

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

BRUNO CÉSAR NOGUEIRA

**Uma Proposta de Adaptação Dinâmica da
Iluminação Urbana baseada em IoT e DCOP**

NITERÓI

2024

BRUNO CÉSAR NOGUEIRA

Uma Proposta de Adaptação Dinâmica da Iluminação Urbana baseada em IoT e DCOP

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Ciência da Computação.

Orientadora:

Flávia Coimbra Delicato, Ph.D.

Co-orientadora:

Rebeca Campos Motta, D.Sc.

NITERÓI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

N778p Nogueira, Bruno César
Uma Proposta de Adaptação Dinâmica da Iluminação Urbana
baseada em IoT e DCOP / Bruno César Nogueira. - 2024.
112 f.

Orientador: Flávia Coimbra Delicato.
Coorientador: Rebeca Campos Motta.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Instituto de Computação, Niterói, 2024.

1. Internet das Coisas. 2. Cidades Inteligentes. 3. Sistemas
Adaptativos. 4. Otimização de Recursos. 5. Produção
intelectual. I. Delicato, Flávia Coimbra, orientador. II.
Motta, Rebeca Campos, coorientador. III. Universidade Federal
Fluminense. Instituto de Computação. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

BRUNO CÉSAR NOGUEIRA

Uma Proposta de Adaptação Dinâmica da Iluminação Urbana baseada em IoT e DCOP

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Ciência da Computação.

Aprovada em agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Flávia Coimbra Delicato, Ph.D. - Orientadora, UFF

Prof^a. Rebeca Campos Motta, D.Sc. - Co-Orientadora, UFF

Prof. Fábio Protti, D.Sc. - UFF

Prof. Claudio Miceli de Farias, D.Sc - UFRJ

NITERÓI
2024

"Crua Sacra sit mihi lux"

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por suas bênçãos infinitas e por estar sempre ao meu lado. Não importa onde eu esteja, sinto Sua presença constante e por isso sou eternamente grato.

A Nossa Senhora, estrela da manhã, pelo amparo, consolo e intercessão nos momentos de desânimo.

À minha amada esposa Emanoelly Nobre Bezerra da Rocha, por todo o apoio incondicional, compreensão e carinho que você me ofereceu durante este percurso, sua força e amor foram o farol que guiou cada palavra que escrevi.

Ao meu querido filho, Davi, e ao nosso bebê a caminho, Felipe, vocês são a luz da minha vida e a alegria de cada novo dia.

Expresso minha gratidão sincera aos meus familiares, amigos e colegas, cujo constante incentivo e apoio foram fundamentais em todas as etapas da minha vida.

Agradeço à Professora Flávia Coimbra Delicato por ter me aceitado como orientando. Sua cordialidade e apoio desde o início do mestrado foram cruciais para o meu progresso acadêmico e para o desenvolvimento desta pesquisa. Sua orientação e confiança no meu trabalho foram fundamentais.

À Professora Rebeca Campos Motta, estendo meus agradecimentos pelas dicas valiosas, pela paciência nas horas das intermináveis revisões e pelas contribuições essenciais que foram decisivas para o sucesso deste trabalho. Sua dedicação enriqueceu profundamente minha experiência acadêmica.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Fábio Protti e Prof. Claudio Miceli de Farias, agradeço pela gentileza e disponibilidade em colaborar com esta dissertação. Suas contribuições e avaliações foram de grande valor para a qualidade final deste trabalho.

Ao Instituto de Computação (IC) da Universidade Federal Fluminense e, em particular, ao Laboratório MídiaCom, sou grato pela infraestrutura disponibilizada, que foi essencial ao longo de todo o processo de elaboração deste trabalho.

À Marinha do Brasil, e especialmente à Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha, agradeço pela oportunidade de me proporcionar uma experiência enriquecedora que contribuiu significativamente para o meu crescimento profissional e acadêmico. Ao Centro de Apoio a Sistemas Operativos, na pessoa do meu orientador, o Capitão de Corveta (T) Leonardo Costa Ferreira, sou grato por me manter atento às metas e prazos e por todo apoio durante esse período.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa conquista. Esta vitória não é apenas minha, mas de todos nós que compartilhamos essa jornada.

Resumo

No paradigma das Cidades Inteligentes, a gestão eficiente dos recursos urbanos é essencial para promover sustentabilidade e qualidade de vida. A iluminação pública, um componente crucial da infraestrutura urbana, pode se beneficiar significativamente da integração com tecnologias IoT e sistemas adaptativos. Esses sistemas permitem a coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando ajustes dinâmicos e eficientes na iluminação urbana.

A pesquisa explora a aplicação de algoritmos de Problemas de Otimização de Restrições Distribuídas (DCOP) para a adaptação da iluminação pública. Utilizando algoritmos como DPOP, MGM e DSA, o estudo busca ajustar a luminosidade dos postes de iluminação com base em variáveis ambientais, como tráfego de veículos e presença de pedestres.

A metodologia envolve a modelagem de um cenário urbano real onde os algoritmos DCOP são implementados para gerir a iluminação pública de forma adaptativa. Os dados coletados foram analisados para verificar a eficiência dos algoritmos em termos de consumo energético e qualidade da iluminação. Os resultados indicam uma redução no consumo de energia e uma melhora na eficiência operacional do sistema de iluminação pública.

A aplicação de algoritmos DCOP na gestão adaptativa da iluminação urbana promove uma utilização mais racional dos recursos energéticos, melhorando a segurança e o conforto dos cidadãos. Este estudo demonstra que a integração de tecnologias IoT com algoritmos de otimização distribuída oferece soluções práticas e replicáveis para a gestão eficiente de recursos urbanos, contribuindo para o avanço das Cidades Inteligentes.

Palavras-chave: DCOP, IoT, Cidades Inteligentes, Sistemas Adaptativos, Iluminação Pública Inteligente, Sistemas Multiagentes.

Abstract

In the smart cities paradigm, the efficient management of urban resources is essential to promote sustainability and quality of life. Street lighting, a crucial component of urban infrastructure, can significantly benefit from integration with IoT technologies and adaptive systems. These systems allow the collection and analysis of data in real time, enabling dynamic and efficient adjustments to urban lighting.

The research explores the application of Distributed Constraint Optimization Problems (DCOP) algorithms for the adaptability of public lighting. Using algorithms such as DPOP, MGM and DSA, the study seeks to adjust the brightness of lampposts based on environmental variables detected, such as vehicle traffic and the presence of pedestrians.

The methodology involves modeling a real urban scenario where DCOP algorithms are implemented to manage public lighting in an adaptive way. The collected data was analyzed to verify the efficiency of the algorithms in terms of energy consumption and lighting quality. The results indicate a reduction in energy consumption and an improvement in the operational efficiency of the public lighting system.

The application of DCOP algorithms in the adaptive management of urban lighting promotes a more rational use of energy resources, improving the safety and comfort of citizens. This study demonstrates that the integration of IoT technologies with distributed optimization algorithms offers practical and replicable solutions for the efficient management of urban resources, contributing to the advancement of smart cities.

Keywords: DCOP, IoT, Smart Cities, Adaptive Systems, Smart Public Lighting, Multi-Agent Systems.

Lista de Figuras

1	Poste Inteligente.	15
2	Arquitetura de iluminação pública inteligente.	16
3	Iluminação inteligente como subconjunto dos elementos da Cidade Inteligente.	17
4	Principais componentes de uma Cidades Inteligente.	22
5	Ciclo de feedback MAPE-K.	25
6	Ciclo Cognitivo.	26
7	Fatores que contribuem na definição de SMA adaptativos.	28
8	Exemplo de um CSP.	31
9	Exemplo de um DisCSP.	31
10	Exemplo de um COP.	33
11	Exemplo de um DCOP.	34
12	Exemplo: Grafo de restrição.	35
13	Exemplo: Grafo-fator.	35
14	Grafo de interação.	36
15	Grafo estruturado hierarquicamente (pseudo-árvore).	36
16	Pseudo-código do algoritmo DSA.	38
17	Pseudo-código do algoritmo MGM.	38
18	Etapas para seleção dos estudos relevantes.	42
19	Ano de publicação dos artigos.	44
20	Tipos de artigos.	44
21	Quantidade de artigos por editora.	45
22	Mapeamento de tipos de tecnologia.	45

23	Quantitativo de artigos por RQs.	46
24	Modelo DCOP: Ajuste dinâmico da iluminação baseado em condições ambientais.	71
25	Modelo padrão de operação contínua.	79
26	Modelo de controle estático.	79
27	Modelo DCOP para iluminação pública adaptativa.	80
28	Dinâmica de simulação DCOP	81
29	Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 10 postes.	83
30	Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 50 postes.	83
31	Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 100 postes.	84
32	Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 500 postes.	84
33	Quantidade de vezes em que a solução ótima foi encontrada por ciclo, para $p = 0,7$ para os cenários de 10, 50 e 100 postes aplicados ao DSA.	85
34	Quantidade de vezes em que a solução ótima foi encontrada por ciclo, para os cenários de 10, 50 e 100 postes aplicados ao MGM	85
35	Velocidade para solução ótima por ciclo para os cenários com 10 postes.	86
36	Velocidade para solução ótima por ciclo para os cenários com 50 postes.	87
37	Velocidade para solução ótima por ciclo para os cenários com 100 postes.	88
38	Quantidade de mensagens por algoritmo para cada cenário.	89
39	Fluxo de veículos ao longo do mês de janeiro de 2024, monitorados pela CTTU de Recife.	90
40	Registro de pontos de iluminação pública na cidade de Niterói.	91
41	Iluminância luminária de 60W com renderização de cor.	92
42	Curva isolux para luminária de 60W.	92
43	Resposta adaptativa do modelo DCOP para o cenário com 50 postes.	93
44	Resposta adaptativa do modelo DCOP para o trecho da cidade de Niterói.	93
45	Avenida utilizada como referência para o modelo DCOP customizado.	94

Lista de Tabelas

1	Campos de extração de informações.	43
2	Comparação Sistemas de Iluminação Inteligente (Parte 1).	60
3	Comparação Sistemas de Iluminação Inteligente (Parte 2) - Cont. Tabela 2.	60
4	Comparação Sistemas Adaptativos (Parte 1).	64
5	Comparação Sistemas Adaptativos (Parte 2) - Cont. Tabela 4.	64
6	Comparação Trabalhos sobre DCOP (Parte 1).	68
7	Comparação Trabalhos sobre DCOP (Parte 2) - Cont. Tabela 6.	68
8	Horários e limites aplicados.	90
9	Potência encontrada com dimerização para cada horário.	91
10	Comparação dos custos diários e mensais para 500 mil postes de iluminação.	92

Lista de Abreviaturas e Siglas

COP do inglês *Constraint Optimization Problem*

CSP do inglês *Constraint Satisfaction Problem*

CTTU Autarquia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife

DCOP do inglês *Distributed Constraint Optimization Problem*

DFST do inglês *Depth First Search Tree*

DisCSP do inglês *Distributed Constraint Satisfaction Problem*

DPOP do inglês *Distributed Pseudo-tree Optimization Procedure*

DROB do inglês *Downlink Rate Optimization for Class B*

DSA do inglês *Distributed Stochastic Algorithm*

DynDisMHG do inglês *Dynamic Distributed Multi-agent Hierarchy Generation*

EPC do inglês *Electronic Product Code*

FIoT do inglês *Framework for Internet of Things*

FRODO do inglês *Framework for Open/Distributed constraint Optimization*

FSM do inglês *Finite State Machine*

ICT do inglês *Information and Communication Technologies*

IoT do inglês *Internet of Things*

LED do inglês *Light Emitting Diode*

MGM do inglês *Maximum Gain Message*

NSS do inglês *Neighborhood Stochastic Search*

OMTC do inglês *Optimization Model for Train Classification*

QoS do inglês *Quality of Service*

RFID do inglês *Radio Frequency Identification*

RSL Revisão Sistemática da Literatura

RSSF Rede de Sensores sem Fio

SC do inglês *Smart Cities*

SisGeo Sistema de Gestão da Geoinformação

SMA Sistemas Multiagentes

TIC Tecnologia da Informação e Comunicação

WoT do inglês *Web of Things*

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Contexto	14
1.2	Motivação e Objetivo	17
1.3	Organização do Trabalho	19
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Internet das Coisas e Cidades Inteligentes	20
2.2	Sistemas Autoadaptativos	22
2.3	Agentes e Sistemas Multiagentes	26
2.4	Problemas de Restrições Distribuídas	30
2.4.1	Problemas de Satisfação de Restrições Distribuídas	30
2.4.2	Problemas de Otimização de Restrições Distribuídas	32
2.4.3	Algoritmos para DCOP	36
2.5	Considerações Finais	39
3	Revisão Sistemática da Literatura	40
3.1	Metodologia e Planejamento	41
3.2	Execução	42
3.3	Análise	44
3.4	Resultados	46
3.4.1	RQ1: Plataformas Usadas para Sistemas IoT Adaptativos	46
3.4.2	RQ2: Aplicações de SC Suportadas pelas Plataformas	48

3.4.3	RQ3: Aspectos da Adaptação Abordados	50
3.5	Discussão	55
4	Trabalhos Relacionados	57
4.1	Iluminação Inteligente	57
4.2	Sistemas de IoT Adaptativos	61
4.3	DCOP	64
4.4	Considerações Finais	69
5	A Iluminação Pública como um Problema DCOP	70
5.1	Definição das Variáveis e Restrições	70
5.2	Métricas de Avaliação de Algoritmos DCOP	75
5.2.1	Limitação de Tempo	75
5.2.2	Qualidade de Comunicação	76
5.3	Descrição das Métricas de Avaliação para DCOP	76
5.4	Considerações Finais	77
6	Estudo de Caso	78
6.1	Descrição do Cenário de Iluminação Pública Adaptativa	78
6.2	Configuração dos Experimentos	80
6.3	Análise Comparativa dos Algoritmos DCOP	81
6.4	Adaptabilidade e otimização da iluminação	87
6.5	Considerações finais	94
7	Conclusão	96
	REFERÊNCIAS	99

1 Introdução

Nos últimos anos, o conceito de Cidades Inteligentes emergiu como uma solução promissora para enfrentar os crescentes desafios urbanos através do uso inovador de tecnologias de informação e comunicação. Com o rápido avanço da urbanização global, torna-se imperativo que as cidades não apenas tratem o aumento da população, mas também melhorem a qualidade de vida dos seus habitantes e a sustentabilidade dos seus recursos. As Cidades Inteligentes oferecem uma maneira de tornar as cidades mais eficientes, sustentáveis e habitáveis por meio do uso de tecnologias avançadas (MOTTA; BATISTA; DELICATO, 2023).

Os indicadores desenvolvidos pela ABNT NBR ISO 37122 - "Cidades e Comunidades Sustentáveis - Indicadores para Cidades Inteligentes" (TÉCNICAS 37122, 2020) são fundamentais nesse contexto, pois ajudam a mensurar o progresso das cidades em direção a uma integração mais completa das capacidades das Cidades Inteligentes, abrangendo aspectos sociais, econômicos e ambientais. A norma categoriza esses indicadores em diversos grupos temáticos, que orientam as cidades na avaliação de seu desempenho em áreas críticas. Esses grupos incluem:

- Economia
- Educação
- Energia
- Meio ambiente e mudanças climáticas
- Finanças
- Governança
- Saúde
- Habitação
- População e condições sociais
- Recreação
- Segurança
- Resíduos sólidos
- Esporte e Cultura
- Telecomunicações
- Transporte
- Agricultura local/urbana e segurança alimentar

- Planejamento urbano
- Esgoto
- Água

A implementação desses indicadores permite que as cidades monitorem e avaliem continuamente seu desempenho, identificando áreas que precisam de melhorias e possibilitando a criação de estratégias mais eficazes para enfrentar os desafios urbanos.

Contudo, para realizar uma análise precisa e detalhada dos indicadores urbanos, é essencial captar uma grande quantidade de dados. Assim, a tecnologia de Internet das Coisas (IoT - do inglês *Internet of Things*) se torna crucial. A IoT possibilita que diversos objetos (sensores), conectados à internet, tenham a capacidade de captar, processar e transmitir dados, e através destes atuar sobre si e interagir entre si (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Esses sensores monitoram e registram informações em tempo real, o que permite uma análise contínua dos indicadores urbanos, possibilitando identificar padrões e tendências, além de áreas que necessitam de atenção, facilitando a tomada de decisões e promovendo a melhoria contínua das cidades (MUSE, 2019).

Um aspecto a ser explorado no contexto das Cidades Inteligentes é a aplicação de sistemas adaptativos, projetados para ajustar automaticamente suas operações em resposta a mudanças nas condições ambientais e nas demandas urbanas. Esses sistemas, ao serem integrados com a infraestrutura IoT, permitem que diversas aplicações, adaptem-se dinamicamente em tempo real a fatores como variações no tráfego, condições climáticas, níveis de poluição do ar, entre diversos outros problemas urbanos. A adoção de sistemas adaptativos visa melhorar a segurança e o conforto dos cidadãos, tornando-se um elemento essencial na construção de uma cidade verdadeiramente inteligente.

No trabalho de (USHA et al., 2020), são apresentados diversos problemas e soluções, no contexto de Cidades Inteligentes e IoT, que se alinham diretamente com alguns indicadores da NBR 37122. Por exemplo, o estudo de caso sobre *Smart Roads*, relacionado ao grupo de Transporte da NBR, foca na melhoria da gestão de congestionamentos urbanos por meio de tecnologias de comunicação entre veículos e infraestruturas, permitindo uma resposta mais rápida e segura.

Outro estudo de caso abordado no artigo é sobre *Smart Surveillance Systems*, que se alinha ao tema Segurança. Esses sistemas de vigilância inteligentes não só monitoram, mas também respondem proativamente a situações de risco, aumentando significativamente a segurança pública.

Além disso, o desafio de gerenciar Resíduos Sólidos é discutido através do uso de *Waste Management Systems*. Esses sistemas utilizam sensores IoT para monitorar a capacidade das lixeiras, automatizando e otimizando as rotas de coleta, contribuindo para a sustentabilidade ambiental da cidade. No âmbito da Governança, os modelos de *Smart Governance* mostram como a tecnologia IoT pode facilitar uma gestão pública mais transparente e interativa, permitindo que os cidadãos acessem informações e serviços em tempo real e promovendo uma melhor integração entre departamentos governamentais.

Essas inovações evidenciam a aplicabilidade prática da IoT no enfrentamento de desafios urbanos, destacando a capacidade da tecnologia de transformar elementos essenciais da infraestrutura das cidades.

1.1 Contexto

A iluminação pública é um elemento frequentemente subestimado, apesar de seu enorme potencial integrativo. Muitas vezes, não é diretamente perceptível o papel que ela desempenha na vida cotidiana e como pode ser otimizada para beneficiar a cidade na totalidade. No contexto das Cidades Inteligentes, a iluminação pública se destaca como um componente onde sua estrutura pode servir não apenas no que diz respeito a iluminação das vias, mas também como componente que contribua com outros tipos de sistemas urbanos (MUSE, 2019). A Figura 1 ilustra a possibilidade de sistemas que podem ser integrados a um poste inteligente, tais como recursos de sinalização, contato e segurança.

Desta forma, a modernização da iluminação pública, por meio da implementação de tecnologias adaptativas e sistemas de telegestão, está diretamente alinhada com o grupo temático de Energia da NBR 37122. Esses sistemas permitem o controle dinâmico e em tempo real da iluminação, ajustando-a conforme a necessidade baseada em dados ambientais, como tráfego de veículos, presença de pessoas, clima e luminosidade (PETRITOLI et al., 2019). A Figura 2 ilustra a arquitetura de um sistema de iluminação pública inteligente, com a integração de diversas tecnologias.

Um dos maiores desafios para a aplicação da IoT na iluminação pública é seu impacto na cidade e na sociedade. É fundamental garantir a segurança e a privacidade dos cidadãos, além de assegurar a confiabilidade do sistema de iluminação pública. Também é importante considerar aspectos técnicos, como o tipo de dados a serem coletados, como esses dados serão transmitidos, processados, armazenados e protegidos, e a capacidade de atuação e resposta do sistema. Além disso, é crucial avaliar o consumo e a fonte de

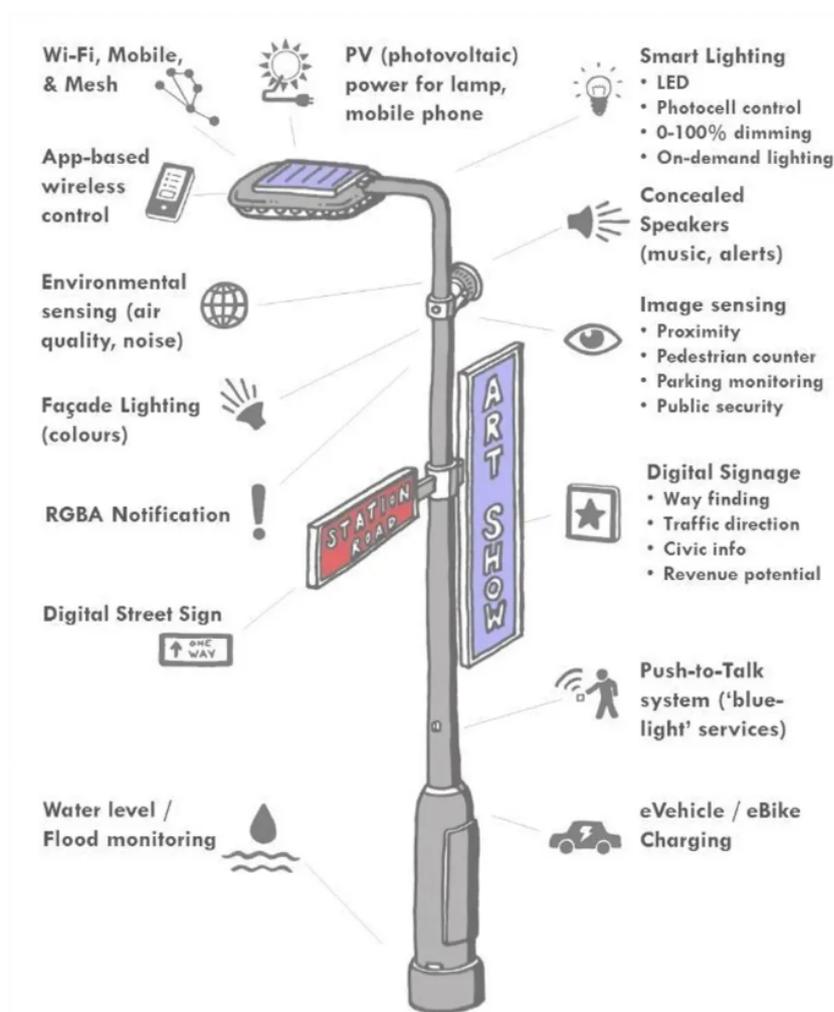


Figura 1: Poste Inteligente.
 Fonte: (HUDSON-SMITH et al., 2021)

energia dos equipamentos, seu posicionamento e exposição às intempéries, e a dimensão da cidade, especialmente o tamanho do parque de iluminação pública (MUSE, 2019).

No Brasil, onde a iluminação pública representa mais de 4% do consumo total de energia, a necessidade de modernização se faz particularmente necessária. O país possui 5.565 municípios com um total aproximado de 16.133.115 pontos de iluminação, dos quais 96,72% ainda utilizam tecnologias de alto consumo energético, como lâmpadas de vapor metálico, destacando um grande potencial para inovação, iniciando pela migração para postes de iluminação que utilizem LED (do inglês *Light Emitting Diode*. (ARAÚJO et al., 2020).

A transição para a tecnologia LED, por si só, já representa avanços significativos. Estudos, como o realizado por (SOUZA, Alessandra et al., 2022), demonstram que a simples substituição de 151 postes com lâmpadas de vapor metálico de 400W por luminárias

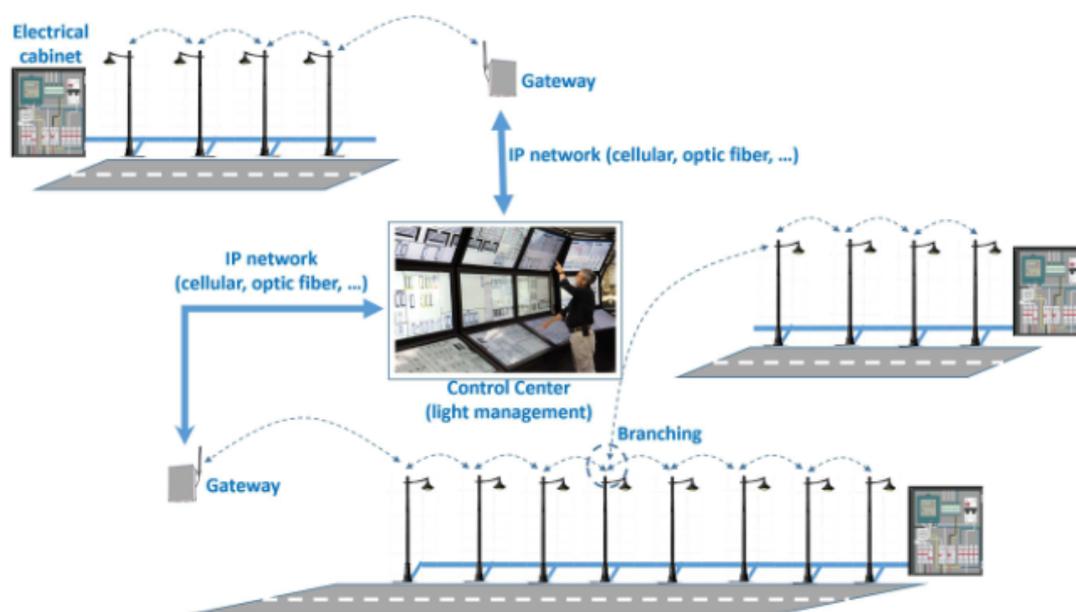


Figura 2: Arquitetura de iluminação pública inteligente.

Fonte: (PASOLINI et al., 2019)

LED de 196W reduziu em 53% os custos de energia. Neste mesmo estudo foi explorada a possibilidade de iluminação pré-definida, onde a potência das luminárias LED foi reduzida para 146W durante períodos de menor movimentação, especificamente entre 00h e 06h. Este ajuste resultou em uma economia de 60% comparada ao sistema atual.

Corroborando com o trabalho anterior, em (PETRITOLI et al., 2019) é apresentado um estudo de caso de um sistema de iluminação público implementado no *ENEA Casaccia Research Centre* em Roma. Avaliações mostraram que configurações regulatórias pré-definidas e adaptativas levaram a economias de energia de 37% e 59%, respectivamente. Esses resultados reforçam o potencial de sistemas de iluminação inteligente para reduzir o consumo de energia, bem como promover uma abordagem integrada e inteligente da gestão urbana.

Ainda em (PETRITOLI et al., 2019), é discutido como a iluminação pública inteligente na Europa é vista como um componente essencial das Cidades Inteligentes, concentrando-se nos temas de energia inteligente e mobilidade inteligente. Conforme representado na Figura 3, a iluminação inteligente se integra ao paradigma das Cidades Inteligentes, interligando-se com outras dimensões fundamentais como Governança, Economia, Ambiente e Participação Social por meio das Tecnologias de Informação e Comunicação (ICT, do inglês *Information and Communication Technologies*).

Desta forma, a implementação de sistemas de iluminação pública inteligentes pode

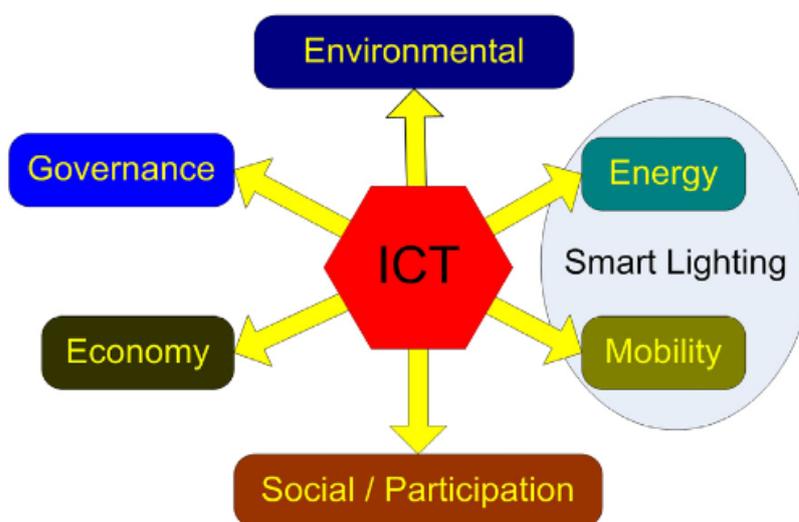


Figura 3: Iluminação inteligente como subconjunto dos elementos da Cidade Inteligente.
Fonte: (PETRITOLI et al., 2019)

auxiliar na redução o consumo de energia servindo também de plataforma para integrar diversos sistemas urbanos, visando facilitar a vida dos cidadãos e dos gestores urbanos nos diversos elementos que compõem uma Cidade Inteligente.

1.2 Motivação e Objetivo

Este estudo é motivado pela necessidade de tornar a iluminação pública não apenas mais eficiente em termos de consumo energético, mas também adaptativa às variáveis ambientais e urbanas. No contexto desta pesquisa, eficiência é definida como a capacidade de maximizar o uso da energia, reduzindo desperdícios e custos. Adaptabilidade refere-se à capacidade do sistema de iluminação de ajustar automaticamente sua operação com base nas condições ambientais e no comportamento humano, como variações de tráfego e padrões de atividade nas áreas urbanas.

A combinação dessas características (eficiência e adaptabilidade) é vital para a iluminação pública, pois permite uma resposta dinâmica que pode reduzir o gasto energético e garantir segurança e conforto para os cidadãos em diferentes condições e horários. Investigar essa dualidade é essencial, visto que a gestão tradicional da iluminação pública muitas vezes ignora essas variações dinâmicas, levando ao uso ineficiente de recursos e à inadequação da iluminação às necessidades reais da população.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e validar um modelo baseado em Problemas de Otimização de Restrições Distribuídas (DCOP, do inglês *Distributed Cons-*

straint Optimization Problem) integrado com a Internet das Coisas, para gerir de forma eficaz e adaptativa a iluminação pública. Este modelo busca reduzir o consumo energético da cidade e melhorar a qualidade da iluminação baseada nas necessidades detectadas por meio de dados ambientais e de sensoriamento.

No contexto da iluminação pública, cada sensor IoT instalado nos postes de luz pode capturar dados específicos do ambiente, como o fluxo de veículos, a presença de pedestres, e as condições climáticas. Esses dados são então utilizados para determinar a intensidade luminosa mais adequada para cada situação. A otimização entra em cena justamente nesse momento, onde o sistema precisa decidir a melhor configuração luminosa não apenas para um poste isolado, mas também considerando a interação com postes vizinhos, de modo a garantir a eficiência energética e operacional do poste. A abordagem baseada em DCOP permite que essa decisão seja tomada de forma distribuída, garantindo que a iluminação pública seja adaptada de maneira otimizada e coordenada, resultando em uma gestão de iluminação mais inteligente e eficaz, essencial para o desenvolvimento de cidades inteligentes.

O uso do DCOP neste trabalho é resultado de uma revisão sistemática da literatura, cujo objetivo foi identificar uma solução adaptativa para a iluminação pública que não dependesse exclusivamente de tecnologias de *machine learning* ou inteligência artificial, mas que ainda assim pudesse ser distribuída e altamente eficaz no contexto de cidades inteligentes. Durante essa revisão, foram avaliadas diversas abordagens, e o DCOP emergiu como uma alternativa devido a sua capacidade de coordenar e otimizar decisões de maneira descentralizada, essencial em cenários complexos e dinâmicos como os encontrados em ambientes urbanos. A escolha pelo DCOP também foi motivada pela sua flexibilidade em lidar com restrições e variáveis múltiplas, tornando-o particularmente adequado para sistemas que precisam integrar diferentes fontes de dados em tempo real, como os sensores IoT, e ajustar a operação da infraestrutura urbana de forma coordenada e eficiente.

Ao alcançar esses objetivos, este trabalho apresenta uma solução de iluminação pública que é mais sustentável e econômica, melhorando significativamente a qualidade de vida urbana e reduzindo o impacto ambiental das cidades. A implementação bem-sucedida deste sistema estabelece um precedente para futuras infraestruturas urbanas inteligentes, servindo como um modelo para cidades ao redor do mundo, de modo a promover uma gestão mais inteligente e responsiva do ambiente urbano.

1.3 Organização do Trabalho

O restante da dissertação está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Expõe conceitos fundamentais sobre IoT, Cidades Inteligentes, e o uso de DCOP na otimização de sistemas distribuídos.
- **Capítulo 3:** Detalha a abordagem metodológica adotada.
- **Capítulo 4:** Analisa estudos existentes sobre iluminação pública inteligente, sistemas IoT adaptativos e aplicações DCOP.
- **Capítulo 5:** Discute os resultados obtidos com a implementação do sistema proposto em um cenário urbano real.
- **Capítulo 6:** Aborda o estudo de algoritmos DCOP aplicados ao cenário de iluminação pública adaptativa.
- **Capítulo 7:** Conclui este trabalho por meio de um resumo com as principais contribuições e sugere direções para pesquisas futuras no campo de sistemas adaptativos aplicados a IoT e Cidades Inteligentes.

2 Fundamentação Teórica

Este Capítulo apresenta um resumo dos principais conceitos e tópicos fundamentais que constituem a base teórica deste estudo. Inicialmente é explorado o paradigma da Internet das Coisas e seu impacto nas Cidades Inteligentes, destacando como essa tecnologia tem revolucionado como as cidades funcionam e interagem com seus habitantes. Em seguida apresentamos os Sistemas Autoadaptativos, destacando sua importância no ajuste dinâmico das funcionalidades dos sistemas em resposta a mudanças no ambiente ou no próprio sistema. A tecnologia de Agentes e Sistemas Multiagentes é introduzida, abordando como essas entidades autônomas colaboram para resolver complexos problemas distribuídos. Por fim, os Problemas de Restrições Distribuídos são conceituados, enfatizando a relevância desses problemas e os algoritmos DCOP na otimização e coordenação de tarefas no contexto de IoT e Cidades Inteligentes.

2.1 Internet das Coisas e Cidades Inteligentes

A tecnologia tem se integrado profundamente na vida das pessoas, tanto em ambientes privados quanto urbanos. Neste cenário, o paradigma da Internet das Coisas surge estabelecendo uma conexão intuitiva entre as pessoas e as atividades tecnológicas cotidianas. O termo de Internet das Coisas foi introduzido por Kevin Ashton em 1999. Originalmente, a IoT referia-se a objetos identificados através do uso do Código Eletrônico de Produto (ou EPC, do inglês *Electronic Product Code*) e da tecnologia de Identificação por Radiofrequência (ou RFID, do inglês *Radio Frequency Identification*) (GUBBI et al., 2013). Atualmente, a IoT evoluiu para um conceito mais amplo, sendo compreendida como um ecossistema global no qual uma infinidade de “coisas” ou objetos inteligentes - como sensores, atuadores, veículos, celulares, eletrodomésticos e câmeras - estão conectados à internet. Essa conexão é facilitada por tecnologias de comunicação, como rede de sensores sem fio (RSSF), redes móveis (4G/5G) ou Wi-Fi, permitindo que os objetos inteligentes coletem dados do ambiente e interajam entre si. Eles processam essas informa-

ções e executam ações de maneira autônoma, minimizando a necessidade de intervenção humana direta (VERMESAN et al., 2009).

Dentro deste ecossistema da IoT, surge o conceito de ambiente inteligente, que se refere à criação de espaços onde a tecnologia está integrada de tal maneira que se torna quase imperceptível. Estes ambientes utilizam a conectividade e a inteligência dos objetos para melhorar a experiência e o conforto dos usuários. Um ambiente inteligente pode variar desde uma casa onde os eletrodomésticos são controlados remotamente, até um escritório onde a iluminação e a temperatura se ajustam automaticamente conforme as condições climáticas e a presença de pessoas. A inteligência destes ambientes não se limita a uma simples automação, ela envolve interação complexa e contínua entre diversos dispositivos conectados, permitindo que tais dispositivos aprendam e se adaptem, por meio da troca de dados, às necessidades e preferências de seus usuários (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

A expansão dos ambientes inteligentes leva naturalmente à criação da ideia da Cidade Inteligente (ou SC, do inglês *Smart Cities*), um desenvolvimento urbano que se alinha estreitamente com os avanços da IoT. As SC são vistas como a aplicação de serviços ubíquos, com o objetivo principal de melhorar a qualidade de vida urbana (AL-FUQAHA et al., 2015). Neste modelo, tecnologias inteligentes interconectadas abrangem áreas vitais como saúde, serviços públicos, transporte, governança, bem como residências e edifícios. Nessa configuração, a cidade age como um organismo vivo, onde cada sistema interage de forma inteligente não só com os habitantes, mas também entre si, criando um ecossistema interconectado e responsivo. Na Imagem 4 são apresentados as principais áreas de uma SC com seus respectivos componentes.

A integração da IoT nas SC representa um marco na evolução urbana, facilitando desde a gestão do tráfego urbano, que se adapta em tempo real às condições do trânsito (NIAZ et al., 2022), até sistemas de saúde que utilizam dados para melhorar o atendimento ao paciente (ANGARITA; MANOUVRIER; RUKOZ, 2016). No entanto, essa integração revisita uma questão fundamental: será que os sistemas de softwares atuais e as estratégias de gestão são suficientes para lidar com a complexidade crescente e as demandas dinâmicas desses ambientes urbanos avançados? Esse questionamento leva a ponderar sobre o papel dos sistemas autoadaptativos no ecossistema de Cidades Inteligentes. Como esses sistemas podem responder de forma autônoma as mudanças e desafios, garantindo que a funcionalidade e sustentabilidade da cidade não apenas persistam, mas também evoluam? Estes pontos chamam a atenção para a importância de explorar abordagens mais

avançadas, como os sistemas autoadaptativos, para garantir o desenvolvimento contínuo e sustentável das Cidades Inteligentes.

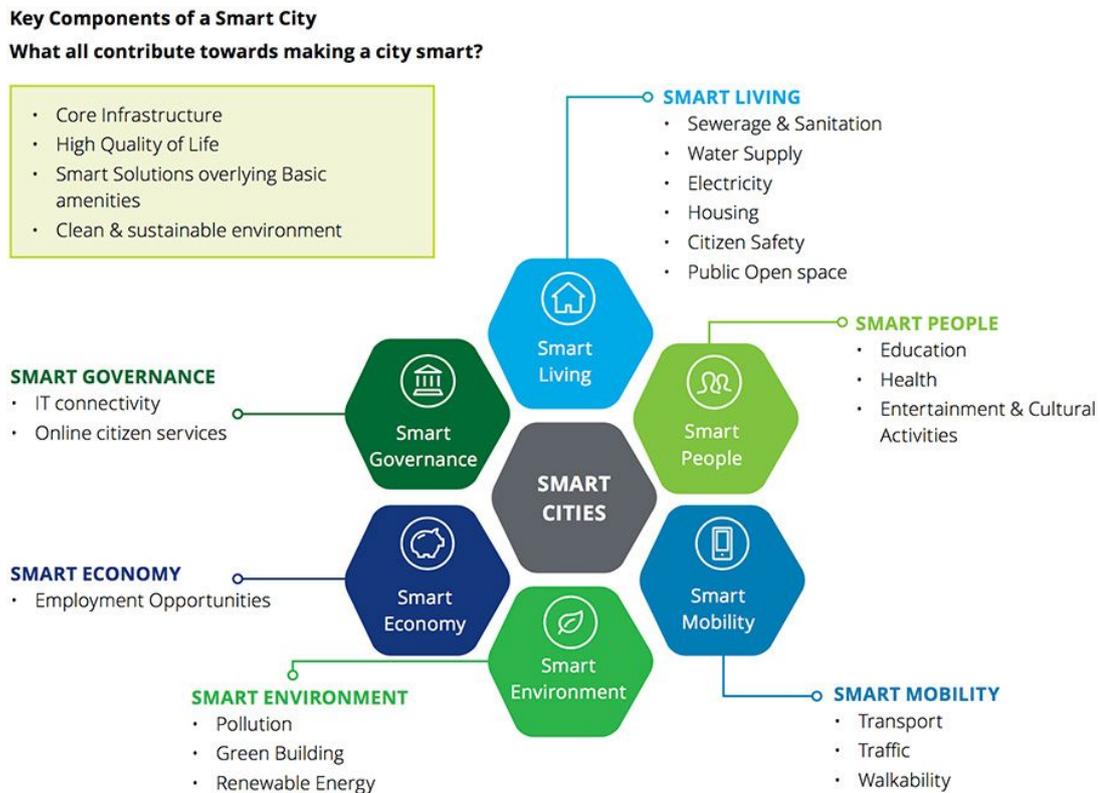


Figura 4: Principais componentes de uma Cidades Inteligente.
 Fonte: (SIKDER et al., 2018)

2.2 Sistemas Autoadaptativos

A IBM, em seu manifesto de 2001, alertou que a crescente interconectividade e integração dos sistemas de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) poderiam transformar o potencial da computação generalizada – bilhões de dispositivos conectados à Internet – em um cenário complexo e desafiador. As inovações em linguagens de programação, embora aumentem a capacidade de construir sistemas mais complexos, não seriam suficientes para superar essa crise de complexidade (KEPHART; CHESS, 2003).

A solução proposta pela IBM para essa crise estava na evolução em direção à computação autônoma. Inicialmente, as funções automatizadas se concentrariam em coletar e agregar informações para apoiar decisões humanas. Posteriormente, evoluiriam para atuar como conselheiros, sugerindo ações para consideração humana. Conforme as tecnologias de automação se aprimorassem, sistemas autônomos seriam confiáveis para tomar e

executar decisões de nível inferior, reduzindo gradualmente a necessidade de intervenção humana em decisões frequentes (KEPHART; CHESS, 2003).

Apesar do avanço nas tecnologias autônomas, a imensa quantidade de dados gerados pelos sensores em sistemas interconectados está desafiando os limites das abordagens tradicionais de engenharia de software. A necessidade de gerenciar e processar tantas informações em sistemas cada vez mais complexos requer métodos inovadores e flexíveis. Esta realidade impulsiona a evolução dos sistemas para serem mais versáteis, adaptáveis e resilientes. Eles precisam ser capazes de responder a ambientes operacionais em constante mudança, mantendo-se confiáveis e robustos (CABRERA; CLARKE, 2019).

Nesse contexto, surge a importância de incorporar funcionalidades "auto*" (*self** - em inglês) nos mais diversos tipos de sistemas. Essas auto-funcionalidades, como auto-configuração, autocorreção, auto-otimização, entre outras, são essenciais para enfrentar a complexidade crescente dos sistemas e a imprevisibilidade dos ambientes em que operam. Conforme destacado por (VERMESAN et al., 2009), a tendência para sistemas com comportamento autônomo está se tornando uma macro tendência na evolução da IoT. Estas capacidades "auto*" permitem que os sistemas se ajustem automaticamente às variações e falhas imprevistas, garantindo a continuidade e eficiência dos serviços em um mundo dinâmico e móvel. Assim, os sistemas autoadaptativos se apresentam como uma solução promissora para o gerenciamento e a operação eficaz em cenários cada vez mais complexos e desafiadores.

Dentro deste paradigma das auto-funcionalidades, surgem vários aspectos que permitem aos sistemas operar com um nível de independência sem precedentes, tais como:

- **Autoconfiguração:** Em *data centers* e sistemas complexos, a instalação e configuração de múltiplas plataformas são processos demorados e propensos a erros. Em sistemas autoadaptativos, no entanto, a autoconfiguração fornece ao sistema a capacidade de se configurar automaticamente seguindo políticas pré-definidas de alto nível, com ajustes automáticos e sem problemas para adequar-se às mudanças ambientais ou de requisitos. Um exemplo de autoconfiguração pode ser visto em (SOUZA, Arthur et al., 2022), onde a aplicação se concentra na escalabilidade, distribuindo a carga de trabalho entre camadas computacionais usando computação osmótica para equalizar os fluxos de trabalho.
- **Auto-otimização:** Enquanto sistemas tradicionais dependem de ajustes manuais em centenas de parâmetros, os sistemas autoadaptativos buscam continuamente

oportunidades para otimizar seu próprio desempenho e eficiência. Esta otimização contínua e dinâmica adapta-se às mudanças nas condições operacionais e carga de trabalho, garantindo sempre o funcionamento ótimo do sistema. Em (KHAKHILASHVILI; DERY; GRINSHPOUN, 2023) é fornecido um exemplo prático, onde o sistema leva em consideração tanto as preferências individuais de alunos quanto suas relações sociais, para otimizar a distribuição dos alunos pelos cursos disponíveis. O sistema busca maximizar a satisfação geral dos alunos e assegurar a equidade, respeitando as limitações de capacidade de cada curso.

- **Autocorreção:** Em sistemas convencionais, identificar e corrigir falhas pode ser um processo lento e complexo. Sistemas autoadaptativos, por outro lado, podem detectar, diagnosticar e reparar automaticamente problemas de software e hardware. Esta capacidade de autocura minimiza o tempo de inatividade e aumenta a confiabilidade do sistema. Em (RUST; PICARD; RAMPARANY, 2022), é descrito um sistema inteligente para residências, equipado com vários sensores, como de luz e umidade. Esse sistema é projetado para manter as configurações especificadas pelo usuário, como o nível de luminosidade em um ambiente, mesmo quando sensores são adicionados ou removidos.
- **Autogerenciamento:** o autogerenciamento em sistemas autoadaptativos vai além da simples automação de tarefas. Esses sistemas são capazes de gerenciar proativamente suas operações e recursos com pouca ou nenhuma intervenção humana, adaptando-se às necessidades em constante mudança e garantindo a eficácia operacional. Em (DRAGAN; METZGER; POHL, 2023) é utilizado estratégias de adaptação para ajustar proativamente a qualidade de vídeo e de anúncios baseando-se na disponibilidade de recursos e demanda dos usuários. Essas estratégias permitem que os sistemas gerenciem automaticamente sua operação em resposta às condições variáveis, como, por exemplo, ajustar recursos para manter a qualidade do vídeo ou modificar a qualidade dos anúncios para otimizar cliques, garantindo assim a maximização da receita mesmo em situações de alta demanda, onde os recursos são limitados.

A ideia de um sistema autoadaptativo reside na sua propriedade de modificar seu comportamento segundo as mudanças percebidas tanto no ambiente quanto no próprio sistema (WEYNS; RAMACHANDRAN; SINGH, 2018). Para compreender melhor esta capacidade, considere o exemplo de um sistema de iluminação inteligente em um prédio de escritórios. Neste caso, o sistema pode automaticamente ajustar a intensidade da luz em

diferentes salas com base na quantidade de luz natural disponível, para otimizar o uso de energia elétrica. Aqui, a adaptação ocorre em resposta à variação do ambiente externo, como as mudanças na luz do dia. Além disso, um exemplo de adaptação ao próprio sistema pode ser observado em redes de comunicação onde, dependendo da qualidade do sinal e do volume de tráfego de dados, o sistema ajusta automaticamente o fluxo de dados para manter uma transmissão estável e eficiente. Esta habilidade de adaptar-se tanto a mudanças ambientais quanto a variações internas do sistema é o que define um sistema autoadaptativo.

Um aspecto crucial dos sistemas autoadaptativos é o emprego de mecanismos específicos para facilitar a autoadaptação. Esses mecanismos são geralmente implementados mediante ciclos fechados de *feedback*, que desempenham um papel fundamental na eficiência destes sistemas. Entre os mais comuns, destaca-se o ciclo OODA (Observar, Orientar, Decidir, Agir), o ciclo MAPE-K (Monitorar, Analisar, Planejar, Executar e Conhecimento), e o ciclo Cognitivo (Sensoriamento, Análise, Decisão, Ação) (MUCCINI et al., 2018).

O ciclo MAPE-K, ilustrado na Figura 5, é particularmente popular e amplamente utilizado devido à sua eficácia em estruturar o processo de autoadaptação (QUIN; WEYNS; BAMELIS; SINGH BUTTAR et al., 2019) (WEYNS; SCHMERL et al., 2021). Este ciclo engloba a coleta e análise de dados (Monitorar e Analisar), seguida do desenvolvimento e execução de um plano de ação (Planejar e Executar), tudo apoiado por um conhecimento acumulado e contínuo (Conhecimento).

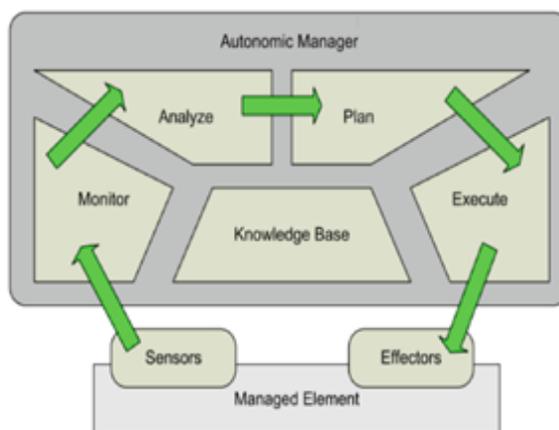


Figura 5: Ciclo de feedback MAPE-K.
Fonte: (WEYNS; SCHMERL et al., 2021)

Por sua vez, o ciclo cognitivo, representado na Figura 6, foca na aquisição e processamento de informações, bem como na tomada e implementação de decisões com base nessa

análise (CICIRELLI et al., 2018). Tais ciclos de *feedback* são vitais para garantir que os sistemas autoadaptativos sejam capazes de manter a escalabilidade, segurança, interoperabilidade e desempenho, aspectos essenciais para o sucesso de qualquer implementação com IoT em ambientes dinâmicos como as SC.



Figura 6: Ciclo Cognitivo.
Fonte: (CICIRELLI et al., 2018)

A abordagem adaptativa contribui para uma melhor resiliência dos sistemas diante de desafios operacionais e de infraestrutura, bem como abre caminho para a integração de agentes e sistemas multiagentes. A capacidade dos agentes de operar autonomamente dentro desses ciclos de *feedback* e contribuir para a autoadaptação de sistemas amplia significativamente o potencial de aplicações em SC. A sinergia entre agentes inteligentes e sistemas autoadaptativos representa um avanço promissor, promovendo soluções mais intuitivas e responsivas para os complexos desafios tecnológicos de hoje.

2.3 Agentes e Sistemas Multiagentes

As tecnologias baseadas em agentes e sistemas multiagentes (SMA) se destacam como soluções fundamentais para a autoadaptação em ambientes interconectados. Estes sistemas oferecem robustez e flexibilidade para adaptar configurações e operações frente a variações e imprevistos, características essenciais no gerenciamento de SC dinâmicas e complexas. No entanto, para entender plenamente por que as tecnologias baseadas em agentes são adequadas para esta tarefa, é crucial compreender o que são agentes e SMA, suas características principais e como eles operam em um ambiente interativo e cooperativo.

De acordo com (WOOLDRIDGE, 2009) um agente é um sistema computacional que opera de forma autônoma em um ambiente, capaz de decidir por si quais ações realizar para atingir seus objetivos, sem precisar de instruções externas. Já um SMA é composto

por múltiplos agentes que interagem entre si de maneira eficiente para resolver problemas que vão além da capacidade de um único agente. Cada agente dentro do SMA tem a capacidade de cooperar, coordenar suas ações e negociar com outros agentes. Em um SMA cada agente possui uma compreensão ou visão parcial do ambiente, limitada ao seu contexto imediato. Esta configuração implica que não há um controle ou supervisão centralizados em todo o sistema; em vez disso, o conhecimento e a tomada de decisão são descentralizados e distribuídos entre os vários agentes.

De acordo com (BAZZAN, 2010), os agentes podem ser classificados em reativos e deliberativos (ou cognitivos).

- **Reativos:** operam com base em modelos simples de estímulo-resposta. Estes agentes respondem diretamente aos estímulos do ambiente sem a necessidade de um modelo interno complexo ou planejamento de ações futuras. Esses agentes são rápidos e eficientes, ótimos para tarefas simples e diretas em ambientes onde muitos deles precisam agir rapidamente, como robôs de limpeza automáticos em um grande edifício.
- **Deliberativos:** são inspirados em organizações sociais humanas. Esses agentes possuem uma representação explícita do ambiente e outros agentes, permitindo-lhes planejar ações futuras de forma mais complexa e estratégica. Eles operam com base em modelos mentais formais, como crenças, desejos e intenções, e a comunicação entre agentes é um aspecto crucial.

A compreensão dessa classificação permite projetar uma rede multiagente adaptativa que operem eficientemente em diversos cenários, variando em complexidade e requisitos, e desempenhem um papel fundamental na percepção e reação autônoma às mudanças no ambiente e no sistema.

Assim, o primeiro passo na criação de uma rede multiagente adaptativa envolve definir os principais recursos e requisitos do sistema, considerando as características de suas entidades, operações, fluxo de informações e o ambiente externo. As entidades em um SMA podem variar em dispositivos, funções, recursos e dinâmicas, incluindo agentes com papéis específicos como líderes ou seguidores, com responsabilidades de alto nível. Por exemplo, um sistema de semáforos interconectados, cada semáforo é uma entidade com funções e recursos específicos, reagindo autonomamente às condições de tráfego.

Além das entidades, as ações em um SMA são fundamentais e são definidas com base no suporte, requisitos, fontes de adaptação, tempo e restrições enfrentadas durante as

operações. Estas ações são orientadas por políticas que determinam conjuntos de ações ou probabilidades de seleção de ações para cada estado do sistema. A adaptabilidade e eficácia dos SMA são aprimoradas pela consideração cuidadosa do ambiente em que operam, definindo seus limites, incerteza e níveis de observabilidade. Considere um sistema de monitoramento ambiental em uma SC. Vários sensores (agentes) estão distribuídos pela cidade para monitorar a qualidade do ar. Dependendo da poluição detectada em determinadas áreas, os agentes podem recomendar ações como restringir o tráfego em áreas específicas. As políticas definidas para os agentes permitem que eles tomem decisões com base nos dados coletados, adaptando-se às mudanças ambientais em tempo real.

O fluxo de dados é outro componente crítico em redes multiagentes adaptativas, pois auxilia no controle eficaz do SMA, facilitando a coordenação e mantendo a independência dos processos das ações dos agentes operadores. Imagine um sistema de gestão de energia de um ambiente inteligente. Nele, diferentes agentes - como painéis solares, lâmpadas, sensores de presença - compartilham informações sobre a produção e consumo de energia. Essa troca de informações permite que o sistema coordene de forma eficiente a distribuição de energia, reduzindo o desperdício e maximizando o uso de fontes renováveis.

Portanto, ao considerar a implementação de SMA em domínios variados em uma SC, é vital compreender e aplicar estes aspectos estratégicos para alcançar uma integração bem-sucedida e eficaz de tecnologias baseadas em agentes. Na Figura 7 é apresentado um resumo dos fatores que influenciam na definição de um SMA para um SC.

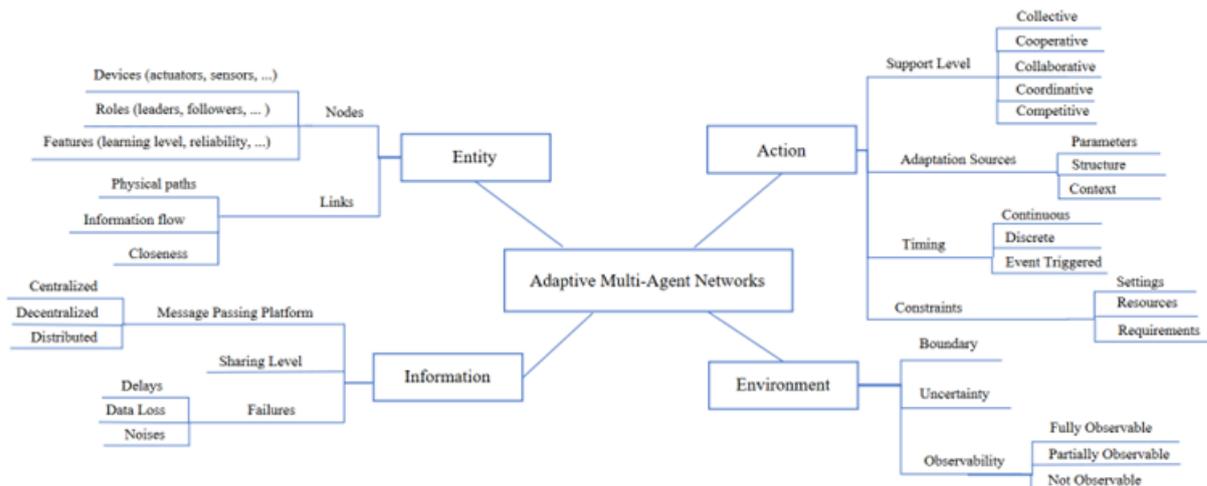


Figura 7: Fatores que contribuem na definição de SMA adaptativos.

Fonte: (NEZAMODDINI; GHOLAMI, 2022).

Em um levantamento realizado por (NEZAMODDINI; GHOLAMI, 2022), foi identificado uma variedade de domínios e aplicações de SMA adaptativos para SC. As principais

características desses sistemas incluem:

- **Consenso e Sincronização:**

- Tem o objetivo de alcançar um estado ou referência comum entre todos os agentes.
- Importante para coordenação e decisão eficiente em sistemas de transporte autônomo e estacionamento inteligente.
- Aplicações em redes inteligentes e ambientes inteligentes.

- **Controle de Formação:**

- Focado em alcançar e manter uma configuração geométrica específica.
- Crucial para tarefas como busca e salvamento, operações em rodovias inteligentes e redes de sensores móveis.

- **Controle de Contenção:**

- Direciona agentes para proteger ou conter áreas específicas em resposta a eventos inesperados.
- Aplicável para orientar veículos autônomos ou outras unidades em cenários de emergência.

- **Otimização Distribuída:**

- Abrange problemas em energia, transporte, cuidados de saúde e cadeias de abastecimento.
- Foco em soluções para maximizar a eficiência e minimizar o uso de recursos.
- Inclui alocação de tarefas em plataformas de computação em nuvem e monitoramento ambiental.

Cada uma dessas características, destaca a capacidade inerente dos agentes e SMA de se adaptarem a diferentes cenários e necessidades em uma SC. Eles oferecem soluções inovadoras e eficientes para os desafios urbanos contemporâneos. Na próxima seção será detalhado o funcionamento dos problemas de otimização de restrições distribuídas e como sua integração com agentes e SMA podem melhorar o desempenho dos sistemas.

2.4 Problemas de Restrições Distribuídas

Os problemas de restrições distribuídas representam um campo em ascensão dentro do domínio de Sistemas Multiagentes. Esta abordagem mira na resolução de problemas complexos, onde a natureza distribuída do problema ou a eficiência proporcionada pela distribuição são fundamentais (PEARCE; TAMBE; MAHESWARAN, 2008).

Em uma SC, onde os desafios são intrinsecamente distribuídos e dinâmicos, a aplicação o uso de técnicas de restrição distribuídas via SMA é particularmente pertinente. A integração desta abordagem com a IoT abre caminhos inovadores para a coordenação e otimização de recursos urbanos. A concatenação dessas tecnologias pode aumentar a robustez e a flexibilidade do sistema em comparação com métodos centralizados. Esta seção visa fornecer uma introdução a problemas de restrições, com foco especial no Problema de Otimização de Restrições Distribuídas.

2.4.1 Problemas de Satisfação de Restrições Distribuídas

O Problema de Satisfação de Restrição Distribuída (ou DisCSP, do inglês *Distributed Constraint Satisfaction Problem*) é uma adaptação dos Problemas de Satisfação de Restrições (ou CSP - do inglês *Constraint Satisfaction Problem*) para um contexto distribuído. Proposto por (YOKOO et al., 1992), o DisCSP busca identificar soluções para satisfazer uma função global. A função global, refere-se à condição ou conjunto de condições que todos os agentes devem atender simultaneamente para que uma solução seja considerada válida. Os agentes são responsáveis por uma determinada variável e devem atribuir valores a elas até encontrar um conjunto de valores que satisfaça todas as restrições. Em um DisCSP a solução pode ser "satisfatória" ou "insatisfatória", não sendo considerados diferentes graus de qualidade ou custo nas soluções.

Formalmente, um CSP é representado pela tupla (V, D, C) , onde:

- $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ é um conjunto de n variáveis;
- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ é o conjunto de domínios, correspondendo a cada variável x_i um domínio d_i que é um conjunto finito e discreto de valores possíveis;
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ é um conjunto de restrições, onde cada restrição c_j determina combinações de valores permitidas para um subconjunto das variáveis de V .

Na Figura 8, é apresentado um exemplo de um CSP com restrições binárias, representado por um grafo de restrições. Neste grafo, cada vértice simboliza uma variável do problema, e cada aresta indica uma restrição aplicada entre duas variáveis. As variáveis do problema são x_1 , x_2 e x_3 , e o objetivo é atribuir uma cor a cada uma delas, escolhendo entre as cores disponíveis no domínio (R, B) , onde R representa vermelho e B representa azul. As restrições impostas são $(x_1 \neq x_3)$ e $(x_2 \neq x_3)$, significando que x_1 e x_2 não podem ter a mesma cor que x_3 . Conseqüentemente, uma solução válida que atende a estas restrições seria a atribuição de cores $(x_1 = B), (x_2 = B), (x_3 = R)$.

Como explicado no início desta sessão, o DisCSP estende o conceito de CSP para um ambiente distribuído, onde as variáveis e restrições são compartilhadas entre vários agentes autônomos. Em um DisCSP, cada agente é responsável por uma variável e deve colaborar com outros agentes para encontrar um conjunto de valores que satisfaça todas as restrições distribuídas. A comunicação e coordenação entre os agentes são essenciais para alcançar uma solução globalmente consistente.

Por exemplo, na Figura 9 é apresentado um DisCSP com as mesmas variáveis, domínios e restrições do CSP anterior, mas agora cada agente a_1 , a_2 e a_3 , é representado por um vértice, e as restrições entre as variáveis controladas por diferentes agentes são ilustradas pelas arestas que conectam esses vértices. Essa representação gráfica ajuda a compreender como os agentes e suas variáveis estão interconectados e quais restrições precisam ser consideradas para alcançar uma solução globalmente consistente para o problema. A coordenação eficaz entre os agentes levaria à mesma solução possível do CSP: $x_1 = B, x_2 = B$ e $x_3 = R$.

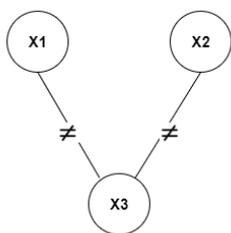


Figura 8: Exemplo de um CSP.

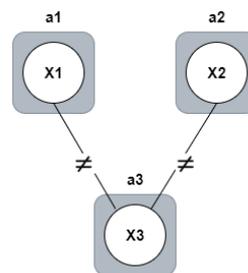


Figura 9: Exemplo de um DisCSP.

É importante salientar que esses problemas focam em encontrar uma solução que simplesmente satisfaça todas as restrições impostas, sem necessariamente considerar a qualidade ou o custo dessa solução. Em outras palavras, o DisCSP visa identificar qualquer solução viável que atenda às restrições, independentemente de ser a melhor ou a mais eficiente (SILVA PEREIRA, 2008).

No entanto, em muitas situações e especialmente em contextos complexos como as SC, é crucial não apenas resolver as restrições, mas também otimizar certos critérios, como custo, eficiência ou desempenho. Nesse cenário, a abordagem mais apropriada é o uso de Problemas de Otimização de Restrições Distribuídas. Esta mudança de foco de simples satisfação para otimização abre novas possibilidades para a aplicação de SMA autoadaptativos em ambientes dinâmicos, proporcionando soluções mais eficazes e eficientes para os desafios enfrentados pelas Cidades Inteligentes.

2.4.2 Problemas de Otimização de Restrições Distribuídas

Assim como o DisCSP representa a versão distribuída do CSP, o DCOP, tem sua origem nos Problemas de Otimização de Restrições (ou COP, do inglês *Constraint Optimization Problem*). De forma geral o CSP e o DisCSP se concentram em encontrar soluções que simplesmente satisfaçam um conjunto de restrições, contudo em alguns casos não é possível encontrar a satisfação completa de todas as restrições. Nestas situações, o objetivo muda para encontrar a melhor solução possível dentro das limitações existentes. Isso é feito por meio da maximização ou minimização das funções de custo associadas às restrições, que determinam a qualidade da solução. O processo de otimização busca a solução que oferece o melhor equilíbrio possível, avaliando as soluções com base em seu custo ou benefício global, conforme estabelecido pela função objetivo. Essa abordagem COP e sua contrapartida distribuída, garante que, mesmo em cenários complexos onde uma solução perfeita não é possível, ainda é possível alcançar um resultado ótimo dentro das restrições disponíveis (CORRÊA, 2015).

Em um COP, além das variáveis, domínios e restrições, inclui-se uma função objetivo, $F(O)$. A função objetivo normalmente é a soma de funções de custo f , que são análogas às funções de restrições em um CSP, mapeando cada possível solução para um valor numérico, representando um custo (positivo ou negativo). O objetivo do COP é encontrar uma atribuição de variáveis que otimize (minimize ou maximize) esse valor, chegando a uma solução ótima. Por exemplo, em um COP onde o objetivo é minimizar custos associados a restrições, a solução ótima será aquela que atende todas as restrições com o menor custo possível.

A Figura 10 ilustra um exemplo de um COP, onde é dado um domínio $D_i = (0,1)$ e uma função de custo f , igual para todas as variáveis x_1, x_2, x_3, x_4 . O objetivo é minimizar a função objetivo F dada pela soma das funções de custo $f(x_1, x_2), f(x_1, x_3), f(x_2, x_4)$. A solução deste COP que minimiza a função F é a atribuição $F((x_1, 0), (x_2, 0), (x_3, 0), (x_4, 0)) =$

6.

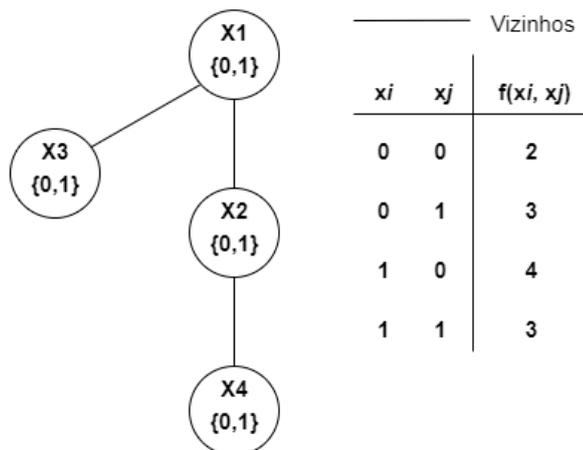


Figura 10: Exemplo de um COP.

O DCOP consiste na atribuição de uma ou mais variáveis a agentes autônomos que, de forma colaborativa, devem encontrar a melhor solução para o problema por meio das funções de custo. As funções de custo, também chamadas de funções de utilidade, são a soma dos custos individuais de cada atribuição de variável, mais os custos das relações entre as variáveis.

De acordo com (MODI et al., 2003) um problema DCOP pode ser definido formalmente pela tupla (A, V, D, F, μ) onde:

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ é um conjunto de n agentes;
- $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ é o conjunto de n variáveis de forma que cada variável está associada a um agente;
- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ é o conjunto de domínios finitos e discretos onde cada variável x_i pode representar valores do domínio D_i ;
- $f_{i,j} : d_i \times d_j \rightarrow \mathbb{N}$ é o conjunto de funções de custo ou utilidade que descrevem as restrições para o par de variáveis x_i, x_j ;
- função objetivo $F(O)$, definida como uma agregação sobre o conjunto de restrições. O objetivo, com essa função, é encontrar um conjunto de valores O^* para as variáveis V , tal que a função objetivo seja minimizada ou maximizada. A função objetivo $F(O)$ é definida como:

$$F(O) = \sum_{x_i, x_j \in V} f_{ij}(d_i, d_j), \text{ onde } x_i \leftarrow d_i, x_j \leftarrow d_j$$

- $\mu: V \rightarrow A$ é uma função que atribui o controle de cada variável a um agente.

A Figura 11, é um exemplo de um DCOP representado como um grafo de restrições. Este exemplo inclui um conjunto de agentes $A = a_1, a_2, a_3, a_4$, cada um associado a uma variável do conjunto $V = x_1, x_2, x_3, x_4$, todas com um domínio de valores $D_i = (0,1)$. As relações entre esses agentes são definidas por restrições, representadas pelas arestas do grafo. Portanto, existem quatro funções de custo correspondentes às arestas: $f(x_1, x_2), f(x_1, x_3), f(x_2, x_3), f(x_2, x_4)$. Dois agentes são considerados vizinhos se houver uma restrição diretamente entre eles; por exemplo, x_1 e x_3 são vizinhos, enquanto x_1 e x_4 não, pois não estão diretamente conectados.

Neste DCOP, a função objetivo F é avaliada com base nas atribuições das variáveis. Por exemplo, se todas as variáveis assumirem o valor zero, a função objetivo é:

$$F((x_1, 0), (x_2, 0), (x_3, 0), (x_4, 0)) = 4.$$

Em contraste, se todas as variáveis assumirem o valor um, a função objetivo é:

$$F((x_1, 1), (x_2, 1), (x_3, 1), (x_4, 1)) = 0.$$

Portanto, a atribuição ótima $O^* = (x_1, 1), (x_2, 1), (x_3, 1), (x_4, 1)$ é aquela que minimiza a função objetivo F , indicando a solução ideal para este DCOP.

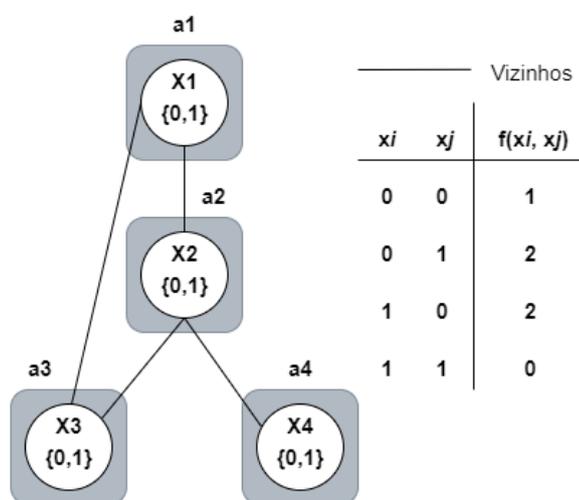


Figura 11: Exemplo de um DCOP.

Dentro da estrutura do DCOP, há características que facilitam sua implantação em um SMA. Essas características incluem:

- **Alocação de variáveis a agentes:** cada variável dentro do problema DCOP é

exclusivamente associada a um agente específico, garantindo que cada agente tenha controle total e responsabilidade sobre essa variável. Isso significa que cada agente tem a autonomia para escolher valores para suas variáveis baseando-se em suas observações e no contexto das restrições aplicáveis.

- **Conhecimento limitado e focado:** inicialmente, um agente tem conhecimento apenas das restrições que impactam diretamente as variáveis sob seu controle. Essa característica reflete a descentralização da informação e a necessidade de estratégias de comunicação eficazes entre agentes para compartilhar conhecimento relevante e alcançar uma solução consensual.
- **Interações baseadas em vizinhança:** a definição de vizinhança em um DCOP é determinada pela existência de restrições compartilhadas entre agentes, ou seja, dois agentes são considerados vizinhos se compartilham ao menos uma restrição que envolva variáveis controladas por ambos. Essa estrutura incentiva a interação direta e a negociação entre agentes vizinhos por meio do envio de mensagens, facilitando a coordenação e a busca pela solução ótima de forma colaborativa.

Como pode ser observado nos exemplos acima, a representação gráfica é fundamental para ilustrar as interações das restrições entre variáveis e agentes. Geralmente, os DCOP são visualizados como grafos de restrições, como apresentado na Figura 12, onde variáveis são representadas por círculos e as restrições entre pares de variáveis por arestas. No entanto, a maioria dos trabalhos de coordenação em SMA prefere utilizar a representação em grafo-fator, exemplificado na Figura 13 devido à sua capacidade de decompor problemas complexos em somas de funções locais, representadas por fatores. Grafos-fator são bipartidos, tendo nós representando as variáveis (círculos) e nós que representam as restrições como funções locais (quadrados), permitindo a modelagem de restrições n-árias como funções de custo entre subconjuntos de variáveis (CORRÊA, 2015).

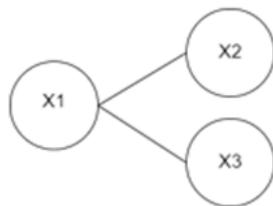


Figura 12: Exemplo: Grafo de restrição.

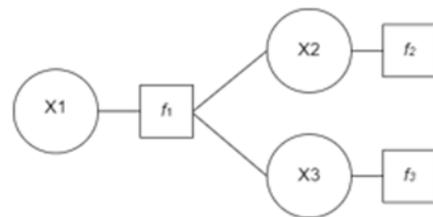


Figura 13: Exemplo: Grafo-fator.

Adaptado de (CORRÊA, 2015)

Além disso, Árvores de Pesquisa em Profundidade (ou DFST - do inglês *Depth First Search Tree*) ou pseudo-árvores, são frequentemente empregadas em algoritmos DCOP, fornecendo uma estrutura hierárquica onde variáveis relacionadas por restrições aparecem no mesmo ramo, estabelecendo assim uma ordenação parcial entre as variáveis, conforme observado nas figuras 14 e 15. Esta ordenação facilita a aplicação de algoritmos que requerem tal hierarquia, como, por exemplo, o algoritmo DPOP.

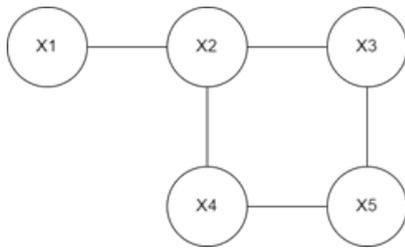


Figura 14: Grafo de interação.

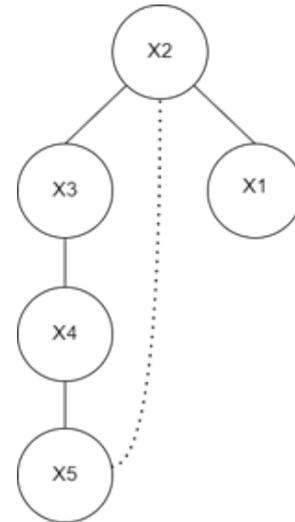


Figura 15: Grafo estruturado hierarquicamente (pseudo-árvore).

2.4.3 Algoritmos para DCOP

Os algoritmos DCOP são especialmente relevantes devido ao suporte que oferecem no processo de tomada de decisão entre múltiplos agentes autônomos. Abaixo segue um breve resumo do funcionamento de três algoritmos descentralizados e síncronos (FIORETTO; PONTELLI; YEOH, 2018) utilizados nesse trabalho.

O DPOP (do inglês *Distributed Pseudo-tree Optimization Procedure*) (PETCU; FALTINGS, 2005) é um algoritmo completo e síncrono que opera por meio de uma pseudo-árvore, semelhante a da Figura 15, para otimizar problemas distribuídos. Funciona em três fases principais:

1. Organização dos agentes em uma pseudo-árvore;
2. Propagação de mensagens UTIL que contêm custos agregados de subproblemas de cada agente; e

3. Propagação de mensagens VALUE, que direcionam a escolha de valores ótimos para as variáveis com base nas mensagens UTIL.

Inicialmente, cada agente, começando pelas folhas, calcula e propaga custos para seus pais até a raiz. Após todas as mensagens UTIL serem recebidas pela raiz, inicia-se a fase de propagação de VALUE, onde cada agente seleciona e propaga o valor ótimo para suas variáveis, começando pela raiz até as folhas. Este método assegura a otimização eficiente, embora requeira uma quantidade maior de memória, quando comparada a outros algoritmos DCOP.

O DPOP é um algoritmo completo que garante encontrar uma solução ótima, sendo adequado em situações onde a obtenção dessa solução é crítica e há recursos computacionais para realizar os cálculos. Contudo, existem algoritmos que não asseguram alcançar a solução ótima, sendo preferíveis em cenários onde a rapidez e a flexibilidade são mais importantes que a otimalidade estrita, como no DSA e do MGM.

Os algoritmos de busca local incompletos, como o DSA (do inglês *Distributed Stochastic Algorithm*) (ZHANG et al., 2005) e o MGM (do inglês *Maximum Gain Message*) (MAHESWARAN; PEARCE; TAMBE et al., 2004) operam trocando informações entre agentes vizinhos e atualizando as atribuições baseadas nas informações recebidas. São projetados para melhorar iterativamente as soluções locais de cada agente e são conhecidos por sua capacidade de continuar melhorando a solução ao longo do tempo, embora não garantam encontrar a solução ótima.

No DSA cada agente inicia com uma atribuição de valor aleatória e comunica essa atribuição aos seus vizinhos. Durante cada iteração, o agente coleta as atribuições dos vizinhos e seleciona um novo valor que reduz mais o seu custo local. No entanto, ao contrário de métodos determinísticos, o DSA decide, com base em uma probabilidade p , se adota o novo valor ou se mantém o valor atual, mesmo que outras opções também reduzam o custo. Essa abordagem estocástica ajuda a evitar mínimos locais e promove uma exploração mais ampla do espaço de solução, o que pode levar a melhores resultados globais ao longo do tempo. A Imagem 16 apresenta o pseudo-código do DSA.

O MGM inicia seu processo igual ao DSA, ou seja, cada agente seleciona um valor aleatório e o comunica aos seus vizinhos. Em seguida, o agente avalia os ganhos locais possíveis e envia esses ganhos aos vizinhos. O agente com o maior ganho entre todos os seus vizinhos altera seu valor para maximizar seu ganho local, enquanto os demais agentes mantêm seus valores atuais. Essa abordagem competitiva e determinística garante que

Distributed Stochastic algorithm(DSA)

```

For each agent  $a_i$  executes:
1  $value \leftarrow Choose\_Random\_Value()$ 
2 Sends value to all neighbors
3 while termination condition is not met do
4   collect neighbors' value
5   select a new value which reduces the local cost most
6    $\Delta \leftarrow$  the number of the cost reduced by the new value
7   if  $\Delta \geq 0$  and  $Random() \leq p$  then
8     | assign the new value
9   end
10  send value to all neighbors
11 end

```

Figura 16: Pseudo-código do algoritmo DSA.

Fonte: (CHEN et al., 2020)

apenas um agente por vez altere seu valor, evitando a incerteza e a instabilidade que poderiam surgir com múltiplas atualizações simultâneas. O processo é repetido até que a condição de término seja atendida, levando a melhorias constantes na qualidade da solução. A Imagem 17 apresenta o pseudo-código do MGM.

Maximum Gain Message Algorithm (MGM)

```

1 foreach agent  $x_i$  do
2   value  $\leftarrow$  Choose a random value;
3   Send value to neighbors;
4 while termination condition not met each agent  $x_i$  do
5   Receive neighbors' values;
6   Choose a new value that reduces the local utility most;
7    $G_i$  (gian)  $\leftarrow$  the number of the local utility reduced by the new value;
8   Send  $G_i$  to neighbors;
9   Receive neighbors'  $G_j$ ;
10  if  $G_i$  is less than all  $G_j$  of neighbors then
11    | Assign the new value;
12    | Send value to neighbors;

```

Figura 17: Pseudo-código do algoritmo MGM.

Fonte: (LIAO; HOANG, 2024)

Esta diferença fundamental reflete uma abordagem mais agressiva no MGM para convergir rapidamente para melhores soluções locais, enquanto o DSA incorpora um elemento de aleatoriedade para potencialmente explorar soluções mais diversificadas, evitando assim ficar preso em soluções sub-ótimas.

2.5 Considerações Finais

Este capítulo fornece informações necessárias sobre os benefícios da união entre a Internet das Coisas e das Cidades Inteligentes, destacando a importância dos sistemas autoadaptativos e a tecnologia de Agentes e Sistemas Multiagentes na resolução de Problemas de Restrições Distribuídos. A aplicação de DCOP para ajustar dinamicamente a iluminação pública por meio de dispositivos IoT exemplifica uma abordagem inovadora para a gestão adaptativa de recursos. A iluminação pública adaptativa, baseada na detecção de variáveis ambientais como tráfego e condições climáticas, ilustra como a integração dessas tecnologias pode melhorar a eficiência energética e adaptar dinamicamente as variáveis segundo as necessidades do ambiente urbano.

3 Revisão Sistemática da Literatura

O tema deste trabalho foi desenvolvido após a realização de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), uma metodologia essencial para consolidar o conhecimento científico existente sobre um tema específico, no caso deste trabalho, Sistemas IoT Adaptativos no contexto das Cidades Inteligentes.

Nos capítulos anteriores, foi discutido a relevância da Internet das Coisas e das Cidades Inteligentes, destacando a importância dos sistemas autoadaptativos e a tecnologia de Agentes e Sistemas Multiagentes para resolver Problemas de Restrições Distribuídas, com um enfoque particular na otimização e gestão da iluminação pública mediante o uso do formalismo DCOP.

A escolha por realizar uma RSL foi motivada pela necessidade de mapear o estado da arte e identificar lacunas na literatura técnica que possam abrir caminhos para novas pesquisas. A RSL permite uma avaliação sistemática, rigorosa e replicável das evidências disponíveis, garantindo que a pesquisa seja fundamentada em uma base sólida de conhecimento ([KEELE et al., 2007](#)). Esta abordagem metodológica foi adotada para entender como diferentes estratégias e tecnologias têm sido aplicadas na implementação de sistemas IoT adaptativos para Cidades Inteligentes, proporcionando um conhecimento mais aprofundado e atualizado sobre os tópicos ligados a pesquisa.

Através da RSL, foi possível compilar e analisar as principais plataformas e aplicações de IoT adaptativos, bem como identificar os desafios e oportunidades existentes na área. Este capítulo, portanto, detalha o processo metodológico da revisão, seguido da execução, análise e discussão dos resultados obtidos, destacando as lacunas de pesquisa que justificam a exploração do tema central desta dissertação: a aplicação de DCOP para sistemas IoT adaptativos no contexto das Cidades Inteligentes.

3.1 Metodologia e Planejamento

A revisão sistemática foi realizada visando abordar desafios significativos no desenvolvimento de sistemas IoT adaptativos para Cidades Inteligentes. A pergunta de pesquisa principal formulada para guiar este estudo foi: "**Quais são os desafios para construir sistemas IoT adaptativos para SC?**" Para abordar esta questão de maneira abrangente, a investigação foi dividida em três subquestões focadas nos diferentes aspectos dos sistemas IoT adaptativos:

- RQ1. Quais são as plataformas usadas para sistemas IoT adaptativos?
 - RQ1.a As plataformas existentes foram projetadas para serem adaptativas?
 - RQ1.b Quais são seus componentes/funcionalidades?
 - RQ1.c Quais tecnologias são utilizadas para adaptação?
- RQ2. Que tipo de aplicações SC as plataformas suportam?
- RQ3. Que aspectos da adaptação são abordados?

Essas subquestões visam desdobrar a questão principal em categorias específicas que facilitam uma análise detalhada das plataformas, suas funcionalidades e aplicações, bem como os aspectos de adaptação críticos para a implementação bem-sucedida de sistemas adaptativos em ambientes urbanos.

Para responder às perguntas, foi realizada uma investigação acerca das plataformas (levando a **como** os sistemas são construídos), aplicativos (levando a **quais** sistemas são construídos) e aspectos de adaptação (**o que** adaptar). O objetivo geral da revisão é discutir os recursos de cada plataforma e aprender como ela lida com o comportamento adaptativo para obter uma visão geral e identificar os desafios para construir sistemas IoT adaptativos para SC, levando a possíveis oportunidades de pesquisa.

A revisão sistemática foi iniciada com a definição de uma estratégia de busca detalhada, utilizando-se a base de dados Scopus ¹, focando em artigos e conferências em inglês. As palavras-chave selecionadas foram estruturadas para abranger três principais domínios: Cidades Inteligentes, Internet das Coisas e Adaptabilidade.

A busca foi realizada em abril de 2023 e resultou em 754 documentos, dos quais 170 foram selecionados para avaliação mais detalhada após a filtragem inicial pelo título.

¹<https://www.scopus.com/>

De modo a convergir cobertura e precisão, foi aplicado o seguinte filtro de busca (*search string*):

```
TITLE-ABS (("smart cit*" OR "intelligent cit*" OR "digital cit*"
OR "smart environment*") AND ("internet of things" OR iot
OR "Internet of everything") AND ("self-" OR "autonom "
OR "osmotic" OR "adapt*")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar")
OR LIMIT-TO(DOCTYPE, "cp")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA, "COMP"))
AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English"))
```

3.2 Execução

A seleção dos trabalhos envolveu várias etapas de filtragem, começando pela leitura de títulos, seguida de resumos e, por fim, leitura completa. , aplicando critérios de inclusão e exclusão para garantir a relevância dos estudos e o consenso entre os revisores. A Figura 18 mostra as etapas de seleção aplicadas.



Figura 18: Etapas para seleção dos estudos relevantes.

Após definir a sequência de busca, a busca resultou em 754 artigos. Após o processo de triagem de Título (584 artigos removidos) e Resumo (116 artigos removidos), 54 artigos permaneceram para uma leitura completa. O conjunto final compreende 21 artigos dos quais informações relevantes foram extraídas e forneceram a base para as análises e discussões.

Foi seguida uma estratégia detalhada de extração de informação para sintetizar os dados relevantes dos artigos finais. Um pesquisador foi responsável por extrair as informações utilizando uma tabela de campos de extração, como descrito abaixo. Posteriormente, um segundo pesquisador revisou todos os dados extraídos para garantir precisão e consistência nas informações compiladas. A tabela de extração de informações (tabela 1) foi essencial para organizar e categorizar os dados relevantes encontrados nos estudos selecionados.

Tabela 1: Campos de extração de informações.

Campo	Descrição
Informação de Referência	Autores, título, ano e local de publicação
Resumo	Resumo do artigo
RQ1. Plataformas	Principais plataformas (privadas ou de código aberto) que oferecem funcionalidades para coletar, armazenar, gerenciar e compartilhar dados em sistemas IoT para SC
RQ2. Aplicações	Aplicações, domínios e casos de uso que são exemplos concretos de comportamento adaptativo em sistemas IoT para SC
RQ3. Aspectos	O que adaptar em um sistema IoT (camada, protocolo, arquitetura...) para um domínio SC
Tipos de Adaptação	A adaptação é mais direcionada ao contexto da cidade, os usuários, o ambiente ou a infraestrutura de rede e servidores de nuvem/borda/névoa
Definição para SC	Atualizar a definição de SC no contexto de comportamento adaptativo para sistemas IoT - Se disponível
Definição para Sistema IoT	Atualizar a definição de sistema IoT no contexto de comportamento adaptativo para SC - Se disponível
Definição para Sistema Adaptativo	Definir o que é comportamento adaptativo em sistemas IoT para SC - Se disponível
Desafios	Questões abertas e lacunas de pesquisa na área
Estudo de Avaliação	Se disponível
Informação Adicional	Informações interessantes – se aplicável

Sobre a Avaliação da Qualidade do Artigo, análise comum em RSL, consideramos o estudo experimental de avaliação (se disponível) nos artigos revisados como uma forma de reunir evidências sobre as soluções propostas. No entanto, após a seleção, constatou-se que muitos artigos não tinham nenhum estudo de avaliação disponível. Por esse motivo, não se realizou uma a Avaliação da Qualidade, pois não há informações metodológicas a serem avaliadas. Portanto, não realizar a Avaliação da Qualidade representa uma ameaça à validade desta revisão. Em vez disso, se avaliou os artigos em questões de adequação, ou seja, como os artigos contribuíram para responder às questões de pesquisa.

3.3 Análise

Considerando os elementos apresentados acima, essa seção discute as principais tendências e características observadas no estudo sobre sistemas IoT adaptativos para Cidades Inteligentes, com base nos artigos selecionados, detalhando aspectos como a distribuição temporal das publicações, os principais canais na disseminação deste conhecimento, e as tecnologias predominantes identificadas, destacando como esses fatores contribuem para o desenvolvimento e a compreensão do campo. Este mapeamento permite visualizar não apenas a evolução da pesquisa ao longo do tempo, mas também identificar as ferramentas e abordagens utilizadas.

Distribuição Temporal das Publicações

Conforme ilustrado na Figura 19, a distribuição dos anos de publicação dos artigos analisados varia de 2014 a 2022. Observa-se que 43% dos artigos são provenientes de periódicos, enquanto 57% são de conferências, conforme detalhado na Figura 20. Uma análise mais detalhada desse aspecto revela um aumento nas publicações entre os anos de 2018 e 2022, sugerindo um crescimento do interesse no tema das Cidades Inteligentes e nas tecnologias IoT.

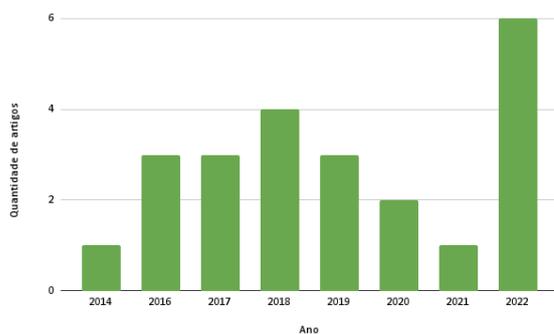


Figura 19: Ano de publicação dos artigos.

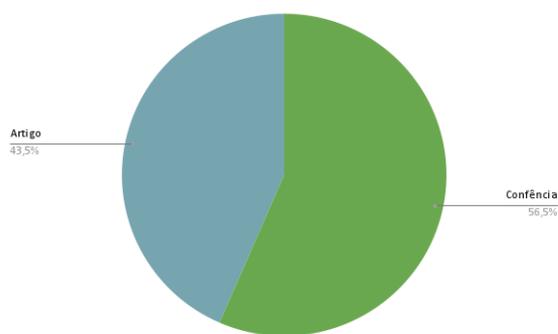


Figura 20: Tipos de artigos.

Editoras e Comunidades Envolvidas

A Figura 21 oferece uma visão sobre as editoras que mais publicaram trabalhos relacionados ao tema. A Springer destaca-se como a editora com o maior número de artigos selecionados, o que indica sua relevância nos principais eventos e comunidades científicas interessadas em Cidades Inteligentes.

Tecnologias Predominantes

A Figura 22 destaca as tecnologias mais citadas nos artigos. Os sistemas multiagen-

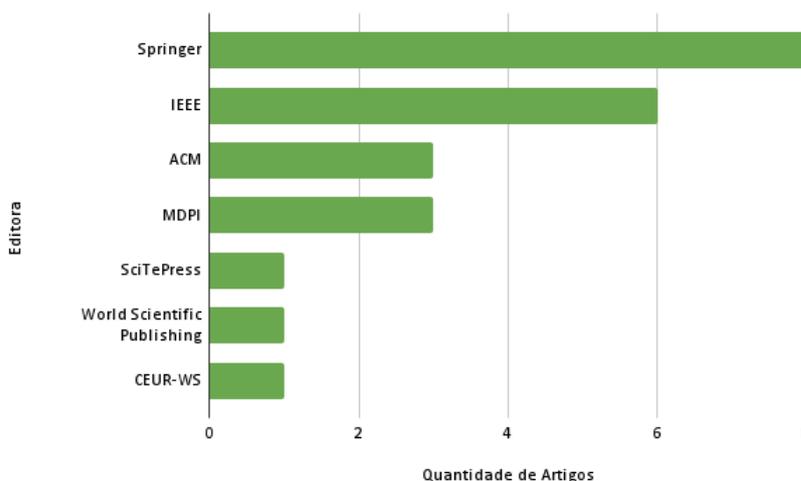


Figura 21: Quantidade de artigos por editora.

tes emergem como a tecnologia predominante, o que se justifica pela complexidade dos ambientes urbanos, onde é complexo prever todos os cenários possíveis e programar comportamentos específicos antecipadamente. Neste contexto, os agentes são extremamente valiosos devido à sua capacidade de aprender e se adaptar continuamente ao ambiente. Além disso, tecnologias como computação em nuvem, Edge e Fog Computing, simulação e aprendizado de máquina também surgiram como ferramentas aplicáveis em sistemas autoadaptáveis. A Computação Osmótica, frequentemente integrada com Edge Computing e agentes, é destacada por sua capacidade de abstração e adaptação. O loop de feedback MAPE-K também é amplamente utilizado, sendo um dos modelos mais reconhecidos para o desenvolvimento de sistemas autoadaptativos.

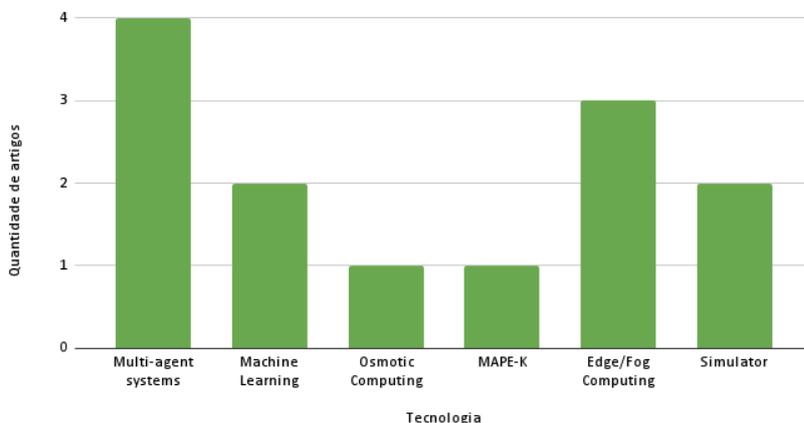


Figura 22: Mapeamento de tipos de tecnologia.

3.4 Resultados

Na Figura 23 é possível observar a distribuição das respostas às questões de pesquisa entre os 23 artigos estudados. Abaixo, segue uma análise detalhada de cada uma das três principais questões de pesquisa (RQs), explorando os principais achados, exemplos representativos e implicações para o desenvolvimento de Cidades Inteligentes por meio de tecnologias adaptativas e IoT.

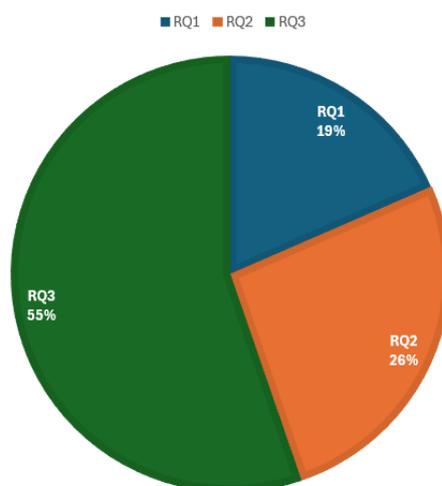


Figura 23: Quantitativo de artigos por RQs.

3.4.1 RQ1: Plataformas Usadas para Sistemas IoT Adaptativos

Os artigos selecionados apresentam uma variedade de plataformas e frameworks que contribuem para o desenvolvimento de ambientes inteligentes e aplicações no contexto de sistemas IoT adaptativos. Estas plataformas visam melhorar a inteligência, adaptabilidade e escalabilidade dos dispositivos IoT, permitindo-lhes responder de forma eficiente às mudanças ambientais e às necessidades dos usuários. Dentre os 23 artigos selecionados, sete exploram tecnologias adaptativas, contudo apenas dois tratam de plataformas projetadas exclusivamente para sistemas IoT adaptativos:

- **Rainbow:** A plataforma Rainbow adota uma camada distribuída de agentes sobre a camada física do IoT, abordando a heterogeneidade e complexidade dos sistemas. Inclui algoritmos adaptativos e descentralizados para aplicações ciberfísicas em larga escala, como SC. Utiliza comportamentos emergentes resultantes das interações entre agentes, aumentando as capacidades de adaptação e autoconfiguração (GIORDANO; SPEZZANO; VINCI, 2016).

- **Sapparchi**: Esta plataforma propõe a execução de aplicações em múltiplos níveis computacionais (Edge, Fog e Cloud), típicos do ambiente SC. Foca na escalabilidade distribuindo a carga de trabalho através dos níveis computacionais usando computação osmótica para equalizar os fluxos de trabalho. A utilização de tecnologias de computação Edge/Fog em sua arquitetura permite maior escalabilidade da plataforma e menor consumo de largura de banda (SOUZA, Arthur et al., 2022).

Além dessas, outras plataformas destacam-se por sua versatilidade e uso em diversos domínios inteligentes:

- **iSapiens**: Sistema orientado a agentes baseado em Java que modela objetos inteligentes como agentes em um sistema multiagente. Os agentes colaboram para atingir metas específicas, proporcionando capacidades de raciocínio e inteligência aos dispositivos IoT. Esta abordagem aproveita a computação de borda, processando dados mais próximos dos dispositivos, reduzindo custos e melhorando a eficiência (CICIRELLI et al., 2018).
- **SitOPT**: Plataforma que fornece meios para identificar, processar e reagir a situações capturadas por sensores heterogêneos. Sua arquitetura de três camadas utiliza sensores e mecanismos de consciência situacional para modelar e detectar situações relevantes, utilizando workflows adaptativos como mecanismo reativo para essas situações (HIRMER et al., 2017).

Dois artigos utilizaram o simulador DeltaIoT para desenvolver projetos de sistemas adaptativos, modelando aplicações de SC:

- **DingNet**: Um simulador para pesquisa de auto-adaptação que usa uma configuração física de IoT para modelar aplicações de SC. As aplicações conectam-se a gateways geograficamente distribuídos que podem interagir por meio de uma rede sem fio com microcontroladores equipados com sensores e atuadores (PROVOOST; WEYNS, 2019).
- **DeltaIoT**: O foco foi explorar as versões DeltaIoT.v1 e DeltaIoT.v2 para enfrentar a análise exaustiva de grandes espaços de adaptação usando aprendizado de máquina online. Esta abordagem melhora o loop de feedback tradicional MAPE-K (Monitor - Analyzer - Planner - Executor - Knowledge) com um módulo de aprendizado que auxilia o analisador na seleção de opções de adaptação relevantes (QUIN; WEYNS; BAMELIS; BUTTAR et al., 2019).

Em (SULTAN; AHMED, 2017) foi apresentado um framework com grande potencial para uso em sistemas adaptativos. O SLASH (Self-Learning and Adaptive Smart Home) é um sistema de autoaprendizado para casas inteligentes que utiliza aprendizado de máquina para aumentar a inteligência dos sensores domésticos, permitindo-lhes detectar autonomamente diversas situações, aprender os padrões de comportamento dos habitantes e, subsequentemente, responder e controlar as funcionalidades da casa com mínima intervenção humana.

Embora esses frameworks e plataformas sejam abordagens inovadoras e contribuições valiosas para o campo de IoT em ambientes urbanos inteligentes, ainda há necessidade de mais trabalhos dedicados a buscar soluções adaptativas voltadas especificamente para Cidades Inteligentes.

3.4.2 RQ2: Aplicações de SC Suportadas pelas Plataformas

No que se refere a RQ2, dos 23 artigos analisados, 10 descrevem especificamente aplicações em sistemas IoT adaptativos para SC. Essas aplicações abrangem monitoramento ambiental, melhoria da qualidade de vida, otimização da infraestrutura urbana, adaptação de redes móveis e adaptação em ambientes inteligentes, demonstrando a versatilidade e a aplicabilidade das tecnologias adaptativas. Tais soluções beneficiam a população, o governo e o meio ambiente, fornecendo tecnologias que possibilitam uma tomada de decisões mais inteligente e que melhoram a vida nas cidades.

Várias aplicações práticas dessas tecnologias podem ser destacadas:

- **Preservação do Patrimônio Cultural:** O artigo (GIALLONARDO et al., 2020) propõe uma arquitetura baseada em semântica e ontologia para sistemas reativos autoadaptativos. Um estudo de caso é realizado para projetar um sistema de edifícios inteligentes dedicado à preservação do patrimônio cultural, utilizando sensores e atuadores como infravermelhos, de presença, câmeras térmicas e sensores de ligar/desligar para modelar o ambiente e garantir resiliência ao reconfigurar o modelo quando sensores falham, substituindo-os por sensores lógicos equivalentes.
- **Gestão de Recursos Urbanos:** O artigo (MEDVEDEV et al., 2016) apresenta uma arquitetura para armazenar e indexar contextos em aplicações de SC, exemplificada pela gestão de resíduos sólidos. Sensores em lixeiras fornecem informações para otimizar rotas de coleta, reduzindo o consumo de combustível e melhorando a qualidade do serviço.

- **Controle de Infraestrutura Urbana:** A plataforma Rainbow (GIORDANO; SPEZZANO; VINCI, 2016) é utilizada em três aplicações de SC: mapeamento da poluição sonora, controle de redes de drenagem urbana para reduzir impactos ambientais durante chuvas intensas e monitoramento da qualidade do ar. Já a plataforma SitOPT (HIRMER et al., 2017) é aplicada em salas de servidores, onde sensores de temperatura podem acionar ações como notificar o administrador ou iniciar o controle climático.
- **Gestão de Emergências:** O artigo (MERABET; BENMERZOU, 2022) apresenta a extensão BPMN4SAS para gerenciar a adaptação desde a fase de modelagem, com critérios pré-definidos para otimizar o desempenho. Um exemplo é o gestor de acidentes, que usa BPMN4SAS para modelar diferentes atividades com suas respectivas restrições de QoS (desempenho, disponibilidade, segurança, etc.), suportando a gestão adaptativa e eficiente de emergências, tornando a cidade mais segura e resiliente frente a eventos inesperados.
- **Jogos Online e Entretenimento:** O artigo (SINGH; ALI; LUNDBERG, 2022) propõe um estudo de caso para uma rede IoT dedicada a jogos online, que requer um ambiente inteligente e adaptável. A rede deve suportar sensores para proporcionar uma experiência de jogo realista e gestão autônoma baseada nas políticas dos stakeholders e no contexto do usuário.
- **Estacionamento Inteligente:** A plataforma Sapparchi (SOUZA, Arthur et al., 2022) é utilizada em um estudo de caso para uma aplicação de estacionamento inteligente, mapeando em tempo real os espaços disponíveis na cidade.
- **Ambientes Inteligentes:** O sistema SLASH (SULTAN; AHMED, 2017) para casas inteligentes utiliza aprendizado de máquina para aumentar a inteligência dos sensores domésticos, permitindo que detectem autonomamente diversas situações, aprendam os padrões de comportamento dos habitantes e, posteriormente, respondam e controlem as funcionalidades da casa com mínima intervenção humana.

Essas aplicações ilustram como as tecnologias adaptativas são essenciais para atender às demandas complexas e em constante mudança das cidades modernas, tornando-as mais sustentáveis, eficientes e acolhedoras para seus habitantes.

3.4.3 RQ3: Aspectos da Adaptação Abordados

Na análise dos artigos, foi realizado um levantamento para saber quais os aspectos dos sistemas IoT são adaptados. Dos 23 artigos, sete podem ser considerados exemplos de sistemas verdadeiramente adaptativos, nos quais a arquitetura do sistema tem sua estrutura e/ou comportamento dinamicamente alterados. Observaram-se também várias instâncias de adaptação no nível de comunicação, que incluem desde a potência de transmissão até o protocolo de rede e o formato de dados. Quatro artigos lidam apenas com o comportamento adaptativo das aplicações, não abordando o sistema computacional como um todo.

Sistemas Verdadeiramente Adaptativos:

- O artigo ([GAZIS et al., 2014](#)) discute a adaptação de protocolos de rede para ambientes IoT, focando na necessidade de integrar dispositivos e redes heterogêneas através de gateways M2M. Para lidar com a complexidade e os desafios de integração que surgem devido à diversidade de dispositivos e tecnologias, os autores sugerem o uso de princípios autônômicos. Esses princípios permitem uma configuração flexível e dinâmica da pilha de protocolos de rede, adaptando-a conforme as necessidades dos serviços sem que haja necessidade de revelar detalhes complexos das tecnologias de rede nos níveis superiores do sistema. O artigo destaca o uso de descrições semânticas, ou ontologias, para alcançar uma integração eficaz e automática.
- O artigo ([ANGARITA; MANOUVRIER; RUKOZ, 2016](#)) aborda a capacidade de autocura de sistemas autônomos, introduzindo um agente de componente de aplicação *Web of Things* (WoT) que automatiza a detecção, diagnóstico e reparo de falhas de software e hardware. Esse sistema destaca-se como um exemplo de adaptação comportamental e estrutural dos componentes do sistema, permitindo que o sistema mantenha sua funcionalidade mesmo diante de falhas.
- O artigo ([WEISSBACH et al., 2017](#)) explora a descentralização da coordenação de adaptação em sistemas autônomos, permitindo a modificação dinâmica do comportamento das aplicações com base em contextos mutáveis. Esse sistema adapta, com o apoio de um gestor de adaptação, qualquer comportamento da aplicação. Desta forma, todas as funcionalidades dependentes do contexto, e os respectivos componentes que as implementam, podem ser adaptados em tempo de execução.

- Em (WEYNS; RAMACHANDRAN; SINGH, 2018) é examinada a necessidade de autogestão em IoT, destacando como as incertezas nos diversos elementos do ecossistema IoT exigem adaptações automáticas para manter a operação eficiente. Nesse sentido, o que adaptar pode ser ilustrado pela escolha de um protocolo de roteamento ou pela forma como as mensagens são roteadas em uma configuração *multi-hop*. Este é um exemplo de adaptação do próprio sistema, seja a nível comportamental (configuração de rotas) ou estrutural (alteração de um componente que implementa o protocolo de roteamento).
- (CICIRELLI et al., 2018) apresenta um sistema multiagente, onde os agentes se adaptam dinamicamente ao ambiente e seguem um ciclo cognitivo de análise, decisão e ação. Similar ao modelo MAPE-K, os agentes adaptativos seguem um ciclo de quatro etapas: coleta de dados, análise de dados, planejamento de decisões em resposta a problemas detectados e execução de mudanças planejadas no estado do aplicativo. Nesse sistema os dispositivos físicos, objetos virtuais, agentes ou até mesmo nós completos de computação podem ser adicionados, removidos ou atualizados conforme necessário. Além disso, as relações entre os agentes também podem ser ajustadas dinamicamente, refletindo a capacidade do sistema de se adaptar integralmente às condições variáveis, modificando tanto sua estrutura quanto seu comportamento.
- Em (MERABET; BENMERZOUG, 2022) foi desenvolvido um sistema IoT adaptativo que incorpora capacidades de auto-reparo para lidar com falhas durante a execução, garantindo o cumprimento contínuo dos requisitos de Qualidade de Serviço (do inglês *Quality of Service*). Para alcançar isso, os autores propõem uma extensão chamada BPMN4SAS, que introduz elementos de adaptação já na fase de design do processo de gestão de negócios. Esse enfoque no design visa preparar o sistema para adaptar-se e responder proativamente durante a execução. Desta forma, quando um serviço enfrenta o risco de falha ou degradação de desempenho, o sistema é capaz de reconfigurar-se automaticamente, substituindo o serviço problemático por outro adequado de uma lista predefinida de serviços alternativos. Essa capacidade de reconfiguração estrutural sublinha um modelo avançado de adaptabilidade em sistemas IoT.
- O trabalho (SOUZA, Arthur et al., 2022) apresenta uma arquitetura que permite a migração dinâmica de aplicações entre a nuvem e a borda, utilizando computação osmótica para responder a mudanças de qualidade de serviço em tempo real. O

aspecto do que adaptar refere-se à camada física onde os componentes do aplicativo são executados no sistema SC.

Comportamento Adaptativo das Aplicações:

- Em (GIORDANO; SPEZZANO; VINCI, 2016) é utilizada a tecnologia de agentes para adaptar automaticamente as operações de controle do sistema de drenagem urbana, baseando-se em medições contextuais para gerenciar eventos como chuvas intensas. Apensar do sistema não ser adaptativo, as ações realizadas são, pois os agentes autônomos observam, inferem e agem conforme o contexto.
- Em (MEDVEDEV et al., 2016) foi descrito um sistema de gestão de resíduos sólidos que adapta as rotas de coleta de lixo com base em dados sensoriais em tempo real e informações contextuais para otimizar o serviço. Este trabalho é mais um exemplo onde o sistema não é adaptativo, mas sim as ações da aplicação (a lógica comportamental) que é adaptada conforme a demanda.
- O artigo (HIRMER et al., 2017) apresenta mecanismos para reconhecer e responder a situações emergentes baseadas em dados de sensores, ajustando operações em tempo real. A abordagem consiste em duas partes principais, a detecção de situações usando dados brutos coletados por sensores e o gerenciamento dessas situações por meio de mecanismos específicos. Os autores destacam que as respostas às situações identificadas são moldadas pela natureza específica de cada situação e pelos recursos de instrumentação disponíveis para enfrentá-las. Esses mecanismos permitem uma resposta flexível e adaptativa a uma variedade de condições e cenários emergentes detectados pelos sensores. No entanto, os autores não delimitam especificamente quais aspectos do sistema ou quais operações podem ser adaptadas através dessa abordagem, deixando um escopo aberto para futuras especificações de adaptação conforme as necessidades operacionais e contextos variados.
- O artigo (MORMUL et al., 2017) detalha uma metodologia para integrar e gerenciar dados de situações em ambientes inteligentes através de um modelo de situação, que atua como interface entre a detecção e as aplicações que respondem a estas situações. Este modelo possibilita que aplicações se adaptem automaticamente a mudanças detectadas sem interações diretas com os serviços de reconhecimento de situação, por meio de uma camada de gerenciamento que desacopla a detecção das aplicações. Isso é realizado registrando e gerindo 'situações' identificadas a partir de dados contextuais coletados por sensores, permitindo que aplicações se registrem para receber

notificações sobre condições específicas e ajustem suas operações conforme necessário. Essa abordagem promove eficiência e adaptabilidade em ambientes complexos, como fábricas inteligentes, facilitando uma operação mais dinâmica e otimizada.

- O sistema SLASH para casas inteligentes ([SULTAN; AHMED, 2017](#)), adapta as funcionalidades da casa aprendendo os padrões comportamentais dos moradores e respondendo automaticamente a situações detectadas. Contudo, o conceito de adaptação pode ser visto no sentido de que as ações da aplicação são adaptáveis ao contexto/ambiente, assim sistema não pode ser considerado estritamente adaptativo, pois não modifica sua estrutura ou comportamento.
- O artigo ([CABRERA; CLARKE, 2019](#)) propõe um modelo de serviço auto-adaptativo que ajusta a organização das informações de serviços com base nos eventos ocorridos na cidade, apoiando a descoberta de novos serviços. Esse modelo visa adaptar a organização das informações de serviços para responder ativamente às mudanças e eventos da cidade. Mediante uma arquitetura autoadaptável, o sistema monitora e ajusta as métricas de descoberta de serviços. Assim, promove a troca de informações entre os registros para garantir que a descoberta de serviços seja sempre eficiente e atualizada. O principal aspecto que se adapta nesse modelo são os metadados, que descrevem os serviços disponíveis, garantindo que a organização dessas informações esteja alinhada com as necessidades dinâmicas da cidade.
- Em ([RUST; PICARD; RAMPARANY, 2022](#)), os ambientes inteligentes baseados em IoT são concebidos como sistemas onde os dispositivos (considerados agentes), devem agir de forma cooperativa, autônoma e dinâmica de acordo com um comportamento coletivo que facilite a vida do usuário. A proposta baseia-se no conceito de configuração espontânea do ambiente, por exemplo, definindo, dependendo de diversas condições, níveis adequados de luz, calor e umidade na casa. A proposta adapta o estado do ambiente conforme os objetivos do usuário e o estado atual. Portanto, é outra instância de aplicação adaptativa, não de sistema.
- O artigo ([SINGH; ALI; LUNDBERG, 2022](#)) explora como adaptar o comportamento de um sistema IoT para responder adequadamente às necessidades e ao contexto dos diferentes usuários, incluindo condições físicas específicas como a frequência cardíaca. O foco está em ajustar o processamento de dados e a localização desses dados dentro do sistema para otimizar a interação e a eficiência. Para alcançar isso, o artigo propõe atualizar continuamente a base de conhecimento do sistema com novos metadados e assinaturas de dados que se tornam relevantes dinamicamente.

Além disso, ajusta-se os componentes e protocolos do sistema para gerenciar eficientemente esses dados. Esta abordagem representa uma adaptação comportamental, modificando alguns elementos do sistema para melhor se alinhar com as necessidades em constante mudança dos usuários e do ambiente operacional.

Adaptação no Nível de Comunicação:

Os artigos listados abaixo foram selecionados devido à sua abordagem de adaptação focada no nível de comunicação/rede.

- O artigo ([AN et al., 2019](#)) implementa a descoberta dinâmica de novas informações e a tradução automática de dados entre diferentes plataformas IoT, utilizando proxies de intermediação semântica. Observa-se que o aspecto do que adaptar refere-se ao formato dos dados.
- Em ([PROVOOST; WEYNS, 2019](#)), os autores exploram como os motes móveis em sistemas IoT podem adaptar suas configurações de comunicação para garantir que a transmissão de dados seja tanto confiável quanto eficiente em termos energéticos. A adaptação abrange diversos aspectos das configurações de comunicação, permitindo ajustes como a potência de transmissão e a taxa de amostragem dos dispositivos, que são modificados segundo as variações ambientais. Além disso, é possível alterar o gateway de destino para onde os dados são enviados ou até mesmo mudar o protocolo de comunicação em uso, demonstrando uma flexibilidade significativa na gestão da comunicação em ambientes IoT.
- O artigo ([SERHANI; NAJA; JAMALI, 2020](#)) descreve o desenvolvimento de um protocolo de roteamento adaptativo chamado AQ-Routing, que utiliza técnicas de Aprendizado por Reforço (do inglês ()RL) para ajustar dinamicamente as métricas de roteamento em resposta à mobilidade detectada na rede. Este protocolo é capaz de identificar variações no nível de mobilidade em diferentes momentos, permitindo que cada nó da rede ajuste sua métrica de roteamento para se adaptar às condições atuais, melhorando assim a estabilidade das conexões tanto em ambientes estáticos quanto móveis. Isso resulta em um aumento significativo na eficiência da entrega de pacotes em comparação com os modelos de roteamento tradicionais.
- Em ([TODOLI-FERRANDIS; SILVESTRE-BLANES; SEMPERE-PAYÁ, 2021](#)) é apresentando um mecanismo inovador de taxa de dados adaptativa, chamado DROB (do inglês *Downlink Rate Optimization for Class B*), utilizando um software de

simulação para testar a eficácia dessa tecnologia em cenários industriais. O DROB permite ajustar os parâmetros de transmissão de dados de dispositivos de *downlink* e classe B em resposta às condições do canal de comunicação, como a presença de fontes de interferência que simulam ambientes industriais. Este ajuste pretende minimizar o congestionamento nas áreas de alta densidade e otimizar o uso da bateria dos dispositivos. A capacidade de adaptar a taxa de dados conforme o ambiente de rede permite uma caracterização detalhada e eficaz dos eventos na rede, melhorando significativamente a operação e a eficiência dos sistemas de comunicação em ambientes desafiadores.

Esta análise dos artigos revela a diversidade e complexidade dos formatos de adaptação em sistemas IoT, demonstrando que a adaptabilidade não é apenas desejável, mas essencial em ambientes de Cidades Inteligentes. A capacidade de adaptar dinamicamente a arquitetura de sistemas, bem como o comportamento das aplicações e a comunicação, destaca a evolução contínua dos sistemas IoT em resposta às demandas operacionais e ambientais. Estes avanços contribuem significativamente para a resiliência e inteligência dos sistemas IoT, permitindo uma melhor gestão e resposta aos desafios urbanos contemporâneos.

3.5 Discussão

Como observado na Figura 22, os sistemas multiagentes se destacaram como uma tecnologia mais utilizada para sistemas autoadaptativos em IoT destinados a Cidades Inteligentes. Estes agentes promovem a autonomia e a interatividade necessárias para ajustes em tempo real, elementos essenciais para uma gestão eficiente dos recursos urbanos. As plataformas como Rainbow e Sapparchi são exemplos onde os agentes demonstram sua capacidade de autoconfiguração e adaptação em contextos de mudanças dinâmicas, como variações intensas no tráfego ou condições climáticas adversas.

Ademais, as discussões apontaram lacunas e desafios significativos, como a necessidade de uma melhor integração entre diferentes plataformas e a escalabilidade das soluções em ambientes urbanos que se tornam cada vez mais complexos. A eficácia dos sistemas adaptativos também é profundamente dependente da precisão com que os agentes aprendem e reagem às alterações ambientais, uma variável crítica para o sucesso dessas tecnologias.

Com base nesta revisão sistemática da literatura, foi realizado um mapeamento focado em sistemas que utilizam a tecnologia DCOP (do inglês *Distributed Constraint Optimiza-*

tion Problem), que serviu de base para esta dissertação. O uso de DCOP em ambientes de Cidades Inteligentes permite uma coordenação eficaz entre agentes, otimizando a gestão de recursos e a adaptação a condições variáveis, fundamentais para a implementação de soluções inteligentes e adaptativas em larga escala.

O resultado desta revisão sistemática da literatura foi integralmente documentado e compartilhado com a comunidade acadêmica através da publicação do artigo "Self-Adaptation in IoT Systems for Smart Cities"(NOGUEIRA et al., 2023) no Simpósio de 2023 sobre Internet das Coisas (SIoT), realizado em São Paulo, Brasil. A fim de garantir a transparência e permitir a replicação dos resultados, todo o protocolo da revisão está disponível online como um pacote de replicação². Esta iniciativa ressalta o potencial de pesquisa na área e as dificuldades que precisam ser superadas para o desenvolvimento eficaz de soluções adaptativas para Cidades Inteligentes utilizando a tecnologia de Internet das Coisas.

²<http://bit.ly/SIoT>

4 Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais trabalhos relacionados à iluminação pública inteligente, a sistemas de IoT adaptativos e à otimização distribuída de restrições (DCOP). O objetivo é contextualizar as pesquisas existentes e destacar como cada uma contribui para o desenvolvimento de sistemas adaptativos e eficientes em ambientes urbanos. A seção está organizada em três grupos: iluminação, IoT Adaptativo e DCOP - sendo este último a tecnologia utilizada na presente dissertação para ajustar de forma adaptativa a iluminação pública da cidade.

4.1 Iluminação Inteligente

Em (SIKDER et al., 2018) foi apresentado um sistema de iluminação inteligente habilitado para IoT para Cidades Inteligentes, visando melhorar a eficiência energética e a gestão da iluminação pública e privada. A proposta inclui a integração de sensores avançados e protocolos de comunicação para criar um sistema de iluminação inteligente autônomo e eficiente. A solução é composta por três camadas principais: percepção (sensores), comunicação e gestão. Sensores integrados nos nós de iluminação permitem o controle automático com base na intensidade da luz e na presença humana, utilizando protocolos de comunicação habilitados para IoT, como ZigBee, 6LoWPAN e JenNET-IP. O estudo analisou diferentes cenários de uso tanto em ambientes internos e externos, mostrando que a implementação do sistema proposto pode reduzir o consumo de energia em até 33,33% em comparação com sistemas de iluminação convencionais. Entretanto, o artigo não detalha os métodos específicos de gestão de dados utilizados, mencionando apenas que os dados passam por ferramentas de análise para visualizar e analisar as informações coletadas, permitindo a tomada de decisões informadas para o controle eficiente do sistema de iluminação.

Em (SIKDER et al., 2018) foi apresentado um sistema de iluminação inteligente habilitado para IoT para Cidades Inteligentes, visando melhorar a eficiência energética e

a gestão da iluminação pública e privada. A proposta inclui a integração de sensores avançados e protocolos de comunicação para criar um sistema de iluminação inteligente autônomo e eficiente. A solução é composta por três camadas principais: percepção (sensores), comunicação e gestão. Sensores integrados nos nós de iluminação permitem o controle automático com base na intensidade da luz e na presença humana, utilizando protocolos de comunicação habilitados para IoT, como ZigBee, 6LoWPAN e JenNET-IP. O estudo analisou diferentes cenários de uso tanto em ambientes internos e externos, mostrando que a implementação do sistema proposto pode reduzir o consumo de energia em até 33,33% em comparação com sistemas de iluminação convencionais. Para as análises do sistema de iluminação externo, o artigo cria um cenário hipotético com 100 postes, operando por 12 horas em um dia típico. Em contraste, a presente dissertação se destaca por utilizar uma base de dados real para a análise de adaptabilidade e redução energética, proporcionando uma avaliação mais precisa e prática das condições reais de operação uma vez que o fluxo de tráfego para um horário específico muda de um dia para o outro.

No trabalho de (PASOLINI et al., 2019) foi discutido o design, a implementação e a evolução de sistemas heterogêneos de iluminação pública inteligente. O trabalho destaca que, além de substituir luminárias tradicionais por LEDs de baixo consumo, a adição de controladores inteligentes e conectividade de rede pode gerenciar a intensidade da luz e reduzir custos de manutenção. A infraestrutura de iluminação inteligente pode também suportar serviços de IoT em toda a cidade, sendo fundamental para o desenvolvimento de Cidades Inteligentes, especialmente na perspectiva das redes 5G. O artigo analisa arquiteturas de rede e tecnologias de comunicação para aplicações de iluminação pública inteligente, discutindo seus benefícios e desvantagens. A automatização da alocação de tarefas é realizada por controladores de luz que monitoram o estado das luminárias, parâmetros elétricos, e ajustam a intensidade da luz conforme necessário. A pesquisa se baseia em informações de outras fontes, como economias estimadas e experiências relatadas em diferentes cenários de implementação ao redor do mundo. Por outro lado, esta dissertação, como já mencionado, faz o uso de uma base de dados real para a análise de adaptabilidade e redução energética. Além disso, o artigo em questão utiliza uma estrutura centralizada, esta dissertação propõe uma infraestrutura distribuída, utilizando o formalismo DCOP para a gestão adaptativa da iluminação pública.

Em (SÁNCHEZ SUTIL; CANO-ORTEGA, 2020), é descrito um sistema para controle e medição da iluminação pública que emprega a tecnologia LoRa para Cidades Inteligentes, baseado na plataforma Arduino. O sistema compreende três componentes principais: um dispositivo de medição e controle para luzes de rua, um dispositivo de medição do nível

de iluminação e um gateway LoRa. O sistema ajusta dinamicamente o fluxo luminoso das luzes da rua conforme o nível de iluminação e a intensidade do tráfego de pedestres, por meio de um algoritmo de eficiência energética. Os dados coletados são enviados para a nuvem através da rede LoRa de baixa potência, permitindo uma operação otimizada e uma redução no consumo de energia. O modelo de restrição proposto nesta dissertação, permite integração de diferentes tipos de sensores, como os de tráfego de carros e de chuvas, requerendo apenas alguns ajustes nas restrições do modelo.

Nos trabalhos de (SOUZA, Alessandra et al., 2022) e (LEITE; KURAHASSI, 2023) foram exploradas soluções para aumentar a eficiência dos sistemas de iluminação pública através da implementação de tecnologias inteligentes. Ambos os estudos destacam que a substituição de lâmpadas tradicionais por LEDs, com a incorporação de sistemas de controle inteligentes, pode resultar em economias significativas de energia e redução de custos operacionais. Em (SOUZA, Alessandra et al., 2022) foi enfatizada a importância de políticas públicas e incentivos para a adoção de tecnologias de telegestão, para criar infraestruturas mais eficientes e sustentáveis. Em (LEITE; KURAHASSI, 2023) foram analisadas as potencialidades da iluminação pública no contexto das Cidades Inteligentes, ressaltando a eficiência energética e a integração de serviços urbanos por meio de tecnologias IoT. Ambos os trabalhos argumentam que a modernização da infraestrutura de iluminação pública melhora a qualidade do serviço e também possibilita a criação de uma rede multifuncional capaz de suportar uma variedade de serviços urbanos, como monitoramento ambiental e segurança pública. Diferentemente desses estudos que se concentram apenas na substituição das lâmpadas convencionais por LED, o presente trabalho explora a versatilidade LED de se integrar com diversos tipos de tecnologias, tal como um sistema DCOP de gestão adaptativa da iluminação pública, proporcionando uma otimização contínua e em tempo real que pode ser adaptada conforme as condições ambientais.

As Tabelas 2 e 3, apresentam um resumo dos principais trabalhos que abordam diferentes aspectos dos sistemas de iluminação inteligente, destacando as camadas arquiteturais, modelos do sistema, tipos de sensores IoT utilizados, entre outros critérios. Foram incluídos os trabalhos de (SIKDER et al., 2018), (PASOLINI et al., 2019) e (SÁNCHEZ SUTIL; CANO-ORTEGA, 2020), por oferecerem uma visão abrangente das diversas tecnologias e estratégias implementadas na iluminação pública aplicado a Cidades Inteligentes. Em contraste, os trabalhos de (SOUZA, Alessandra et al., 2022) e (LEITE; KURAHASSI, 2023) não foram incluídos nesta tabela comparativa devido ao seu foco específico na redução energética através da substituição de lâmpadas convencionais por LEDs, o que não abrange a totalidade dos critérios analisados nos outros estudos consi-

derados.

Tabela 2: Comparação Sistemas de Iluminação Inteligente (Parte 1).

Trabalho	Camadas Arquiteturais	Modelo do Sistema	Tipos de Sensores IoT	Protocolos de Comunicação
Sikder et al. (2018)	Percepção, Comunicação e Aplicação	Centralizada e Descentralizada	Iluminação e Movimento	ZigBee, 6LoWPAN, JenNET-IP, Wi-Fi, Ethernet, GPRS, WiMax, 3G/4G/5G
Pasolini et al. (2019)	Comunicação e Aplicação	Centralizada	Tráfego, qualidade do ar	PLC, Celulares, LoRa, Sigfox
Sánchez Sutil e Cano-Ortega (2020)	Comunicação e Aplicação	Centralizado	Iluminação, Movimento, elétrico	LoRa
Este trabalho	Aplicação	Distribuído	Tráfego e Movimento	N/A

Tabela 3: Comparação Sistemas de Iluminação Inteligente (Parte 2) - Cont. Tabela 2.

Trabalho	Ambiente	Simulação ou Implementação	Dados Reais ou Sintéticos	Avaliação de Eficiência Energética	Ganhos Obtidos em Eficiência
Sikder et al. (2018)	Urbano	Simulação	N/A	Sim	Economia de até 33,33%
Pasolini et al. (2019)	Urbano	N/A	N/A	Não	N/A
Sánchez Sutil e Cano-Ortega (2020)	Urbano	Implementação	N/A	Sim	Economia de até 40%
Este trabalho	Urbano	Simulação	Ambos	Sim	Economia de até 30%

No presente trabalho, o formalismo DCOP é utilizado de forma inovadora para adaptar a intensidade luminosa dos postes de iluminação, associado a uma possível redução do consumo energético. Além disso, essa abordagem permite a adaptação de diversos tipos de sensores de monitoramento do ambiente, agregando valor à infraestrutura já criada.

Os trabalhos apresentados destacam a importância da modernização da infraestrutura de iluminação pública para melhorar a eficiência energética e reduzir custos operacionais, bem como proporcionar novos tipos de serviços aproveitando a infraestrutura criada para iluminação pública. A integração de tecnologias inteligentes, como sensores e sistemas de controle, é fundamental para o desenvolvimento de Cidades Inteligentes.

4.2 Sistemas de IoT Adaptativos

Em (NASCIMENTO; LUCENA, 2017) propuseram o FIoT (do inglês *Framework for Internet of Things*), uma estrutura baseada em agentes para aplicações autoadaptativas e auto-organizáveis no contexto da Internet das Coisas. O FIoT é projetado para permitir a criação de sistemas IoT que podem se adaptar dinamicamente às mudanças no ambiente e aos requisitos do sistema, utilizando paradigmas de Sistemas Multiagentes e técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais e algoritmos evolutivos. A adaptação no FIoT é realizada via um ciclo de controle que envolve a coleta de dados, a análise, a tomada de decisão e a execução de ações. Esse ciclo é implementado por agentes adaptativos que monitoram continuamente as condições do ambiente e ajustam seus comportamentos com base nas informações coletadas. Esses agentes utilizam controladores, como redes neurais, para processar dados e tomar decisões informadas sobre as ações a serem executadas. Entre os exemplos de aplicação apresentados, destacamos o Controle de Tráfego em Cidades Inteligentes. Nesta aplicação, agentes adaptativos são utilizados para gerenciar semáforos de forma autônoma. Cada segmento de estrada possui um microcontrolador que calcula o fluxo de veículos e ajusta os tempos dos semáforos com base nos dados coletados e nas interações com segmentos vizinhos. Os agentes utilizam uma rede neural recorrente para ajustar dinamicamente os tempos dos semáforos, melhorando o fluxo de tráfego urbano.

No trabalho de (MUCCINI et al., 2018) desenvolveram uma arquitetura IoT autoadaptativa para gerenciamento de emergências, utilizando padrões de controle e distribuição baseados no ciclo MAPE (Monitoramento, Análise, Planejamento e Execução). A adaptação é realizada através da combinação de padrões como *master/slave* centralizado e planejamento regional colaborativo. O estudo de caso focou no monitoramento de florestas recreativas, para prevenção de incêndios e avalanches. Sensores de CO_2 , temperatura e RFID foram usados para detecção, e atuadores como alarmes e sinais de evacuação para resposta. No padrão *master/slave*, um controlador central realiza a análise e planejamento, enquanto sensores e atuadores executam as ações. Em modo normal, os sensores operam a cada cinco segundos, e em modo crítico, a cada segundo, com a central guiando a evacuação. No padrão colaborativo, cada região tem seu próprio planejador que coordena as adaptações localmente e entre regiões. A operação é similar ao *master/slave*, mas com decisões distribuídas. As simulações mostraram que o padrão colaborativo consome mais energia devido à maior troca de mensagens, mas oferece melhor coordenação em emergências.

Em (LEE; SEO; KIM, 2019) propuseram uma estrutura autoadaptativa também base-

ada no ciclo MAPE para tomada de decisão em tempo real em ambientes IoT. A estrutura compreende um modelo de máquina de estados finitos (FSM) e um método de tomada de decisão baseado em teoria dos jogos para extrair estratégias eficientes. A tecnologia central utilizada para realizar a adaptabilidade inclui o modelo de FSM para descrever o comportamento do software autoadaptativo e a teoria dos jogos, para determinar as melhores estratégias de adaptação. O ciclo MAPE coleta dados do ambiente, analisa os sintomas de adaptação, planeja as mudanças necessárias e executa as estratégias de adaptação, enquanto o FSM é usado para modelar os estados e transições do sistema. Entre os exemplos de aplicação apresentados, destacamos o estudo de caso de uma estufa inteligente baseada em IoT. Neste cenário, três requisitos foram considerados: intensidade de luz, umidade e temperatura. A estufa foi equipada com três dispositivos de atuação (controlador de luz, ventilador e janelas) e seis sensores (iluminação, umidade e temperatura internos e externos). A FSM modela os estados da estufa, verificando se os requisitos são satisfeitos e acionando os dispositivos de atuação conforme necessário. Os resultados para os cenários demonstraram que a abordagem proposta pode ser aplicada em tempo real em ambientes IoT, adaptando-se eficientemente a mudanças no ambiente e satisfazendo múltiplos requisitos simultaneamente.

No trabalho de (CABRERA; CLARKE, 2019) foi apresentado um modelo autoadaptativo de descoberta de serviços para Cidades Inteligentes, visando melhorar a eficiência na descoberta de serviços através da adaptação da organização das informações de serviços com base em eventos urbanos. O modelo utiliza uma arquitetura autoadaptativa que acompanha métricas de descoberta e realoca informações sobre serviços entre registros para manter a eficiência da descoberta. A tecnologia central para a adaptabilidade inclui algoritmos que identificam eventos inesperados e reorganizam as informações dos serviços de forma reativa, além de algoritmos que reorganizam essas informações de acordo com eventos programados na cidade. A estrutura se adapta dinamicamente a eventos imprevistos (como inundações repentinas), eventos programados (como eventos culturais) e eventos periódicos (como padrões de tráfego). Entre os exemplos de aplicação apresentados, destacamos o estudo de caso de uma simulação em um ambiente de IoT real. A simulação envolveu uma rede de 500 gateways cobrindo o centro da cidade de Dublin. Os gateways monitoram continuamente o ambiente urbano e ajustam a organização das informações de serviços segundo a ocorrência de eventos. Os resultados mostraram que o modelo proposto supera os modelos concorrentes quando a adaptação reativa é desencadeada por eventos específicos. No entanto, a adaptação proativa precisa de mais pesquisa.

Em (SZYDLO et al., 2022) desenvolveram o IoTsim-Osmosis-RES, um modelo de simulação autônomo e consciente de energia renovável para computação osmótica. Este modelo visa aumentar a eficiência dos sistemas de IoT através do uso otimizado de fontes de energia renováveis. A computação osmótica permite a migração flexível dos fluxos de dados entre dispositivos de borda e centros de dados na nuvem, similar ao movimento de partículas no fenômeno de osmose. A tecnologia central para a adaptabilidade inclui agentes osmóticos autônomos que seguem o conceito de computação autônoma, monitorando e ajustando continuamente a infraestrutura conforme a disponibilidade de energia renovável. Esses agentes são capazes de tomar decisões baseadas em dados históricos e em tempo real sobre a disponibilidade de energia solar e a demanda energética dos centros de dados. O estudo de caso focou na gestão de energia renovável em um sistema de IoT que processa fluxos de vídeo de câmeras instaladas em uma Cidade Inteligente. A simulação incluiu dois centros de dados de borda localizados em Berlim e Paris, e um centro de dados na nuvem localizado na Irlanda, todos alimentados por painéis fotovoltaicos. Os resultados mostraram que, ao alterar a lógica de adaptação dos agentes osmóticos, é possível aumentar a autossuficiência no consumo de energia renovável ou aumentar o uso de fontes de baixa emissão. Os algoritmos de adaptação foram testados em diferentes cenários, demonstrando que a seleção adaptativa de centros de dados com base na disponibilidade de energia renovável pode melhorar significativamente a eficiência energética do sistema. Além disso, o uso de baterias recarregáveis para dispositivos IoT mostrou ser eficaz para garantir a operação contínua durante períodos de baixa geração de energia solar.

As Tabelas 4 e 5 a seguir fornecem uma visão geral comparativa dos diferentes estudos analisados neste capítulo, destacando as técnicas adaptativas empregadas entre outros detalhes, facilitando assim a compreensão das diferentes abordagens e metodologias aplicadas nos estudos em sistemas IoT adaptativos.

Neste trabalho, o formalismo DCOP é empregado para promover uma adaptação dinâmica da iluminação pública, respondendo ativamente às variações ambientais. A abordagem aplicada reduz o consumo bem como eleva a eficiência operacional. Diferentemente de estudos anteriores que geralmente se voltavam para aplicações teóricas do DCOP, este trabalho concentra-se em sua aplicação prática e direta na iluminação pública. Utiliza-se uma metodologia de adaptação proativa no sistema de gestão de iluminação, que inclui sensores para detectar mudanças ambientais em tempo real, tomada de decisões baseada em dados e implementação de ajustes necessários, garantindo assim uma adaptação contínua e inteligente às necessidades de iluminação urbana.

Os trabalhos acima enfatizam a importância de frameworks e arquiteturas autoadaptativas no contexto da IoT, mostrando como essas soluções podem ser aplicadas em diversas áreas, como controle de tráfego, gerenciamento de emergências e otimização de energia renovável.

Tabela 4: Comparação Sistemas Adaptativos (Parte 1).

Trabalho	Técnica Adaptativa	Objetivo da Adaptação	Ambiente	Simulação ou Implementação
Nascimento e de Lucena (2017)	Rede Neural e algoritmos evolutivos	Quantificar coisas e Controle de tráfego inteligente	Genérico e Urbano	Implementação
Muccini et al. (2018)	Ciclo MAPE-K	Identificar padrão de distribuição e autoadaptação IoT	Florestas	Simulação
Lee et al. (2019)	Ciclo MAPE-K	Tomada de decisão auto-adaptável em IoT	Ambientes IoT dinâmicos	Implementação
Cabrera e Clarke (2019)	Ciclo cognitivo próprio	Descoberta de serviços autoadaptável	Urbano	Simulação e Implementação
Szydło et al. (2022)	Ciclo MAPE-K e Computação Os-mótica	Maximizar uso de energia renovável	Urbano	Simulação
Este trabalho	Reativa	Tomada de decisão adaptativa e redução do consumo energético	Urbano	Simulação

Tabela 5: Comparação Sistemas Adaptativos (Parte 2) - Cont. Tabela 4.

Trabalho	Dados Reais ou Sintéticos	Avaliação de Eficiência Energética	Utiliza SMA	Modelo do Sistema
Nascimento e de Lucena (2017)	Ambos	Não	Sim	Centralizado
Muccini et al. (2018)	Sintéticos	Sim	Não	Distribuído
Lee et al. (2019)	Reais	Não	Não	Centralizado
Cabrera e Clarke (2019)	Reais	Não	Sim	Centralizado
Szydło et al. (2022)	Reais	Sim	Sim	Distribuído
Este trabalho	Ambos	Sim	Sim	Distribuído

4.3 DCOP

Em (GIACOMET; ENEMBRECK, 2010) foi proposto o DynADOPT, um algoritmo para a otimização distribuída de restrições em ambientes dinâmicos. Esse algoritmo baseia-se

em técnicas clássicas de reuso de soluções, permitindo a adaptação eficiente as mudanças nas restrições durante a execução. O DynADOPT foi desenvolvido para resolver problemas onde novas relações entre variáveis podem surgir, desaparecer ou se modificar, utilizando informações de soluções anteriores para convergir rapidamente para uma nova solução ótima. Os experimentos mostraram que o algoritmo é capaz de se adaptar eficientemente às mudanças nas restrições, mantendo a qualidade das soluções. Em comparação com métodos tradicionais, o DynADOPT apresentou tempos de resposta significativamente menores e maior estabilidade nas soluções obtidas. A avaliação em cenários simulados demonstrou que o algoritmo é robusto e eficiente, sendo capaz de lidar com a dinâmica dos problemas de otimização distribuída em tempo real, podendo ser aplicado em problemas reais, como agendamento de tarefas e condução de veículos.

O trabalho de (SATO, 2014) desenvolveu o modelo OMTC (do inglês *Optimization Model for Train Classification*) para a classificação de trens em pátios ferroviários, modelando o problema como um Problema de Otimização Distribuída de Restrições (DCOP). O OMTC gera planos de classificação que descrevem como reordenar vagões recebidos no pátio para formar novos trens de forma eficiente, minimizando o tempo total de execução. O OMTC foi estendido para o I-DCOP (*Iterative DCOP*), que permite solucionar cenários mais complexos, incluindo restrições de capacidade e quantidade máximas para as linhas de ordenação do pátio. Cada iteração do processo I-DCOP ajusta os valores dos vagões que violaram alguma restrição, permitindo a inclusão de restrições adicionais de forma iterativa. Os resultados experimentais mostraram que o OMTC é eficaz em gerar planos de classificação viáveis e ótimos, minimizando a quantidade total de *roll-ins* (operação que permite direcionar um vagão a uma linha de ordenação específica) dos vagões. O I-DCOP, por sua vez, demonstrou ser capaz de resolver cenários mais complexos, obtendo soluções sub-ótimas, mas adaptando-se eficientemente às restrições adicionais introduzidas durante as iterações. O estudo de caso focou na simulação de cenários fictícios baseados em dados reais de um pátio ferroviário, validando a aplicabilidade do modelo proposto na otimização das operações de classificação de trens.

Em (LHOPITAL et al., 2020) foi apresentada uma abordagem inovadora para o gerenciamento de notificações de dispositivos em ambientes hospitalares utilizando DCOP. O objetivo é preservar a privacidade dos pacientes enquanto se reduz a intrusividade dessas notificações. A abordagem visa diminuir a carga de trabalho dos assistentes de saúde e melhorar a segurança dos pacientes, automatizando a alocação de tarefas e garantindo que as necessidades de alta prioridade sejam atendidas em tempo hábil. A automatização da alocação de tarefas é realizada por meio de um sistema que detecta anomalias e gerên-

cia a divisão de tarefas combinando dados de várias fontes, construindo e sugerindo um plano de ação para os provedores de saúde. Vários modelos de DCOP foram propostos e avaliados tanto em simulações quanto em implantações reais, mostrando eficiência em termos de custos computacionais e de comunicação.

Em (ALI; ARIB; AKNINE, 2021) foi desenvolvido um novo mecanismo descentralizado para alocação de vagas de estacionamento em áreas centrais, utilizando uma abordagem DCOP. O sistema funciona com um modelo de múltiplos estacionamentos e múltiplas zonas, onde veículos estão conectados e podem trocar informações com o sistema de alocação distribuída. O mecanismo visa alcançar os menores custos de alocação, atribuindo veículos aos estacionamentos com os menores custos agregados de usuário. Esses custos são calculados com base nas preferências agregadas dos motoristas sobre as vagas disponíveis. A automatização da alocação de tarefas é realizada por meio do algoritmo Max-Sum, que é um algoritmo de inferência baseado em propagação de crença, operando em gráficos de fatores para otimizar as funções de custo. Esse processo é realizado propagando mensagens entre nós de variáveis e nós de fatores, levando em conta o impacto nas funções de custo marginalizadas. A abordagem foi avaliada empiricamente com custos gerados aleatoriamente e testada em três configurações diferentes, mostrando o desempenho de cada configuração em termos de tempo de execução e volume de dados trocados.

No trabalho (MORADIKIAN; EMAMI-SKARDI; KERACHIAN, 2022) foi proposto um modelo multiagente para a alocação de águas residuais recuperadas em áreas urbanas, aplicando uma versão modificada do algoritmo ADOPT. Este novo algoritmo, denominado MADOPT (*Modified* ADOPT), considera as características sociais dos agentes e uma nova forma de interação entre eles. A abordagem proposta visa otimizar a tomada de decisão de maneira distribuída, considerando os interesses conflitantes dos diversos usuários envolvidos. A automatização da alocação de tarefas é realizada por meio de um agente monitor que supervisiona os recursos hídricos, garantindo que a alocação de água atenda às necessidades dos usuários de maneira eficiente e sustentável. O MADOPT incorpora funções de custo locais modificadas, que incluem tanto as restrições quanto os custos de utilidade dos agentes. A eficácia do MADOPT foi avaliada em um estudo de caso real na bacia do rio Kan, em Teerã, Irã, demonstrando sua aplicabilidade e eficiência na gestão de sistemas de recursos hídricos em larga escala.

Foi proposto em (AGYEMANG; REN; YAN, 2023) um algoritmo para a construção hierárquica distribuída multiagente em problemas de DCOP dinâmicos (D-DCOP) em equipes de sensores móveis. Este algoritmo visa facilitar a coordenação entre agentes em

ambientes dinâmicos e abertos, onde a topologia de interação entre os agentes não pode ser pré-definida devido à natureza dinâmica do ambiente. A proposta inclui um método para construir e manter uma hierarquia multiagente que dispensa a necessidade de um grafo de interação pré-definido, permitindo que os agentes se conectem e desconectem conforme necessário. A automatização da alocação de tarefas é realizada por meio de um algoritmo denominado DynDisMHG (do inglês *Dynamic Distributed Multi-agent Hierarchy Generation*), que permite que os agentes detectem mudanças no ambiente e ajustem suas conexões hierárquicas de maneira eficiente. Este algoritmo foi avaliado em um estudo de caso para detecção de alvos utilizando uma simulação em um ambiente de grade, onde os agentes precisam detectar alvos estáticos. Os resultados mostraram que o DynDisMHG é eficaz na manutenção de uma hierarquia estável e na minimização da perturbação entre as atualizações da hierarquia.

No trabalho de (ZILBERSTEIN et al., 2024) propuseram um esquema de agendamento de observações descentralizado baseado em decomposição para constelações de satélites em larga escala. Este sistema é necessário para coordenar centenas ou milhares de satélites utilizados na observação da Terra, vistos como um sistema multiagente (MAS). O problema é formulado como DCOP, onde a comunicação entre agentes é escalável. O algoritmo desenvolvido, denominado NSS (do inglês *Neighborhood Stochastic Search*), utiliza uma heurística de decomposição baseada na vizinhança geométrica para dividir o DCOP global em subproblemas gerenciáveis. A automatização da alocação de tarefas é realizada por meio da divisão do problema global em subproblemas, onde cada agente utiliza a heurística de vizinhança geométrica para coordenar suas ações sem comunicação excessiva. O NSS foi projetado para resolver eficazmente o problema de agendamento de observações, considerando milhões de variáveis, limitando a complexidade computacional e de comunicação. O algoritmo foi avaliado empiricamente em comparação com outras abordagens, mostrando eficácia tanto em instâncias pequenas quanto grandes do problema.

As tabelas 6 e 7 oferecem uma visão comparativa dos estudos apresentados acima, focados na utilização do formalismo DCOP em diversos domínios de aplicação. A tabela destaca os objetivos específicos de cada implementação do DCOP permitindo identificar as variadas abordagens e técnicas empregadas para resolver problemas complexos em contextos distintos, demonstrando a versatilidade e eficácia do DCOP em otimizar decisões distribuídas em sistemas adaptativos.

Diferentemente da maior parte dos trabalhos desta seção, que utilizam algoritmos exa-

Tabela 6: Comparação Trabalhos sobre DCOP (Parte 1).

Trabalho	Domínio de Aplicação	Objetivo do DCOP	Algoritmos DCOP
Giacomet e Enembreck (2010)	Ambientes dinâmicos	Resolver problemas de otimização em tempo real	ADOPT, DynADOPT
Denise Sato (2014)	Classificação de trens	Gerar planos de classificação ótimos	ADOPT, DPOP, OMTC
Lhopital (2020)	Gestão hospitalar	Minimizar a intrusividade das notificações	DPOP
Ali et al. (2021)	Alocação de vagas de estacionamento	Minimizar custos de alocação	Max-Sum
Moradikian et al. (2022)	Alocação de água	Desenvolver políticas de alocação eficiente	ADOPT, MAADOPT
Agyemang et al. (2023)	Coordenação de agentes	Detecção de alvo simulado	DPOP, CoCoA
Zilberstein et al. (2024)	Agendamento de tarefas	Maximizar pedidos atendidos	BD, NSS
Este trabalho	Iluminação Pública	Tomada de decisão adaptativa e redução do consumo energético	DPOP, DSA e MGM

Tabela 7: Comparação Trabalhos sobre DCOP (Parte 2) - Cont. Tabela 6.

Trabalho	Implementação ou Simulação	Utiliza Agentes ou SMA	Modelo do Sistema
Giacomet e Enembreck (2010)	Simulação	Sim	Distribuído
Denise Sato (2014)	Simulação	Sim	Distribuído
Lhopital (2020)	Simulação e Implementação	Sim	Distribuído
Ali et al. (2021)	Simulação	Sim	Distribuído
Moradikian et al. (2022)	Simulação	Sim	Distribuído
Agyemang et al. (2023)	Simulação	Sim	Distribuído
Zilberstein et al. (2024)	Implementação e Simulação	Sim	Distribuído
Este trabalho	Simulação	Sim	Distribuído

tos como DPOP e ADOPT, este trabalho analisa dois algoritmos locais (DSA e MGM), que oferecem maior flexibilidade e adaptabilidade às condições dinâmicas do ambiente urbano. Além disso, enquanto muitos estudos fazem uso do *framework* FRODO, que requer a criação de arquivos XML detalhados para definir variáveis, agentes, domínios, restrições e funções de custo, esta pesquisa optou pelo pyDCOP. Esse *framework* proporciona um modelo mais intuitivo para a adição dos parâmetros necessários e, sendo desenvolvido em Python, oferece maior flexibilidade e personalização, facilitando a adaptação e a implementação em diferentes cenários urbanos. Os estudos acima abrangem uma vasta gama de aplicações, desde a otimização de rotas em sistemas de transporte até o gerenciamento de recursos em ambientes hospitalares, destacando a versatilidade do formalismo DCOP em adaptar sistemas complexos a condições dinâmicas e otimizar interações e operações em tempo real.

4.4 Considerações Finais

Este capítulo revisou diversos trabalhos relacionados às temáticas de iluminação pública inteligente, IoT adaptativo e DCOP, pertinentes a proposta apresentada. Foi dado destaque em como cada um contribui para o desenvolvimento de sistemas urbanos eficientes e adaptativos. Os estudos de iluminação enfatizam a importância da modernização da infraestrutura e a integração de tecnologias inteligentes para melhorar a eficiência energética. Os trabalhos sobre IoT adaptativo mostram a relevância de *frameworks* e arquiteturas autoadaptativas para gerenciar ambientes dinâmicos e complexos. Por fim, os estudos de DCOP demonstram a aplicabilidade e eficácia dessa tecnologia em diversos contextos, oferecendo soluções eficientes para problemas de otimização distribuída. A dissertação se beneficia dessas pesquisas ao utilizar técnicas de DCOP para criar um sistema de iluminação pública adaptativo, onde o sistema precisa decidir a melhor configuração luminosa não apenas para um poste isolado, mas também considerando a interação com postes vizinhos, de modo a garantir a eficiência energética e operacional do sistema.

5 A Iluminação Pública como um Problema DCOP

Este capítulo apresenta a formulação da gestão da iluminação pública como um problema DCOP. É apresentada a abordagem utilizada para modelar um sistema de iluminação como um DCOP, detalhando a definição das variáveis e a construção das restrições.

5.1 Definição das Variáveis e Restrições

O modelo proposto assume a presença de postes de iluminação e sensores ambientais, ambos fundamentais para ajustar a luminosidade em resposta às condições urbanas dinâmicas. Neste cenário, a seleção de variáveis e restrições não é arbitrária, mas diretamente influenciada pelas necessidades práticas e pelos desafios encontrados em ambientes urbanos reais.

Para ilustrar, considere a configuração típica de uma área urbana movimentada, onde a densidade de pedestres e veículos varia significativamente ao longo do dia e em condições meteorológicas distintas. Os postes de iluminação nesses locais devem ser capazes de adaptar sua intensidade de luz, não apenas para economizar energia durante períodos de baixa atividade, mas também para garantir segurança e conforto durante os períodos de pico de movimento.

Desta forma, cada poste é equipado com sensores IoT que monitoram o fluxo de veículos, a presença de pedestres e as condições meteorológicas, como chuva. Cada sensor, ao identificar uma determinada condição ambiental, sugere um nível de luminosidade específico, conforme ilustrado na Figura 24. Por exemplo, um alto fluxo de veículos ou a presença de chuva pode demandar um nível de luminosidade mais elevado para garantir a visibilidade e segurança, enquanto um baixo fluxo ou ausência de pedestres pode permitir uma redução na intensidade luminosa para economizar energia.

Neste sistema distribuído, os postes de iluminação devem interagir entre si para decidir o nível de luminosidade final, considerando as diferentes informações recebidas de

seus sensores. A coordenação é necessária porque, em um ambiente real, as condições podem variar de um ponto para outro, e uma decisão isolada de um poste pode não ser a mais eficiente ou segura para a área toda. Por isso, o DCOP assegura que as restrições definidas, ou a economia de energia, sejam atendidas de maneira global e eficiente. Assim, mesmo em situações complexas, onde múltiplos sensores influenciam a decisão, o sistema consegue ajustar automaticamente a iluminação, garantindo que o consumo energético seja otimizado.

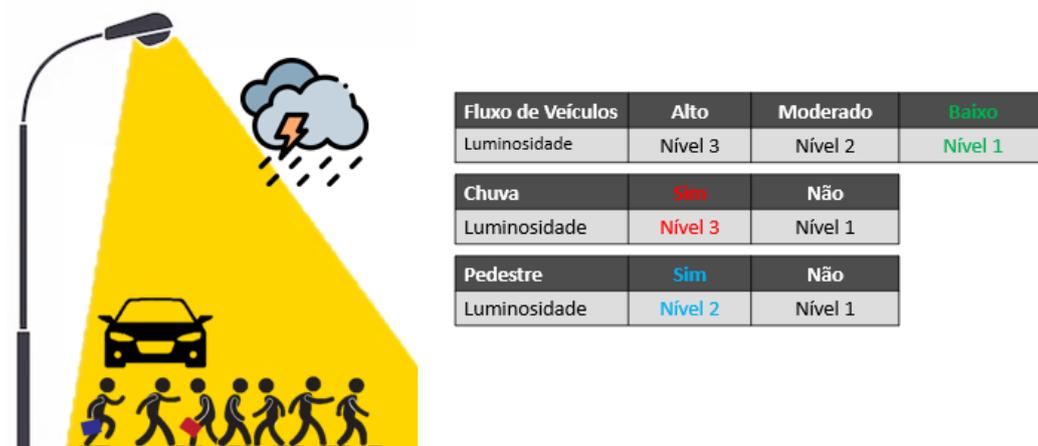


Figura 24: Modelo DCOP: Ajuste dinâmico da iluminação baseado em condições ambientais.

Assim, as variáveis e restrições utilizadas neste trabalho são descritas abaixo.

Considere P o conjunto de postes de iluminação, sendo v_i a variável que representa o nível de luminosidade de cada poste $p_i \in P$, onde $v_i \in D_p$. O domínio D_p define os possíveis níveis de luminosidade que cada poste pode assumir. Para cada poste de luz incide um conjunto de restrições associado a cada nível de luminosidade, onde o custo total está relacionado à quantidade de conflitos entre as restrições de cada poste, sendo utilizado como parâmetro de comparação entre os algoritmos DCOP.

Considere S o conjunto de sensores (de tráfego, meteorológicos e de presença) disponíveis na infraestrutura de iluminação pública, sendo s_i^k a variável que representa uma informação do ambiente capturada por um dos respectivos sensores k referente a um poste p_i , onde $s_i^k \in D_s$. O domínio D_s engloba informações sobre o volume de tráfego e também indica se houve detecção de pedestres ou chuva próximo de um determinado poste. Os estados dos sensores s_i^k não são controláveis pelo sistema de gestão da iluminação porque eles operam de forma autônoma, capturando dados ambientais em tempo real sem qualquer manipulação ou ajuste externo pelo sistema de iluminação. Isso garante que as leituras sejam objetivas e não influenciadas por parâmetros externos, permitindo que

o sistema responda adequadamente baseado em dados puros e precisos, essenciais para ajustar dinamicamente os níveis de iluminação dos postes de acordo com as condições reais detectadas.

Considere R como o conjunto de restrições definidas pelo gestor urbano. Cada restrição $r_i \in R$ é uma tupla condição-ação que depende de cada poste p_i e da leitura dos respectivos sensores s_i^k para ser ativada. A parte da condição específica define quando a restrição deve ser ativada (mudança no volume do tráfego, chuva ou presença de pedestres) e é representada por expressões booleanas relacionadas aos estados dos atuadores ou dos sensores, utilizando predicados binários ($>$, $<$, $=$). Esta "condição" atua como um gatilho, determinando se as circunstâncias ambientais atendem aos critérios estabelecidos para alterar o estado da iluminação. Uma vez que a condição é satisfeita, entra em cena a "ação", que é a resposta programada do sistema a essa condição. Por exemplo, se o sensor de tráfego de um determinado poste detectar um baixo volume de carros (nível de luminosidade 1) mas o sensor de presença detectar pedestres (nível de luminosidade 2), a ação correspondente será atribuir o nível de luminosidade 2 para esse poste, uma vez que a presença de pedestres é prioritária em comparação ao volume de tráfego.

Sabendo que $k = 1$, $k = 2$ e $k = 3$, dizem respeito aos sensores de tráfego, chuva e pedestre, respectivamente, e que r_i^1 pode conter o estado de tráfego baixo ($r_i^{1^B}$), moderado ($r_i^{1^M}$) ou alto ($r_i^{1^A}$), as restrições rígidas que configuram as variáveis de entrada dos sensores são dadas por:

$$c_i^1 = \begin{cases} 0 & \text{se } s_i^1 = \text{valortrafego} \\ +\infty & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$c_i^2 = \begin{cases} 0 & \text{se } s_i^2 = \text{valorchuva} \\ +\infty & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$c_i^3 = \begin{cases} 0 & \text{se } s_i^3 = \text{valorpedestre} \\ +\infty & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.3)$$

onde *valortrafego*, *valorchuva* e *valorpedestre* são valores estabelecidos conforme a situação.

Outro ponto a se chamar a atenção é que a função de custo não apenas considera o poste atual, mas também inclui o impacto nos postes adjacentes para as condições de

tráfego (moderado e alto), chuva e pedestre, respectivamente. Assim temos:

$$r_i^{1B} = (s_i^1 \leq 500) \cdot |v_i - 1| \quad (5.4)$$

$$r_i^{1M} = (500 < s_i^1 \leq 1200) \cdot (|v_i - 2| + 10 \cdot |v_{i+1} - 2|) \quad (5.5)$$

$$r_i^{1A} = (s_i^1 > 1200) \cdot (|v_i - 3| + 10 \cdot |v_{i+1} - 3| + 10 \cdot |v_{i+2} - 2|) \quad (5.6)$$

$$r_i^2 = 10 \cdot (s_i^2) \cdot (|v_i - 2| + 10 \cdot |v_{i+1} - 2|) \quad (5.7)$$

$$r_i^3 = 20 \cdot (s_i^3) \cdot (|v_i - 3| + 10 \cdot |v_{i+1} - 3| + 10 \cdot |v_{i+2} - 2|) \quad (5.8)$$

As expressões relacionais acima ($(s_i^1 \leq 500)$, $(500 < s_i^1 \leq 1200)$ e $(s_i^1 > 1200)$) assumem o valor 1 ou 0 dependendo de sua validade, ou falsidade, respectivamente. Como essas expressões tratam de valores disjuntos de s_i^1 , apenas uma delas será ativada em cada instante.

A atribuição dos níveis de luminosidade dos postes para cada volume de tráfego seguiram as normas da ABNT NBR 5101, que trata sobre iluminação pública ([TÉCNICAS 5101, 2018](#)). Esta norma tem como objetivo principal garantir segurança e visibilidade adequada nas vias públicas para veículos e pedestres, promovendo também a eficiência energética. Conforme a norma, são estabelecidos requisitos específicos para diferentes tipos de vias, como urbanas e rurais, levando em consideração aspectos como a densidade do tráfego e a complexidade do ambiente. Já para detecção de pedestres e chuva, foram atribuídos os níveis de luminosidade 2 e 3, respectivamente. Desta forma temos:

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{se } s_i^{1B} \leq 500 \text{ (Baixo Tráfego)} \\ 2 & \text{se } 500 < s_i^{1M} \leq 1200 \text{ (Tráfego Moderado)} \\ 3 & \text{se } s_i^{1A} > 1200 \text{ (Alto Tráfego)} \\ 2 & \text{se } s_i^2 = 1 \text{ (Detecção de Pedestre)} \\ 3 & \text{se } s_i^3 = 1 \text{ (Chuva Detectada)} \end{cases} \quad (5.9)$$

O conjunto de restrições é crucial para que o sistema de gestão da iluminação possa

ajustar os níveis de luz de forma dinâmica, assegurando que as metas de iluminação sejam atingidas sob diversas condições impostas pelo ambiente, maximizando o atendimento às restrições e minimizando o consumo de energia.

Assim, podemos formalizar o problema de otimização da iluminação pública como DCOP da seguinte forma:

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ é o conjunto de agentes, onde cada agente a_i está associado a um poste de luz p_i ;
- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ é o conjunto de variáveis v_i que representam o nível de luminosidade de cada poste $p_i \in P$;
- $S = \{s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k \mid 1 \leq k \leq 3\}$ é o conjunto de sensores, sendo s_i^k a variável que representa o dado capturado pelo sensor k ($1 \leq k \leq 3$) de cada poste p_i , o qual é dotado de três sensores: tráfego (s_i^1), chuva (s_i^2) e pedestre (s_i^3);
- $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\} \cup \{Ds_1^k, Ds_2^k, \dots, Ds_n^k \mid 1 \leq k \leq 3\}$ é o conjunto de domínios de todas as variáveis, onde D_i contém os níveis de luminosidade de cada poste de luz p_i , e Ds_i^k os valores capturados por seus respectivos sensores;
- $C = \{\{c_1^k, c_2^k, \dots, c_n^k\} \cup \{r_1^k, r_2^k, \dots, r_n^k\} \mid 1 \leq k \leq 3\}$ é o conjunto de funções de custo (restrições), onde cada $c_i^k : D_i \rightarrow \mathbb{R}$ é uma restrição rígida que força a variável de cada sensor a não mudar seu valor durante o processo de otimização. Já cada $r_i^k : R_i \rightarrow \mathbb{R}$ é uma regra que atribuiu um valor de luminosidade para cada v_i dependendo da entrada de cada s_i^k . Desta forma, C determina grau de conflito de todos os postes envolvidos no processo de otimização.
- μ é a função de mapeamento que liga variáveis e restrições aos dispositivos de iluminação (agentes).

A função objetivo do problema DCOP para otimização da iluminação pública é formulada como:

$$F = \min \left(\sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq k \leq 3}} c_i^k + \sum_{1 \leq i \leq n} (r_i^{1B} + r_i^{1M} + r_i^{1A} + r_i^2 + r_i^3) \right) \quad (5.10)$$

Este modelo DCOP busca a interação entre sensores, atuadores e restrições, adaptando a iluminação pública para responder dinamicamente às condições locais do ambiente dentro da infraestrutura de uma Cidade Inteligente.

5.2 Métricas de Avaliação de Algoritmos DCOP

A avaliação de algoritmos DCOP é um aspecto crucial na determinação de sua eficácia e aplicabilidade em cenários reais. No contexto da iluminação pública, dois fatores importantes devem ser considerados: a limitação de tempo e a qualidade da comunicação.

A limitação de tempo refere-se à capacidade dos algoritmos de encontrar soluções em prazos curtos, o que é vital em ambientes onde as condições mudam rapidamente, como no tráfego urbano e a detecção de pedestres. Já a qualidade da comunicação aborda a confiabilidade e a eficiência das mensagens trocadas entre os agentes, uma vez que a infraestrutura de comunicação pode ser suscetível a falhas e perda de dados.

Para uma melhor avaliação dos algoritmos DCOP discutidos neste trabalho, são utilizadas métricas que medem o desempenho em termos de tempo de execução e qualidade das trocas de mensagens. Nas subseções a seguir é apresentada como a limitação de tempo e a qualidade da comunicação são fatores determinantes na escolha e implementação dos algoritmos DCOP.

5.2.1 Limitação de Tempo

Em diversas aplicações o tempo de execução é um fator crítico, pois as decisões de ajuste das variáveis devem ser rápidas e eficientes para responder às mudanças ambientais em tempo real. As limitações de tempo podem restringir a busca pela solução ótima, particularmente em contextos urbanos onde as dinâmicas ambientais são imprevisíveis e rápidas. Neste contexto, o problema DCOP pode se aproximar de problemas NP-completos, onde o tempo disponível frequentemente não é suficiente para alcançar a melhor solução de maneira convencional.

No contexto deste trabalho, a otimização da iluminação pública precisa considerar a variabilidade do tráfego e das condições meteorológicas, exigindo atualizações frequentes e rápidas dos estados dos sensores para adaptar a luminosidade adequadamente. Essas condições exigem que as soluções de DCOP operem em ciclos de execução rápidos para manter a eficácia e a eficiência energética, sem comprometer a segurança e o conforto visual.

Portanto, soluções que utilizam métodos locais podem ser adotadas para reduzir o tempo de execução. Tais métodos podem sacrificar a garantia de atingir a solução ótima, mas são adaptados para fornecer respostas adequadas dentro das janelas de tempo críticas

impostas por mudanças rápidas no ambiente urbano.

5.2.2 Qualidade de Comunicação

Para a maioria das aplicações DCOP, assume-se que a infraestrutura de comunicação é perfeita, garantindo transmissão eficiente e confiável das informações coletadas pelos sensores. No entanto, na prática, podem ocorrer perdas de dados ou transmissões corrompidas, afetando o desempenho dos algoritmos. Portanto, é crucial que o sistema seja projetado levando em consideração esses fatores de forma que o algoritmo DCOP selecionado para a aplicação, seja adequado.

Um algoritmo DCOP eficiente em termos de comunicação, que gere um baixo volume de mensagens, pode ser crucial em áreas com infraestrutura de rede limitada ou sobrecarregada. Por exemplo, em uma área onde a capacidade da rede é uma limitação, um algoritmo que minimize a troca de mensagens, poderia garantir uma adaptação adequada sem sobrecarregar a rede, preservando a qualidade e a resposta do sistema de iluminação. Por outro lado, se a prioridade for a rapidez na adaptação à dinâmica, mesmo com um custo mais alto de comunicação, outro algoritmo poderia ser mais adequado, pois sua estrutura permite uma resposta mais rápida às mudanças no ambiente, ainda que gere um volume maior de comunicações.

Portanto, a seleção do algoritmo DCOP deve considerar o equilíbrio entre a quantidade de mensagens geradas e a necessidade de resposta rápida do sistema, adaptando-se assim às especificidades da infraestrutura de comunicação e às exigências operacionais do ambiente urbano. Na aplicação dos algoritmos DCOP para gestão da iluminação pública, a qualidade da comunicação assume um papel vital devido à natureza distribuída e interdependente dos componentes do sistema. É imperativo que as informações coletadas pelos sensores de tráfego, chuva e detecção de pedestres sejam comunicadas de forma precisa e sem interrupções, pois qualquer falha ou atraso na transmissão pode levar a ajustes inadequados nos níveis de iluminação, afetando a eficiência energética. Maiores detalhes serão explorados na subseção 6.3.

5.3 Descrição das Métricas de Avaliação para DCOP

Avaliar corretamente os fatores que impactam a execução dos algoritmos DCOP aplicados à iluminação pública é fundamental. De acordo com (JUNGES, 2007) as métricas de avaliação devem refletir a capacidade do sistema de responder adequadamente às condições

variáveis do ambiente.

As métricas utilizadas neste estudo incluem:

- **Número de ciclos de execução:** este indicador mede o número de iterações necessárias para que os agentes consigam estabilizar a solução, refletindo diretamente a eficiência do algoritmo em condições dinâmicas de tráfego e ambientais.
- **Tempo total de execução:** fundamental para sistemas em tempo real, esta métrica avalia o tempo necessário para que uma solução seja implementada, influenciando diretamente a viabilidade da aplicação em ambientes urbanos dinâmicos.
- **Número de mensagens trocadas:** representa o volume de comunicação entre os agentes e o sistema central, afetando a análise de tempo e a capacidade de comunicação do sistema.
- **Tamanho das mensagens trocadas:** o tamanho médio das mensagens trocadas ajuda a avaliar a carga na rede de comunicação, sendo um fator crítico para a escalabilidade do sistema.
- **Qualidade da solução:** avalia se as soluções atendem às necessidades de iluminação baseadas nas condições ambientais e de tráfego detectadas, garantindo eficácia e eficiência energética.

Estas métricas ajudam a garantir que o sistema funcione eficientemente sob condições ideais e se adapte às flutuações comuns ao ambiente que está inserido.

5.4 Considerações Finais

Este capítulo discutiu a formulação da gestão da iluminação pública como um DCOP, explorando a interação entre postes de iluminação e sensores ambientais. A modelagem detalhada das variáveis e restrições demonstra a capacidade dos DCOPs para adaptar-se a um tipo de cenário específico. As métricas de avaliação introduzidas servem como indicadores para sistemas DCOP genéricos, mas aqui aplicados a um cenário de iluminação pública. O próximo passo envolveu um estudo de caso que aplica o modelo criado em cenários reais e sintéticos.

6 Estudo de Caso

Este capítulo aborda o estudo de algoritmos DCOP aplicados ao cenário de iluminação pública adaptativa. Por meio de uma análise detalhada, o capítulo explora como diferentes algoritmos DCOP ajustam a luminosidade de postes da cidade em resposta a dados ambientais variáveis, como tráfego, presença de pedestres e detecção de chuva. O estudo além de avaliar a eficiência energética dos algoritmos, também examina sua capacidade de adaptação em um ambiente urbano dinâmico, comparando-os com modelos de iluminação tradicionais.

6.1 Descrição do Cenário de Iluminação Pública Adaptativa

Nesse estudo, a gestão da iluminação pública é concebida como uma rede inteligente e adaptável, onde dispositivos IoT, como atuadores e sensores, desempenham um papel fundamental na otimização do consumo energético, alinhando-se às necessidades variáveis do ambiente urbano. Os postes de iluminação, equipados com dispositivos de dimerização, podem ajustar a luminosidade conforme necessário, enquanto os sensores monitoram fatores como o volume de tráfego, a presença de pedestres e as condições climáticas, como chuva, fornecendo dados para o ajuste dinâmico da iluminação dos postes.

Quando um sensor detecta tráfego intenso, presença de pedestres ou condições climáticas adversas, como chuva, a iluminação aumenta automaticamente, assegurando que o sistema funciona de forma otimizada. Por outro lado, durante períodos de baixo tráfego, sem pedestres ou chuva, a luminosidade é reduzida para economizar energia, conforme já ilustrado na Figura 24. Um estudo de viabilidade foi conduzido para avaliar três algoritmos DCOP, apresentados na subseção 2.4.3, aplicados ao modelo proposto, com foco na adaptação dinâmica da iluminação pública e possível redução do consumo energético, dependendo dos dados ambientais disponíveis.

Em termos energéticos, os resultados do modelo DCOP foram comparados com outros dois modelos de iluminação. O primeiro, o modelo padrão de operação contínua

(Figura 25), mantém a potência das lâmpadas constante durante todo o período de funcionamento, sem adaptação às condições ambientais, resultando em um consumo energético constante, sendo potencialmente ineficiente. O segundo modelo, o de controle estático (Figura 26), oferece algum grau de adaptação ao ajustar a iluminação em dois níveis de dimerização fixos, baseados em horários predefinidos. No entanto, esse modelo não responde a variações imediatas nas condições de tráfego ou clima, o que pode levar a oportunidades perdidas de economia energética.



Figura 25: Modelo padrão de operação contínua.



Figura 26: Modelo de controle estático.

Em contraste, o modelo DCOP (Figura 27) ajusta dinamicamente a potência das lâmpadas com base nas condições reais detectadas pelos sensores, reduzindo o consumo energético durante períodos de baixa demanda e aumentando a iluminação quando necessário. Isso garante uma utilização mais eficiente dos recursos energéticos, sem comprometer a segurança e o conforto urbano, mesmo em situações complexas onde múltiplos sensores influenciam a decisão.



Figura 27: Modelo DCOP para iluminação pública adaptativa.

6.2 Configuração dos Experimentos

Neste estudo, foi utilizado o *framework* pyDCOP ¹ versão 0.1.2a1 para conduzir uma série de experimentos de modo a avaliar a eficácia dos algoritmos DCOP em otimizar a iluminação pública de forma adaptativa. O pyDCOP é uma biblioteca de código aberto voltada para aplicações IoT que apoia a implementação de agentes distribuídos. Optou-se por empregar essa ferramenta em vez de desenvolver os algoritmos, pois o foco da pesquisa está na avaliação do modelo proposto, e não nos algoritmos DCOP em si.

Assim, as simulações foram realizadas em um ambiente virtualizado utilizando o VirtualBox versão 7.0.12, rodando o sistema operacional Ubuntu 18.04.6 LTS em uma máquina com Windows 11 64 bits, equipada com um Processador Intel® Core™ i7-1165G7 e 12GB de memória RAM.

O modelo DCOP desenvolvido foi configurado para n postes de iluminação e é alimentado por uma base de dados que contém informações sobre tráfego de carros, presença de pedestres e condições meteorológicas. O pyDCOP processa essa massa dados conforme o modelo criado e com base no algoritmo selecionado. A Figura 28 ilustra essa dinâmica.

Os experimentos foram estruturados em duas fases distintas para testar a eficácia dos algoritmos DCOP em diferentes contextos. A primeira fase focou na análise comparativa dos algoritmos 6.3 (DPOP, DSA e MGM), utilizando um conjunto de dados sintéticos que modelava cenários estáticos sem variações temporais. A segunda fase expandiu esta análise para a verificar a adaptabilidade e otimização da iluminação 6.4, incorporando dados reais de tráfego e excluindo variáveis como sensores de pedestres e chuva para evitar possíveis vieses nos resultados.

A configuração detalhada dos cenários, bem como os resultados obtidos na execução

¹<https://pydcop.readthedocs.io/en/latest/>

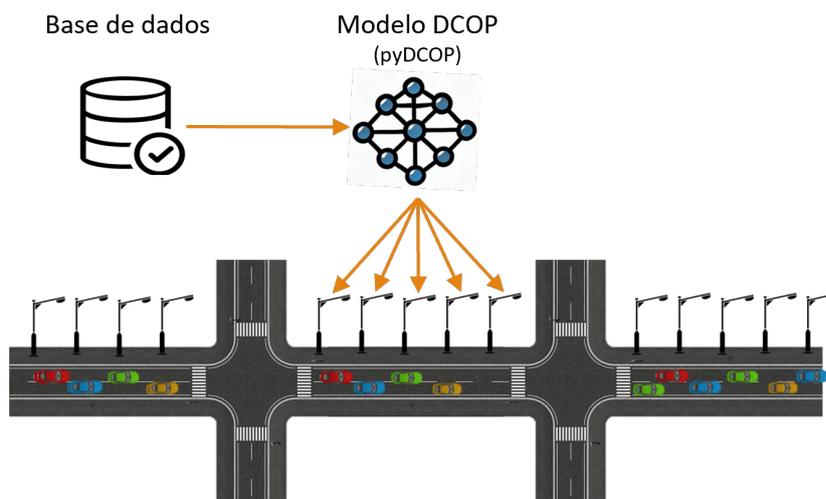


Figura 28: Dinâmica de simulação DCOP

de cada algoritmo, são discutidos nas subseções 6.3 e 6.4. As simulações foram projetadas para avaliar a eficiência energética dos modelos propostos em comparação com métodos de iluminação padrão e estáticos, e também testar a adaptabilidade dos sistemas em responder a variações reais no ambiente.

6.3 Análise Comparativa dos Algoritmos DCOP

Os algoritmos DCOP foram avaliados em quatro cenários fictícios, cada um configurado com um número crescente de ruas com 10 postes por rua. Assim, os cenários incluíram 1 rua com 10 postes, 5 ruas com 50 postes, 10 ruas com 100 postes e, finalmente, 50 ruas totalizando 500 postes. Inicialmente, para o modelo mais simples de 10 postes, os dados recebidos pelos sensores de tráfego, presença de pedestres e detecção de chuva, foram criados aleatoriamente. Para os modelos subsequentes, esses dados foram replicados em escala. Por exemplo, o poste 1 de cada rua nos modelos de 50, 100 e 500 postes recebeu as mesmas informações dos sensores que o poste 1 do modelo inicial de 10 postes. Essa metodologia garantiu a consistência dos dados em todos os modelos, facilitando a comparação direta do desempenho dos algoritmos DCOP em diferentes cenários de escala.

A escolha desses quatro cenários foi motivada pela necessidade de entender como o aumento da complexidade, em termos de variáveis e restrições, impacta o desempenho dos algoritmos DCOP. Como a literatura sugere, conforme o número de variáveis e restrições aumenta, a complexidade computacional dos algoritmos cresce, tornando o problema de otimização mais desafiador (FIORETTO; PONTELLI; YEOH, 2018). Avaliar os algoritmos em diferentes escalas permite identificar até que ponto cada algoritmo é capaz de

operar eficientemente e como eles lidam com as demandas crescentes de comunicação e coordenação entre os agentes. Além disso, esses cenários progressivamente maiores refletem situações práticas que uma implementação real poderia encontrar, proporcionando uma visão abrangente da escalabilidade e robustez dos algoritmos em estudo.

A avaliação dos algoritmos focou na frequência com que cada um encontrava a solução ótima e na rapidez da resposta. O DPOP, sendo um algoritmo completo, retornou soluções ótimas, com tempos de execução previsíveis em todos os cenários. No entanto, sua aplicação para 500 postes foi inviável devido a limitações de memória ocasionado pelo tamanho da pseudo-árvore gerada.

Quanto aos algoritmos locais, optou-se pela realização de 100 iterações de teste para cada um dos cenários propostos. Esta abordagem foi adotada para verificar a consistência e a confiabilidade dos resultados obtidos ao longo das diversas repetições. A escolha de 100 iterações foi feita como uma métrica quantitativa para garantir que os resultados fossem suficientemente robustos e não influenciados por variações aleatórias. Esse número foi considerado adequado para fornecer uma amostra representativa do desempenho dos algoritmos em diferentes condições, permitindo uma análise mais precisa e a identificação de padrões consistentes no comportamento dos algoritmos. Embora não esteja embasada em um estudo específico, a escolha reflete uma prática comum em experimentos de simulação, onde múltiplas iterações ajudam a suavizar os efeitos de *outliers* e fornecem uma visão mais clara do desempenho médio dos algoritmos.

Contudo, antes de comparar os algoritmos DSA e MGM, uma análise preliminar do DSA foi necessária devido ao seu comportamento estocástico. Foram realizados testes com diferentes valores de probabilidade p variando de 0,1 a 0,7 para determinar o mais adequado ao nosso problema. Esta análise preliminar consistiu em executar 100 iterações para cada valor de p em cada um dos quatro cenários (10, 50, 100 e 500 postes).

Os resultados dessas iterações foram avaliados para observar como diferentes valores de p influenciam a rapidez e a frequência com que as soluções ótimas são alcançadas. Os gráficos das Figuras 29, 30, 31 e 32 mostram as ocorrências de soluções ótimas em função dos ciclos para cada valor de p . Observamos que valores de p acima de 0,7 não produziram diferenças significativas nos resultados, então 0,7 foi escolhido como o valor final para p na análise principal.

Os testes mostraram que o valor de p tem um impacto direto na eficiência do DSA, onde valores mais altos de p tendem a encontrar soluções ótimas mais rapidamente. Assim, o valor de $p = 0,7$ proporciona um bom equilíbrio entre rapidez e frequência de soluções

ótimas. Para a análise final, foi utilizado 100 iterações com $p = 0,7$ em cada cenário.

Essa análise preliminar foi importante para garantir que o valor de p selecionado fosse o mais eficiente, evitando assim possíveis ameaças à validade do estudo. Ao estabelecer um valor de p que maximiza a eficiência do DSA, foi mitigado o risco de obter resultados subótimos devido a uma configuração inadequada do algoritmo estocástico.

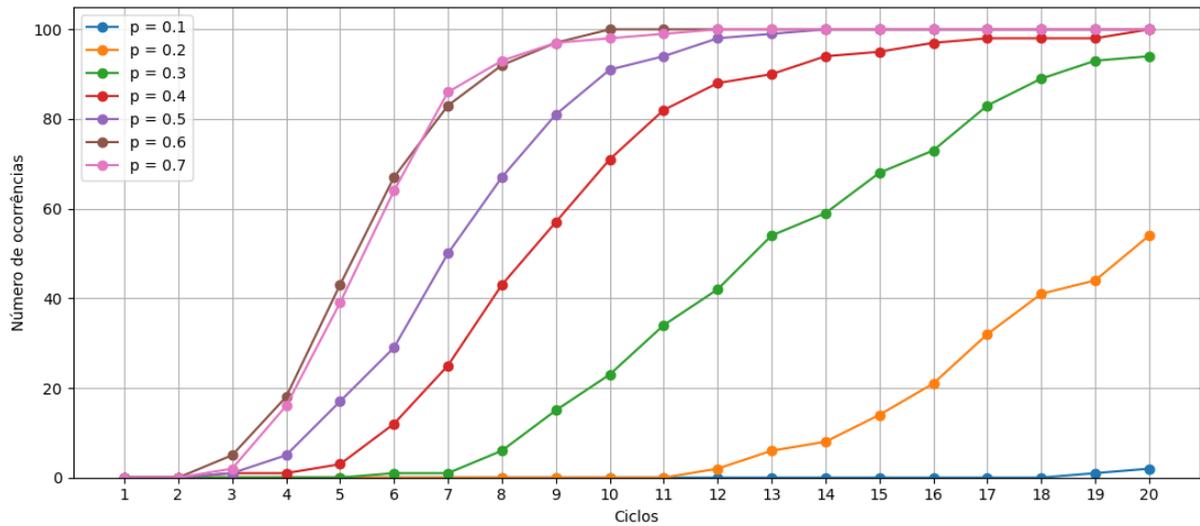


Figura 29: Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 10 postes.

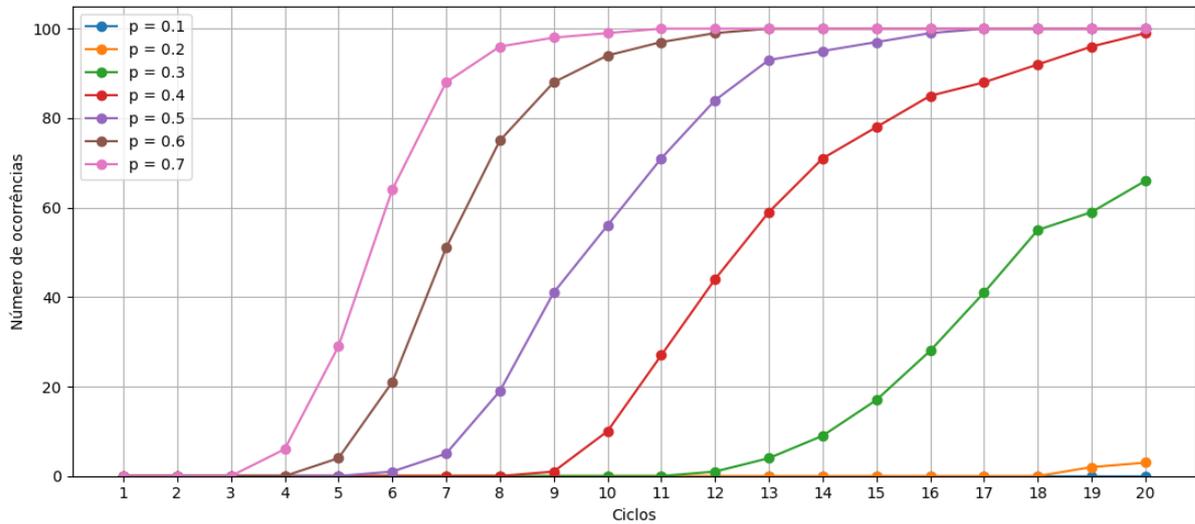


Figura 30: Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 50 postes.

Outro ponto a saber é que os algoritmos DCOP incompletos, como o DSA e o MGM, necessitam de uma condição de parada pré-estabelecida para encerrar os processos de busca. Isso acontece porque, ao contrário dos algoritmos completos, eles não garantem encontrar a solução ótima e podem potencialmente continuar a busca indefinidamente.

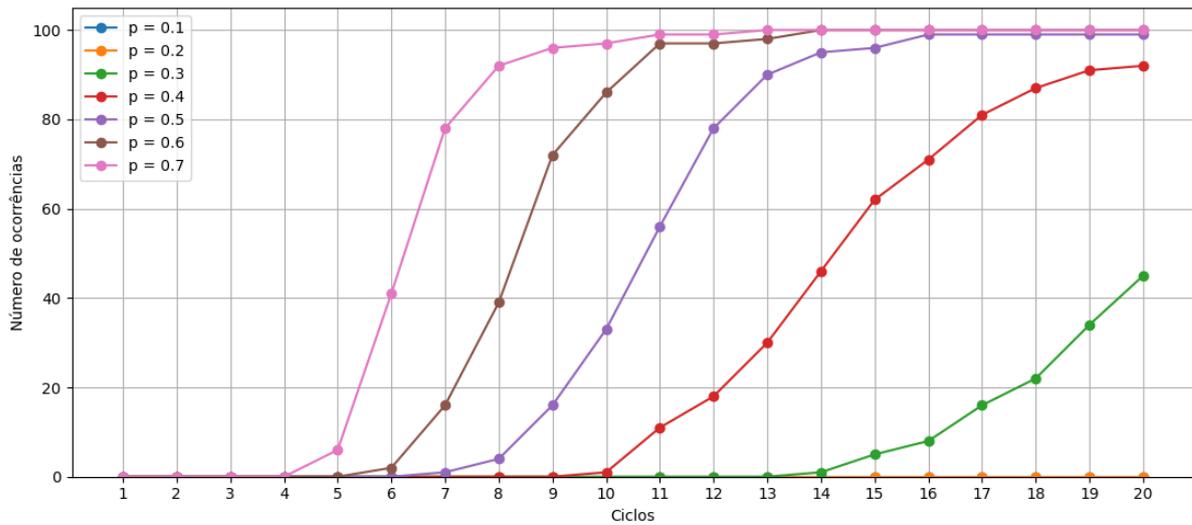


Figura 31: Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 100 postes.

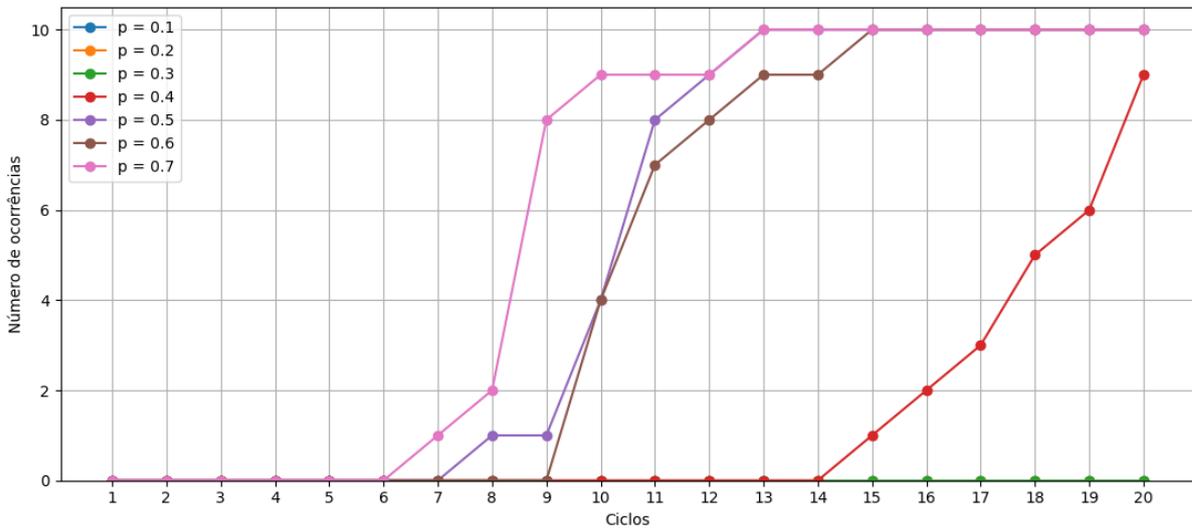


Figura 32: Solução ótima para diferentes valores de p para o cenário com 500 postes.

Esses algoritmos iterativos são projetados para operar em ambientes distribuídos, onde os agentes trabalham de forma descentralizada e podem se comunicar de maneira limitada. A condição de parada serve para limitar o número de iterações, garantindo que o algoritmo finalize em um tempo razoável e os recursos computacionais sejam utilizados de maneira eficiente. Além disso, ao definir um limite de ciclos, pode-se assegurar que a solução encontrada seja suficiente para os propósitos do problema em questão, mesmo que não seja a solução ótima global. Para este trabalho, definiu-se um limite de 20 ciclos como condição de parada, uma vez que para as 100 iterações essa quantidade de ciclos foi suficiente para obter uma boa avaliação da quantidade de vezes que a solução ótima foi alcançada pelos algoritmos.

Quando comparamos os resultados obtidos pelos dois algoritmos locais, observamos que o DSA consistentemente encontrou soluções ótimas em todos os cenários e iterações, variando apenas na rapidez com que essas soluções foram alcançadas, dependendo do valor de p ajustado, conforme observado no gráfico da Figura 33 para $p = 0,7$. Em comparação, o MGM, embora capaz de encontrar soluções ótimas, não o fez com a mesma consistência do DSA e tendeu a alcançar estas soluções mais tarde nos ciclos, especialmente em cenários mais complexos, como observado no gráfico da Figura 34.

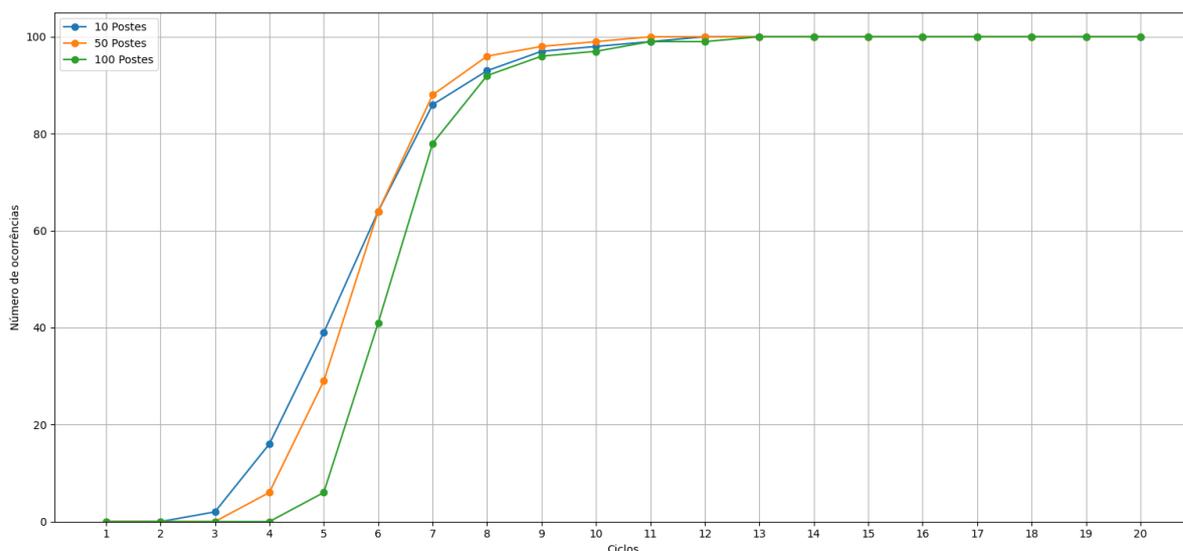


Figura 33: Quantidade de vezes em que a solução ótima foi encontrada por ciclo, para $p = 0,7$ para os cenários de 10, 50 e 100 postes aplicados ao DSA.

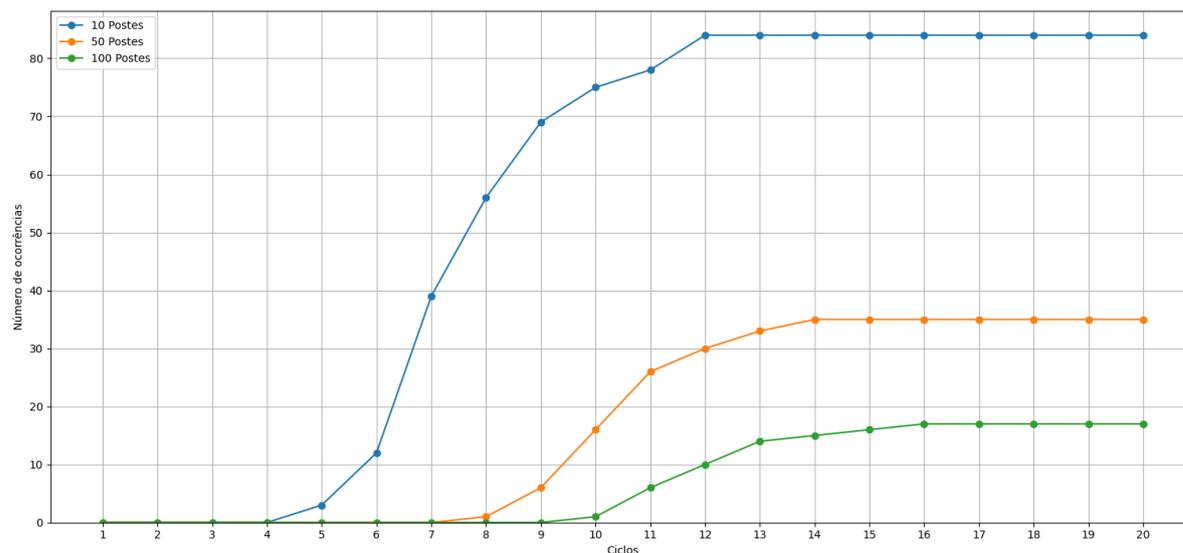


Figura 34: Quantidade de vezes em que a solução ótima foi encontrada por ciclo, para os cenários de 10, 50 e 100 postes aplicados ao MGM

Também foram realizados experimentos para examinar as diferenças de desempenho

em termos de tempo necessário para alcançar soluções ótimas dos algoritmos DPOP, DSA e MGM nos cenários de 10, 50 e 100 postes. Conforme pode ser observado nos gráficos das figuras 35, 36 e 37, os algoritmos de busca local, DSA e MGM, demonstram a capacidade de encontrar soluções ótimas em um tempo inferior ao do DPOP. O DSA apresenta tempos mais baixos em comparação ao MGM, indicando uma eficiência e consistência superiores na obtenção de soluções ótimas com mínima variação de tempo para um mesmo ciclo para cada cenário. Esta observação sugere que o DSA pode ser particularmente vantajoso para cenários que exigem respostas rápidas mesmo sendo um algoritmo de busca local.

Devido à natureza dos protocolos de comunicação comumente empregados em sistemas de IoT, que possuem uma largura de banda limitada, é crucial avaliar a carga comunicacional dos algoritmos utilizados. A Figura 38 compara o número médio de mensagens trocadas por cada algoritmo nos três cenários avaliados (10, 50 e 100 postes).

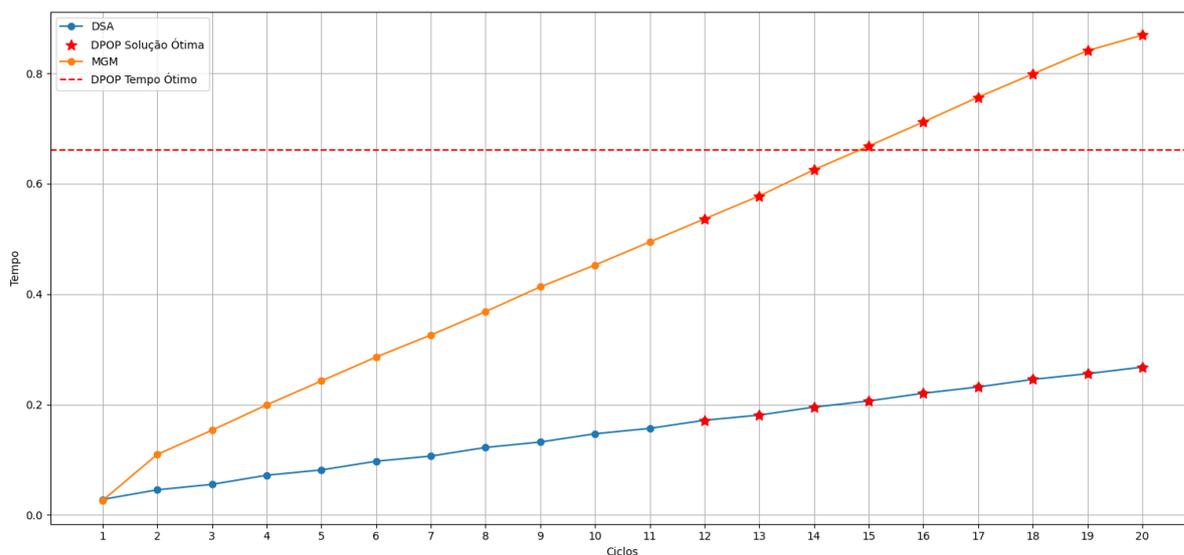


Figura 35: Velocidade para solução ótima por ciclo para os cenários com 10 postes.

O DPOP se destaca pelo baixo número de mensagens trocadas. Essa eficácia deve-se ao fato de que cada nó no DPOP transmite um número restrito de mensagens, que incluem uma mensagem de tipo VALUE e uma de COST durante o processo de otimização, além de, no máximo, uma mensagem para cada vizinho para estabelecer a árvore hierárquica. Esta característica torna o DPOP particularmente adequado para ambientes onde a capacidade de transmissão é um recurso valioso e escasso.

Em relação ao DSA, observa-se um crescimento linear no número de mensagens conforme aumenta o número de postes. Este padrão mostra que o DSA, embora exija mais comunicação que o DPOP, mantém uma carga comunicacional gerenciável que escala de forma proporcional ao tamanho do problema. Por outro lado, o MGM mostra um aumento

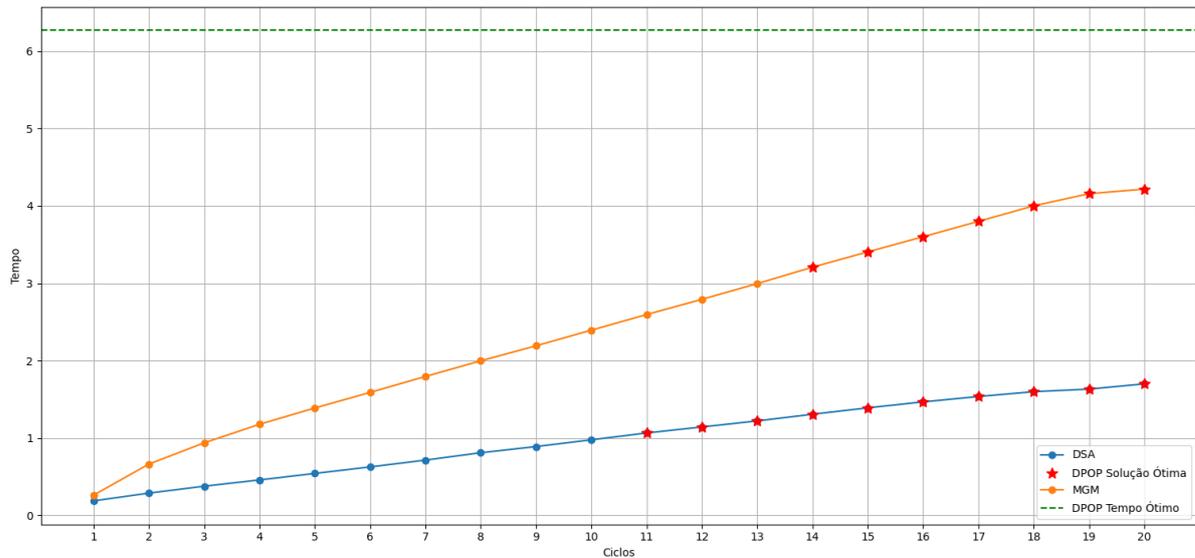


Figura 36: Velocidade para solução ótima por ciclo para os cenários com 50 postes.

quase exponencial na quantidade de mensagens trocadas, particularmente no cenário de 100 postes. Esta tendência aponta para uma limitação na escalabilidade do MGM em termos de comunicação, o que pode representar um desafio significativo em ambientes com restrições severas de largura de banda.

Portanto, considerando os resultados apresentados, é adequado afirmar que para sistemas onde a comunicação é um fator crítico, especialmente em aplicações com largura de banda limitada, o DPOP se apresenta como a opção mais adequada devido à sua eficiência comunicacional superior. Contudo deve-se atentar ao quesito de tempo de resposta. Considerando que o DSA consistentemente alcança soluções ótimas em todas as iterações e demonstra uma capacidade de resposta mais rápida que o DPOP, ele emerge como a escolha mais adequada para aplicações com menos restrições de comunicação e necessidade de respostas rápidas. Além disso, o DSA mostrou ser capaz de escalar eficientemente em cenários mais complexos, algo que o DPOP não conseguiu no cenário de 500 postes, tornando-o particularmente vantajoso para cenários de média a alta complexidade.

6.4 Adaptabilidade e otimização da iluminação

Prosseguindo com a análise dos algoritmos DCOP, esta subseção foca na aplicação prática dos algoritmos DPOP e DSA utilizando bases de dados reais. A escolha desses dois algoritmos baseia-se em seus desempenhos, conforme discutido anteriormente, onde ambos demonstraram alcançar soluções de custo ótimo de forma consistente, garantido que a

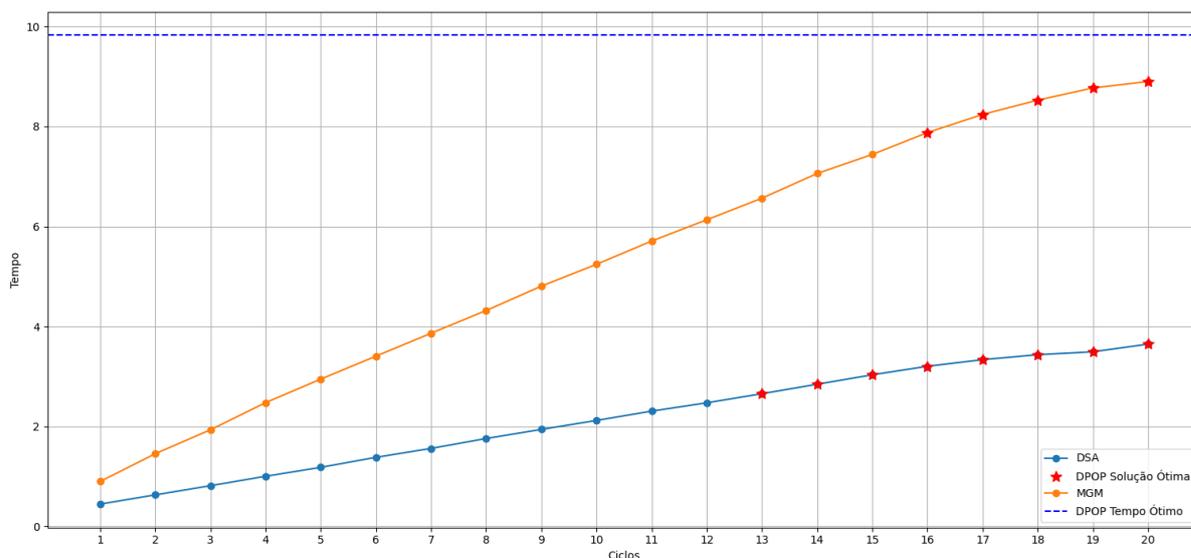


Figura 37: Velocidade para solução ótima por ciclo para os cenários com 100 postes.

saída dos níveis de iluminação estão conforme a informação captada pelos sensores, desta forma tornando-os ideais para avaliar a aplicabilidade do modelo DCOP em condições dinâmicas.

Para este estudo, foram empregados dois conjuntos de dados distintos. O primeiro conjunto de dados é proveniente da Autarquia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife (CTTU) ², detalha o fluxo de veículos em cinco ruas durante janeiro de 2024. e detalha o fluxo de veículos em cinco ruas durante janeiro de 2024. Esses dados são originados de equipamentos de monitoramento, como lombadas eletrônicas e fotossensores, que registram o número de veículos que passam por determinados pontos em intervalos de 15 minutos. O objetivo desses dados é monitorar o tráfego urbano para planejamento e gestão do trânsito. A Figura 39 ilustra a heterogeneidade dos dados de tráfego para uma das ruas monitoradas ao longo do mês.

Para utilizar esses dados no modelo DCOP, foi necessário um processo de tratamento e limpeza. Inicialmente, os dados foram agrupados por equipamento e hora, resultando no total de veículos por hora para cada equipamento ao longo do mês. Em seguida, foram removidos os períodos em que as luzes de iluminação pública estariam desligadas, mantendo apenas os dados das 0h às 6h e das 18h às 23h. Os equipamentos foram renomeados para áreas (A1 a A5), e os dados foram organizados em arquivos distintos para áreas com 10, 50, 100 e 500 postes de iluminação. Cada arquivo contém informações sobre tráfego (dados reais), pedestres (dados sintéticos) e condições meteorológicas (dados

²<http://dados.recife.pe.gov.br/ca/dataset/velocidade-das-vias-quantitativo-por-velocidade-media-2024>

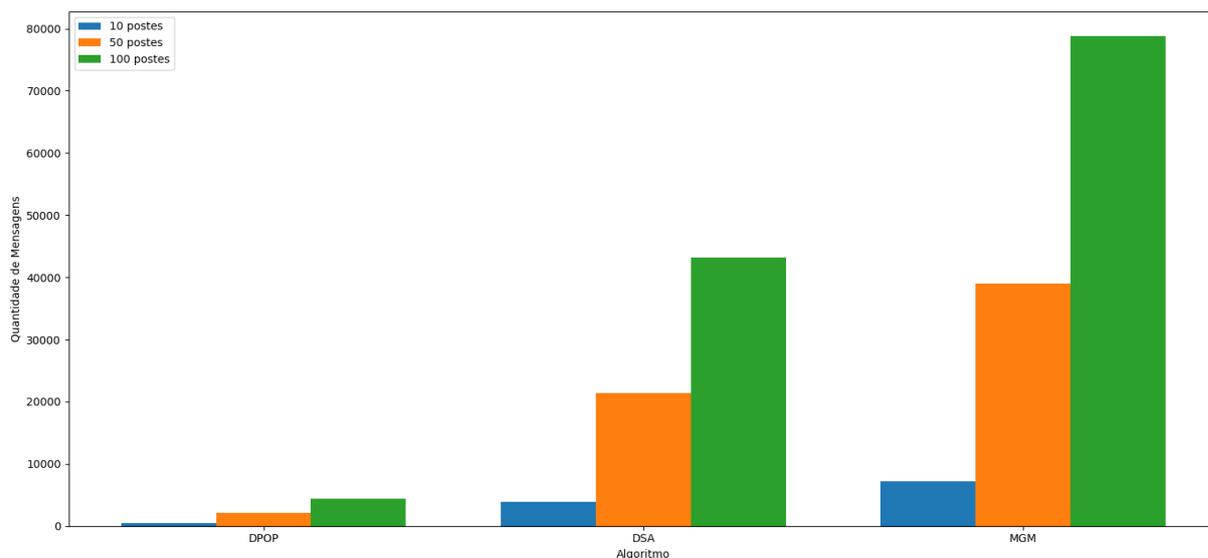


Figura 38: Quantidade de mensagens por algoritmo para cada cenário.

sintéticos).

O segundo conjunto de dados provém do SisGeo³ (Sistema de Gestão da Geoinformação) de Niterói, que gerencia os dados geoespaciais do município. Através da coleta e atualização contínua de dados, o SIGeo apoia a criação de políticas públicas, promove a transparência e disponibiliza informações para a população por meio de um portal de dados abertos. A visão do SIGeo é transformar Niterói em uma cidade inteligente, utilizando recursos tecnológicos para otimizar a gestão urbana, melhorar a qualidade de vida dos cidadãos e servir de modelo para outras cidades no Brasil.

Foram utilizados 41.846 registros de pontos de iluminação pública, disponíveis na plataforma SIGeo. Para este estudo, foi selecionada a Rua Marechal Deodoro, que contém oito quadras totalizando 53 pontos de luz. Os dados foram personalizados para refletir a configuração real das ruas e postes, criando modelos específicos para cada quadra. A Figura 40 mostra a distribuição dos postes na cidade de Niterói.

A consolidação dos dados do SIGeo permitiu uma customização detalhada do modelo DCOP, refletindo a diversidade real das configurações urbanas. A base de dados foi filtrada e organizada para criar cenários que representam fielmente a infraestrutura de iluminação pública da cidade, facilitando a análise da adaptabilidade e otimização da iluminação.

Em (P. FRAGOSO et al., 2020), foram realizadas simulações no software Dialux⁴ para determinar requisitos de iluminância média mínima (lux) para uma luminária LED

³<https://www.sigeo.niteroi.rj.gov.br/search?q=ilumina%C3%A7%C3%A3o>

⁴<https://www.dialux.com/en-GB/>

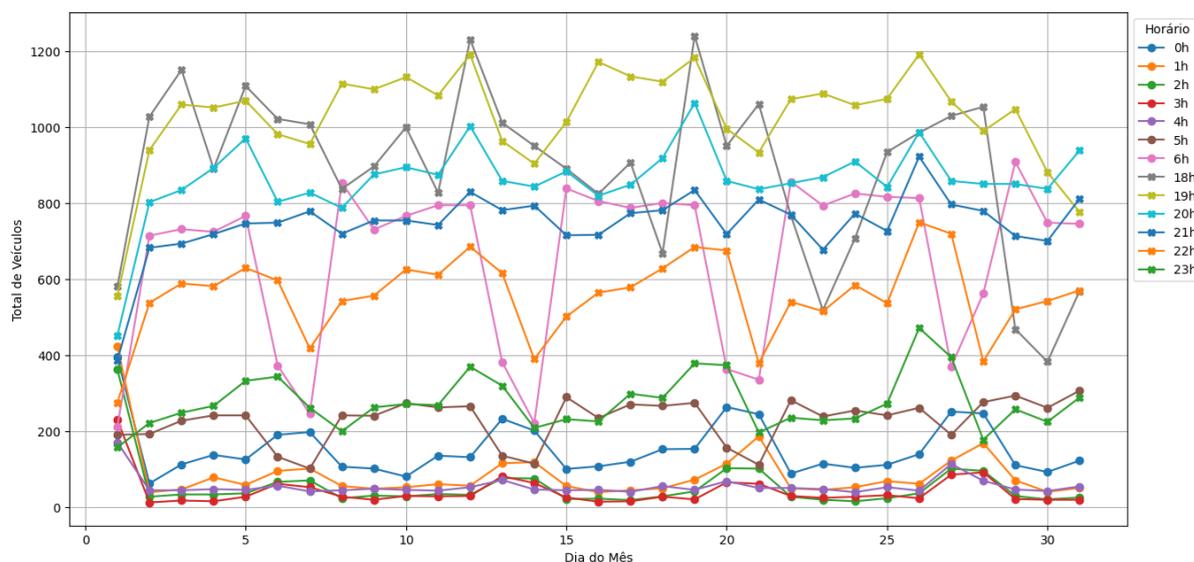


Figura 39: Fluxo de veículos ao longo do mês de janeiro de 2024, monitorados pela CTTU de Recife.

de 60W com base no fluxo de veículos para os períodos de 18h-22h (alto fluxo), 22h-00h (fluxo moderado) e 00h-06h (baixo fluxo), conforme estabelecido na NBR 5101. Os resultados das simulações podem ser observados nas Figuras 41 e 42 e os valores de iluminância para cada horário são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Horários e limites aplicados.

Períodos	Iluminância média mínima (lux)
18-22h	30
22-00h	20
00-06h	10

Com base nesses valores de iluminância, a potência das lâmpadas foi ajustada para cada período, resultando em uma dimerização eficiente da iluminação pública. Neste trabalho, foram utilizados os valores estabelecidos para uma lâmpada de 60W, ajustando a potência para 42W em períodos de fluxo moderado e para 22W em períodos de baixo fluxo, sendo a potência nominal de 60W utilizada nos horários de alto fluxo. Esses valores de potência foram definidos para atender aos requisitos de iluminância média mínima (lux) conforme a tabela acima. A Tabela 9 apresenta os valores de potência dimerizados por horário.

Ao mapear o tráfego de veículos para esses valores de potência ajustados, o modelo DCOP, utilizando os algoritmos DPOP e DSA, foi capaz de gerenciar os níveis de luminosidade de forma mais eficiente e adaptativa, contribuindo para reduções significativas

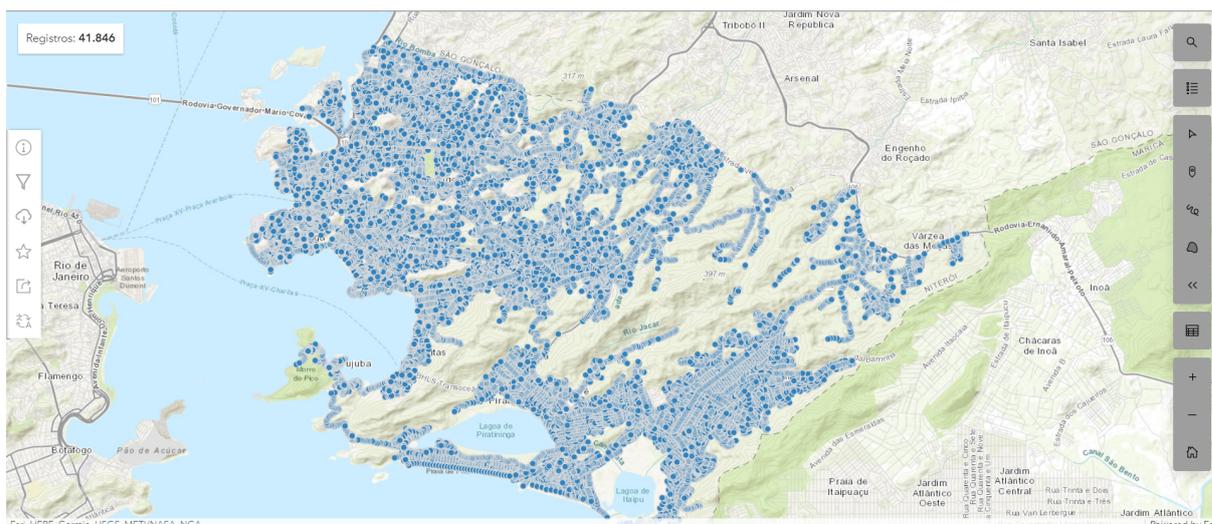


Figura 40: Registro de pontos de iluminação pública na cidade de Niterói.

Tabela 9: Potência encontrada com dimerização para cada horário.

Período	18-22h	22-00h	00-06h
Potência (W)	60	42	22

no consumo de energia. Essas adaptações resultaram em uma economia de energia significativa, mantendo a conformidade com os níveis de iluminância estabelecidos pela NBR 5101 e assegurando a visibilidade e segurança necessárias.

A Figura 43 ilustra os resultados do consumo energético para modelagem feita com a base de dados da CTTU para uma região com 50 postes, em três datas específicas ao longo de um mês, comparando o desempenho do modelo DCOP empregando os algoritmos DPOP e DSA com métodos tradicionais de iluminação. O gráfico demonstra que o modelo adaptativo apresentou uma economia de energia, com custos variando conforme a demanda de tráfego e horário. Em contraste, os métodos estáticos e de horário pré-definido mostram um consumo energético mais alto e constante, independente da variação de demanda ao longo do período de funcionamento dos postes.

Se expandirmos o resultado desse modelo para uma cidade com 500 mil postes, onde o custo para um dia de funcionamento de 50 postes (equivalente a 5 ruas com 10 postes cada) é de R\$ 19,50 no modelo estático, R\$ 11,95 no modelo pré-definido, e R\$ 9,44 para o modelo DCOP no dia 01/01/2024, a redução no custo diário em comparação ao modelo estático é de R\$ 10,06. Esta economia, quando aplicada a toda a cidade em uma operação diária, resulta em uma economia mensal aproximada de R\$ 3.018.000,00. Em contraste, a economia em relação ao método pré-definido, que é de R\$ 2,51 por dia, leva a uma economia mensal de cerca de R\$ 2.265.000,00. Este cálculo destaca a eficiência do modelo

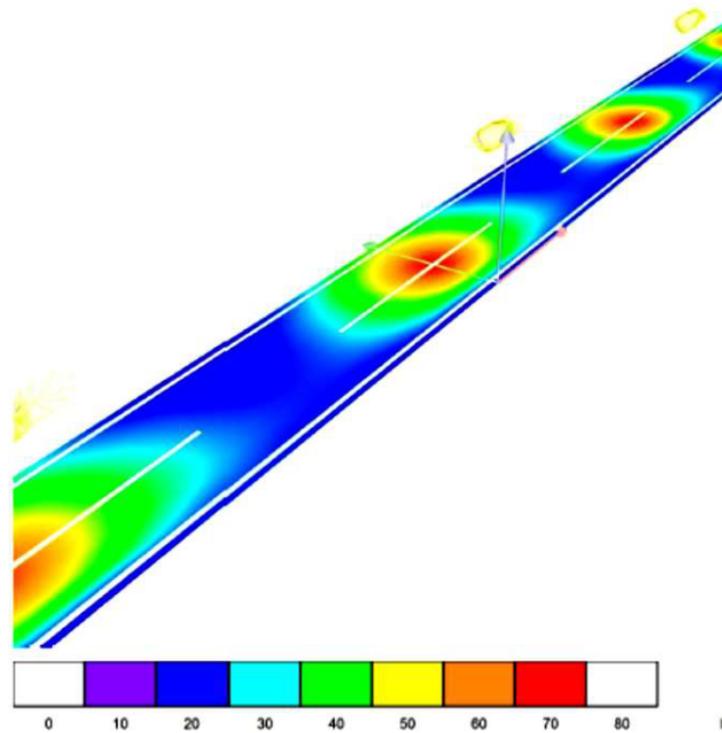


Figura 41: Iluminância luminária de 60W com renderização de cor.

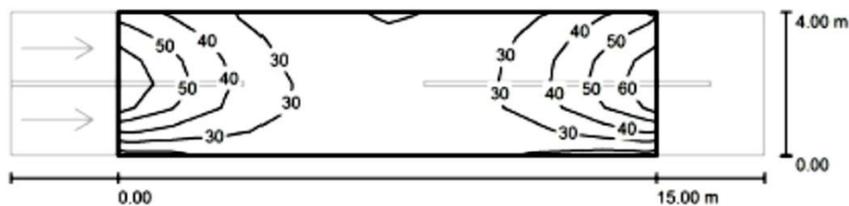


Figura 42: Curva isolux para luminária de 60W.

DCOP em reduzir custos operacionais em situações que o ambiente assim permita. Um resumo das informações acima é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: Comparação dos custos diários e mensais para 500 mil postes de iluminação.

Modelo	Custo Diário (R\$)	Economia Mensal (R\$)
Estático	19,50	-
Pré-definido	11,95	2.265.000,00
DCOP	9,44	3.018.000,00

A Figura 44 ilustra os resultados do consumo energético para a modelagem customizada empregando dados de Niterói, onde foram aplicadas as mesmas informações de tráfego utilizadas no modelo anterior, acrescidas de dados sintéticos sobre detecção de pedestres e chuva. Observa-se que as curvas de consumo energético neste gráfico são distintas das do gráfico anterior, refletindo um aumento na intensidade luminosa e, conseqüentemente, um maior consumo energético devido à presença de informações adicionais

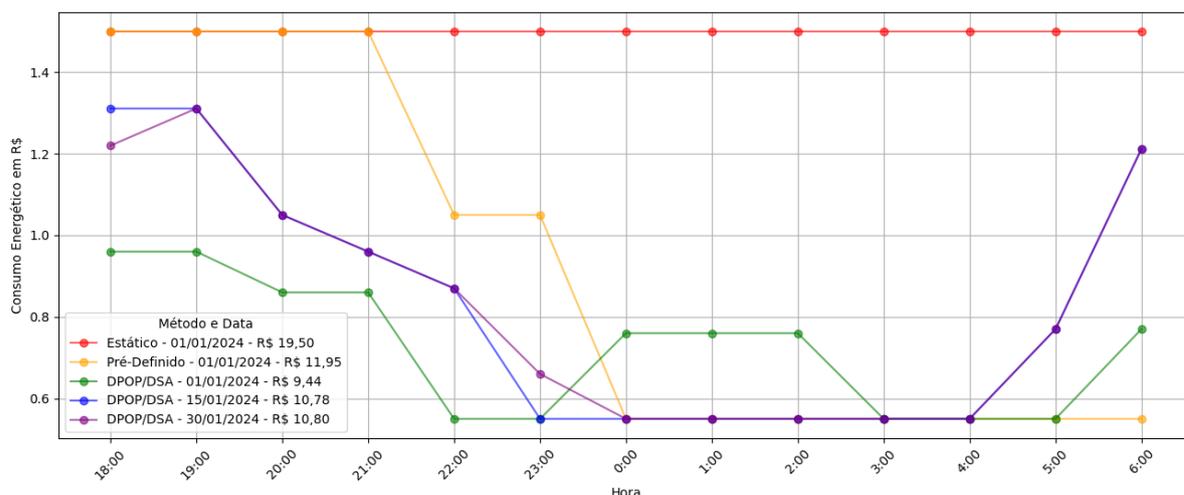


Figura 43: Resposta adaptativa do modelo DCOP para o cenário com 50 postes.

de pedestres e chuva. Este padrão evidencia como o modelo DCOP consegue se adaptar dinamicamente aos dados ambientais capturados, ajustando a iluminação de forma eficiente e responsiva.

Além disso, o segundo conjunto de dados reflete uma customização profunda do modelo DCOP, com a quantidade de ruas e postes sendo especificamente adaptada para corresponder a uma rua específica na cidade de Niterói, demonstrada na Figura 45. Essa abordagem testa a flexibilidade do modelo em ajustar-se a diferentes configurações urbanas, e também destaca sua capacidade de otimizar o uso da iluminação pública em resposta direta às necessidades locais, conforme evidenciado pelas variações nos níveis de consumo energético entre os dois cenários examinados.

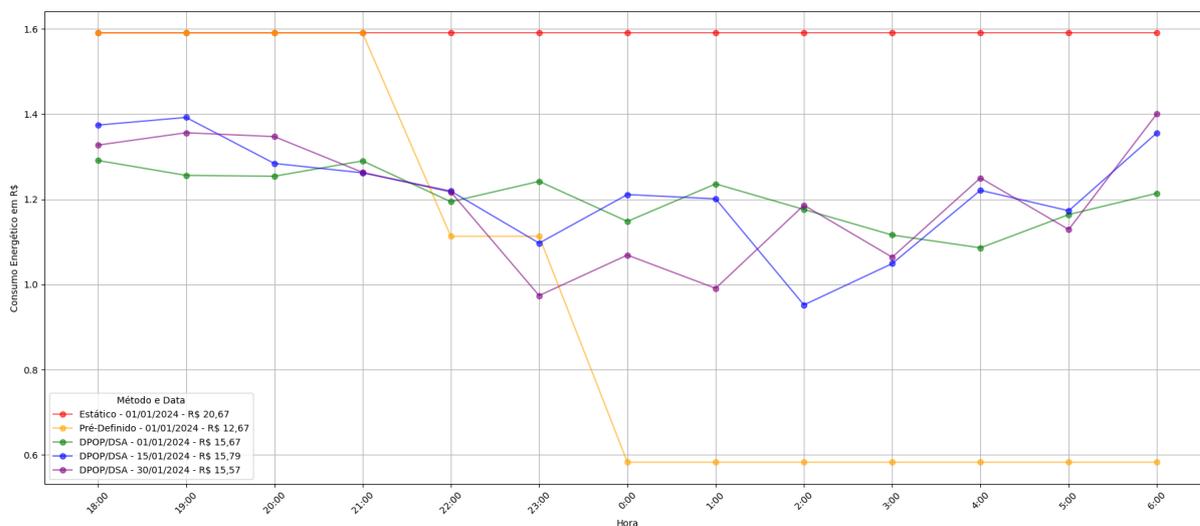


Figura 44: Resposta adaptativa do modelo DCOP para o trecho da cidade de Niterói.

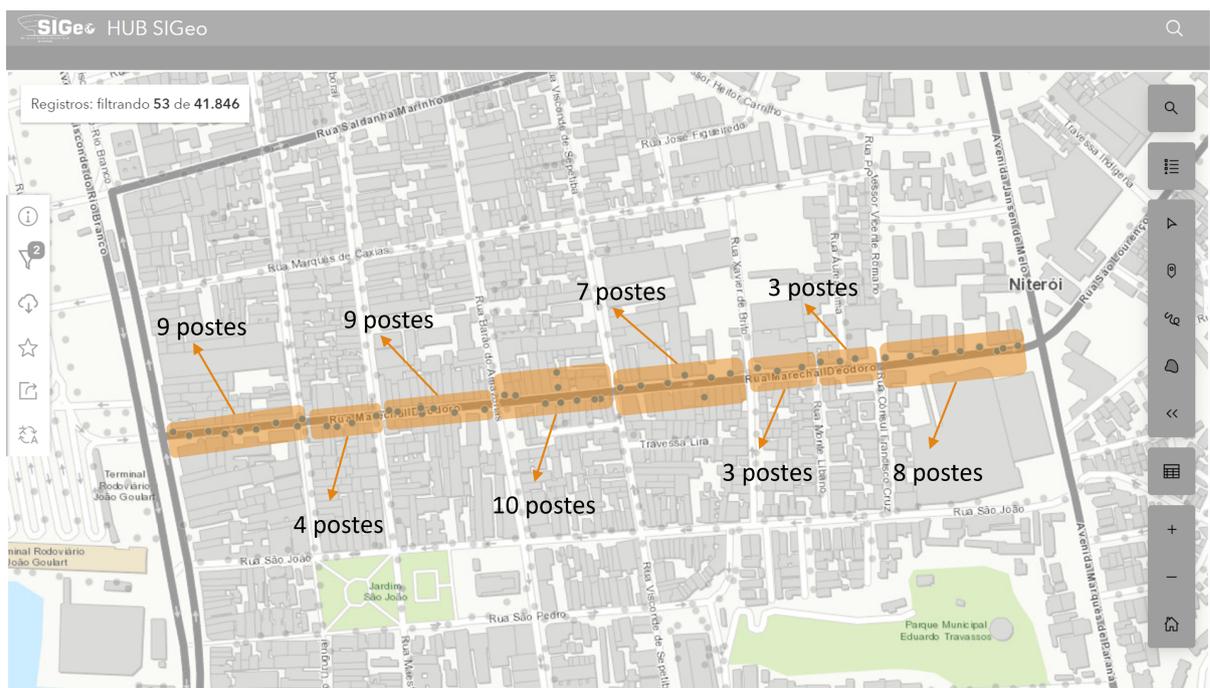


Figura 45: Avenida utilizada como referência para o modelo DCOP customizado.

Esta subseção demonstrou a aplicabilidade dos algoritmos DPOP e DSA em contextos dinâmicos através do uso de dados reais. Essas análises reforçam que o DCOP não é apenas um método teórico, mas uma solução prática que pode ser customizada para atender às diversas exigências de um ambiente urbano, otimizando o consumo energético enquanto melhora a iluminação pública.

6.5 Considerações finais

Durante a análise dos algoritmos DCOP, especificamente o DPOP e o DSA, notamos sua capacidade de ajustar dinamicamente os níveis de iluminação baseados em condições de tráfego variáveis e outros fatores ambientais, utilizando dados reais. Este estudo confirmou a viabilidade dos algoritmos para otimizar o consumo energético e melhorar a eficiência da iluminação pública, ao mesmo tempo que respondem de forma adaptativa às mudanças no ambiente urbano.

Os resultados destacam que, embora o DPOP seja altamente eficiente em termos de comunicação, o DSA se mostrou mais rápido e adaptável em cenários de complexidade crescente, fazendo-o ideal para aplicações práticas onde a resposta rápida é crucial. Além disso, a modelagem baseada nos dados de Niterói introduziu uma perspectiva de customização que ilustra a flexibilidade do modelo DCOP para ser ajustado a configurações

urbanas específicas, aumentando sua aplicabilidade.

Este capítulo também mostrou que a integração de tecnologias adaptativas pode resultar em economias significativas de custos operacionais quando expandidas para escalas urbanas maiores, oferecendo percepções valiosas para o planejamento e a gestão de sistemas de iluminação pública.

Portanto, enquanto os algoritmos DCOP apresentam desafios, especialmente em termos de requisitos de comunicação e processamento em larga escala, seus benefícios potenciais para Cidades Inteligentes são claros, proporcionando uma plataforma robusta para futuras investigações e aplicações práticas em gestão de energia e automação urbana.

7 Conclusão

O uso de sistemas IoT adaptativos aplicados a Cidades Inteligentes, detalhado neste trabalho, ressalta a transformação tecnológica em ambientes urbanos por meio da integração de dispositivos interconectados. Esta tecnologia viabiliza uma gestão mais eficiente dos recursos urbanos, potencializando a qualidade dos serviços públicos. A capacidade de dispositivos inteligentes em coletar e analisar dados em tempo real transforma a infraestrutura das cidades, tornando-as capazes de responder de maneira proativa às necessidades dos cidadãos e aos desafios ambientais.

A contribuição deste trabalho reside na aplicação prática e inovadora de algoritmos DCOP na gestão adaptativa da iluminação pública, um campo ainda pouco explorado em estudos anteriores. Embora não tenha sido desenvolvido um novo algoritmo ou feita uma adaptação extensa de algoritmos existentes, a pesquisa demonstra a viabilidade e a eficácia do uso de algoritmos DCOP, como DPOP, MGM e DSA, em cenários urbanos reais para a otimização da iluminação pública. A implementação destes algoritmos em um sistema de iluminação pública permite ajustes dinâmicos e automáticos na luminosidade dos postes, com base em variáveis ambientais detectadas em tempo real, como tráfego de veículos, presença de pedestres e detecção de chuva. Este modelo promoveu uma redução no consumo energético, bem como melhorou a eficiência operacional do sistema de iluminação pública, contribuindo para o fortalecimento do paradigma das Cidades Inteligentes. A relevância da pesquisa está em validar empiricamente a aplicabilidade dos algoritmos DCOP em contextos próximos dos reais, oferecendo uma solução para melhorar a gestão dos recursos urbanos e a qualidade dos serviços públicos.

O foco em adaptabilidade revelou a importância de sistemas que podem modificar seu comportamento em resposta a mudanças ambientais e operacionais. A dissertação expõe como sistemas autoadaptativos empregam tecnologias de sensoriamento para ajustar as funções de infraestrutura urbana em resposta a dados contextuais. A implementação de tais sistemas promove a economia de recursos, bem como garante uma resposta ágil e eficaz às dinâmicas urbanas, contribuindo para uma gestão urbana mais resiliente e menos

sujeita a falhas ou ineficiências.

No desenvolvimento deste estudo, o cenário de Iluminação Pública Adaptativa foi modelado como um DCOP, algo pouco explorado na literatura. Ao implementar variáveis e restrições dentro do modelo DCOP, foi possível criar uma rede de iluminação pública que responde automaticamente e de forma otimizada às necessidades em tempo real da área urbana.

Essa abordagem permitiu uma otimização em escala urbana, promovendo uma gestão mais inteligente e econômica dos recursos de iluminação. Os resultados da análise comparativa dos algoritmos DCOP revelaram que os algoritmos locais, como o DSA e MGM são eficazes em encontrar soluções ótimas rapidamente, ajustando-se de maneira eficiente a dinâmica da cidade.

Contudo, embora os algoritmos DCOP tenham mostrado úteis na gestão adaptativa da iluminação pública, uma limitação percebida diz respeito à infraestrutura tecnológica necessária e à capacidade dos algoritmos em lidar com mudanças dinâmicas de restrições. A maioria dos *frameworks* DCOP disponíveis atualmente não suporta a modificação dinâmica de restrições em tempo real, uma capacidade essencial para aplicações em ambientes urbanos que exigem alta adaptabilidade. Além disso, como destacado por (FIORETTO; PONTELLI; YEOH, 2018), a falta de uma métrica padrão para avaliar o desempenho dos algoritmos e a ausência de uma linguagem DCOP geral dificultam a comparação e a validação de novos algoritmos em diferentes contextos.

Como trabalhos futuros, pode-se explorar o uso de outros algoritmos DCOP, como Max-sum, ADOPT, e OptAPO, que podem oferecer novas perspectivas e eficiências em contextos variados. A inclusão desses algoritmos poderia potencialmente expandir a capacidade do sistema em lidar com cenários mais complexos e dinâmicos, onde a adaptação em tempo real se faz ainda mais necessária. Adicionalmente, propõe-se aprofundar o modelo criado neste trabalho incorporando restrições adicionais relacionadas à capacidade de processamento dos dispositivos IoT, ao canal de comunicação utilizado, e capacidade de hospedagem de agentes em outros dispositivos. Outra possibilidade é testar a resiliência do sistema frente à entrada e saída de agentes em tempo real, melhorando a robustez e a aplicabilidade do modelo em ambientes urbanos reais. Algumas modificações sugeridas podem ser implementadas utilizando o *frameworks* pyDCOP, já empregado neste estudo, algo que não foi feito devido às limitações de tempo do estudo. Estas melhorias não só ampliariam a funcionalidade do modelo atual, mas também contribuiriam significativamente para a literatura sobre gestão inteligente de recursos urbanos, fortalecendo as bases

para futuras inovações no campo das Cidades Inteligentes.

As contribuições desta pesquisa destacam-se por sua aplicabilidade prática e teórica no campo das Cidades Inteligentes e sistemas IoT adaptativos. Através da publicação do artigo "Self-Adaptation in IoT Systems for Smart Cities" no Simpósio de 2023 sobre Internet das Coisas (SIoT)¹, a pesquisa contribuiu significativamente para o avanço do conhecimento na área, introduzindo novas abordagens de adaptabilidade em sistemas urbanos inteligentes. Também foi aprovado um artigo ao 56º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2024), o qual deve ser publicado nos próximos meses, ampliando a discussão sobre o impacto dos sistemas adaptativos em contextos urbanos. Essas contribuições reforçam a relevância do estudo no contexto acadêmico e prático, além de destacar o potencial de aplicações desenvolvidas para a gestão eficiente de recursos de uma Cidade Inteligente e a melhoria da qualidade dos serviços públicos, posicionando a pesquisa na vanguarda das discussões sobre tecnologias adaptativas para ambientes urbanos.

¹<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10390083>

REFERÊNCIAS

- AGYEMANG, Brighter; REN, Fenghui; YAN, Jun. Distributed Multi-Agent Hierarchy Construction for Dynamic DCOPs in Mobile Sensor Teams. **Human-Centric Intelligent Systems**, Springer, v. 3, n. 4, p. 473–486, 2023.
- ALI, Atik; ARIB, Souhila; AKNINE, Samir. A New Parking Space Allocation System based on a Distributed Constraint Optimization Approach. In: ICAART (2). [S. l.: s. n.], 2021. P. 196–204.
- AN, Jonggwan et al. Toward global IoT-enabled smart cities interworking using adaptive semantic adapter. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 6, n. 3, p. 5753–5765, 2019.
- ANGARITA, Rafael; MANOUVRIER, Maude; RUKOZ, Marta. An agent architecture to enable self-healing and context-aware web of things applications. In: INTERNATIONAL Conference of Internet of Things and Big Data (IoTBD 2016). [S. l.: s. n.], 2016. P. 82–87.
- ARAÚJO, Júlia et al. Assessment of the Technological update of Public Lighting in Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 06, p. 985–991, 2020. DOI: [10.1109/TLA.2020.9099674](https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9099674).
- ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, out. 2010. ISSN 1389-1286. DOI: [10.1016/j.comnet.2010.05.010](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>. Acesso em: 4 set. 2023.
- BAZZAN, Ana Lúcia C. IA Multiagente: Mais Inteligência, Mais Desafios. pt. **Jornadas de Atualização em Informática (JAI)**. SBC, 2010, 2010.
- CABRERA, Christian; CLARKE, Siobhán. A self-adaptive service discovery model for smart cities. **IEEE Transactions on Services Computing**, IEEE, v. 15, n. 1, p. 386–399, 2019.

- CHEN, Ziyu et al. A genetic algorithm based framework for local search algorithms for distributed constraint optimization problems. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, Kluwer Academic Publishers, USA, v. 34, n. 2, 2020. ISSN 1387-2532. DOI: [10.1007/s10458-020-09464-9](https://doi.org/10.1007/s10458-020-09464-9). Disponível em: [10.1007/s10458-020-09464-9](https://doi.org/10.1007/s10458-020-09464-9).
- CICIRELLI, Franco et al. A scalable agent-based smart environment for edge-based urban iot systems. In: SPRINGER. INTEROPERABILITY, Safety and Security in IoT: Third International Conference, InterIoT 2017, and Fourth International Conference, SaSeIoT 2017, Valencia, Spain, November 6-7, 2017, Proceedings 3. [S. l.: s. n.], 2018. P. 53–59.
- CORRÊA, Abel. **Alocação de tarefas de desastre na plataforma RMASBench: uma abordagem baseada em passagem de mensagens e formação de grupos**. Jan. 2015. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática, Porto Alegre. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/130528>. Acesso em: jan. 2015.
- DRAGAN, Paul-Andrei; METZGER, Andreas; POHL, Klaus. Towards the decentralized coordination of multiple self-adaptive systems. In: IEEE. 2023 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems (ACSOS). [S. l.: s. n.], 2023. P. 107–116.
- FIORETTO, Ferdinando; PONTELLI, Enrico; YEOH, William. Distributed Constraint Optimization Problems and Applications: A Survey. **Journal of Artificial Intelligence Research**, AI Access Foundation, v. 61, p. 623–698, mar. 2018. ISSN 1076-9757. DOI: [10.1613/jair.5565](https://dx.doi.org/10.1613/jair.5565). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1613/jair.5565>.
- AL-FUQAHA, Ala et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015. Conference Name: IEEE Communications Surveys & Tutorials. ISSN 1553-877X. DOI: [10.1109/COMST.2015.2444095](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095).
- GAZIS, Vangelis et al. On the Role of Semantic Descriptions for Adaptable Protocol Stacks in the Internet of Things. In: IEEE. 2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. [S. l.: s. n.], 2014. P. 437–443.

- GIACOMET, Bruno; ENEMBRECK, Fabrício. **Otimização distribuída de restrições em ambientes dinâmicos**. 2010. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. Disponível em: <<https://arquivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos/tede/brunogiacomet.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2010.
- GIALONARDO, Ester et al. Semantics-driven programming of self-adaptive reactive systems. **International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering**, World Scientific, v. 30, n. 06, p. 805–834, 2020.
- GIORDANO, Andrea; SPEZZANO, Giandomenico; VINCI, Andrea. Smart agents and fog computing for smart city applications. In: SPRINGER. **SMART Cities: First International Conference, Smart-CT 2016, Málaga, Spain, June 15-17, 2016, Proceedings 1**. [S. l.: s. n.], 2016. P. 137–146.
- GUBBI, Jayavardhana et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. en. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, set. 2013. ISSN 0167-739X. DOI: [10.1016/j.future.2013.01.010](https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241>>. Acesso em: 4 abr. 2023.
- HIRMER, Pascal et al. Situation recognition and handling based on executing situation templates and situation-aware workflows. **Computing**, Springer, v. 99, p. 163–181, 2017.
- HUDSON-SMITH, Andrew et al. Urban IoT: Advances, Challenges, and Opportunities for Mass Data Collection, Analysis, and Visualization. In: **Urban Informatics**. Edição: Wenzhong Shi. Singapore: Springer Singapore, 2021. P. 701–719. ISBN 978-981-15-8983-6. DOI: [10.1007/978-981-15-8983-6_38](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_38). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_38>.
- JUNGES, Robert. **Comparação de algoritmos para otimização de restrições distribuídas em um cenário de controle semafórico**. Jan. 2007. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática, Porto Alegre. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/16123>>. Acesso em: jan. 2007.
- KEELE, Staffs et al. **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**. [S. l.], 2007.

- KEPHART, J.O.; CHESS, D.M. The vision of autonomic computing. **Computer**, v. 36, n. 1, p. 41–50, jan. 2003. Conference Name: Computer. ISSN 1558-0814. DOI: [10.1109/MC.2003.1160055](https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055).
- KHAKHIASHVILI, Ilya; DERY, Lihi; GRINSHPOUN, Tal. Distributed course allocation with asymmetric friendships. **arXiv preprint arXiv:2309.09684**, 2023.
- LEE, Euijong; SEO, Young-Duk; KIM, Young-Gab. Self-adaptive framework based on mape loop for internet of things. **sensors**, MDPI, v. 19, n. 13, p. 2996, 2019.
- LEITE, Adriel Christian Diniz; KURAHASSI, Luiz Fernando Tibaldi. As potencialidades da iluminação pública no contexto das cidades inteligentes. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 05, p. 14508–14520, 2023.
- LHOPITAL, Sacha et al. Decentralised control of intelligent devices: A healthcare facility study. In: SPRINGER. MULTI-AGENT Systems and Agreement Technologies: 17th European Conference, EUMAS 2020, and 7th International Conference, AT 2020, Thessaloniki, Greece, September 14-15, 2020, Revised Selected Papers 17. [S. l.: s. n.], 2020. P. 20–36.
- LIAO, Xin; HOANG, Khoi. A Class of Local Search Based Anytime Algorithms for Continuous Distributed Constraint Optimization Problems. **Preprints**, Preprints, 2024. DOI: [10.20944/preprints202401.1158.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202401.1158.v1). Disponível em: [10.20944/preprints202401.1158.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202401.1158.v1).
- MAHESWARAN, Rajiv T; PEARCE, Jonathan P; TAMBE, Milind et al. Distributed Algorithms for DCOP: A Graphical-Game-Based Approach. In: CITESEER. PDCS. [S. l.: s. n.], 2004. P. 432–439.
- MEDVEDEV, Alexey et al. Storing and indexing IoT context for smart city applications. In: SPRINGER. INTERNET of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 16th International Conference, NEW2AN 2016, and 9th Conference, ruSMART 2016, St. Petersburg, Russia, September 26-28, 2016, Proceedings 16. [S. l.: s. n.], 2016. P. 115–128.
- MERABET, Fatima Zohra; BENMERZOUG, Djamel. Service Modeling and Architecting for Self-Adaptive IoT-Based Systems. In: RIF. [S. l.: s. n.], 2022. P. 76–87.
- MODI, Pragnesh Jay et al. An asynchronous complete method for distributed constraint optimization. In: PROCEEDINGS of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Melbourne, Australia: Association for Computing Machinery, 2003. (AAMAS '03), p. 161–168. ISBN 1581136838. DOI:

[10.1145/860575.860602](https://doi.org/10.1145/860575.860602). Disponível em:

<<https://doi.org/10.1145/860575.860602>>.

MORADIKIAN, Samaneh; EMAMI-SKARDI, Mohammad Javad; KERACHIAN, Reza. A distributed constraint multi-agent model for water and reclaimed wastewater allocation in urban areas: Application of a modified ADOPT algorithm. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 317, p. 115446, 2022.

MORMUL, Mathias et al. Situation model as interface between situation recognition and situation-aware applications. **Computer Science-Research and Development**, Springer, v. 32, n. 3, p. 331–342, 2017.

MOTTA, Rebeca C.; BATISTA, Thais V.; DELICATO, Flávia C. Making Cities Smarter: A Literature Review of Characteristics, Technologies, and Challenges. In: ANAIS do XV Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva (SBCUP 2023). João Pessoa/PB: Sociedade Brasileira de Computação, 2023. P. 111–120. DOI: [10.5753/sbcup.2023.230418](https://doi.org/10.5753/sbcup.2023.230418).

MUCCINI, Henry et al. Self-adaptive IoT architectures: an emergency handling case study. In: PROCEEDINGS of the 12th European Conference on Software Architecture: Companion Proceedings. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, set. 2018. (ECSA '18), p. 1–6. ISBN 978-1-4503-6483-6. DOI:

[10.1145/3241403.3241424](https://doi.org/10.1145/3241403.3241424). Disponível em:

<<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3241403.3241424>>. Acesso em: 5 jul. 2023.

MUSE, Larissa Paredes. **Iluminação Pública no Contexto das Cidades Inteligentes: Matriz Multicritério para Aplicação do LED e da IoT no Brasil**. 2019. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro. Disponível em:

<<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2654.pdf>>.

NASCIMENTO, Nathalia Moraes do; LUCENA, Carlos José Pereira de. Fiot: An agent-based framework for self-adaptive and self-organizing applications based on the internet of things. **Information Sciences**, Elsevier, v. 378, p. 161–176, 2017.

NEZAMODDINI, Nasim; GHOLAMI, Amirhosein. A survey of adaptive multi-agent networks and their applications in smart cities. **Smart Cities**, MDPI, v. 5, n. 1, p. 318–347, 2022.

NIAZ, Ashfaq et al. Smart city IoT application for road infrastructure safety and monitoring by using digital twin. In: IEEE. 2022 International Conference on IT and Industrial Technologies (ICIT). [S. l.: s. n.], 2022. P. 1–6.

NOGUEIRA, Bruno C. et al. Self-Adaptation in IoT Systems for Smart Cities. In: 2023 Symposium on Internet of Things (SIoT). [S. l.: s. n.], 2023. P. 1–5. DOI:

[10.1109/SIoT60039.2023.10390083](https://doi.org/10.1109/SIoT60039.2023.10390083).

P. FRAGOSO, Adriano et al. Análise da economia de energia com dimerização quando da aplicação da tecnologia LED na Iluminação Pública - Estudo de caso: Cidade do Rio de Janeiro. In: ANAIS do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020. [S. l.: s. n.], ago. 2020. (Anais SBSE 2020). DOI: [10.48011/sbse.v1i1.2298](https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2298).

PASOLINI, Gianni et al. Design, deployment and evolution of heterogeneous smart public lighting systems. **Applied Sciences**, MDPI, v. 9, n. 16, p. 3281, 2019.

PEARCE, Jonathan P.; TAMBE, Milind; MAHESWARAN, Rajiv. Solving Multiagent Networks Using Distributed Constraint Optimization. en. **AI Magazine**, v. 29, n. 3, p. 47–47, set. 2008. Number: 3. ISSN 2371-9621. DOI: [10.1609/aimag.v29i3.2159](https://doi.org/10.1609/aimag.v29i3.2159).

Disponível em:

<<https://ojs.aaai.org/aimagazine/index.php/aimagazine/article/view/2159>>.

Acesso em: 9 jan. 2024.

PETCU, Adrian; FALTINGS, Boi. A Scalable Method for Multiagent Constraint Optimization. **InproceedingsofIJCAI05**, EdinburghScotlandUK, r271, 2005.

PETRITOLI, Enrico et al. Smart lighting as basic building block of smart city: An energy performance comparative case study. **Measurement**, v. 136, p. 466–477, 2019. ISSN 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.095>.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118312405>>.

PROVOOST, Michiel; WEYNS, Danny. DingNet: A self-adaptive internet-of-things exemplar. In: IEEE. 2019 IEEE/ACM 14th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS). [S. l.: s. n.], 2019. P. 195–201.

QUIN, Federico; WEYNS, Danny; BAMELIS, Thomas; BUTTAR, Sarpreet Singh et al. Efficient analysis of large adaptation spaces in self-adaptive systems using machine learning. In: IEEE. 2019 IEEE/ACM 14th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS). [S. l.: s. n.], 2019. P. 1–12.

- QUIN, Federico; WEYNS, Danny; BAMELIS, Thomas; SINGH BUTTAR, Sarpreet et al. Efficient Analysis of Large Adaptation Spaces in Self-Adaptive Systems using Machine Learning. In: 2019 IEEE/ACM 14th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS). [S. l.: s. n.], mai. 2019. P. 1–12. ISSN: 2157-2321. DOI: [10.1109/SEAMS.2019.00011](https://doi.org/10.1109/SEAMS.2019.00011).
- RUST, Pierre; PICARD, Gauthier; RAMPARANY, Fano. Resilient distributed constraint reasoning to autonomously configure and adapt IoT environments. **ACM Transactions on Internet Technology**, ACM New York, NY, v. 22, n. 4, p. 1–31, 2022.
- SÁNCHEZ SUTIL, F.; CANO-ORTEGA, Antonio. Smart Public Lighting Control and Measurement System Using LoRa Network. **Electronics**, v. 9, n. 1, 2020. ISSN 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics9010124](https://doi.org/10.3390/electronics9010124). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/1/124>.
- SATO, Denise Maria Vecino. **I-DCOP: Classificação de Trens Baseada em um Processo Interativo com Otimização Distribuída de Restrições**. Ago. 2014. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=2217258. Acesso em: 14 ago. 2014.
- SERHANI, Abdellatif; NAJA, Najib; JAMALI, Abdellah. AQ-Routing: mobility-, stability-aware adaptive routing protocol for data routing in MANET-IoT systems. **Cluster Computing**, Springer, v. 23, n. 1, p. 13–27, 2020.
- SIKDER, Amit Kumar et al. IoT-enabled smart lighting systems for smart cities. In: IEEE. 2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). [S. l.: s. n.], 2018. P. 639–645.
- SILVA PEREIRA, Bruno Miguel da. **Procura distribuída de soluções com restrições locais e globais**. 2008. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/319>. Acesso em: 1 jan. 2008.
- SINGH, Shailesh Pratap; ALI, Nauman Bin; LUNDBERG, Lars. Smart and adaptive architecture for a dedicated internet of things network comprised of diverse entities: a proposal and evaluation. **Sensors**, MDPI, v. 22, n. 8, p. 3017, 2022.
- SOUZA, Alessandra et al. Potencial de Eficientização dos Sistemas de Iluminação Pública. **REVISTA DE TECNOLOGIA APLICADA**, v. 10, n. 3, p. 18–23, 2022.

- SOUZA, Arthur et al. SAPPARCHI: an Osmotic Platform to Execute Scalable Applications on Smart City Environments. In: IEEE. 2022 IEEE 15th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). [S. l.: s. n.], 2022. P. 289–298.
- SULTAN, Mohamed; AHMED, Khaled Nabil. SLASH: Self-learning and adaptive smart home framework by integrating IoT with big data analytics. In: IEEE. 2017 Computing Conference. [S. l.: s. n.], 2017. P. 530–538.
- SZYDLO, Tomasz et al. IoTSim-Osmosis-RES: Towards autonomic renewable energy-aware osmotic computing. **Software: Practice and Experience**, Wiley Online Library, v. 52, n. 7, p. 1698–1716, 2022.
- TÉCNICAS 37122, Associação Brasileira de Normas. **ABNT NBR ISO 37122: Cidades e comunidades sustentáveis — Indicadores para cidades inteligentes**. [S. l.]: Abnt, 2020. ABNT NBR ISO 37122. Primeira edição 09.07.2020, Versão corrigida 24.06.2021.
- TÉCNICAS 5101, Associação Brasileira de Normas. **ABNT NBR 5101: iluminação pública: procedimento**. [S. l.]: Abnt, set. 2018. ISBN 978-85-07-07743-5.
- TODOLI-FERRANDIS, David; SILVESTRE-BLANES, Javier; SEMPERE-PAYÁ, Víctor. Robust downlink mechanism for industrial Internet of Things using lorawan networks. **Electronics**, MDPI, v. 10, n. 17, p. 2122, 2021.
- USHA, B A et al. Comprehensive Review of Smart Cities using IOT. In: 2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). [S. l.: s. n.], 2020. P. 367–371. DOI: [10.1109/ICRITO48877.2020.9197792](https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9197792).
- VERMESAN, Ovidiu et al. **Internet of Things Strategic Research Roadmap**. [S. l.: s. n.], jan. 2009.
- WEISSBACH, Martin et al. Decentrally coordinated execution of adaptations in distributed self-adaptive software systems. In: IEEE. 2017 IEEE 11th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO). [S. l.: s. n.], 2017. P. 111–120.
- WEYNS, Danny; RAMACHANDRAN, Gowri Sankar; SINGH, Ritesh Kumar. Self-managing internet of things. In: SPRINGER. SOFSEM 2018: Theory and Practice of Computer Science: 44th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science, Krems, Austria, January 29-February 2, 2018, Proceedings 44. [S. l.: s. n.], 2018. P. 67–84.

WEYNS, Danny; SCHMERL, Bradley et al. **Towards Better Adaptive Systems by Combining MAPE, Control Theory, and Machine Learning**. [S. l.]: arXiv, mar. 2021. arXiv:2103.10847 [cs, eess]. DOI: [10.48550/arXiv.2103.10847](https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.10847). Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2103.10847>. Acesso em: 24 abr. 2023.

WOOLDRIDGE, Michael J. **An introduction to multiagent systems**. 2nd ed. Chichester, U.K: John Wiley & Sons, 2009. OCLC: ocn246887666. ISBN 978-0-470-51946-2.

YOKOO, Makoto et al. Distributed Constraint Satisfaction for Formalizing Distributed Problem Solving. In: IEEE. 12TH IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Sanpeidani Inuidani, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan e Ann Arbor, MI 48109, USA: [s. n.], 1992. P. 614–621.

ZHANG, Weixiong et al. Distributed stochastic search and distributed breakout: properties, comparison and applications to constraint optimization problems in sensor networks. **Artificial Intelligence**, v. 161, n. 1, jan. 2005. ISSN 0004-3702. DOI: [10.1016/j.artint.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.artint.2004.10.004). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370204001481>.

ZILBERSTEIN, Itai et al. Decentralized, Decomposition-Based Observation Scheduling for a Large-Scale Satellite Constellation. In: PROCEEDINGS of the International Conference on Automated Planning and Scheduling. [S. l.: s. n.], 2024. v. 34, p. 716–724.