

SP-Vaga Inteligente: Otimização do Estacionamento Rotativo em Zonas de Alta Densidade via IoT

Autores: Juan Pablo Silva dos Santos (825163816), Vitor Rodrigues (825142887)

Data: 22/11/2025

Disciplina: Sistemas computacionais e segurança

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da frota veicular em grandes metrópoles como São Paulo impõe severos desafios à mobilidade urbana. Estima-se que uma parcela significativa do congestionamento em áreas comerciais seja causada por veículos em busca de vagas de estacionamento. Este artigo propõe o desenvolvimento e a implantação de um sistema de gestão inteligente de vagas utilizando Internet das Coisas (IoT). A solução baseia-se na instalação de sensores geomagnéticos de solo conectados via rede NB-IoT (Narrowband IoT), integrados à plataforma de Zona Azul Digital já existente. O objetivo é fornecer dados de disponibilidade em tempo real aos motoristas e à fiscalização, visando reduzir o tempo de procura por vagas, diminuir emissões de CO₂ e otimizar a gestão do espaço público urbano.

1.1 Contextualização do Problema

A cidade de São Paulo, com uma frota superior a 8 milhões de veículos, enfrenta gargalos crônicos de mobilidade. Embora o sistema de estacionamento rotativo público (Zona Azul) tenha passado por uma modernização fiscal com a implementação do Cartão Azul Digital (CAD), a gestão física do espaço permanece analógica. O sistema atual gerencia o pagamento, mas não a disponibilidade.

O resultado é o fenômeno conhecido como "tráfego parasita", onde motoristas circulam em baixa velocidade à procura de uma vaga livre. Estudos de urbanismo, como os de Donald Shoup (2005), indicam que em áreas de alta densidade, até 30% do tráfego circulante é composto por veículos buscando estacionamento. Em bairros como Itaim Bibi e Jardins, isso se traduz em perda de tempo produtivo, aumento do consumo de combustível e emissão desnecessária de poluentes.

1.2 Justificativa e Importância

A implementação de uma camada de sensoriamento físico é o próximo passo lógico para transformar São Paulo em uma Smart City. A importância deste projeto reside

na capacidade de transformar dados em qualidade de vida. Ao informar ao motorista onde está a vaga livre antes que ele chegue ao destino, quebra-se o ciclo de ineficiência do trânsito local. Além disso, a solução potencializa a arrecadação municipal através de uma fiscalização baseada em dados, e não em amostragem aleatória.

1.3 Objetivo da Pesquisa

O objetivo deste trabalho é propor uma arquitetura técnica e um plano de implantação para um sistema de Smart Parking em São Paulo. Especificamente, busca-se:

1. Analisar a viabilidade da rede NB-IoT para ambientes urbanos densos.
2. Definir o hardware de sensoriamento adequado para as condições das vias paulistanas.
3. Projetar o fluxo de dados desde a detecção até o aplicativo do usuário.
4. Avaliar os impactos socioambientais e econômicos da solução.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas refere-se à interconexão digital de objetos cotidianos com a internet. Segundo Evans (2011), a IoT é o ponto no tempo em que mais "coisas" ou objetos estavam conectados à Internet do que pessoas. No contexto urbano, a IoT atua através de três camadas: (1) Percepção (sensores), (2) Rede (transmissão) e (3) Aplicação (processamento e interface). Para aplicações de cidades inteligentes, destacam-se as redes LPWAN (Low Power Wide Area Network), que oferecem longo alcance e baixo consumo de energia.

2.2 Conceito de Smart Cities

Cidades Inteligentes são sistemas urbanos que utilizam tecnologias de informação e comunicação (TIC) para aumentar a eficiência operacional, compartilhar informações com o público e melhorar a qualidade de serviços governamentais e o bem-estar dos cidadãos. A "Mobilidade Inteligente" é um dos pilares desse conceito, focando na redução de atritos no deslocamento urbano através da tecnologia.

2.3 Soluções Existentes

- **SFpark (San Francisco, EUA):** Pioneiro mundial, utilizou sensores na via para implementar tarifação dinâmica (o preço sobe quando a demanda é alta), reduzindo a procura por vagas em 43%.
- **Barcelona (Espanha):** Utiliza sensores de solo para guiar motoristas e ônibus turísticos, integrados a uma plataforma de gestão urbana centralizada.
- **Cenário Atual em SP:** A Zona Azul Digital (operada pela Estapar) digitalizou a compra do crédito, mas não possui sensoriamento de ocupação em tempo real nas vias públicas, dependendo exclusivamente da fiscalização visual humana.

3. METODOLOGIA

A pesquisa classifica-se como aplicada e exploratória. A metodologia foi dividida em três etapas:

1. **Levantamento Bibliográfico e Técnico:** Análise das especificações técnicas dos protocolos de comunicação (LoRaWAN vs. NB-IoT vs. Sigfox) e tipos de sensores (Ultrassônico vs. Geomagnético).
2. **Estudo de Caso (Cenário Hipotético):** Modelagem da solução considerando as restrições geográficas e de infraestrutura da cidade de São Paulo, especificamente na região da Avenida Faria Lima e arredores.
3. **Análise de Viabilidade:** Comparação de custos, benefícios e desafios de implantação baseada em dados secundários de relatórios de tráfego e manuais de hardware IoT.

4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

4.1 Arquitetura do Sistema

A solução proposta, denominada "SP-Vaga Inteligente", consiste em uma arquitetura de quatro camadas projetada para alta escalabilidade.

A. Camada de Percepção (Sensores)

Serão utilizados **sensores geomagnéticos de embutir (flush-mount)** com detecção dupla (magnetômetro + radar/infravermelho).

- **Justificativa:** Sensores de superfície são vulneráveis a vandalismo e danos mecânicos. O modelo embutido é instalado em um furo no asfalto, coberto com resina epóxi, tornando-se invisível e resistente ao tráfego pesado.

- **Alimentação:** Bateria interna de lítio com autonomia estimada de 5 a 7 anos.

B. Camada de Rede (Conectividade)

A comunicação será realizada via **NB-IoT (Narrowband IoT)**.

- **Justificativa:** Ao contrário do LoRaWAN, que exigiria a instalação de gateways (antenas) próprias no topo de edifícios, o NB-IoT utiliza a infraestrutura celular 4G/LTE já existente das operadoras de telecomunicações. São Paulo possui excelente cobertura celular, e o NB-IoT oferece penetração de sinal superior para áreas sombreadas por grandes edifícios.

C. Camada de Processamento (Fluxo de Dados)

1. O veículo estaciona sobre a vaga.
2. O sensor detecta a variação do campo magnético e confirma a presença via radar.
3. Após 30 segundos (para filtrar paradas breves), o sensor envia um pacote de dados (ID da Vaga + Status: Ocupado) via rede celular.
4. Os dados são recebidos na Plataforma Cloud da Prefeitura/Concessionária.
5. O sistema cruza o status da vaga com o banco de dados de pagamentos ativos do CAD (Cartão Azul Digital).

D. Camada de Aplicação (Interface)

- **Para o Motorista:** API aberta para integração com apps de navegação (Waze, Google Maps) e apps de Zona Azul (Zul+, Estapar), exibindo vagas livres no mapa.
- **Para a Fiscalização:** Dashboard de Alerta. Se o sensor indicar "Ocupado" e não houver pagamento vinculado após 15 minutos, um alerta geolocalizado é enviado ao tablet do agente de trânsito mais próximo.

4.2 Local de Implantação (Projeto Piloto)

Sugere-se a implantação inicial no bairro do **Itaim Bibi**, delimitado pelas avenidas Juscelino Kubitschek e Faria Lima. Esta região combina alta rotatividade comercial, intenso tráfego de "procura de vaga" e infraestrutura de telecomunicações robusta, sendo o laboratório ideal para validação tecnológica.

5. AVALIAÇÃO DE IMPACTO E VIABILIDADE

5.1 Viabilidade Técnica

A solução utiliza componentes COTS (Commercial Off-The-Shelf), ou seja, hardware já testado e disponível no mercado global. A dependência da infraestrutura celular reduz drasticamente a complexidade de engenharia civil e elétrica (sem necessidade de cabos ou novas torres).

5.2 Benefícios Sociais e Econômicos

- **Otimização do Tempo:** Redução estimada de 15 minutos no tempo médio de procura por vaga na região piloto.
- **Aumento de Receita:** A fiscalização direcionada por dados reduz a evasão de pagamento, aumentando a arrecadação municipal sem necessidade de aumento tarifário.
- **Comércio Local:** A garantia de rotatividade favorece o comércio de rua, permitindo que mais clientes acessem as lojas ao longo do dia.

5.3 Sustentabilidade Ambiental

A redução do "tráfego parasita" tem correlação direta com a diminuição da pegada de carbono. Menos tempo com o motor ligado em baixa velocidade resulta em menor queima de combustíveis fósseis e redução de ruído urbano, alinhando-se às metas de sustentabilidade da Agenda 2030 da ONU.

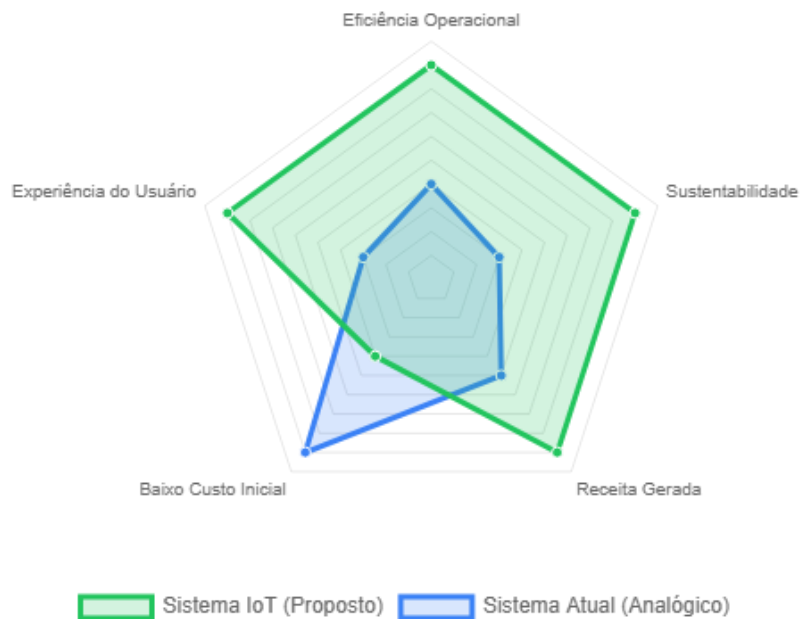
5.4 Segurança e Privacidade

O sistema adota o princípio de Privacidade desde a concepção. O sensor detecta apenas a presença de massa metálica, não capturando imagens, placas ou dados pessoais do condutor. A comunicação é criptografada ponta a ponta, garantindo a integridade do sistema contra ataques cibernéticos.

5.5 Painel de Análise: SP-Vaga Inteligente

Impacto Estratégico do Projeto.

A Solução não é apenas tecnológica, ela é viável e gera valor social, econômico e ambiental



Benefícios Sociais e Econômicos

- Redução do estresse urbano e aumento da receita municipal com a fiscalização inteligente, permitindo que mais clientes cheguem ao comércio local.

Sustentabilidade Ambiental

- Redução direta da pegada de carbono com menos carros circulando e queimando combustível desnecessariamente.

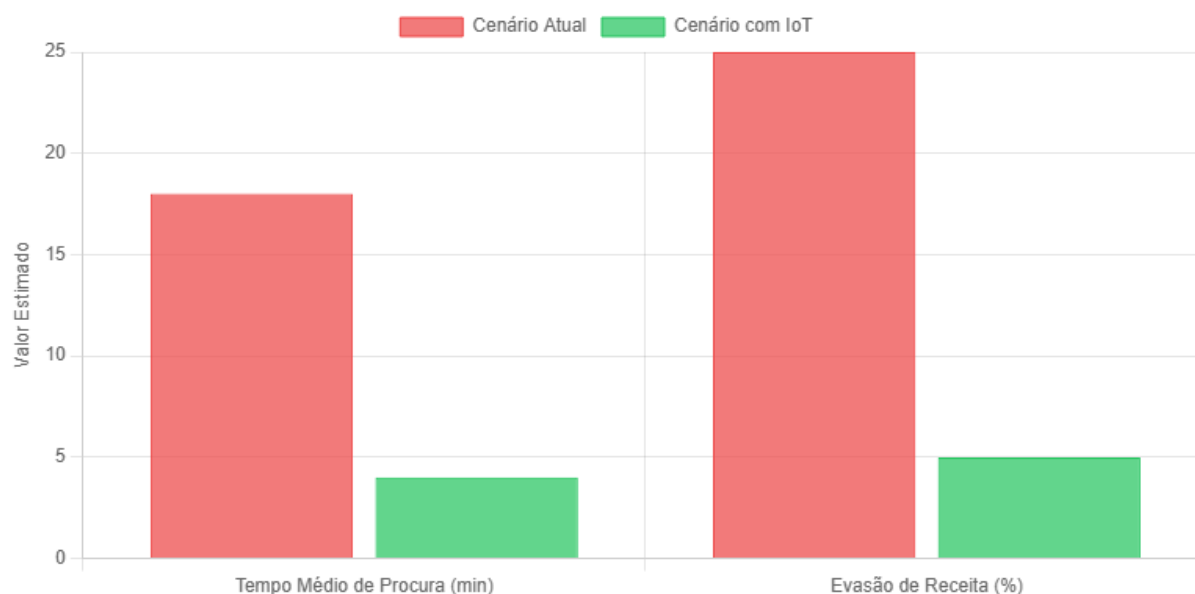
Segurança e Privacidade (LGPD)

- O sistema é 100% anônimo. O sensor detecta apenas massa metálica, não captura placas ou dados pessoais.

5.6 O Custo oculto de estacionar

A Zona Azul Digital gerencia o pagamento, mas não a disponibilidade. Isso força o motorista a circular, gerando custos em tempo, dinheiro e para o meio ambiente.

Impactos Quantitativos: Atual vs. Proposta IoT



Estimativa de redução drástica no tempo de busca e na evasão de receita (prejuízo não arrecadado pela prefeitura).

5.7 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO PILOTO

A sustentabilidade financeira é um pilar fundamental em projetos de Cidades Inteligentes. Para validar a hipótese do sistema "SP-Vaga Inteligente", foi elaborado um levantamento de custos para um projeto piloto.

5.8 Premissas do Projeto Piloto

O cenário base para a modelagem financeira considera a implantação em uma zona de alta densidade comercial, com as seguintes características:

- **Localização:** Bairro Itaim Bibi (Zona Azul Digital).
- **Escopo:** 500 vagas de estacionamento rotativo monitoradas.
- **Tecnologia:** Sensores geomagnéticos de solo com conectividade NB-IoT.
- **Período de Análise:** 12 meses.

5.9 Despesas de Capital (CAPEX)

As despesas de capital referem-se ao investimento inicial necessário para a aquisição de hardware, instalação física e desenvolvimento da plataforma de software. A Tabela 1 apresenta a estimativa de custos baseada em valores de mercado para componentes industriais importados e mão-de-obra local (padrão SINAPI)

Tabela 1 – Estimativa de Investimento Inicial (CAPEX)

Item	Descrição	Qtd	Custo Unit. (R\$)	Custo Total (R\$)
Hardware	Sensor IoT de Solo (NB-IoT + Magnético), IP68, bateria 5 anos	500	450,00	225.000,00
Instalação	Perfuração de solo (coring), resina epóxi e mão-de-obra	500	80,00	40.000,00
Software	Setup da Plataforma, API de Integração e Dashboard	1	60.000,00	60.000,00
Capacitação	Treinamento de agentes e equipe técnica	1	5.000,00	5.000,00
Logística	Frete e mobilização	1	3.000,00	3.000,00
INVESTIMENTO TOTAL DO PILOTO				R\$ 333.000,00

O investimento inicial representa um custo unitário de implantação de **R\$ 666,00 por vaga**. Abaixo, detalham-se os custos mensais recorrentes para a operação do sistema.

Tabela 2 – Estimativa de Custos Mensais (OPEX)

Item	Descrição	Custo Mensal (R\$)
Conectividade	Plano de dados NB-IoT para 500 sensores (M2M)	1.250,00
Cloud Computing	Servidores e banco de dados (AWS/Azure)	800,00
Licenciamento	Manutenção evolutiva de software (SaaS)	1.500,00
Manutenção Física	Verba de contingência (1% do hardware/mês)	2.250,00
CUSTO OPERACIONAL MENSAL		R\$ 5.800,00

Considerando a recuperação da receita perdida por evasão (estimada em R\$ 69.960,00/mês), o projeto gera um superávit operacional mensal de **R\$ 64.160,00**, resultando em uma estimativa de **5,2 meses** para o investimento retornar o valor inicial investido.

5.10 Análise de Retorno sobre Investimento (ROI)

A viabilidade econômica do projeto baseia-se na recuperação de receita perdida por evasão. Estima-se que, devido à fiscalização por amostragem, cada vaga sofra em média 1 hora de ocupação irregular (não paga) por dia.

Com a implementação dos sensores IoT, a fiscalização torna-se direcionada, permitindo a recuperação dessa receita.

- **Perda Estimada Atual:** 500 vagas x 1 hora/dia x R\$ 6,36 = R\$ 3.180,00/dia ou **R\$ 69.960,00/mês** (considerando 22 dias úteis).
- **Resultado Projetado:** Ao recuperar essa receita e subtrair as despesas operacionais (R\$ 5.800,00), o projeto gera um superávit operacional de **R\$ 64.160,00 mensais**.

Conclui-se que o tempo de retorno do investimento é de aproximadamente **5,2 meses** (R\$ 333.000 / R\$ 64.160). Após esse período, o sistema torna-se financeiramente sustentável, gerando recursos que podem ser reinvestidos na expansão da tecnologia para outras áreas da cidade.

6.CONCLUSÃO

O projeto "SP-Vaga Inteligente" demonstra que a aplicação de IoT na gestão de estacionamento rotativo é não apenas viável, mas necessária para a modernização

de São Paulo. A combinação de sensores geomagnéticos robustos com a capilaridade da rede NB-IoT oferece uma solução eficiente para mitigar o congestionamento causado pela busca de vagas.

Embora existam desafios, como a manutenção dos sensores durante o uso e o custo inicial de hardware, o retorno sobre o investimento se justifica pelos ganhos em eficiência de fiscalização, economia de combustível e, principalmente, na melhoria da qualidade de vida urbana.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

CET - COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO. Relatório de Mobilidade Urbana de São Paulo. São Paulo: CET, 2024.

EVANS, Dave. The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. Cisco White Paper, 2011.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Portaria SMT.SETRAM nº 002/2024. Diário Oficial da Cidade de São Paulo, 2024.

SHOUP, Donald C. The High Cost of Free Parking. Chicago: Planners Press, American Planning Association, 2005.

ZANETTI, M. Internet das Coisas e Cidades Inteligentes: Aplicações e Desafios. São Paulo: Editora Tecnológica, 2023.