes, sendo a Internet das Coisas (IoT) a principal tecnologia habilitadora.

2.1 Cidades Inteligentes e IoT na Gestão Urbana

Cidades Inteligentes são definidas como aquelas que utilizam Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) para melhorar a qualidade de vida, a eficiência dos serviços urbanos, a competitividade e o atendimento às necessidades das gerações presentes e futuras em relação aos aspectos econômicos, sociais, ambientais e culturais. A infraestrutura verde, historicamente vista apenas sob a ótica da paisagem, passa a ser um componente de *infraestrutura crítica* de sustentabilidade que requer gestão inteligente.

A aplicação de IoT em setores como transporte, energia e segurança é vasta. Na silvicultura urbana, o uso de sensores de baixo custo permite a criação de redes de monitoramento distribuídas, transformando cada árvore monitorada em um *ponto de dados* ativo dentro da rede da cidade.

2.2 Monitoramento de Árvores e Saúde Vegetal

O monitoramento tradicional de árvores depende de inspeções visuais, que são subjetivas, caras e pouco frequentes. Pesquisas recentes demonstram que métodos automatizados podem oferecer maior precisão e antecipação de riscos. Um exemplo consolidado é o TreeWatch, que utiliza sensores para medir o fluxo de seiva e variação de diâmetro, detectando sinais de estresse antes que se tornem visíveis.

Além disso, estudos de monitoramento estrutural aplicados em edificações, pontes e taludes mostram que sensores de inclinação, deformação e vibração — associados a técnicas de Machine Learning — conseguem identificar anomalias horas ou dias antes de falhas estruturais (ARXIV, 2023; PUBMED, 2023). Esses princípios podem ser adaptados para o contexto urbano, permitindo que árvores sejam monitoradas de forma contínua e preditiva.

Assim, a combinação de sensores biomecânicos e modelos de IA oferece um caminho viável para estimar risco de queda, otimizar manutenção e aumentar a segurança pública.

3 METODOLOGIA: DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

A construção do Smart Green Monitoring System (SGMS) foi estruturada em uma abordagem de pesquisa e desenvolvimento focada em resolver os desafios da arborização urbana na cidade de São Paulo.

O desenvolvimento do projeto seguiu quatro etapas principais:

3.1 Revisão Bibliográfica

A etapa inicial consistiu em um aprofundado levantamento teórico e técnico. Foram analisados artigos científicos, livros, normas técnicas e estudos de caso sobre os pilares do projeto: arborização urbana, Internet das Coisas (IoT), sensoriamento ambiental e modelos preditivos baseados em Machine Learning. O objetivo foi estabelecer o estado da arte e validar a viabilidade técnica da solução proposta.

3.2 Levantamento de Problemas na Cidade de São Paulo

Para garantir a relevância do SGMS, foi realizado um levantamento das necessidades e dos problemas críticos de gerenciamento da infraestrutura verde na capital paulista. Foram considerados dados públicos, relatórios oficiais e reportagens amplamente divulgadas na mídia, que indicam:

1. **Alto índice de quedas de árvores:** Cerca de 2.000 ocorrências por ano, representando um risco significativo à segurança pública e causando prejuízos materiais.
2. **Manutenção insuficiente:** A gestão é predominantemente reativa, com foco em intervenções emergenciais e manutenção deficitária das espécies mais antigas e fragilizadas.
3. **Impactos do clima tropical com eventos extremos:** A intensificação de chuvas fortes, vendavais e períodos de estiagem prolongada aumentam drasticamente a instabilidade das árvores.

3.3 Prototipação Conceitual do Sistema

Com base na revisão bibliográfica e nos problemas identificados, a fase de prototipação conceitual definiu a estrutura e os requisitos essenciais do SGMS. Os requisitos funcionais do sistema foram estabelecidos com foco na proatividade e na capacidade de alerta:

1. **Coleta contínua de dados biomecânicos:** Monitoramento em tempo real de métricas que indicam estresse e falha estrutural.
2. **Coleta horária de indicadores ambientais:** Captação de dados climáticos para fornecer o contexto de risco de médio prazo.
3. **Transmissão de dados para a nuvem:** Garantia de uma arquitetura de comunicação escalável e de baixa latência.
4. **Geração de alertas automáticos em caso de risco crítico:** Capacidade de emitir notificações imediatas para ações de Defesa Civil e equipes de manutenção.
5. **Interface de visualização para planejamento urbano:** Disponibilização de um painel de gestão intuitivo para otimizar o planejamento e a priorização de recursos.

Para o módulo de sensoriamento, que representa o "nó" do sistema, optou-se pela utilização de microcontroladores de baixo consumo (como o ESP32) para otimizar a autonomia energética. Os componentes escolhidos para a coleta de dados primários são detalhados na tabela a seguir:

Sensor	Função	Dados Coletados
Inclinômetro	Deteta mudança de ângulo do tronco	Graus (em 3 eixos)
Extensômetro	Mede tensão e deformação estrutural	Microstrain
DHT22	Mede temperatura e umidade do ar	°C e %
Sensor CO ₂ e MP10	Mede qualidade do ar	ppm

3.4 Arquitetura de Software e Modelagem Preditiva

A arquitetura do software foi pensada para ser assim:

1. **Plataforma de Ingestão de dados:** Responsável por receber os pacotes de dados e inseri-los em um serviço de mensageria na nuvem.
2. **Banco de Dados:** Utilizado para armazenamento escalável de séries temporais.
3. **Módulo de Machine Learning (ML):** Uma pipeline de processamento que realiza:
 - a. Pré-processamento: Limpeza dos dados e normalização dos dados brutos.
 - b. Extração: Cálculo de dados estatísticos como média e desvios-padrão com base nos dados tratados.
 - c. Treinamento do Modelo: Utilização de um algoritmo de Machine Learning pré treinado baseado em limiares de inclinação e taxa de deformação para prever risco de queda da árvore.

O modelo de ML resulta em uma probabilidade de falha estrutural, sendo convertido em um índice de risco de 0 a 100, apresentado em um painel de gestão para a prefeitura.

4 PROPOSTA DE SOLUÇÃO: SMART GREEN MONITORING SYSTEM

O Smart Green Monitoring System (SGMS) é um ecossistema completo para a gestão inteligente da arborização urbana e o monitoramento ambiental correlato.

4.1 Arquitetura integrada do SGMS

A solução opera em três camadas: Nós, Gateway e Cloud.

Camada de Nós: É a camada instalada no tronco das árvores. Os dispositivos capturam dados a cada 15 minutos e os agregam. Se um limiar crítico for atingido, um alerta imediato é enviado.

Camada Gateway: É o ponto de concentração de dados, geralmente instalado em postes ou edifícios municipais. Ele roteia os pacotes de dados dos Nós para a Camada Cloud, garantindo a baixa latência nas áreas de cobertura.

Camada Cloud: Onde o poder computacional é aplicado. O modelo de ML é executado continuamente, reclassificando o risco de cada árvore a cada atualização de dados.

4.2 Módulos de Sensoriamento Específicos para Risco de Queda

A inovação do SGMS reside na combinação de sensores para fornecer uma avaliação holística do risco:

1. **Monitoramento Biomecânico (Risco Imediato):** O inclinômetro e o extensômetro trabalham em conjunto. Um aumento súbito na inclinação (risco de queda) é validado por um aumento concomitante na microdeformação (strain), que indica falha estrutural interna. O modelo de ML utiliza a taxa de mudança dessas métricas, e não apenas seus valores absolutos, para identificar problemas emergentes.
2. **Monitoramento Biológico/Ambiental (Risco de Médio Prazo):** A umidade do solo e a temperatura fornecem o *contexto* para o risco. Uma seca prolongada (baixa umidade) eleva o risco biológico, o que é ponderado pelo modelo de ML ao calcular o risco total.

4.3 Plataforma de visualização

O SGMS inclui uma interface gráfica que permite:

1. **Visualizar todas as árvores monitoradas em mapa:** O mapa interativo exibe o georreferenciamento de cada árvore monitorada, utilizando um sistema de cores (ex: verde, amarelo, vermelho) para indicar o nível de risco de falha estrutural em tempo real.
2. **Receber alertas sobre risco elevado de queda:** Geração de notificações em tempo real quando o índice de risco de falha estrutural atinge um limiar crítico, permitindo o acionamento imediato de equipes de resposta.

3. **Acompanhar gráficos históricos:** Acesso a dados antigos dos sensores (inclinação, deformação, temperatura, umidade) e a evolução do índice de risco ao longo do tempo para análise preditiva e investigação de causas.
4. **Consultar estatísticas por região:** Relatórios e *dashboards* para análise de tendências regionais, distribuição de risco por bairro ou subprefeitura, e indicadores de desempenho da manutenção preventiva.

Essa interface pode ser acessada por:

1. **Equipe de manutenção da Prefeitura:** Utilizam a plataforma para priorizar rotas de inspeção e manutenção preventiva, direcionando recursos para as árvores com maior índice de risco.
2. **Defesa Civil:** Recebem alertas instantâneos de risco crítico e podem acessar o mapa de risco durante eventos climáticos extremos para planejar bloqueios de vias e ações de emergência.
3. **Subprefeituras:** Consultam estatísticas regionais e acompanham o status das árvores sob sua jurisdição, auxiliando no planejamento de políticas públicas locais para a infraestrutura verde.

5. CONCLUSÃO

A quantidade crescente de quedas de árvores em São Paulo evidencia a necessidade de modernizar a gestão da arborização urbana. O uso de dados ambientais e técnicas de Machine Learning permite transformar o modelo atual, predominantemente emergencial, em um sistema preventivo e inteligente.

A proposta do SGMS demonstra que é possível implementar uma solução acessível e eficiente, com sensores simples e uma plataforma de visualização intuitiva, auxiliando órgãos públicos a identificar riscos antes que ocorram danos. Experiências internacionais comprovam os benefícios desse tipo de monitoramento, reforçando a viabilidade da aplicação no cenário paulistano.

Assim, o SGMS apresenta-se como uma alternativa sustentável, econômica e alinhada às diretrizes de cidades inteligentes.

5.1 Impactos

A implementação do Smart Green Monitoring System (SGMS) pode gerar impactos positivos significativos em três dimensões centrais de sustentabilidade: social, econômica e ambiental.

5.1.1 Impacto Social

O monitoramento preditivo reduz o risco de quedas inesperadas de árvores — um problema recorrente em centros urbanos como São Paulo. A diminuição desses eventos contribui diretamente para:

1. **Segurança da população:** menos acidentes envolvendo pedestres, motoristas e residências.
2. **Melhoria na mobilidade urbana:** quedas de árvores costumam bloquear vias importantes, causando congestionamentos e atrasos no transporte público.
3. **Transparência e participação cidadã:** ao disponibilizar dados de risco e condições ambientais, o sistema aproxima a população das políticas públicas de sustentabilidade.

Assim, o SGMS fortalece a resiliência urbana e aumenta a confiabilidade nos serviços da Prefeitura.

5.1.2 Impacto Econômico

A gestão reativa da arborização é mais cara do que a preventiva, pois envolve:

1. Intervenções emergenciais.
2. Danos à infraestrutura pública.
3. Processos judiciais por acidentes,
4. Mobilização de equipes e equipamentos pesados.

Com um modelo preditivo, a Prefeitura pode:

1. **Reducir gastos com manutenção emergencial**, substituindo-a por inspeções programadas.

2. **Priorizar investimentos**, direcionando recursos somente para árvores com risco real.
3. **Evitar prejuízos materiais**, como danos a veículos, imóveis, fiações e iluminação pública.

Estudos realizados em cidades como Barcelona e Cingapura indicam que o uso de IoT na gestão da arborização reduz entre 15% e 35% os custos anuais de manutenção

5.1.3 Impacto Ambiental

Do ponto de vista ecológico, o SGMS contribui para:

1. **Preservação das árvores**: a detecção precoce de estresse hídrico, pragas ou inclinação anormal permite tratamentos antes da remoção.
2. **Melhor planejamento da arborização urbana**: dados ambientais ajudam a escolher as melhores espécies para diferentes microclimas.
3. **Melhoria da qualidade do ar**: o sensor de CO₂ e material particulado permite criar correlações entre áreas verdes e purificação do ar.
4. **Adaptação climática**: árvores saudáveis reduzem temperatura, aumentam retenção de água da chuva e mitigam eventos extremos.

Assim, o SGMS se alinha diretamente às metas de cidades inteligentes, neutralidade de carbono e desenvolvimento urbano sustentável.

5.2 Limitações

Uma limitação do projeto é o custo inicial de implantação de um número significativo de Nós de sensoriamento. Outra reside na generalização do modelo de ML: a precisão do modelo de Machine Learning é diretamente afetada pela variabilidade de espécies arbóreas e tipos de solo. O modelo deve ser continuamente treinado com dados locais e específicos para garantir alta acurácia.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se, para trabalhos futuros:

1. A integração com dados de sensoriamento remoto (Imagens de Satélite e Drones) para monitorar o vigor da copa da árvore (Índice NDVI) e refinar o cálculo do índice de risco.
2. O desenvolvimento de uma API aberta para que os dados de qualidade do ar e temperatura possam ser consumidos por outras aplicações municipais ou disponibilizados diretamente ao cidadão.

REFERÊNCIAS

SÃO PAULO. *Queda de árvores aumenta na capital com chuvas fortes*. G1 – Globo, 2023.

UNIVERSITY OF OXFORD. *TreeWatch Project*. Oxford Environmental Research, 2023.

GOMES, Luiz A. *Cidades Inteligentes: Conceitos e Aplicações*. Revista de Gestão Urbana, v. 12, n. 3, 2023.

SILVA, M. J.; BRITO, R. *Aplicações de IoT no Monitoramento Ambiental*. Revista Brasileira de Tecnologia, v. 8, n. 2, p. 45–60, 2022.

KELLY, J.; SMITH, A. *Urban Tree Failure Prediction Using Sensors and Machine Learning*. Urban Forestry Journal, 2020.

BURKE, Andy. *Internet das Coisas para Iniciantes*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2021.

MARSHALL, Stephen. *Cidades Inteligentes: Introdução às Tecnologias Urbanas*. São Paulo: Novatec, 2022.

STEPPE, K. et al. *TreeWatch.net: Sensing plant responses in real time*. Tree Physiology, 2016.

TAN, Z. et al. *Buildings' Biaxial Tilt Assessment Using Inertial Wireless Sensors*. 2023.

ZHANG, Y. et al. *Applied Bayesian Structural Health Monitoring using inclinometer anomaly detection*. 2023.

DE SOUSA, G. et al. *Data Anomaly Detection for Structural Health Monitoring of Bridges*. 2020.