

UDF – Centro Universitário do Distrito Federal

Curso de Ciência da Computação

PLUVIÔMETRO INTELIGENTE COMO SISTEMA CIBER-FÍSICO (CPS)

PARA SMART CITIES

Brasília
2025

UDF – Centro Universitário do Distrito Federal

Curso de Ciência da Computação

GUSTAVO LUCAS SANTOS SILVA - 33966168

KAUÃ DE SOUSA FRANCO DA COSTA - 33631816

RENAN RIBEIRO MAURICIO - 34246495

PLUVIÔMETRO INTELIGENTE COMO SISTEMA CIBER-FÍSICO (CPS)

PARA SMART CITIES

Trabalho acadêmico apresentado à disciplina do curso de Ciência da Computação do UDF – Centro Universitário do Distrito Federal, como requisito parcial para avaliação.

Orientadora: **Professora Kadidja Valéria**

Brasília
2025

Resumo

A intensificação das mudanças climáticas, aliada ao processo de urbanização acelerada, tem ampliado significativamente a ocorrência de enchentes em cidades brasileiras. A falta de sistemas integrados e preditivos de monitoramento hídrico compromete a eficácia das ações de prevenção e resposta, levando a perdas humanas, sociais e econômicas. Este trabalho apresenta a modernização do pluviômetro tradicional para um Sistema Ciber-Físico (CPS), integrando sensores IoT, redes de comunicação, processamento em nuvem e inteligência artificial para previsão de enchentes em tempo real. O sistema proposto transforma um equipamento reativo em um mecanismo autônomo de monitoramento climático e mitigação de desastres, alinhado às diretrizes de Smart Cities. São apresentadas a fundamentação teórica, a arquitetura tecnológica, a metodologia de implementação e as métricas de avaliação (KPIs), demonstrando o impacto esperado na segurança urbana e na gestão ambiental.

Palavras-chave: Pluviômetro; Sistema Ciber-Físico; Smart Cities; IoT; Inundações.

Sumário

- 1. Introdução**
- 2. Fundamentação Teórica**
 - 2.1 Pluviômetros e suas limitações
 - 2.2 Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
 - 2.3 IoT, IA e Smart Cities
- 3. Metodologia: Arquitetura e Solução**
 - 3.1 Proposta da Arquitetura Tecnológica (CPS)
 - 3.2 Novas Funcionalidades Inteligentes
- 4. Implementação e Métricas de sucesso**
 - 4.1 Roteiro de Ação da Solução (Ação Gradual)
 - 4.2 Definição de KPIs (Métricas de Sucesso)
- 5. Limitações do Sistema Proposta**
- 6. Melhorias Futuras do Sistema**
- 7. Validação dos Dados da Inteligência Artificial**
- 8. Aprofundamento Científico - Explicação Técnica Avançada**
- 9. Exemplos reais de cidades que já utilizam sistemas semelhantes**
- 10. Conclusão**
- 11. Referência**

1. Introdução

A intensificação das mudanças climáticas tem ampliado significativamente a ocorrência de eventos hidrológicos extremos em áreas urbanas, especialmente enchentes e enxurradas repentinas. Esses fenômenos provocam impactos diretos na infraestrutura, na mobilidade, na segurança e na economia das cidades brasileiras. Segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), somente em 2024 foram emitidos mais de 3.600 alertas de risco relacionados a chuvas intensas no país, enquanto a Confederação Nacional dos Municípios (CNM) estima que os prejuízos acumulados entre 2013 e 2024 ultrapassam R\$ 732 bilhões. Tais números evidenciam que o modelo atual de monitoramento pluviométrico — baseado em equipamentos analógicos, isolados e dependentes de coleta manual — tornou-se insuficiente para responder à velocidade e intensidade dos eventos climáticos modernos.

Nesse contexto, surge a necessidade de reinventar o papel do pluviômetro, transformando-o de um instrumento reativo de medição para um sistema inteligente capaz de prever riscos, integrar dados e atuar autonomamente. A proposta deste trabalho é desenvolver um **Pluviômetro Inteligente baseado em Sistema Ciber-Físico (CPS)**, que combina sensores IoT, conectividade de longo alcance (LoRaWAN/5G), processamento em nuvem e inteligência artificial para previsão antecipada de enchentes.

Ao integrar tecnologias de IoT, IA e automação, o sistema deixa de depender exclusivamente da intervenção humana e passa a operar como um agente ativo de proteção urbana, emitindo alertas, orientando rotas de mobilidade, acionando mecanismos de drenagem e auxiliando na tomada de decisões estratégicas para a Defesa Civil. Assim, este trabalho não apresenta apenas uma modernização de equipamento, mas uma proposta alinhada às diretrizes internacionais de **Smart Cities**, contribuindo para a construção de cidades mais resilientes, autônomas e preparadas para os desafios climáticos do século XXI.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Pluviômetros e suas limitações

O pluviômetro é um dispositivo utilizado para medir a precipitação pluviométrica. Os modelos convencionais, especialmente os de báscula, dependem de coleta manual ou armazenamento local, inviabilizando análises em tempo real. Isso cria um intervalo crítico entre o evento de chuva e sua interpretação, prejudicando ações emergenciais.

2.2 Sistemas Ciber-Físicos (CPS)

Sistemas Ciber-Físicos são integrações avançadas entre componentes físicos e digitais. Eles conectam sensores, redes de comunicação, processamento computacional e atuadores, permitindo tomada de decisão automática. No contexto urbano, os CPS são essenciais para automação, sustentabilidade e resposta rápida a eventos críticos.

2.3 IoT, IA e Smart Cities

As Smart Cities utilizam tecnologias digitais para melhorar serviços públicos, otimizar recursos e aumentar a qualidade de vida. Entre essas tecnologias destacam-se:

- **IoT**: sensoriamento em tempo real;
- **IA/ML**: identificação de padrões e previsão de eventos;
- **Infraestrutura inteligente**: comunicação e automação.

Quando aplicadas ao monitoramento ambiental, essas tecnologias tornam-se fundamentais para prevenção de enchentes, mitigação de riscos e planejamento urbano.

3. METODOLOGIA: ARQUITETURA E SOLUÇÃO

A solução proposta é o **Pluviômetro Inteligente**, que opera em um *loop* contínuo de inteligência. A arquitetura transforma o autômato em um verdadeiro Sistema Ciber-Físico (CPS).

3.1 Proposta da Arquitetura Tecnológica (CPS)

O novo autômato opera em uma sequência lógica que parte da coleta de dados até a ação automatizada:

1. **Sensores (IoT):** O pluviômetro é integrado com pluviômetros digitais de alta precisão, sensores de nível em rios/córregos e sensores de umidade do solo, que fornecem dados em **tempo real**. Estes componentes formam a "visão" do sistema, coletando dados de precipitação, taxa de escoamento e saturação do solo.
2. **Rede (LoRaWAN/5G):** Tecnologias como LoRaWAN (baixa potência e longo alcance) ou 5G (alta velocidade) são cruciais para transmitir os dados brutos e em tempo real dos sensores para a plataforma de análise.
3. **Plataforma / IA (O Cérebro):** A plataforma central de análise de dados (Nuvem) abriga o Módulo de IA/ML. Esta plataforma analisa padrões de chuva, prevê o risco de enchente (com base em dados históricos e umidade do solo) e toma a decisão **autônoma** de emitir alertas.
4. **Atuadores (Automação):** Os atuadores executam a decisão da IA. O Sistema de Disparo de Alertas emite alertas automáticos via SMS/App e ativa Painéis de Aviso em áreas de risco. Os atuadores também podem acionar dispositivos de infraestrutura, como bombas de drenagem.

3.2 Novas Funcionalidades Inteligentes

As novas funcionalidades transformam o medidor em um sistema de gestão de risco preditivo e autônomo:

- **Alerta Preditivo de Enchentes:** A funcionalidade principal é a capacidade de prever enchentes com uma antecedência crítica. O sistema calcula o risco de transbordamento com base na taxa de chuva e saturação do solo e dispara alertas automaticamente para a população e equipes de emergência (Defesa Civil) sem intervenção humana, otimizando o tempo de resposta.
- **Integração com Mobilidade Urbana:** A solução se integra ao sistema de tráfego, permitindo que a IA atue redirecionando o tráfego para longe das áreas afetadas ou acionando a mudança de rotas em aplicativos de tráfego (GPS) e em painéis de trânsito.
- **Gestão Otimizada de Infraestrutura (Proatividade):** O sistema fornece dados açãoáveis, atuando como um gatilho para ligar ou desligar automaticamente bombas de drenagem em galerias pluviais, baseando-se no volume de água previsto. Isso garante o uso eficiente de recursos e optimiza o consumo de energia.

4. IMPLEMENTAÇÃO E MÉTRICAS DE SUCESSO

Esta fase detalha o plano de ação (roteiro) e as métricas (KPIs) para comprovar a eficiência do projeto.

4.1 Roteiro de Ação da Solução (Ação Gradual)

O roteiro descreve as etapas para a integração do Pluviômetro Inteligente à infraestrutura da cidade:

- 1. Etapa 1: Projeto Piloto e Instalação de Hardware.** O foco principal é testar a conectividade e os sensores (IoT). Consiste na instalação dos primeiros 10 a 15 kits de sensores em uma bacia hidrográfica piloto de alto risco para garantir que a rede (LoRaWAN/5G) funcione e que os dados cheguem de forma confiável à Nuvem.
- 2. Etapa 2: Treinamento da IA e Desenvolvimento do Alerta.** O foco é criar o "Cérebro Preditivo" (IA/ML). Envolve desenvolver e treinar o algoritmo de IA com dados históricos de chuva, topografia e inundações da área piloto, além de desenvolver o software de atuação para disparar alertas automáticos. O principal objetivo é validar a precisão da previsão.
- 3. Etapa 3: Expansão e Integração Total.** O foco é gerar impacto em escala e integrar os sistemas. Esta fase consiste na expansão do projeto para toda a área urbana de risco e na integração total do sistema de alertas com painéis de trânsito variável e aplicativos de mobilidade para desvio de rotas.

4.2 Definição de KPIs (Métricas de Sucesso)

Os indicadores definidos medirão o impacto do autômato modernizado nos pilares de *Smart City* (Cidadão, Economia, Proatividade):

- KPI 1: Tempo de Antecipação Média do Alerta (Foco: Segurança/Cidadão).** Mede a diferença de tempo entre a emissão do Alerta Preditivo e o início real da inundaçāo, aumentando o tempo de reação da população e da Defesa Civil.
- KPI 2: Redução de Custos Operacionais Pós-Enchente (Foco: Economia/Proatividade).** Mede a diminuição do custo médio anual de reparos de infraestrutura (estradas, pontes, drenagem) e emergência, comparando com a média dos anos anteriores à implementação.
- KPI 3: Acurácia do Modelo Preditivo (IA/ML) (Foco: Autonomia/Eficiência Técnica).** Representa a porcentagem de vezes em que o sistema previu uma inundaçāo com o nível de severidade correto versus o total de alertas emitidos. O objetivo é garantir a confiança no sistema autônomo.

5. Limitações do Sistema Proposto

Embora o Pluviômetro Inteligente como Sistema Ciber-Físico (CPS) represente um avanço significativo para o monitoramento ambiental urbano, algumas limitações devem ser consideradas. A primeira delas refere-se à **dependência da infraestrutura de comunicação**, especialmente em regiões onde a cobertura LoRaWAN ou 5G ainda é limitada. Em situações de falha de rede, a transmissão de dados pode sofrer interrupções, comprometendo a emissão dos alertas.

Outra limitação importante envolve **falhas físicas nos sensores**, comuns em ambientes externos sujeitos a intempéries. A água, os detritos e a falta de manutenção periódica podem afetar a precisão das leituras. Além disso, a calibração inadequada dos sensores pode resultar em medições inconsistentes, prejudicando a qualidade das previsões.

Por fim, existe a limitação do **modelo de IA**, que depende fortemente da qualidade e diversidade dos dados históricos. Em áreas com poucos registros de eventos climáticos extremos, o sistema pode apresentar menor acurácia durante os primeiros meses de operação.

6. Melhorias Futuras do Sistema

Para aumentar a robustez e eficiência do sistema, algumas melhorias futuras podem ser incorporadas. Uma delas é a implementação de **sensores redundantes**, garantindo que falhas isoladas não prejudiquem o funcionamento geral da rede. A redundância, aliada à autocalibração automática, eleva o nível de precisão e reduz a necessidade de intervenção humana.

Outra melhoria consiste na integração do sistema com **redes de satélites meteorológicos**, ampliando a capacidade de previsão ao combinar dados locais com previsões macroclimáticas. Esse recurso aumentaria significativamente a antecedência dos alertas, permitindo respostas ainda mais rápidas da Defesa Civil.

Além disso, pode-se implementar um módulo de **aprendizado contínuo (online learning)**, no qual a IA atualiza seu modelo em tempo real conforme novos dados de chuva e inundação são registrados. Essa automação torna o sistema mais adaptativo e preciso.

7. Validação dos Dados da Inteligência Artificial

A validação do modelo de IA é uma etapa crítica para garantir a confiabilidade das previsões de enchentes. Para isso, utiliza-se um conjunto de dados históricos dividido em **base de treinamento** e **base de teste**, permitindo avaliar a capacidade do sistema de prever eventos climáticos que não foram usados no treinamento.

Técnicas como **validação cruzada (k-fold cross-validation)** e **matrizes de confusão** são aplicadas para mensurar métricas como precisão, sensibilidade e especificidade. A partir desses indicadores, é possível verificar se o sistema está detectando corretamente eventos reais ou produzindo falsos alarmes.

Além disso, utiliza-se o cálculo da **Acurácia de Previsão de Enchentes (APE)**, que relaciona o número de alertas corretos com o total de alertas emitidos. Esse indicador é inspirado nas metodologias operacionais do Cemaden, que afirma que “a emissão de alertas eficazes depende da integração entre modelos numéricos, dados de campo e validação contínua para reduzir incertezas” (CEMADEN, 2024).

8. Aprofundamento Científico – Explicação Técnica Avançada

A modelagem de previsão utilizada no sistema baseia-se em algoritmos de **aprendizado supervisionado**, como Random Forest e Gradient Boosting, amplamente usados em hidrologia urbana por sua capacidade de lidar com dados não-lineares. Esses modelos conseguem correlacionar variáveis como intensidade de precipitação, saturação do solo e velocidade do escoamento superficial.

Do ponto de vista físico, o sistema se apoia nos princípios da hidrologia urbana, especialmente na relação entre **capacidade de infiltração do solo e tempo de concentração das bacias hidrográficas**. Quando o solo se aproxima da saturação, a capacidade de infiltração cai drasticamente, aumentando o escoamento superficial e acelerando a formação de enxurradas — fenômeno amplamente descrito por Tucci (2009) em estudos de hidrologia urbana.

Adicionalmente, o CPS opera em um ciclo contínuo de **percepção–processamento–ação**, característica fundamental desses sistemas. Essa estrutura é essencial para garantir que os dados coletados não sejam apenas armazenados, mas convertidos em ações tangíveis em tempo real.

9. Exemplos Reais de Cidades que já Utilizam Sistemas Semelhantes

Diversas cidades ao redor do mundo já utilizam tecnologias semelhantes à proposta deste trabalho.

- **Curitiba (Brasil)**: utiliza desde 2019 sensores de nível de rios integrados com pluviômetros automáticos e IA para prever riscos de enchentes.
- **São Paulo (Brasil)**: o Centro de Gerenciamento de Emergências (CGE) opera sensores IoT distribuídos para monitoramento de microbacias urbanas.
- **Seul (Coreia do Sul)**: possui um sistema de drenagem inteligente com sensores de chuva e de fluxo que acionam bombas automaticamente.
- **Roterdã (Holanda)**: emprega CPS ambientais para prever enchentes costeiras, integrando dados de marés, pressão atmosférica e chuva.
- **Nova York (EUA)**: utiliza sensores e modelos preditivos após o furacão Sandy, com foco em alertas antecipados de inundações.

Essas cidades demonstram que sistemas inteligentes baseados em IoT, IA e CPS não são apenas viáveis, mas representam o futuro da resiliência urbana

10. Conclusão

A modernização do pluviômetro tradicional para um **Sistema Ciber-Físico (CPS)** demonstra que tecnologias emergentes podem transformar profundamente a gestão de riscos climáticos nas cidades brasileiras. A integração entre sensores IoT, redes de comunicação, inteligência artificial e automação cria um ecossistema capaz de monitorar o ambiente em tempo real, prever enchentes com antecedência e atuar de forma coordenada para reduzir danos humanos e materiais. Diferentemente dos métodos convencionais, o CPS opera de forma contínua, autônoma e adaptativa, fornecendo aos gestores públicos dados precisos e acionáveis.

Os resultados esperados — aumento do tempo de antecedência dos alertas, maior precisão preditiva e redução significativa dos custos pós-desastre — evidenciam o potencial dessa solução. Além disso, a análise das limitações atuais e das melhorias futuras indica que o projeto pode evoluir para incorporar redundância sensorial, modelos de aprendizagem contínua e integração com redes meteorológicas globais, tornando-se ainda mais robusto.

A experiência de cidades como Curitiba, São Paulo, Seul, Roterdã e Nova York mostra que sistemas inteligentes baseados em IoT e IA já são uma realidade internacional e representam o caminho para cidades mais seguras e resilientes. Nesse sentido, o Pluviômetro Inteligente proposto neste trabalho contribui de maneira significativa para o avanço tecnológico da gestão ambiental no Brasil, reforçando a importância da inovação como ferramenta central no enfrentamento das mudanças climáticas.

Assim, conclui-se que o CPS desenvolvido não apenas moderniza um instrumento histórico da hidrologia, mas redefine seu papel, inserindo-o em um ecossistema urbano inteligente capaz de salvar vidas, otimizar recursos e promover desenvolvimento sustentável.

11. Referências

- AGÊNCIA BRASIL. Chuvas no RS podem impactar em R\$ 97 bilhões a economia nacional. 25 jul. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- AGÊNCIA BRASIL. RS: organismos internacionais calculam danos de R\$ 88,9 bi com chuvas. 28 nov. 2024.
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Relatórios Operacionais – 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- CNM – Confederação Nacional dos Municípios. Prejuízos com desastres climáticos no Brasil entre 2013 e 2024. Brasília, 2025.
- ONU – Organização das Nações Unidas. Relatórios sobre mudanças climáticas. 2024.
- PODER360. Enchentes no RS causaram prejuízo de R\$ 87 bilhões, diz BID. 23 set. 2024.