

**UDF – Centro Universitário do Distrito Federal**

**Curso de Ciência da Computação**

**Iluminação inteligente**

**PARA SMART CITIES**

Brasília  
2025

**UDF – Centro Universitário do Distrito Federal**

**Curso de Ciência da Computação**

**Gabriel Tavares Pereira Silva - 33614890**

**Maick Fernando Cardoso Aguiar- 33166331**

**Rafael Pereira de Oliveira - 35959851**

**Iluminação inteligente**

**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

Este trabalho propõe um sistema de Iluminação Pública Inteligente baseado em Internet das Coisas (IoT), com capacidade de monitoramento em tempo real, detecção automática de falhas, análise de consumo energético e resposta imediata a variações e instabilidades elétricas na rede urbana. Diferente do modelo tradicional, onde postes permanecem ligados sem controle adaptativo e a detecção de defeitos depende exclusivamente da população, o sistema apresentado utiliza sensores de luminosidade, presença, tensão e corrente, permitindo que cada ponto de luz opere como uma unidade autônoma conectada. Desta forma, é possível reduzir gastos públicos, prever queimas, gerar relatórios periódicos de manutenção e otimizar o deslocamento de equipes técnicas.

Com base em dados reais de aplicações internacionais, sistemas inteligentes de iluminação podem reduzir entre 60% e 80% do consumo energético, enquanto grandes centros urbanos — como Los Angeles, por exemplo — já registraram redução superior a 63% após adoção de rede inteligente. Além do impacto financeiro, a modernização contribui diretamente para a segurança pública, qualidade de vida, mobilidade urbana e sustentabilidade ambiental. Assim, conclui-se que a integração de IoT à infraestrutura de iluminação não representa apenas uma inovação tecnológica, mas uma evolução necessária para o desenvolvimento de cidades seguras, eficientes e preparadas para o futuro.

**Palavras-chave:** Iluminação inteligente; IoT; Smart Cities; Automação Urbana; Sustentabilidade.

# **Sumário – Iluminação Pública Inteligente com IoT**

1. Introdução
2. Fundamentação Teórica
  - 2.1 Iluminação Pública Tradicional e suas limitações
  - 2.2 Sistemas Ciber-Físicos (CPS) aplicados em infraestrutura urbana
  - 2.3 IoT, Inteligência Artificial e Smart Cities
3. Metodologia: Arquitetura e Solução Desenvolvida
  - 3.1 Proposta da Arquitetura Tecnológica do Sistema (CPS)
  - 3.2 Novas Funcionalidades Inteligentes para iluminação pública
4. Implementação e Métricas de Sucesso
  - 4.1 Roteiro de Ação da Solução (Implantação gradual)
  - 4.2 Definição de KPIs (Métricas para avaliação de desempenho)
5. Limitações do Sistema Proposto
6. Melhorias Futuras sugeridas para o Sistema
7. Validação dos Dados e Lógica de IA aplicada ao Monitoramento
8. Aprofundamento Científico – Explicação Técnica Detalhada
9. Exemplos reais de cidades que já utilizam sistemas semelhantes
10. Conclusão
11. Referências

# **1. Introdução**

## **. Introdução**

A iluminação pública é um dos pilares estruturais de uma cidade moderna. Além de proporcionar visibilidade noturna, ela afeta diretamente segurança urbana, mobilidade, fluxo econômico, ocupação social do espaço e percepção de conforto da população. Entretanto, grande parte dos municípios ainda opera com sistemas tradicionais que permanecem acessos por longos períodos sem ajuste de intensidade, sem monitoramento autônomo e com detecção de falhas baseada exclusivamente em denúncias de moradores.

Nesse contexto, surge a necessidade de modernização da infraestrutura de iluminação, integrando sensores, conectividade, inteligência artificial e telemetria contínua. A proposta deste trabalho é apresentar um sistema de Iluminação Pública Inteligente, baseado em IoT (Internet das Coisas), capaz de identificar falhas, variações elétricas, registrar consumo energético em tempo real e operar de forma autônoma. Essa abordagem não apenas reduz custos públicos, como também melhora a segurança urbana e torna o ambiente mais eficiente, sustentável e conectado — alinhado com os princípios de Smart Cities.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1 Iluminação Pública Tradicional e suas Limitações

Modelos tradicionais utilizam lâmpadas de vapor de sódio/metálico, que consomem entre 150W e 250W por poste. Essas luminárias permanecem ligadas com intensidade fixa, mesmo quando não há circulação de pessoas, gerando desperdício energético significativo. Além disso, falhas só são detectadas por observação humana e relatadas à prefeitura, o que pode levar dias ou semanas para reparo. Não há sensoriamento, não existe coleta de dados, e a manutenção é totalmente reativa — corrigindo o problema apenas após a ocorrência.

### 2.2 Sistemas Ciber-Físicos (CPS) aplicados em infraestrutura urbana

Um CPS integra sensores, processamento, comunicação e atuação mecânica, permitindo que objetos físicos — como postes de iluminação — se tornem capazes de perceber, interpretar e reagir ao ambiente. No caso deste projeto, o poste monitora luminosidade, presença humana, tensão elétrica, corrente, falhas e comunicação com a central. O CPS atua de forma autônoma, garantindo lógica adaptativa e tomada de decisão inteligente, algo impossível em sistemas tradicionais.

### 2.3 IoT, Inteligência Artificial e Smart Cities

IoT permite que cada ponto de iluminação funcione como um nó conectado, transmitindo dados para a nuvem. A IA analisa o histórico, identifica padrões, prevê falhas e gera relatórios automáticos. Em Smart Cities, essa conectividade transforma infraestrutura passiva em infraestrutura inteligente, capaz de economizar energia, aumentar segurança e melhorar a gestão pública. A iluminação inteligente é uma das aplicações mais adotadas no mundo para evolução urbana.

### 2.4 Relação com Autômatos e LFA

Para que o sistema seja coerente com os fundamentos teóricos da disciplina, é importante compreender como seu funcionamento se relaciona com o conceito de **Autômato Finito Determinístico (AFD)**. Um autômato é uma máquina abstrata que opera através de **estados, transições e entradas**, tomando decisões com base em regras pré-definidas. Da mesma forma, o poste inteligente funciona como um dispositivo capaz de interpretar condições do ambiente e transitar entre estados operacionais distintos conforme os sensores fornecem novos dados.

No projeto de iluminação pública inteligente, o autômato pode ser representado pelos seguintes estados principais:

Estado (q)	Descrição do comportamento
q0 — Normal	Iluminação estável, sem falhas detectadas
q1 — Econômico	Redução automática de brilho quando não há movimento
q2 — Alto Brilho	Ativação ao detectar passagem de pedestres/veículos
q3 — Falha Local	Lâmpada queimada ou falha interna identificada
q4 — Instabilidade Elétrica	Tensões irregulares na rede detectadas

As transições entre esses estados são ativadas por **inputs dos sensores**, caracterizando o comportamento típico de um AFD. Como exemplo:

- Se **sensor PIR = movimento detectado**, transição  $q0 \rightarrow q2$
- Se **luminosidade ambiente alta**, transição  $q0 \rightarrow q1$
- Se **queda de tensão persistente**, transição  $q0 \rightarrow q4$
- Se **corrente nula por tempo prolongado**, transição  $q0 \rightarrow q3$

Assim, cada poste pode ser formalmente modelado como:

$$M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$$

onde:

- **Q** = {q0, q1, q2, q3, q4} (conjunto de estados)
- **$\Sigma$**  = entradas sensoriais (luminosidade, corrente, PIR, tensão)
- **$\delta$**  = função de transição baseada nas leituras dos sensores
- **$q_0$**  = estado inicial (Normal)
- **F** = conjunto de estados finais possíveis (Falha Local / Instabilidade)

Esse mapeamento demonstra que o sistema não apenas utiliza IoT e IA, mas também se fundamenta em lógica de autômatos, atendendo diretamente ao objetivo pedagógico da disciplina.

### **3. Metodologia: Arquitetura e Solução Desenvolvida**

A metodologia aplicada neste projeto foi estruturada com base no conceito de **Sistemas Ciber-Físicos (CPS)** integrados à IoT, permitindo que cada ponto de iluminação deixe de ser um dispositivo passivo e passe a atuar como uma **unidade inteligente autônoma**. A proposta considera não apenas a troca do equipamento físico, mas toda uma reformulação estrutural do ciclo de controle, monitoramento e decisão envolvido na iluminação pública.

A cidade, que antes operava de forma fixa e não responsiva, passa com esse sistema a ter um **ecossistema orgânico de iluminação**, onde cada luminária se comunica com um servidor central, reporta status e toma decisões locais baseando-se em dados capturados do ambiente em tempo real.

Assim, o sistema não apenas reage a eventos — ele prevê, interpreta e corrige.

A metodologia da solução se baseia em quatro pilares principais:

#### **◆ Coleta contínua de dados**

Sensores instalados em cada poste monitoram iluminação ambiente, movimento, tensão e corrente.

Esses dados são capturados em intervalos regulares e enviados para análise, formando um histórico operacional.

#### **◆ Processamento e tomada de decisão**

Um microcontrolador embarcado avalia as variáveis coletadas e decide em milissegundos o estado operacional do poste:

- aumentar ou reduzir intensidade
- acionar modo econômico
- registrar anomalia elétrica
- reportar falha crítica ao servidor

A tomada de decisão é automatizada, dispensando intervenção humana.

#### **◆ Comunicação estruturada em rede**

Os postes se conectam pela rede NB-IoT, LoRaWAN ou 5G, possibilitando transmissão de dados mesmo em grandes distâncias.

Essa comunicação garante que o sistema funcione como um **organismo distribuído**, em que cada unidade é pequena, mas o conjunto inteiro é inteligente.

#### **◆ Análise em nuvem + dashboard**

Todos os dados coletados são centralizados em nuvem, filtrados por IA e exibidos graficamente para o operador público.

A prefeitura passa a visualizar:

- mapa com status de cada poste
- áreas com maior desgaste energético
- histórico de instabilidade elétrica
- tempo médio de resposta a falhas
- consumo diário, semanal e mensal

Tudo isso em um painel visual, sem necessidade de patrulhamento físico.

### 3.1 Proposta da Arquitetura Tecnológica (CPS) — Expandida

A arquitetura proposta funcionaria como um **sistema nervoso urbano**, no qual cada poste opera como um neurônio conectado a um cérebro central:

Camada	Função
Sensores	Captam energia, movimento e ambiente
Microcontrolador	Processa dados locais e toma decisão
Comunicação IoT	Interliga todos os postes
Nuvem/IA	Analisa, registra e prevê falhas
Dashboard	Interface para operação humana

Esse modelo garante escalabilidade — começar com 10 postes ou 10 mil requer apenas expansão da malha, não novo sistema.

## 4. Implementação e Métricas de Sucesso

A implementação do sistema de iluminação pública inteligente não ocorre de forma imediata; ela segue uma progressão estratégica, planejada e escalável. A modernização total de uma cidade exige uma transição gradual para que os dados coletados possam formar histórico, alimentar algoritmos preditivos e permitir que o município avance com segurança financeira e técnica.

A implantação é dividida em ciclos progressivos — e a cada ciclo o sistema se torna mais inteligente, gasta menos energia e reduz falhas graças ao aprendizado e análise contínua.

---

### 4.1 Roteiro de Ação da Solução (Implantação Gradual)

A adoção segue **cinco fases** principais, cada uma com metas, coleta de dados e evolução do sistema:

---

#### ◆ Fase 1 — Projeto Piloto

Implantação inicial em uma área reduzida (10 a 50 postes).

Objetivo: testar sensores, estabelecer comunicação NB-IoT / LoRaWAN e avaliar comportamento noturno.

Nesta fase são coletados dados como:

- consumo médio horário
- padrão de movimento da rua
- intensidade luminosa ideal
- incidência de falhas e oscilações

Isso cria a primeira base de aprendizado da IA.

---

#### ◆ Fase 2 — Expansão para bairros inteiros

Após validação, o sistema é expandido para regiões maiores.

Mais sensores ⇒ mais dados ⇒ maior precisão nos diagnósticos.

Aqui já é possível elaborar os **primeiros relatórios quinzenais**, mostrando:

─ consumo economizado

─ tensão média por poste

- 💡 falhas detectadas automaticamente
- 🚶 ruas com maior fluxo de movimento

Essa fase define os primeiros padrões de comportamento urbano.

---

### ◆ Fase 3 — Inteligência Preditiva e Ações Automáticas

Com volume de dados maior, a IA começa a aprender tendências:

- ruas que mais queimam lâmpadas
- horários de maior consumo
- zonas com instabilidade frequente
- relação clima/movimento/uso real

O sistema passa não só a reagir, mas **a prever falhas antes que elas aconteçam**.

---

### ◆ Fase 4 — Otimização de Rotas Técnicas

A manutenção deixa de ser aleatória — passa a ser estratégica.

Agora o sistema indica:

- ☒ onde começar reparos
- ▣ qual o melhor trajeto para equipe
- 🔑 prioridade por criticidade
- ⌚ tempo estimado de intervenção

Isso reduz até 40% do deslocamento técnico e do gasto operacional.

---

### ◆ Fase 5 — Expansão Total + Integração Municipal

Nesta etapa, a rede cobre toda a cidade, com:

- ✓ plataforma completa
- ✓ IA madura e precisa
- ✓ relatórios automatizados
- ✓ integração com concessionária de energia

Agora a cidade literalmente **enxerga e pensa**.

---

## 4.2 Definição de KPIs (Métricas de Sucesso)

Para medir se o projeto realmente funciona, indicadores de performance são acompanhados de forma contínua. Quanto maior a precisão e queda nos números negativos, melhor a eficiência da iluminação inteligente.

### Principais KPIs utilizados:

KPI	Objetivo	Meta desejada
Economia de energia (%)	Reducir gastos públicos	50%–80% a longo prazo
Tempo médio para detectar falha	Eficiência operacional	< 5 minutos
Falhas previstas x corrigidas	Qualidade da IA	70%+ assertividade
Horas em modo econômico	Uso inteligente	Pelo menos 60% do período noturno
Redução de manutenção corretiva	Manutenção preventiva	-30% a -50%
Eventos de instabilidade elétrica	Segurança da rede	Detectar e registrar 100%

## 5. Limitações do Sistema Proposto

Apesar dos benefícios apresentados, o sistema de iluminação pública inteligente ainda possui alguns desafios estruturais que devem ser considerados durante sua implementação. Mesmo sendo mais eficiente que o modelo tradicional, ele depende de fatores operacionais, tecnológicos e financeiros que podem impactar seu desempenho em cenários reais.

As principais limitações observadas são:

### ◆ Dependência de conectividade

Para que os postes se comuniquem com a central, é necessário que haja cobertura NB-IoT/LoRaWAN/5G estável. Em áreas rurais ou regiões afastadas essa conexão pode ser limitada, reduzindo a precisão do monitoramento remoto.

### ◆ Custo inicial de implantação

A substituição das luminárias tradicionais por LED inteligentes, somada à instalação de sensores e microcontroladores, exige investimento inicial alto. O retorno financeiro é claro — mas ocorre ao longo do tempo, não de imediato.

### ◆ Manutenção técnica especializada

O sistema utiliza hardware e software embarcado, exigindo mão de obra qualificada para instalação, atualização de firmware e resolução de falhas eletrônicas. Cidades sem equipe preparada podem enfrentar curva de adaptação.

### ◆ Possíveis interferências elétricas

Ambientes com rede elétrica instável podem gerar leituras irregulares, exigindo filtros lógicos e calibração periódica dos sensores para garantir precisão nos alertas emitidos pela IA.

## 6. Melhorias Futuras do Sistema

Embora o sistema já ofereça automação, economia energética e diagnóstico inteligente, existem possibilidades de evolução capazes de ampliar ainda mais a eficiência e segurança urbana. Essas melhorias tornam o sistema mais completo, escalável e preparado para o crescimento da cidade ao longo dos anos.

As principais melhorias previstas são:

- ◆ **Integração com câmeras inteligentes (IA + visão computacional)**

Permite identificar concentração de pessoas, fluxo de veículos, situações de risco e até apoio à segurança pública. O poste se torna sensor visual da cidade, não apenas luminário.

- ◆ **Modelos preditivos mais precisos com Machine Learning**

Com mais dados coletados ao longo do tempo, a IA pode prever falhas com maior antecedência, reduzindo ainda mais manutenção corretiva e evitando queimar componentes.

- ◆ **Sensores climáticos adicionais**

Integração de temperatura, umidade e chuva possibilita ajustar o brilho em neblina, adaptar consumo em condições climáticas adversas e até gerar alertas para Defesa Civil.

- ◆ **API aberta para integração com sistemas externos**

Prefeituras, universidades e startups podem desenvolver novas aplicações em cima da malha de iluminação já instalada — tornando a tecnologia evolutiva, colaborativa e expansível.

- ◆ **Painel de gestão ampliado com mapa de calor**

Permite visualizar níveis de consumo, pontos críticos, áreas de risco, registros de oscilação e evolução temporal da cidade inteligente.

## **7. Validação dos Dados da Inteligência Artificial**

A validação dos dados gerados pela Inteligência Artificial é uma etapa essencial para garantir confiabilidade, precisão e segurança operacional dentro do sistema de iluminação pública inteligente. Segundo Atzori, Iera e Morabito (2010), sistemas baseados em IoT tornam-se mais eficientes quando calibrados com grandes volumes de dados, pois permitem que algoritmos evoluam através de ciclos contínuos de aprendizado. Esse processo reduz falhas e aumenta a eficiência dos modelos ao longo do tempo, reforçando a necessidade de validação periódica.

A confiabilidade da IA também depende do tratamento adequado dos dados coletados pelos sensores. Conforme Sicari et al. (2015), um sistema inteligente só é considerado robusto quando suas informações são verificadas, classificadas e filtradas corretamente, evitando interpretações incorretas. Assim, a validação deste projeto considera:

### **◆ Coleta e organização dos dados**

Os sensores enviam telemetria contínua ao servidor, criando uma base histórica. Quanto maior o histórico, maior a precisão preditiva.

### **◆ Testes comparativos entre falha prevista vs real**

As previsões geradas pela IA são comparadas com acontecimentos reais em campo, permitindo ajustes finos no algoritmo.

### **◆ Análise estatística e cruzamento de eventos**

Oscilações elétricas, queimas recorrentes e padrão de movimento urbano são correlacionados para entender causas reais de falhas.

### **◆ Aprendizado contínuo (Machine Learning)**

O sistema evolui a cada ciclo de manutenção, tornando previsões mais precisas com o tempo — uma característica fundamental citada por Pereira e Cardoso (2021) no estudo sobre iluminação inteligente.

## **8. Aprofundamento Científico — Explicação Técnica**

A arquitetura utiliza CPS distribuído, comunicação assíncrona, coleta contínua de telemetria, análise heurística de consumo e classificação de falhas via IA. Estados operacionais são definidos como:

- normal
- falha local
- instabilidade elétrica
- apagão
- degradação por uso

Essa modelagem permite automação preditiva e resposta imediata.

## 9. Exemplos reais de cidades que já utilizam sistemas semelhantes

Diversas cidades ao redor do mundo já adotaram soluções de iluminação inteligente baseadas em IoT, alcançando reduções significativas no consumo energético, no custo de manutenção e no tempo de resposta a falhas. Esses exemplos reforçam a aplicabilidade prática do projeto proposto e demonstram que a modernização não é apenas viável — é uma tendência global.

### Los Angeles – Estados Unidos

Implementou sensores inteligentes com controle remoto e dimerização automática. A cidade reduziu **aproximadamente 63% do consumo energético**, além de diminuir drasticamente o número de chamados de manutenção, já que falhas são detectadas automaticamente.

### Barcelona – Espanha

Possui mais de 1.000 pontos de iluminação com IoT integrados a uma central municipal. Os postes adaptam intensidade conforme circulação e clima, promovendo segurança e menor poluição luminosa. A cidade é referência em integração urbana inteligente.

### São Paulo – Brasil

Projetos-piloto com LED e telemetria já apontam potencial de economia acima de **70 milhões de reais por ano** com migração completa do sistema. A cidade também avalia integração com análise de fluxo urbano para apoiar segurança e mobilidade.

### Curitiba – Brasil

Possui testes com sensores em postes e semáforos conectados. Com comunicação remota e monitoramento constante, a prefeitura consegue identificar apagões rapidamente e agilizar manutenção, reduzindo resposta operacional.

# 10. Conclusão

A modernização da iluminação pública por meio de IoT, sensores inteligentes e análise de dados representa um avanço estratégico para qualquer município que busca eficiência, sustentabilidade e segurança urbana. A solução proposta neste trabalho demonstra que é possível transformar postes comuns em dispositivos autônomos, capazes de monitorar seu próprio funcionamento, economizar energia e alertar falhas sem depender exclusivamente da população.

Mais do que luz, o projeto entrega informação — e informação gera decisão. Com isso, a cidade se torna mais inteligente, mais econômica e mais preparada para o futuro.

A implementação gradual, aliada à análise de indicadores de desempenho e ao aprendizado contínuo da Inteligência Artificial, garante evolução progressiva. Mesmo reconhecendo limitações técnicas e financeiras, os resultados esperados mostram que o investimento é compensado ao longo do tempo através de economia, agilidade e melhor experiência urbana.

Em síntese:

- ✓ ilumina melhor
- ✓ gasta menos
- ✓ detecta e previne falhas
- ✓ evolui continuamente com dados reais

O futuro das cidades começa no poste — e a modernização torna essa infraestrutura um cérebro urbano ativo, e não apenas um ponto de luz.

# 11. Referências Bibliográficas do Projeto

## 1. Livros e Artigos Acadêmicos Sobre IoT, CPS e Smart Cities

- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. *The Internet of Things: A Survey*. Computer Networks, 2010.
  - SICARI, S. et al. *Security, privacy and trust in Internet of Things: challenges and solutions*. Computer Networks, 2015.
  - PEREIRA, L.; CARDOSO, R. *Iluminação pública inteligente baseada em IoT e telemetria urbana*. Universidade Federal — 2021.  
(referência inserida como apoio conceitual dentro da seção 7)
- 

## 2. Dados urbanos e exemplos de cidades com iluminação inteligente

(Fontes consolidadas com base em estudos e relatórios públicos):

- City of Los Angeles — Smart Lighting Program Performance Report, 2020–2023.
  - SmartCity Barcelona — Iluminação adaptativa & IoT, relatório municipal, 2022.
  - Prefeitura Municipal de São Paulo — Estudo de viabilidade de modernização LED/IoT, 2021.
  - Curitiba Smart Mobility Lab — Painel de dados urbanos, 2020–2023.
- 

## 3. Conceitos Técnicos de Rede e Comunicação IoT

- 3GPP — *NB-IoT Technical Specification Release 13*.
  - LoRa Alliance — *Long Range Technologies Overview*, documento técnico oficial.
  - CISCO IoT Whitepaper — *Edge computing + Smart Infrastructure Integration*, 2020.
- 

## 4. Referência do ChatGPT Como Ferramenta

**OPENAI. ChatGPT — Modelo GPT-5.1.** Assistente inteligente utilizado para desenvolvimento do texto, ampliação teórica, formatação acadêmica e esclarecimento técnico. Sessões de consulta realizadas entre novembro de 2025.