

ILU Dossier

**Integrative Learning from Urban Data and Situational Context
for City Mobility Optimization**

Projeto R&D nacional (DSAIPA/DS/0111/2018)
financiado pela *Fundação para a Ciência e a Tecnologia* (FCT)

Período: 1/2019–6/2022

Estrutura

I Contexto	3
1 Sumário Descritivo	4
2 Nota Introdutória	5
3 Equipa	6
4 Planeamento Científico	8
5 ILU em perspectiva	12
II Contribuições	16
6 Síntese	17
7 Software (aplicações computacionais)	17
8 Progresso científico por tarefa	19
III Publicações	23
9 Revistas científicas Q1 (ISI/SJR)	24
10 Conferências internacionais de elevada visibilidade	26
11 Outras publicações de relevo	29
IV Dissertações (formação)	30
12 Teses de mestrado concluídas	31
13 Doutoramentos	35
14 Outros trabalhos	37
V ILU APP	38
15 Introdução	39
16 Consolidação	40
17 Visualização	42
18 Descrição	46
19 Previsão	51
20 Otimização	52
21 Outras facilidades	54
VI Notas finais	55
22 Indicadores de realização	56
23 Desvios e inclusões	56
24 Execução Orçamental	59
25 Impactos sociais esperados	60
26 Website	62



rmch@tecnico.ulisboa

Parte I: Contexto

1 Sumário Descritivo

Âmbito

A mobilidade nas grandes capitais europeias, incluindo Lisboa, ainda não é sustentável. A Câmara Municipal de Lisboa (CML) tem estabelecido iniciativas para integrar diferentes fontes de dados urbanos disponíveis, incluindo tráfego rodoviário a partir de sensores fixos e móveis, procura na rede de transportes públicos (carreiras, metro, comboios, bicicletas, barcos, e novos velocípedes), e o seu contexto situacional. O contexto situacional inclui eventos de relevo (congressos, eventos desportivos e culturais), acidentes, obras em via pública, planeamento urbano, meteorologia ou, entre outros, notificações dos cidadãos na app *na minha rua*. Apesar destes esforços, o potencial conhecimento contido nestes dados é ainda desconhecido.

Desafios

O projeto ILU (Integrative Learning from Urban data) propõe endereçar dois grandes desafios:

1. a falta de uma análise integrativa capaz de combinar diferentes fontes de dados urbanos recolhidas a partir de sensores na cidade e de validações de títulos nos diferentes modos de transporte público; e
2. a ausência de contexto situacional na descrição, previsão, e otimização da mobilidade urbana;
3. a importância de responder dinamicamente às contínuas alterações à mobilidade na cidade, incluindo mudanças disruptivas em contexto pandémico.

Contribuições científicas

1. consolidar as diferentes fontes de dados de mobilidade e contexto disponíveis na Plataforma de Gestão Inteligente de Lisboa (PGIL) por forma a permitir uma análise multimodal e sensível ao contexto da mobilidade na cidade;
2. descobrir padrões de mobilidade a partir destas fontes de dados urbanos, com foco em dinâmicas emergentes na cidade e correlações entre o tráfego e o seu contexto situacional;
3. antecipar, de forma sensível ao contexto, congestionamentos no tráfego e no acesso aos transportes públicos; e
4. apoiar decisões de mobilidade de forma sensível ao contexto, incluindo otimização da rede de transportes (e.g., roteamento) e estudo do impacto de alternativas ao controlo semaforico.

Resultados

As contribuições do projeto serão disponibilizadas à CML através de um sistema de análise de dados urbanos e suporte à decisão que poderá vir a operar a partir da Infraestrutura Nacional para a Computação Distribuída.

O projeto ILU impulsionará uma gestão da mobilidade centrada nos dados, mais dinâmica, focada nas necessidades do cidadão, e capaz de permitir uma coordenação mais objetiva, transparente e eficaz entre as autoridades, municípios, e operadores de transporte público.

2 Nota Introdutória

O projeto de investigação científica ILU reúne a CML, o INESC-ID e o LNEC com o propósito de explorar o potencial latente nos dados urbanos recolhidos em Lisboa, apoiando uma gestão da mobilidade de forma alinhada com o que está a acontecer e a emergir na cidade e, por conseguinte, auxiliando o município a colocar Lisboa como uma referência mundial em mobilidade sustentável.

O projeto está inserido no âmbito do programa FCT para projetos de *Investigação Científica e Desenvolvimento Tecnológico em Ciência dos Dados e Inteligência Artificial na Administração Pública*. Neste contexto, o projeto recorre aos mais recentes progressos nos domínios da aprendizagem centrada nos dados para responder ao propósito identificado e, complementarmente, avançar estes domínios de conhecimento científico.

ORIGENS

Em 2018, motivado por um contacto da CML junto da presidência do Instituto Superior Técnico, o projeto é visionado. Posteriormente, o INESC-ID e o LNEC integram a equipa para conduzir as contribuições científicas do mesmo.

Para compreender as verdadeiras origens do projeto ILU, é necessário recuar mais alguns anos e ir de encontro ao nascimento de uma nova visão do município para Lisboa. A visão de Lisboa como cidade sustentável, apoiada por uma plataforma de gestão inteligente capaz de possibilitar a monitorização, análise e gestão de todo o eco-sistema urbano de forma alinhada com as reais dinâmicas na cidade. Neste contexto, a CML tem conduzido diversas iniciativas que possibilitaram a identificação e recolha de numerosas fontes de dados urbanos - abrangendo áreas como a mobilidade, segurança, descarbonização, planeamento urbano e desenvolvimento local, obras, pagamentos, ou proteção civil. Parte destas fontes é disponibilizada por parceiros no contexto de protocolos estabelecidos com a CML.

Como resultado destes esforços, a Plataforma para a Gestão Inteligente de Lisboa (PGIL) é lançada pela CML em 2017 e, desde então, progressivamente ampliada com novas funcionalidades. É sob a luz da PGIL que o projeto ILU pode ser entendido.

Em 2018, um ano depois do lançamento da PGIL, o projeto é desenhado por forma a contribuir para a PGIL com analítica avançada no domínio da mobilidade urbana.

PROPOSTA

O desenho da proposta inicial do projeto ILU teve contornos particularmente interessantes, uma vez que contou na sua génese com a contribuição essencial de um grupo de jovens investigadores, entre os quais Miguel Henriques, João Rico, Dário Silva e Carlos Henriques. A equipa inicial, sob a coordenação e olhar visionário dos professores Arlindo Oliveira, Elisabete Arsénio, e Fernando Mira da Silva, foi progressivamente crescendo. Eu, Rui Henriques, aceito o convite de coordenar as contribuições científicas do projeto ILU. A equipa é consolidada com investigadores e profissionais de excelência.

O projeto ILU é submetido e recomendado a financiamento pela FCT ainda em 2018, e iniciado a 1 de Janeiro de 2019, tendo sido concluído a 30 de Junho de 2022.

CONTORNOS

Como projeto de Investigação e Desenvolvimento Científicos com fundos FCT, o projeto ILU tem como fins complementares: a) contribuir com produção científica, e b) formar recursos com competências nos domínios computacionais e aplicados em que o projeto se insere, equipando a sociedade com perfis de elevado relevo.

Contrariamente a outros projetos na área da mobilidade urbana com equipas compostas na sua maioria por especialistas em transportes e planeamento urbano, o projeto ILU combina peritos em mobilidade urbana com um elevado número de investigadores especializados nos domínios de Ciência de Dados e Inteligência Artificial. Este contorno multidisciplinar tem contribuído para um ambiente de investigação único, propício à inovação.

Para que o leitor possa conhecer os principais resultados que decorreram do primeiro ano de trabalhos neste contexto, concatenei os principais marcos do projeto ILU neste dossier, na esperança de que transmita uma visão compreensiva daquilo que está a ser alcançado,

Lisboa, 3 de Janeiro de 2022,



3 Equipa

A equipa de investigação reflete os requisitos exigentes e o carácter multidisciplinar do projeto ILU, unindo o INESC-ID, LNEC, e CML, contando ainda com a colaboração de outros parceiros públicos (CARRIS e METRO).

INESC-ID

O INESC-ID (Instituto de Eng. de Sistemas e Computadores, Investigação e Desenvolvimento em Lisboa) reúne investigadores dos grupos IDSS (Information and Decision Support Systems) e AIPS (Artificial Intelligence for People and Society), com extensa experiência nos domínios da Engenharia e Ciência de Dados, Inteligência Artificial, Aprendizagem e Sistemas Multi-Agente.

Rui Henriques (**PI**), Professor Auxiliar IST
 Arlindo L. Oliveira, Professor Catedrático IST
 Fernando Mira da Silva, Professor Associado IST
 Francisco S. Melo, Professor Associado IST
 Alberto Sardinha, Professor Auxiliar IST
 Manuel Lopes, Professor Associado IST
 Thomas J. Tiam-Lee, Investigador
 Anna C. Finamore, Investigador
 António Miguel Henriques, Investigador
 Dário Silva, Investigador
 Carlos Henriques, Investigador

LNEC

O LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) reúne investigadores altamente qualificados do Departamento de Transportes, com ampla experiência em mobilidade urbana sustentável, planeamento de transporte, mobilidade intermodal, e sistemas de sensorização. Conta ainda com a participação de investigadores do Núcleo de Tecnologias de Informação.

Elisabete Arsénio, Perita em Mobilidade e Investigadora Sénior
 José Barateiro (**co-PI**), Professor Auxiliar
 João Rico, Investigador
 Marta Bubicz, Investigador

Câmara Municipal Lisboa

A Câmara Municipal de Lisboa reúne especialistas do **Centro de Operações Integrado** (COI), que reúne iniciativas como o Laboratório de Dados Urbanos e coordena as atividades associadas ao desenvolvimento da Plataforma de Gestão Inteligente de Lisboa (PGIL) e à política de Dados Abertos de Lisboa,

João Tremoceiro, Coordenação COI
 Célia Aguiar, Técnica Superior

Conta ainda com o acompanhamento independente do **Gabinete de Mobilidade**.

E com a contribuição da **Divisão de Gestão de Tráfego** (DGT),

Graça Reis, Direcção DGT/EMEL
 Sérgio Costa, Técnico Superior

Transportadoras

O projeto ILU conta ainda com a presença de especialistas e técnicos de entidades que operam a rede de transportes públicos de Lisboa. A presença destas entidades, que atuam como entidades consultoras no projeto, é essencial para apoiar, alinhar e priorizar as contribuições do projeto.

CARRIS (Companhia Carris de Ferro de Lisboa)

Margarida Nunes, Núcleo de Procura e Tarifário
 Salvador Collaço, Núcleo de Procura e Tarifário
 Carlos Miguel, Responsável pelo Planeamento Operacional, Divisão de Operações
 Heitor Castro, Diretor de departamento, Divisão de Operações

METRO (Metropolitano de Lisboa, EPE)

Adelaide Basto, Chefe do Núcleo de Planeamento
 Ricardo Antunes, Técnico Superior

Jovens Investigadores

- *mestrandos*: Francisco Neves, Pedro Santos, Rui Loureiro, Inês Leite, Vasco Leal, Carlos Lemonde, Cláudio Sardinha, Vasco Silva, Hussein Sacoór, Miguel Coelho, Pedro Lopes
- *doutorandos*: Guilherme Varela, Sofia Cerqueira, João Aparício, Miguel G. Silva

4 Planeamento Científico

4.1 Motivação

O projeto ILU combina fontes heterogéneas de dados urbanos de mobilidade com amplos fatores de contexto situacional (incluindo eventos públicos, clima, acidentes, obras em via público, e planeamento urbano) para apoiar a descrição e previsão compreensiva dos padrões de mobilidade urbana, e a sua tradução em iniciativas públicas alinhadas com as dinâmicas atuais e emergentes na cidade. Apesar dos esforços estabelecidos pela Câmara Municipal de Lisboa (CML) e dos avanços observados nos domínios da Computação Urbana, este objetivo é desafiado por cinco grandes desafios:

1. (**consolidação**) a presença de fontes diversas de dados urbanos provenientes de diferentes tecnologias de monitorização (como espiras e sensores móveis), modalidades de transporte (e.g. transporte privado, CARRIS, METRO, GIRA), e fontes de contexto situacional;
2. (**descrição**) a atual análise dos dados urbanos está centrada em fontes isoladas de dados, negligenciando padrões de mobilidade multimodal ou dinâmicas emergentes na cidade;
3. (**previsão**) a incerteza nas previsões de tráfego e procura na rede de transportes públicos impede a previsão precisa do tráfego para horizontes de tempo acima dos 15 minutos;
4. (**contexto**) a ausência de contexto situacional nos modelos descritivos e preditivos de tráfego;
5. (**decisão**) a otimização dos aspetos de mobilidade urbana não está totalmente alinhada com os dados de tráfego e o seu contexto situacional, impedindo uma revisão transparente e objetiva da oferta e do planeamento de reforços pontuais na rede de transportes públicos.

4.2 Objetivos

Estes desafios impedem uma compreensão abrangente das dinâmicas de tráfego em Lisboa. Neste contexto, o projeto ILU visa enfrentar esses desafios, alcançando cinco principais objetivos:

1. consolidar e explorar fontes de dados urbanos disponíveis na plataforma PGIL com potencial impacto na análise do tráfego na cidade. Para esse fim, serão considerados princípios bem estabelecidos sobre integração e limpeza de dados: (a) garantir a consolidação de dimensões partilhadas entre fontes, (b) suportar a atualização automática das fontes na presença de dados mais recentes, (c) tratar os dados e, (d) mapeá-los em estruturas de dados adequadas ao subsequente desenvolvimento de algoritmos de prospeção e aprendizagem;
2. propor algoritmos para a descrição compreensiva da mobilidade urbana, com foco em padrões de tráfego de relevo, incluindo: (a) padrões frequentes e periódicos; (b) padrões emergentes; (c) padrões desviantes; e (d) correlações de múltiplas fontes;
3. propor algoritmos para uma previsão robusta mobilidade urbana a partir de várias fontes de dados, usando princípios de aprendizagem clássica, aprendizagem associativa, e aprendizagem profunda;
4. propor algoritmos para descrição e previsão do tráfego urbano na presença de diferentes fontes de contexto situacional. Aqui, o projeto centrar-se-á em: (a) correlacionar dinâmicas de tráfego e fatores de contexto; e (b) enriquecer algoritmos de previsão com contexto situacional, eventos futuros e previsões meteorológicas;

5. propor simuladores com base nos anteriores modelos para otimizar a oferta na rede de transportes públicos, incluindo reforços pontuais na presença de eventos de larga-escala ou interdições à circulação, bem como estudar o impacto de alternativas de controlo semaforico inteligente. Nesse contexto, o projeto ILU recorrerá a princípios de controlo, micro-simulação, e optimização, incorporando princípios avançados de aprendizagem profunda com reforço.

As contribuições descritivas, preditivas e prescritivas identificadas ao longo destes objetivos serão integradas num sistema de recomendação por forma a apoiar:

- decisões estratégicas (ligadas ao planeamento da mobilidade da cidade), e
- decisões operacionais/em tempo real (e.g., reforço de transportes, controlo de tráfego).

4.3 Tarefas: síntese

De acordo com as cinco contribuições listadas, o plano de trabalho está centrado em cinco tarefas verticais (Tarefas 3-7), contando ainda com três tarefas transversais (Tarefas 1, 2 e 8).

Tarefas transversais:

- A Tarefa 1 garante o funcionamento adequado dos aspectos administrativos, técnicos e financeiros do projeto da ILU.
- A Tarefa 2 pretende estabelecer as especificações e métricas de avaliação relevantes para garantir a adequação e validação das contribuições a desenvolver no projeto.
- A Tarefa 8 integra as contribuições desenvolvidas no projeto num único sistema de recomendação, que poderá vir a ser integrado na PGIL.

Tarefas verticais:

- As Tarefas 3 e 4 fornecem os meios infraestruturais e computacionais para atualizar, extrair, navegar e explorar a ampla gama de dados urbanos e situacionais disponíveis.
- As Tarefas 5 e 6 propõem modelos avançados descritivos e preditivos de dinâmica de tráfego, capazes de analisar integrativamente fontes heterogéneas de dados contra contexto situacional.
- A Tarefa 7 recorre aos modelos estatísticos previamente preparado para desenvolver optimizadores e sistemas multi-agente capazes de apoiar decisões de mobilidade urbana.

4.4 Milestones

As tarefas identificadas originarão em cinco principais entregáveis (marcos).

1. especificação formal dos outputs de cada tarefa, suas dependências, e requisitos funcionais e desempenho do sistema de recomendação;
2. repositório com dados consolidados, e facilidades de tratamento, atualização e navegação;
3. algoritmos descritivos e preditivos sensíveis ao contexto para caracterizar e prever procura na rede de transportes públicos, e problemas de mobilidade nas vias públicas;
4. modelos de controlo micro-simulação para apoiar oferta e condicionamento positivo do tráfego;
5. sistema de recomendação capaz de integrar os artefatos anteriores (M2-M4) para apoiar decisões estratégicas e em tempo real.

M1: *Documento de especificações* (01-08-2019)

Especificações dos casos de uso mais relevantes, outputs e dependências entre tarefas, funcionalidades e requisitos de desempenho do sistema de recomendação, por forma garantir que as contribuições desenvolvidas estejam de acordo com um conjunto de critérios bem identificado.

M2: *Repositório consolidado de dados* (01-01-2020)

Repositório de dados multidimensional com funcionalidade de atualização e limpeza, que integra todas as fontes de dados disponíveis com potencial impacto na análise de tráfego da cidade (incluindo conjuntos heterogêneos de dados de tráfego e fontes externas de informação para incorporação do contexto situacional).

M3: *Algoritmos descritivos e preditivos do tráfego urbano, multimodais e sensíveis ao contexto* (01-05-2021)

Algoritmos avançados capazes de aprender modelos descritivos e preditivos a partir de dados urbanos heterogêneos na presença de contexto situacional; incluindo algoritmos para inferência de matrizes origem-destino; descoberta de padrões espaço-temporais para detetar dinâmicas de tráfego não triviais e emergentes; aprendizagem profunda para a antecipação de problemas de mobilidade.

M4: *Sistemas de controlo da rede pública de transportes* (01-09-2021)

Redes de agentes equipados com aprendizagem por reforço capazes de otimizar a oferta de transportes e o fluxo de tráfego na presença de informação de contexto; combinando princípios para micro-simulação de tráfego e modelos avançados de aprendizagem profunda com reforço.

M5: *Sistema de recomendação para apoiar decisões de mobilidade* (01-12-2021)

Protótipo totalmente funcional que integra os algoritmos descritivos, preditivos e prescritivos, disponibilizados pelos marcos anteriores (M2, M3 e M4); fornecendo garantias de adaptabilidade, acionabilidade e significância estatística, de acordo com as especificações (M1).

4.5 Timeline

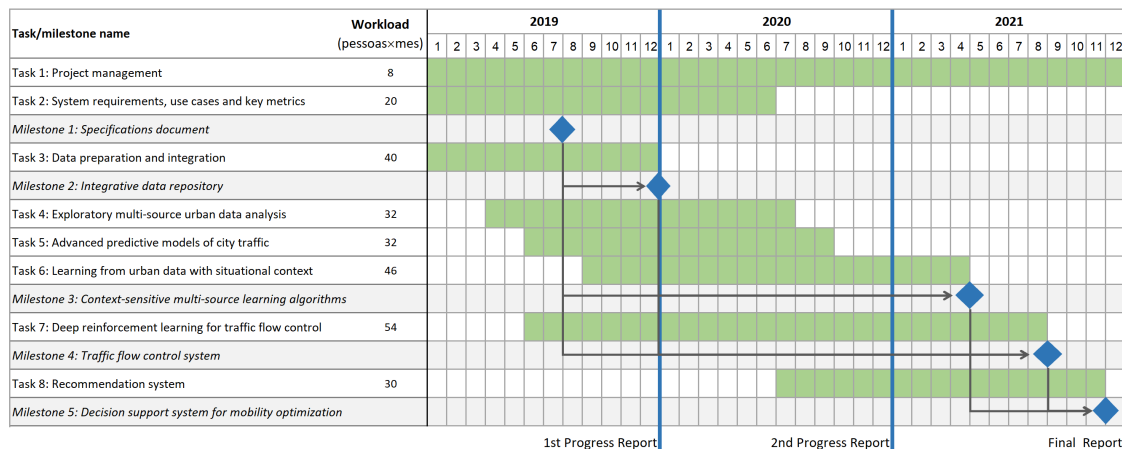


Figure 1: Planeamento original.

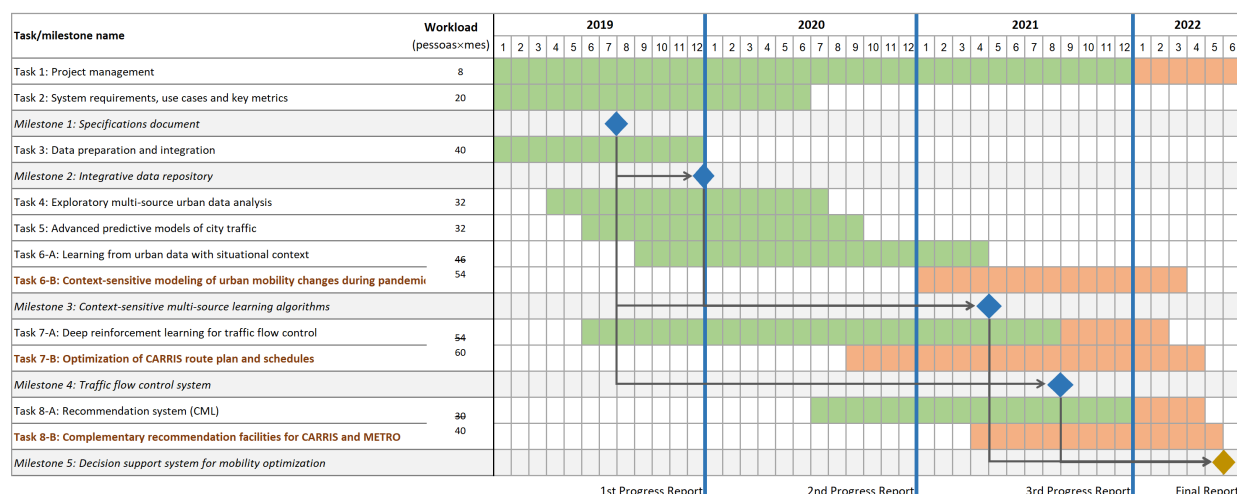


Figure 2: Atualização ao planeamento, aprovada a 14/7/2021.

4.6 Atualizações ao plano original

O projeto ILU está a decorrer dentro do esperado, tendo sido concluídas as atividades originalmente delineadas para os primeiros três anos de projeto sem atrasos.

No contexto do pedido diferido pela FCT (#10383392) em 2021, foram incluídas três novas subtarefas que se encontram em curso até ao final do projecto (30/6/2022):

- Tarefa 6-B que visa estender os modelos descritivos e preditivos da mobilidade urbana para contextos pandémicos, caracterizados por alterações significativas no volume e distribuição da procura por modo de transporte. Em particular, a equipa encontra-se a trabalhar em três principais contribuições: i) resiliência da rede de transportes públicos de Lisboa a catástrofes e picos inesperados de procura; ii) inferência exaustiva de matrizes origem-destino multimodais em contexto pré- e pós-pandémico; e iii) descoberta de padrões de disrupção na distribuição espaço-temporal da procura com potencial de aplicabilidade em reformas de planeamento;
- Tarefa 7-B que responde à necessidade de apoiar o redesenho do roteamento e escalonamento de carreiras no município de Lisboa de forma multimodal e resiliente para responder às dinâmicas mudanças observadas em contexto pandémico. Esta tarefa será alimentada pelos reais fluxos multimodais de passageiros dados pelas matrizes origem-destino inferidas a partir das validações de títulos na rede pública de transportes de Lisboa. Serão consideradas procuras heurísticas, incluindo algoritmos genéticos, para enumerar soluções na frente de Pareto em formulações multi-objetivo, bem como soluções sob compromissos uni-objetivo;
- Tarefa 8-B, correspondente à necessidade de responder a necessidades levantadas transportadoras, em particular facilidades de imputação de saídas na CARRIS, identificação de transbordos por passageiro no METRO, e requisitos funcionais e de qualidade na inferência dinâmica e multimodal de matrizes origem-destino .

4.7 Fins

As contribuições acima mencionadas fornecerão modelos descritivos, preditivos e prescritivos acionáveis para apoiar:

1. decisões estratégicas, ligadas ao planeamento da mobilidade urbana;
2. decisões operacionais, por exemplo recomendações de reforços pontuais na rede de transportes públicos ou informação veiculada em painéis eletrónicos na via pública;
3. coordenação eficaz entre o município, as autoridades, e os operadores de transporte público.

As contribuições computacionais serão integradas a um sistema de recomendação auditável que pode ser usado diretamente pela CML e seus parceiros de mobilidade, ou integrado na PGIL. Dado o alto volume de dados urbanos disponíveis e a necessidade de aprender modelos estatísticos abrangentes e acionáveis, as contribuições computacionais da ILU considerarão os princípios de distribuição e o sistema poderá vir a correr na Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (<http://www.incd.pt/>), do qual o LNEC é um membro fundador.

O sistema de recomendação a produzir atenderá a princípios de adaptabilidade e extensibilidade, para que as contribuições do projeto ILU possam ser facilmente complementadas para responder a diversos fins.

5 ILU em perspectiva

May 5th, 2020

Rui Henriques is interviewed by Marta Pedro, Comunicação Técnico

1. *Fale-nos um pouco do projecto ILU. O que é? Como surge?*

ILU. ILU é uma iniciativa científica que resulta de uma visão para Lisboa. Lisboa como uma referência em mobilidade sustentável, capaz de dinamicamente responder ao que está a acontecer e emergir na cidade. O atual contexto, COVID, é um exemplo marcado de como alterações na mobilidade urbana, decorrentes de alterações à procura na rede de transportes e a necessidade de satisfazer normas de segurança, criam a necessidade de continuamente adaptar a oferta na rede de transportes públicos. Para este fim, os dados urbanos, que resultam da sensorização da cidade, são uma chave essencial e o foco do projeto ILU. Os dados urbanos revelam os reais padrões de mobilidade urbana, oferecendo um meio para uma coordenação objetiva, transparente e multimodal entre os operadores, autoridades, municípios, e cidadãos.

As origens. Sustentada nesta visão para a cidade, a Câmara Municipal de Lisboa lança em 2017 a Plataforma para a Gestão Inteligente de Lisboa (PGIL). Um ano depois, o projeto ILU é desenhado por forma a contribuir para a PGIL com princípios avançados de Aprendizagem a partir de Dados Urbanos. Esta é também a origem do nome do projeto. ILU: Integrative Learning from Urban data.

ILU. Projeto nacional de investigação científica e inovação no âmbito do programa FCT para a modernização da Administração Pública. Projeto multidisciplinar que cruza os domínios da Ciência de Dados, Aprendizagem e Mobilidade. Projeto que une o INESC-ID,

LNEC, CML e transportadoras com o propósito de explorar o conhecimento latente nos dados urbanos recolhidos em Lisboa.

2. *O projeto centra-se essencialmente na análise de dados de mobilidade? O que traz de novo?*

Exato. O ILU tem como primeiro objetivo apoiar o estudo e previsão dos padrões de mobilidade urbana combinando fontes heterogêneas de tráfego urbano e o seu contexto situacional. O tráfego urbano inclui fontes de fluxo rodoviário e validação de títulos na rede de transportes públicos (carreiras, metro, comboios, bicicletas, barcos e novos velocípedes). O contexto situacional inclui eventos públicos, acidentes, obras em via pública, planeamento urbano, meteorologia, e notificações do cidadão.

O objetivo do projeto está também refletido na própria equipa, composta por profissionais em Mobilidade Urbana e por uma curiosa maioria de investigadores nos domínios de Ciência de Dados e Inteligência Artificial.

Este contorno multidisciplinar surge como uma necessidade de criar novos ângulos para responder a dois grandes desafios. Primeiro, a falta de uma análise integrativa do tráfego urbano capaz de combinar diferentes modalidades de transporte e consolidar fontes heterogêneas de dados urbanos recolhidas a partir de sensores fixos e móveis na cidade. Segundo, a ausência de contexto situacional nos atuais modelos de descrição, previsão e otimização da mobilidade urbana.

Estes desafios são as principais forças motoras do projeto ILU, distinguindo-o do papel de outras iniciativas em curso.

Iniciativas complementares em Lisboa? O LxDataLab é uma iniciativa de elevado relevo, resultado de uma parceria entre a Câmara Municipal de Lisboa (CML) e instituições universitárias e de investigação, o LxDataLab tem por missão criar soluções de analítica e visualização para melhorar a gestão operacional da cidade de Lisboa. O observatório de Mobilidade Lx (M-LX), parceria entre CML e Universidade de Lisboa, é um outro exemplo. Reune uma equipa alargada e multidisciplinar para a monitorização e resposta de problemáticas ligadas à mobilidade urbana e acessibilidade.

3. *Os dados urbanos que estão na base do projeto são cada vez mais apetecíveis, certo?*

Sim. Eles são a fonte.

Revelam de forma objetiva os problemas atuais e emergentes, como necessidades de transbordo, congestionamentos, ou sobrelotação. São também um instrumento para garantir uma eficaz coordenação entre operadores e autoridades, capaz de permitir um alinhamento continuado da rede de transportes à realidade da cidade.

A Câmara Municipal de Lisboa (CML) tem feito um trabalho extraordinário na disponibilização destas fontes de dados, estabelecendo parcerias essenciais à sua recolha e consolidação; facilitando a criação de um título único na rede de transportes públicos que permite uma análise de padrões de mobilidade multimodal; e criando uma política inovadora de dados abertos sobre quais iniciativas, como o projeto ILU, operam.

4. *Como é que vão ser recolhidos estes dados urbanos que estão na base do projeto?*

A recolha de dados é realizada pelos nossos parceiros públicos, e cedida à equipa do projeto

no contexto de acordos de confidencialidade celebrados entre os institutos de investigação (INESC-ID e LNEC) e a CML, CARRIS e METRO.

As principais fontes de tráfego urbano são obtidas a partir de sensores de contagem nas principais vias da cidade (DGT), de trajetórias individuais recolhidas por dispositivos móveis (WAZE), check-ins e check-outs de bicicletas nas estações da rede GIRA (EMEL), ocupação de parques (EMEL), e validações de títulos na rede de carreiras (CARRIS) e metropolitana (METRO). Complementarmente, a ocorrência de eventos culturais e desportivos (usufruto de espaços públicos), interdições à circulação (CML), registos meteorológicos (IPMA), planeamento urbano (portal Dados Abertos) e notificações dos cidadãos (portal Na Minha Rua) são algumas das fontes de contexto situacional exploradas no contexto do projeto ILU.

5. *As contribuições do ILU permitirão fazer uma análise multimodal da mobilidade da cidade de Lisboa?*

Assim esperamos. Estamos neste momento a identificar padrões de deslocação multimodal a partir das validações de títulos na rede pública de transportes. Estes padrões permitem compreender necessidades de transbordos entre uma ou mais modalidades de transporte entre diferentes pontos da cidade, avaliar interfaces na rede de transportes, e identificar sinergias ao nível da oferta que possam estar subexploradas.

Do ponto de vista da aprendizagem automática, este é um problema com bastantes desafios, incluindo a estimativa de saídas nas modalidades de transporte onde a validação de títulos ocorre apenas à entrada (e.g. CARRIS), a definição de critérios para identificar transbordos, a inerente variabilidade associada à procura, ou a consolidação de fluxos provenientes da rede ciclovável.

6. *Em que fase está neste momento o projeto e quais as próximas fases?*

O projeto foi desenhado em torno de quatro fases: consolidação, descrição, previsão e decisão.

A fase de *consolidação* das fontes de dados urbanos está concluída, tendo já sido disponibilizadas facilidades de tratamento, pesquisa eficiente, e atualização automática na presença de dados mais recentes, permitindo auscultar o tráfego privado e público na cidade.

A nível da *descrição*, foram criadas facilidades de visualização integrativa e multimodal, e desenvolvidas técnicas para a descoberta de padrões de mobilidade, incluindo padrões frequentes, periódicos, emergentes e padrões anómalos.

Por exemplo, a descoberta de padrões emergentes no tráfego rodoviário contempla congestionamentos cuja recorrência no tempo, limites máximos à velocidade de circulação ou extensão espacial tem vindo progressivamente a crescer ou decrescer.

Outro exemplo, a descoberta de padrões anómalos na rede de transportes públicos deteta por sua vez desvios significantes entre a procura observada e a esperada, permitindo uma sinalização automática destas ocorrências por forma a permitir a atuação das transportadoras sempre que necessário.

Ainda ao nível da descrição, temos modelos da procura na rede de transportes públicos (METRO, CARRIS, GIRA) e a inferência de matrizes origem-destino que nos permitem

compreender as principais fluxos na cidade ao longo do dia. Neste contexto, o próximo passo é refinar estas matrizes na presença de fatores de contexto.

Ao nível da *previsão*, estamos a fazer um amplo recurso a abordagens de aprendizagem profunda (deep learning) e associativa para apoiar a previsão a curto-prazo (próximos dias) do tráfego rodoviário e da procura na rede de transportes públicos, na ausência e presença de contexto situacional. Recentemente, medimos o impacto causado pela presença de histórico e prospeção meteorológica na previsão de fluxos na rodovia e ciclovia. O próximo passo será o desenvolvimento de modelos de previsão a longo prazo (próximos meses) por forma a apoiar o planeamento estratégico das transportadoras.

Finalmente ao nível da *decisão*, estamos a recorrer a princípios de controlo e micro-simulação por forma a traduzir o conhecimento anterior em recomendações. Neste contexto, estamos a estudar modelos de controlo semaforico inteligente e a desenhar optimizadores da oferta na rede de transportes públicos por forma a apoiar necessidades de reforço.

Transversalmente, as contribuições produzidas no contexto destas quatro frentes de trabalho têm sido integradas num sistema de recomendação – ILU App – que já permite o recurso a princípios avançados de aprendizagem automática para estudar padrões multimodais da mobilidade urbana em Lisboa.

7. *Os resultados do projeto podem servir para apoiar decisões de mobilidade, como o reforço do transporte público, certo?*

Sim. Certamente. A identificação de padrões multimodais de procura na rede de transportes públicos tem o potencial de revelar necessidades de reforço ao nível da oferta, algo que está ao nível do planeamento estratégico. Adicionalmente, na presença de eventos planeados ou ocorrências inesperadas, a previsão da procura na rede permite identificar necessidades de reforços pontuais, algo que está ao nível da gestão operacional da oferta.

Complementarmente, o projeto ILU disponibilizará contribuições iniciais em duas outras áreas de atuação, que podem ser aprofundadas em subseqüentes projetos científicos.

Primeiro, gestão inteligente de semáforos, painéis eletrónicos, e parques de estacionamento na cidade. Segundo, a operacionalização, expansão e balanceamento inteligente da rede GIRA e novos velocípedes.

8. *Numa fase posterior o projeto pode ser adaptado a outras cidades? É esse o vosso objetivo?*

Será certamente uma consequência natural dada a natureza das contribuições do projeto e o nosso compromisso para a disseminação científica das mesmas. O desenho do projeto contempla de raiz esta possibilidade. Estamos atentos a iniciativas internacionais, e recorrido a fontes externas de dados urbanos para validar as contribuições do projeto. O sistema de recomendação atende também a princípios de adaptabilidade e interoperabilidade. Ainda assim, o nosso foco e compromisso? Lisboa. Responder à visão que está na génese do projeto ILU – Lisboa, uma cidade referência de sustentabilidade e resiliência em mobilidade urbana.

Parte II:

Contribuições

6 Síntese

Formação (detalhes no Volume IV)

- **6 doutoramentos** em curso: João Rico, Guilherme Varela, Sofia Cerqueira, Han Shao, Miguel G. Silva, João Aparício;
- **14 teses de mestrado** concluídas com sucesso: Francisco Neves, Pedro Santos, Vasco Silva, Rui Loureiro, Inês Leite, Vasco Leal, Sofia Cerqueira, Carlos Macedo, Cláudio Sardinha, Ricardo Sousa, João Aparício, Hussein Sacoor, Miguel Coelho, Pedro Lopes
- **3 PosDocs** concluídos com sucesso: Marta Bubicz, Thomas Tiam-Lee, Anna Finamore
- **12 trabalhos adicionais** de investigação com sinergias de relevo para o projeto concluídos com sucesso: João Palet, Sofia Carvalho, Pedro Remédios, Susana Gomes, Margarida Costa, Francisco Barata, Leonor Pimenta, Leonardo Alexandre, Rui Nóbrega, Pedro Caldeira, Joana Coutinho, e Pedro Rodrigues

Comunicação (detalhes no Volume III)

- **+15** publicações científicas em revistas internacionais Q1 (ISI/SJR)
- **+25** publicações nas conferências de maior visibilidade nos domínios do ILU
- **+5** artigos sob revisão em revistas/conferências de referência
- noticiação do projeto ILU na comunicação social (Agência Lusa, DN)

Distinções

- Prémio **ULisboa-RedeMov 2021** pela melhor dissertação atribuída a *Francisco Neves* pelo trabalho desenvolvido no projeto ILU
- Nomeação do trabalho desenvolvido por *Pedro Santos* no projeto ILU ao Prémio Luís Vidigal
- **Distinção** de duas publicações teóricas na revista ACM CSUR (melhor artigo anual pelo LASIGE) e conferência ITS (nomeação a melhor artigo) desenvolvidas no projeto ILU

7 Software (aplicações computacionais)

Foram desenvolvidos e validados novos algoritmos para apoiar a descrição, previsão e otimização da mobilidade urbana. Os algoritmos encontram-se integrados no sistema de recomendação ILU APP, que providencia analítica descritiva, preditiva e prescritiva para apoiar a tomada de decisão. Parte das facilidades computacionais já se encontram disponibilizadas e sob utilização na CARRIS. Destacamos as seguintes facilidades computacionais disponibilizadas no sistema de recomendação ILU APP:

1. deteção de padrões espaço-temporais, emergentes e multimodais de tráfego urbano a partir de múltiplas fontes de dados urbanos;

2. abordagens de aprendizagem profunda em grafos e redes recorrentes para previsão do tráfego urbano sensível ao contexto situacional;
3. deteção de anomalias em séries temporais multivariadas sensíveis ao contexto situacional e com garantias de significância estatística;
4. otimização multi-objetivo heurística para revisão do roteamento e escalonamento de veículos na rede de transportes públicos de Lisboa;
5. processamento autónomo e não-paramétrico de fontes de dados urbanos sujeitas a falhas e ruído;
6. inferência eficiente de matrizes origem-destino (OD), dinâmicas, multimodais e com estatísticas detalhadas relativas aos tempos de espera e viagem, número e distância percorrida a pé nos transbordos por OD;
7. analítica diferencial de vulnerabilidades no transporte público contra transporte privado por origem-destino;
8. imputação avançada de saídas por passageiro na rede de carreiras, com graus;
9. aprendizagem por reforço multi-agente para optimização do controlo semafórico.

As aplicações anteriormente listadas estendem o estado-da-arte em aprendizagem automática e inteligência artificial ao permitirem lidar com:

- a heterogeneidade das fontes de dados disponíveis, combinando dados produzidos por sensores fixos (e.g. contagens de veículos ao longo das principais vias, validações de títulos) e móveis (e.g. velocidade geolocalizada, trajetórias);
- o impacto do contexto situacional na mobilidade urbana, garantindo a aprendizagem de modelos descritivos, preditivos e prescritivos sensíveis à ocorrência de eventos culturais e desportivos (usufruto de espaços públicos), interdições à circulação (CML), registos meteorológicos (IPMA), planeamento urbano (portal Dados Abertos) e notificações dos cidadãos (portal Na Minha Rua);
- a natureza multimodal do tráfego urbano, integrando validações de títulos na rede de transportes públicos (incluindo CARRIS e METRO), check-ins/outs na rede GIRA (EMEL), e tráfego rodoviário;
- a necessidade de oferecer recomendações com garantias de significância estatística e capacidade de tradução prática;
- a riqueza espacial, temporal e modal dos dados urbanos;
- a importância de acompanhar as contínuas alterações à mobilidade urbana no atual contexto pandémico, apoiando a resposta aos desafios levantados pela mudança nas opções de deslocação e pela aplicação de normas de segurança nos transportes públicos.

Complementarmente à produção do sistema de recomendação, foram produzidos pacotes individuais de software para promover a **transferência de conhecimento**, visibilidade das contribuições científicas, e promover a sua aplicabilidade em outras cidades. Os algoritmos propostos no decorrer do projeto estão disponibilizados em pacotes de software (geralmente acompanhados de interfaces gráficas, programáticas e facilidades de scripting) sob a Licença Pública Geral GNU. A tabela 1 lista algumas das aplicações computacionais publicamente disponíveis.

<i>Software</i>	<i>Descritivo</i>	<i>URL</i>
e2pat	emerging pattern discovery from spatiotemporal data	https://github.com/francisconeves97/emerging-patterns
busOpt	optimization of bus networks and schedules	https://github.com/CronoPT/bus_network_optimization
bicpams	integrative pattern-based biclustering	http://www.bicpams.com
autoMTS	autonomous time series data processing from sensor networks	https://github.com/RicardoFLNSousa/AutoMTS
DI2	prior-free and multi-item discretization	https://github.com/JupitersMight/DI2
wisdomapp	detection of leakages and bursts in water distribution systems	https://github.com/susanachambel
iluapp	recommendation system for context-aware urban data analysis	https://web.ist.utl.pt/rmch/ilu/
data2help	descriptive and predictive analysis of emergencies in Portugal	groups.tecnico.ulisboa.pt/~data2help.daemon/wordpress
siamese	siamese NN for signal classification using pairwise learning	https://github.com/DCalhas/siamese_schizophrenia_eeg
rDenoiser	imputation in spatiotemporal data using recurrent denoiser	https://github.com/DCalhas
flebic	associative classifiers with non-constant coherency	http://web.ist.utl.pt/rmch/software/bclassifier/
gtfs2osm	road-network projection facilities using GTFS and OSM	https://github.com/CronoPT/gtfs_to_osm

Table 1: Listagem de pacotes abertos de software que implementam facilidades analíticas.

8 Progresso científico por tarefa

Referenciação de publicações e dissertações em concordância com Volumes III e IV do dossier.

Tarefa 1

- celebrados quatro Acordos de Confidencialidade e Proteção de Dados Pessoais (NDA) com o Município de Lisboa, CARRIS e METRO;
- co-organização de duas conferências de elevada visibilidade em transportes inteligentes (ETC 2020, TRA 2022);
- três seminários abertos realizados com parceiros e stakeholders.

Tarefa 2

- concluídas especificações do sistema de recomendação, casos de uso para parceiros, outputs e dependências entre tarefas;
- validação do sistema de recomendação contra requisitos funcionais e de qualidade, bem como avaliação do impacto societal das contribuições produzidas conforme casos de uso identificados.

Tarefa 3

- concluído repositório de dados multidimensional que integra fontes de tráfego urbano (validações VIVA card, espiras, aplicativo waze, GIRA, entre outros) e contexto situacional (eventos públicos, meteorologia, obras e ocorrências na via pública, polos urbanos);
- contribuições centrais: atualização dinâmica de dados; transformação e exportação de estruturas de dados espaçotemporais adequadas a tarefas de descrição e previsão; pesquisa multimodal com recurso a dimensões partilhadas; interfaces gráfica e programática para acesso; tratamento automático; indexação espaçotemporal eficiente; entre outros.

- destacam-se por exemplo as seguintes **publicações centrais**:
 - [8] *On how to incorporate public sources of situational context in descriptive and predictive models of traffic data*, ETRR 2021
 - [9] *Integrative analysis of multimodal traffic data: addressing open challenges using big data analytics in the city of Lisbon*, ETRR 2021
 - [24] *Consolidation of massive medical emergency events with heterogeneous situational context data sources*, DARLIAP 2021
 - [36] *AutoMTS: fully autonomous processing of multivariate time series data from heterogeneous sensor networks*, QShine 2020

Tarefas 4 a 6

A tarefas 4 a 6 agregam as contribuições centrais do projeto ILU, incluindo facilidades computacionais para descrição e previsão de tráfego sensíveis ao contexto multimodal e situacional. Um elevado número de contribuições foi realizado neste contexto (+20 publicações, +15 dissertações).

Ao nível da *descrição*, destacam-se facilidades para a inferência dinâmica e multimodal de matrizes origem-destino; descoberta de padrões de tráfego, incluindo padrões frequentes, periódicos, emergentes e padrões anómalos; estimação de saídas na CARRIS e rotas individuais no METRO; avaliação e promoção de resiliência. Por exemplo, a descoberta de padrões emergentes no tráfego rodoviário contempla congestionamentos cuja recorrência no tempo, limites máximos à velocidade de circulação ou extensão espacial apresentam uma tendência crescente. Outro exemplo, a descoberta de padrões anómalos na rede de transportes públicos, deteta por sua vez desvios significantes entre a procura observada e a esperada, permitindo uma sinalização automática destas ocorrências para rastreio em tempo real. Complementarmente, produzimos algoritmos para a modelação da procura na rede de transportes públicos (METRO, CARRIS, GIRA) sensível ao contexto, e a inferência de matrizes OD que permitem identificar os principais fluxos na cidade ao longo do dia. Ainda neste contexto, a análise de estatísticas OD, como tempos de espera e viagem, número de transbordos, e distâncias percorridas a pé nos transbordos, foi estendida para lidar com fatores de contexto e incluir vistas diferenciais contra tráfego rodoviário privado.

Ao nível da *previsão*, sublinhamos a extensão de abordagens de aprendizagem profunda (deep learning) e associativa para apoiar a previsão do tráfego rodoviário e da procura na rede de transportes públicos, na presença de contexto situacional – incluindo fontes de contexto espacial e meteorológico.

Listagem não exaustiva de contribuições por domínio:

- **METRO e CARRIS**

- contribuições: inferência de matrizes OD multimodais, dinâmicas e multivariadas; sinalização de vulnerabilidades (incluindo acessibilidade, comodidade); imputação de saídas na rede CARRIS; estimação de rotas por passageiro na rede METRO; modelação e previsão sensível ao contexto; posicionamento estratégico; entre outros.
- **publicações**:
 - [1] *Route choice estimation in rail transit systems using smart card data: handling vehicle schedule and walking time uncertainties*, ETRR 2022
 - [18] *Is there any best practice principles to estimate bus alighting passengers from incomplete smart card transactions?*, TRA 2022

- [27] *How to ensure the provision of social inclusive bus services? A strategic case study in Lisbon*, ETC 2021
- [33] *Inference of Dynamic Origin-Destination Matrices with Trip and Transfer Status from Individual Smart Card Data*, ETC 2021
- [42] *Context-sensitive modeling of public transport data*, TRA 2020
- teses centrais: [D2,D4,D7,D11,D13,D14]

• MOBILIDADE RODOVIÁRIA

- contribuições: descoberta de padrões emergentes sensíveis ao contexto (inc. eventos, interdições, redistribuição de polos); previsão de tráfego assente em novos princípios de aprendizagem profunda; implicações em redes inteligentes de veículos; avanços em bi/triclustering; entre outros.
- **publicações:**
 - [6] *Mining actionable patterns of road mobility from heterogeneous traffic data using biclustering*, IEEE ITS 2021
 - [35] *Efficient discovery of emerging patterns in heterogeneous spatiotemporal data from mobile sensors*, MobiQuitous 2020
 - [46] *Graph neural networks for traffic forecasting*, CSUR
- outras publicações (descarbonização, redes inteligentes): [5,11,32,40]
- teses centrais: [D1,D8,D10,D29]

• GIRA e MICROMOBILIDADE

- contribuições: contribuições: modelação e previsão de fluxos de mobilidade ativa sensível ao contexto situacional e meteorológico; análise rigorosa de desvios com diversos perfis; papel da micromobilidade no ecossistema urbano; entre outros.
- **publicações:**
 - [10] *The role of shared E-Scooter systems in urban sustainability and resilience during the Covid-19 mobility restrictions*, Sustainability 2021
 - [25] *UNIANO: robust and efficient anomaly consensus in time series sensitive to cross-correlated anomaly profiles*, SDM 2021
 - [47] *Context-aware demand prediction in bike sharing systems: incorporating spatial, meteorological and calendrical context*
- teses centrais: [D6,D10,D30]

• RESILIENCE/COVID-19

- contribuições: avaliação e promoção de resiliência em redes de transporte multimodais (incluindo robustez, subcapacitação em picos procura); impacto do contexto pandémico na mobilidade urbana em Lisboa e no mundo; entre outros.
- **publicações:**
 - [2] *LINES: muLtImodal traNsportation rEsilience analySis*, Sustainability 2022
 - [4] *Assessing robustness in multimodal transportation systems: a case study in Lisbon*, ETRR 2022
 - [7] *Understanding the impacts of the COVID-19 pandemic on public transportation travel patterns in the city of Lisbon*, Sustainability 2021

- [45] *Sustainable urban mobility measures in response to Covid-19: a systematic literature review and emerging policy challenges*
- outras publicações: [21,23]
- **MULTIMODALIDADE (outros)**
 - contribuições: estatísticas diferenciais de atratividade do transporte público vs. individual; análise de conjuntos massivos de eventos de tráfego e contexto; entre outros.
 - **publicações centrais:**
 - [22] *Inference of differential origin-destination matrices to assess the spatiotemporal attractiveness of public transport in relation to car travel*, ETC 2022
 - [37] *Integrative analysis of traffic and situational context data to support urban mobility planning*, ETC 2020
 - outras publicações: [3,27,39]
 - teses centrais: [D2,D3,D4,D9,D16]

Tarefa 7

Desenvolvidos otimizadores, micro-simuladores e sistemas multi-agente capazes de apoiar a gestão de mobilidade urbana de forma centrada nos dados. Por domínio:

- **CONTROLO SEMAFÓRICO INTELIGENTE**
 - avanços em micro-simulação e sistemas multi-agente (aprendizagem por reforço e coordenação) para controlo semafórico adaptativo e sensível a aspetos de interesse (ex. micromobilidade e emergências)
 - **publicações centrais:**
 - [26] *A methodology for the development of RL-based adaptive traffic signal controllers*, AI4UM 2021
 - [44] *Impact of data distribution on Q-learning with function approximation*
 - teses centrais: [D5,D12,D22]
- **ROTEAMENTO e ESCALONAMENTO INTELIGENTE**
 - avanços em otimização para revisão local e global ao planeamento de carreiras alinhada com os fluxos emergentes na cidade;
 - **publicação central:** [43] *On the Role of Multi-Objective Optimization to the Transit Network Design Problem*, ITS Magazine 2022
 - teses centrais: [D2,D7,D13]

Tarefa 8

- concluída versão estável do sistema de recomendação do projeto – ILU APP. Um elevado número de funcionalidades associadas às anteriores tarefas já se encontra disponibilizado e aberto aos parceiros do projeto. Detalhes disponíveis no último volume do atual dossier.
- **publicação central:** [19] *Data-driven and user-centric tools for a more resilient and inclusive public transport*, CITTA 2022
- outras publicações: [3,8,21,35,42]

Parte III:

Publicações

9 Revistas científicas Q1 (ISI/SJR)

1. Thomas J. Tiam-Lee and Rui Henriques, 2022
Route choice estimation in rail transit systems using smart card data: handling vehicle schedule and walking time uncertainties
 European Transport Research Review (**ETRR**), Vol.14, Nr.31
 [10.1186/s12544-022-00558-x]
<https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-022-00558-x>
2. Joao T. Aparicio, Elisabete Arsenio, Francisco C. Santos, Rui Henriques, 2022
LINES: muLtImodal traNsportation rEsilience analySis
 In **Sustainability**, 14(13), 7891
 [10.3390/su14137891]
<https://doi.org/10.3390/su14137891>
3. Sofia Cerqueira, Elisabete Arsenio, Rui Henriques, 2022
Inference of Dynamic Origin-Destination Matrices with Trip and Transfer Status from Individual Smart Card Data
 European Transport Research Review (**ETRR**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/Provisory_InferenceODTripTransferStatus.ETRR.pdf
4. Joao T. Aparicio, Elisabete Arsenio, Rui Henriques, 2022
Assessing robustness in multimodal transportation systems: a case study in Lisbon
 European Transport Research Review (**ETRR**), Vol.14, Nr.28
 [10.1186/s12544-022-00552-3]
<https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-022-00552-3>
5. Thomas J. Tiam-Lee, R. Henriques, V. Manquinho, 2022
Associative Analysis of Inefficiencies and Station Activity Levels in Emergency Response
 ISPRS Int. J. Geo-Information, 11(7), 356
 [10.3390/ijgi11070356]
<https://www.mdpi.com/2220-9964/11/7/356>
6. Francisco Neves, Anna Finamore, Sara Madeira and Rui Henriques, 2021
Mining actionable patterns of road mobility from heterogeneous traffic data using biclustering
 In IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (**IEEE T-ITS**)
 [10.1109/TITS.2021.3057240]
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9357483>
7. João Aparício, Elisabete Arsénio, and Rui Henriques, 2021
Understanding the impacts of the COVID-19 pandemic on public transportation travel patterns in the city of Lisbon
Sustainability, 13(15), 8342
 [10.3390/su13158342]
<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/15/8342>
8. Sofia Cerqueira, Elisabete Arsénio, Rui Henriques, 2021
On How to Incorporate Public Sources of Situational Context in Descriptive and Predictive Models of Traffic Data
 European Transport Research Review (**ETRR**), 13:60, Springer Nature
 [10.1186/s12544-021-00519-w]
<https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-021-00519-w>

9. Carlos Lemonde, Elisabete Arsénio, Rui Henriques, 2021
Integrative Analysis of Multimodal Traffic Data: Addressing Open Challenges using Big Data Analytics in the City of Lisbon
 European Transport Research Review (**ETRR**), 13:64, Springer Nature
 [10.1186/s12544-021-00520-3]
<https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-021-00520-3>
10. Gabriel Dias, Elisabete Arsenio, Paulo Ribeiro, 2021
The role of shared E-Scooter systems in urban sustainability and resilience during the Covid-19 mobility restrictions
 In **Sustainability**, 13(13), 7084
 [10.3390/su13137084]
<https://doi.org/10.3390/su13137084>
11. Rui Henriques and Sara C. Madeira, 2019
Triclustering Algorithms for Three-Dimensional Data Analysis: A Comprehensive Survey
 ACM Computing Surveys (**CSUR**), Volume 51, Issue 5, No. 95, pp 1-43
 [10.1145/3195833]
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/ACM_CSUR_TricSurvey_HenriquesMadeira2018.pdf

Publicações complementares em revistas Q1

Um conjunto adicional de contribuições de carácter mais teórico apresenta princípios computacionais que estão na base de facilidades disponibilizadas no sistema de recomendação (ILU APP):

12. Miguel G. Silva, Sara C. Madeira, Rui Henriques, 2022
Water Consumption Pattern Analysis Using Biclustering: When, Why and How
 In *Water*, 14(12), 1954, MDPI
 [10.3390/w14121954]
13. Rui Henriques, Sara C. Madeira, 2021
FleBiC: Learning classifiers from high-dimensional data using discriminative biclusters with non-constant patterns
 In **Pattern Recognition**
 [10.1016/j.patcog.2021.107900]
14. Susana Gomes, Susana Vinga, Rui Henriques, 2021
Spatiotemporal Correlation Feature Spaces to support Anomaly Detection
 In *Water*, 13(18), 2551, MDPI
 [10.3390/w13182551]
15. Leonardo Alexandre, Rafael Costa, Rui Henriques, 2021
DI2: prior-free and multi-item discretization and its applications
 In *BMC Bioinformatics*
 [10.1186/s12859-021-04329-8]
16. David Calhas, Enrique Romero, Rui Henriques, 2020
On the use of Pairwise Distance Learning for Signal Classification with Limited Observations
Artificial Intelligence in Medicine, Elsevier
 [10.1016/j.artmed.2020.101852]
17. João Lobo, Rui Henriques, Sara C. Madeira, 2020
G-Tric: generating three-way synthetic datasets with triclustering solutions
BMC Bioinformatics
 [10.1186/s12859-020-03925-4]

10 Conferências internacionais de elevada visibilidade

18. S. Cerqueira, E. Arsenio, R. Henriques, 2022
Is there any best practice principles to estimate bus alighting passengers from incomplete smart card transactions?
 In Transport Research Arena (**TRA**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/AlightingStopEstimation_TRA22_CerqueiraArsenioHenriques.pdf
19. Elisabete Arsenio, Rui Henriques, 2022
Data-driven and user-centric tools for a more resilient and inclusive public transport
 In Conf. on Planning Research – Safe, Equitable and Just Communities (**CITTA**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/CITTA22_ILUTools_ArsenioHenriques.pdf
20. Daniel Gonçalves, Rafael Costa, Rui Henriques, 2022
Context-situated visualization of biclusters to aid decisions: going beyond subspaces with parallel coordinates
 IC on Advanced Visual Interfaces (**AVI**)
 [10.1145/3531073.3531124]
<https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3531073.3531124>
21. Marta Bubicz, Elisabete Arsenio, José Barateiro, Rui Henriques, 2022
Planning for more resilient urban transportation systems: Lessons learned from the Covid-19 pandemic
 In Transport Research Arena (**TRA**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/ILULessons_TRA22_BubiczArsenioBarateiroHenriques.pdf
22. S. Cerqueira, E. Arsenio, R. Henriques, 2022
Inference of Differential Origin-Destination Matrices to Assess the Spatio-temporal Attractiveness of Public Transport in relation to Car Travel: a case study in the city of Lisbon
 In European Transport Conference (**ETC**), Milan, Italy
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/DifferentialPublicIndividualOD_CerqueiraArsenioHenriques_ETC22.pdf
23. M. Bubicz, E. Arsenio, R. Henriques, J. Barateiro, 2022
Sustainable Urban Mobility in response to Covid-19: What comes next?
 In 9th EurOMA Forum, Zagreb, Croatia
 [10.13140/RG.2.2.24259.07205]
https://www.researchgate.net/publication/359437735_Sustainable_Urban_Mobility_in_response_to_Covid-19_What_comes_next
24. Thomas J. Tiam-Lee, R. Henriques, J. Costa, V. Manquinho, H. Galhardas, 2022
Consolidation of Massive Medical Emergency Events With Heterogeneous Situational Context Data Sources
 In 6th IW on Data Analytics solutions for Real-Life APplications (DARLIAP) @ EDBT/ICDT
http://ceur-ws.org/Vol-3135/darliap_paper10.pdf
25. Leonor P. Silva, Vasco Manquinho, Rui Henriques, 2021
UNIANO: robust and efficient anomaly consensus in time series sensitive to cross-correlated anomaly profiles
 In SIAM International Conference on Data Mining (**SDM**)
 [10.1137/1.9781611976700.37]
<https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611976700.37>

26. Guilherme S. Varela, Pedro P. Santos, Alberto Sardinha, Francisco S. Melo, 2021
A Methodology for the Development of RL-Based Adaptive Traffic Signal Controllers
 AAAI Workshop on AI for Urban Mobility (**AI4UM**)
http://aium2021.felk.cvut.cz/papers/AI4UM_paper_2.pdf
27. Carlos Lemonde, Elisabete Arsenio, Rui Henriques, 2021
Public transportation multimodality in the City of Lisbon
 Transportation Research **Procedia**, 58 (2021): 75-82
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521007705>
28. Thomas J. Tiam-Lee, Rui Henriques, 2021
Where are the Passengers? Individual Passenger Route Choice Estimation from Gate Information in Urban Rail Transit Systems
 In European Transport Conference (**ETC**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/WhereAreThePassengers_ETC_TiamLeeHenriques.pdf
29. David Calhas, Rui Henriques, 2021
Fitting Regularized Population Dynamics with Neural Differential Equations
 In the The Symbiosis of Deep Learning and Differential Equations Workshop, Neural Information Processing Systems conference (DLDE, **NeurIPS**)
<https://openreview.net/pdf?id=v7zNWgyirXX>
30. Gabriel Dias, Elisabete Arsenio, Paulo Ribeiro, 2021
Analysis of e-scooter usage in Portugal to contribute to sustainable mobility planning
 In Proceedings of the 49th European Transport Conference (**ETC**)
https://www.dropbox.com/s/85ee7tu6asoelsg/ETC2021_Paper_GDPREA_Micromobility.pdf?dl=0
31. Hussein Sacoar, Elisabete Arsenio, Elsa Cardoso, José Barateiro, 2021
How to ensure the provision of social inclusive bus services? A strategic case study in Lisbon
 In Proceedings of the 49th European Transport Conference (**ETC**)
https://www.dropbox.com/s/heiusg4fptnmxy/ETC2021_Paper_HSEAEJB_2021_7349.pdf?dl=0
32. Joao Tiago Aparicio, Miguel Trinca, Daniel Castro, Rui Henriques, 2021
Vehicle smart grid allocation using multi-agent systems sensitive to irrational behavior and unstable power supply
 In Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)
 [10.23919/CISTI52073.2021.9476320]
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9476320>
33. Sofia Cerqueira, Elisabete Arsenio, Rui Henriques, 2021
Inference of Dynamic Origin-Destination Matrices with Trip and Transfer Status from Individual Smart Card Data
 In European Transport Conference (**ETC**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/InferenceDynamicOD_ETC_CerqueiraArsenioHenriques.pdf
34. Joao T. Aparicio, Elisabete Arsenio, Rui Henriques, 2021
Assessing Robustness in Multimodal Transportation Systems: A case study in Lisbon
 In European Transport Conference (**ETC**)
http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/RobustnessMultimodalTransportation_ETC_AparicioArsenioHenriques.pdf

35. Francisco Neves, Anna Finamore, Rui Henriques, 2020
Efficient discovery of emerging patterns in heterogeneous spatiotemporal data from mobile sensors
 In EAI Int. Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (**MobiQuitous**)
 [10.1145/3448891.3448949]
<http://web.ist.utl.pt/~rmch/upload/publications/EmergingPatterns.MobiQuitous.NevesFinamoreHenriques.pdf>
36. Ricardo Sousa, Conceição Amado, Rui Henriques, 2020
AutoMTS: fully autonomous processing of multivariate time series data from heterogeneous sensor networks
 In EAI Int. Conf. on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (**QShine**)
 [10.1007/978-3-030-77569-8_12]
<http://web.ist.utl.pt/~rmch/upload/publications/QShine.SousaConceicaoHenriques.pdf>
37. Sofia Cerqueira, Elisabete Arsénio, Rui Henriques, 2020
Integrative analysis of traffic and situational context data to support urban mobility planning
 In European Transport Conference (**ETC**)
<http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/ContextAwareTrafficDataAnalysis.ETC.CerqueiraArsenioHenriques.pdf>
38. Pavlo Kovalchuk, Diogo Proença, José Borbinha, Rui Henriques, 2020
Moving from formal towards coherent concept analysis: why, when and how
 In The 42nd European Conference on Information Retrieval (**ECIR**)
 [10.1007/978-3-030-45439-5_19]
<http://web.ist.utl.pt/~rmch/upload/publications/FromFormalToCoherentConceptAnalysis.ECIR2020.pdf>
39. Carlos Lemonde, Elisabete Arsénio, Rui Henriques, 2020
Exploring multimodal mobility patterns with big data in the city of Lisbon
 In European Transport Conference (**ETC**), Milan, Italy
<http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/MultimodalDataAnalysis.ETC.LemondeArsenioHenriques.pdf>
40. E. Arsenio, M. Romão, J. Gomes, J. Prata, 2020
Assessing future use of autonomous, shared and electric vehicle technologies to meet decarbonisation goals: a case study in Lisbon
 In 8th Transport Research Arena (**TRA**), Helsinki, Finland
https://www.researchgate.net/publication/342703779_Assessing_future_use_of_autonomous_shared_and_electric_vehicle_technologies_to_meet_decarbonisation_goals_a_case_study_in_Lisbon
41. João Rico, José Barateiro, Arlindo Oliveira, 2019
Graph neural networks for traffic forecasting
 In OMAINTEC
<https://www.inesc-id.pt/publications/15378/pdf/>
42. Inês Leite, Anna Carolina Finamore, Rui Henriques, 2020
Context-sensitive modeling of public transport data
 In Transport Research Arena (**TRA**)
<http://web.ist.utl.pt/rmch/upload/publications/TRA.ContextModelingTransportData.LeiteFinamoreHenriques.pdf>

11 Outras publicações de relevo

Destacam-se ainda 4 artigos focais, acessíveis via arXiv e sob revisão em revistas de referência:

43. Vasco D. Silva, Anna Finamore, Rui Henriques, 2021
On the Role of Multi-Objective Optimization to the Transit Network Design Problem
arXiv preprint arXiv:2201.11616
<https://arxiv.org/pdf/2201.11616.pdf>
44. Pedro P. Santos, Francisco S. Melo, Alberto Sardinha, D. S. Carvalho, 2021
Understanding the Impact of Data Distribution on Q-learning with Function Approximation
arXiv preprint arXiv:2111.11758
<https://arxiv.org/pdf/2111.11758.pdf>
45. M. Bubicz, E. Arsenio, R. Henriques, J. Barateiro, 2022
Sustainable Urban Mobility Measures in Response to Covid-19: a Systematic Literature Review and Emerging Policy Challenges
SSRN preprint ssrn.4055178
[10.2139/ssrn.4055178]
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4055178
46. João Rico, José Barateiro, Arlindo Oliveira, 2021
Graph Neural Networks for Traffic Forecasting
arXiv preprint arXiv:2104.13096
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2104/2104.13096.pdf>
47. Cláudio Sardinha, Anna Finamore, Rui Henriques, 2021
Context-aware demand prediction in bike sharing systems: incorporating spatial, meteorological and calendrical context
arXiv preprint arXiv:2105.01125
<https://arxiv.org/pdf/2105.01125.pdf>

Notas finais

A visibilidade e fator de impacto das revistas e conferências internacionais onde foram publicados os trabalhos científicos listados revelam o nosso compromisso em garantir a visibilidade e disseminação das contribuições científicas do projeto ILU.

Todas as revistas seleccionadas são Q1 (ISI/SJR) nas áreas científicas alvo. Destacamos a realização de publicações na IEEE T-ITS, a revista com maior fator de impacto em sistemas de transporte inteligente, bem como na Pattern Recognition, elevado fator de impacto em aprendizagem automática.

Destacamos ainda a publicação de artigos em conferências com CORE Rank **A** no ano da publicação, incluindo SIAM SDM (*Statistical Data Mining*), ECIR (*European Conf. on Information Retrieval*), ITS (*Intelligent Tutoring Systems*), MobiQuitous (*EAI Mobile Ubiquitous Systems*).

Finalmente, seis artigos foram publicados na bianual TRA (*Transport Research Arena*) e ETC (*European Transport Conference*), as conferências em engenharia de transportes com maior visibilidade a nível Europeu.

Parte IV:
Dissertações (formação)

12 Teses de mestrado concluídas

1. *Francisco Neves*, 83467

Título: **Discovery of actionable patterns in road traffic**

Orientação por Rui Henriques e Anna Finamore

Distinção como *Melhor Tese de Mestrado* pela *ULisboa-RedeMov 2021*

Descrição: This work proposes two major approaches for mining road traffic patterns from heterogeneous sources of spatiotemporal data, tackling major challenges: (i) spatiotemporal intricacies of geolocated speed and loop count data; (ii) the need to integrate heterogeneous views of road traffic (such as speed limits, congestion size, delay, throughput); (iii) the need to mine jam patterns with varying degrees of severity; (iv) the inherent traffic variability and unexpected occurrence of events; (v) the need to guarantee the statistical significance, actionability and interpretability of the target patterns; (vi) the difficulty of detecting emerging patterns not yet markedly noticeable at early stages; (vii) and massive data size. E2PAT is proposed as a scalable method to detect emerging patterns from heterogeneous sources of spatiotemporal data. These contributions are comprehensively assessed in the Lisbon's road traffic monitoring system, a large sensor network composed of mobile and fixed sensors, producing geolocated speed data and loop counter data.

https://www.dropbox.com/s/plbkttov37ng9kx/MScThesis_FranciscoNeves.pdf?dl=0

2. *Vasco Silva*, 86525

Título: **Optimizing bus networks from multimodal travel flows**

Orientação por Rui Henriques e Anna Finamore

Descrição: This work proposes a novel optimization approach for bus networks in multimodal transport systems, considering both topological and route scheduling ends. Genetic Algorithms are used in both single and multi objective approaches. The single objective formulation is based on a human rating of Pareto Optimal networks drawn from multi objective solutions. A regression model is used to infer the weighted sum of the different objectives. Results proved to improve on the multi objective optimization results with reductions in objective functions, including travel time and transfers per trip, up to 28.3%.

https://www.dropbox.com/s/qu9ri8711o5e191/MScThesis_VascoSilva.pdf?dl=0

3. *Carlos Lemonde Macedo*, 73919

Título: **Spatial multimodality analysis in the city of Lisbon**

Orientação por Elisabete Arsénio e Rui Henriques

Descrição: The present work is anchored in the ILU project, introducing a methodology to identify multimodal mobility patterns through the analysis of spatiotemporal indices of multimodality in passengers' public transport against available situational context. A software tool was built in order to aid specialists in the field finding inconsistencies along the public transportation network.

4. *Sofia Cerqueira*, 81200

Título: **Integrative traffic flow analysis of public transport data in the city of Lisbon**

Orientação por Rui Henriques e Elisabete Arsénio

Descrição: This thesis proposes an approach to infer Origin-Destination matrices from smart-card validations able to: i) detect commuting patterns and vulnerabilities on the network pertaining to walking distances and trip durations; ii) decompose traffic flows by calendrical rules and user profiles; iii) support context-aware descriptive analytics. Given the fact that automated fare collection systems can assume an only-entry control, unimodal and multimodal models for alight bus stop inference are further proposed in this thesis. Lisbon city is used as the study case, with the aforementioned contributions being assessed over the CARRIS and METRO transportation network. The inferred OD matrices allowed the identification of vulnerabilities in the network.

5. *Pedro Santos*, 83550

Título: Traffic light control using deep reinforcement learning

Orientação por Francisco Melo e Alberto Sardinha

Descrição: This thesis aimed at developing intelligent Traffic Signal Controllers (TSCs) using Reinforcement Learning (RL) techniques, assessing how the different dimensions of the control problem affect the efficiency of the resulting controllers under a variety of simulation scenarios. Firstly, a novel methodology for the development of intelligent TSCs is proposed, ensuring some level of standardization at the different stages of the experimental process: simulation setup, TSC design – problem formulation and selection of the RL method – as well as performance estimation and comparison. Secondly, a thorough study of different state spaces, reward functions, and RL algorithms (Q-learning, deep Q-network, and deep deterministic policy gradient) is conducted. In particular, a fully decentralized approach to traffic light control featuring a constrained action space definition is considered. The performance of the developed TSCs is assessed with respect to different traffic demands, under traffic networks extracted from the city of Lisbon, including arterial and grid networks.

<https://www.dropbox.com/s/bnl17qvea4mdht0/MScThesis.PedroSantos.pdf?dl=0>

6. *Cláudio Sardinha*, 94082

Título: Describing and predicting demand in Lisbon's public Bike sharing system

Orientação por Rui Henriques e Anna Finamore

Descrição: Recent contributions from deep learning show limited success on forecasting bike sharing demand. This is hypothesized to be driven by: i) the inherent traffic variability, dependent on externalities such as the meteorological and public events; and ii) the absence of spatial awareness as most predictors are unable to model the effects of high-low station load on nearby stations. This work proposes a comprehensive set of new principles to incorporate both historical and prospective sources of spatial, meteorological, situational and calendrical context in predictive models of station demand. To this end, a new recurrent neural network layering composed by serial long-short term memory (LSTM) components is proposed with two major contributions: i) the feeding of multivariate time series masks produced from historical context data at the input layer, and ii) the time-dependent regularization of the forecasted time series using prospective context data.

<https://arxiv.org/pdf/2105.01125.pdf>

7. *Rui Loureiro*, 80845

Título: Machine learning methods for the optimisation of urban mobility

Orientação por Fernando Mira da Silva

Descrição: Procedures for efficient route set and schedule design are crucial in order to develop efficient transit systems that quickly adapt to the dynamic demand of the passengers. This thesis uses Automatic Data Collection System (ADCS) data to infer origin-destination demand and approach the Transit Network Design (TND) problem using a Genetic Algorithm based approach to optimize a bus network. We apply our approach to the bus network in Lisbon, Portugal, where a 4 minute decrease in the average travel time per passengers is observed.

<https://www.dropbox.com/s/s7nsk820tjx08so/MScThesis.RuiLoureiro.pdf?dl=0>

8. *Vasco Leal*, 81749

Título: Neural processing principles for traffic analysis and prediction in urban areas

Orientação por Fernando Mira da Silva

Descrição: Traffic flow prediction is considered a critical element for the successful deployment of an ITS. In order to create accurate road traffic flow prediction models, this thesis explored the impact of distinct neural processing principles. Considering as the primary source of road data, loop counters placed at intersections throughout the center of Lisbon, as well as other sources of publicly available urban data, a comprehensive experimental assessment of the impact of processing choices and neural architectures is undertaken.

9. *João Aparício*, 97155

Título: **Modelling and assessing resilience in multimodal transportation systems**

Orientação por Rui Henriques e Elisabete Arsénio

Descrição: **Descrição:** This thesis aims to contribute to a more sustainable mobility solution by proposing and empirically testing methods to assess the resilience of a multimodal transport system. Resilience is seen in both static and dynamic settings, looking at aspects in the network topology and user flow and demand. To this end, we propose major contributions: a robustness assessment model along with the analysis of dynamics and the demand and supply changes as a means to characterize resilience; and further highlight resilience aspects from the analysis passenger traffic demand during Covid-19 pandemic.

https://www.dropbox.com/s/wvm4o6dbls8ukp7/MScThesis_JoaoAparicio.pdf?dl=0

10. *Ricardo Sousa*, 94046

Título: **Autonomous time series data processing on historical and real-time settings**

Orientação por Rui Henriques e Conceição Amado

Descrição: Heterogeneous sensor networks, including traffic monitoring and water systems, produce abundant time series data with an arbitrarily-high multivariate order. Nevertheless, errors and failures in the calibration, data storage or acquisition often occur on some of the sensors installed in those systems. This thesis proposes a computational system, for the fully autonomous cleaning of multivariate time series data using strict quality criteria assessed against ground truth extracted from the targeted series data. The proposed methodology is parameter-free as it relies on robust principles for the assessment, hyperparameterization and selection of methods. State-of-the-art methods for (multivariate) time series imputation and outlier detection-and-treatment, considering both point and segment/serial occurrences, are supported.

11. *Hussein Sacoer*

Título: **Balanced scorecard for public transport agencies in the XXI century**

Orientação por Elsa Raposo, José Barateiro e Elisabete Arsénio

Descrição: The Balanced Scorecard (BSC) is a management methodology developed by Robert Kaplan and David Norton for communicating and executing the strategy of an organization. Public transport providers face unique challenges in their strategic planning pertaining to the need for multimodal coordination with other agencies, enhance service quality and experience, align public transport interfaces and to introduce decarbonized solutions. This dissertation aimed at developing a BSC for CARRIS, able to embrace all these needs, bridging different points of view from experts in the areas of strategic management, mobility, and transportation.

https://www.dropbox.com/s/9dbk0eiflbpwyuh/MScThesis_HusseinSacoer.pdf?dl=0

12. *Miguel Coelho*, 87687

Título: **Coordination and observability in multi-agent systems for traffic signal control**

Orientação por Francisco Melo e Alberto Sardinha

Descrição: By sensorizing intersections, adaptive traffic signal controllers can respond to actual traffic conditions at intersections and produce policies capable of mitigating bottlenecks and preventing gridlocks. Reinforcement learningbased multi-agent systems (MARL) provide a natural framework to address the task. In MARL, each agent controls one intersection and can coordinate with its neighbors to attain an optimal networkwide policy. However, it remains a daunting task to compare approaches as there are many possible compositions. This thesis makes a critical comparison across different traffic controllers found in the literature. We show that using non-linear approximators, coordination mechanisms and increasing the observability at each intersection are key performance drivers.

https://www.dropbox.com/s/as2ds6j9bil1at7/MScThesis_MiguelCoelho.pdf?dl=0

13. Pedro Lopes, 87558

Título: Simultaneous route design and frequency planning in bus networks

Orientação por Fernando Mira da Silva

Descrição: Complementarily to the work of Vasco Dias, this work explores solution for optimizing bus route design and frequency. A change in transit frequency and fleet allocation affect route capacity, waiting time and operator costs. This work tackles these tasks simultaneously using heuristic searches, studying the impact of the solutions on public transportation activity, including waiting and travel time, transfer needs, and operator cost proxies, such as empty seats. CARRIS is selected as the case study to validate the contributions.

14. Inês Leite, 81328

Título: Contextual outlier detection in traffic data

Orientação por Rui Henriques e Anna Finamore

Descrição: This work proposes a methodology to integrate situational context (including public events, planned interventions, and citizen notifications) in the analysis of public transport data. Major contributions are the: online consolidation and labeling of heterogeneous sources of context; calendar-driven statistical modeling of expected traffic behavior; forecasting; the integrative display of traffic and its situational context, accompanied by spatiotemporal navigation and zooming facilities, and outlier detection. Preliminary results collected from Lisbon's subway network system shows the relevance of these contributions.

Trabalhos complementares de mestrado com contribuições no projeto ILU:

15. Margarida Costa, 83425

Título: Unsupervised anomaly detection using recurrent neural networks

Orientação por Rui Henriques e Susana Vinga

Descrição: This work proposes a methodology to detect anomalies in the utility distribution networks using deep learning architectures. Encoder-decoder architectures based on LSTM such as LSTM autoencoder, CNN-LSTM, CNN-BiLSTM, and SCB-LSTM are comprehensively compared to this end, and predictions adjusted under a temperature correction model. Results show that these approaches offer improvements, yet are insufficient to separate relevant events from other background confounds.

16. Susana Gomes, 94043

Título: Modeling network dynamics using multivariate time series data

Orientação por Rui Henriques e Susana Vinga

Descrição: This work shows that it is possible to (1) describe the dynamics of a utility distribution network through spatiotemporal correlation analysis of pressure and volumetric flowrate sensors, and (2) analyze disruptions on the expected correlation to detect burst leakage dynamics using standard classifiers. Our approach is promising in a synthetic setting and offers initial support towards leakage detection in real distribution networks despite the presence of highly irregular consumption patterns, a limited number of recorded leakages, and highly heterogeneous leakage profiles. Results confirm the simplicity, novelty, and accuracy of the proposed correlation-based principles for anomaly detection in heterogeneous and georeferenced time series.

17. Francisco Barata, 87656

Título: Spatiotemporal patterns of emergency prevalence and response in Portugal

Orientação por Rui Henriques e Anna Finamore

Descrição: Medical emergency event's patterns are known to fluctuate both temporally and spatially, and significantly dependent on external context factors such as weather, the occurrence of public events and calendrical context. Even so, in mainland Portugal, estimates of EMS demand are currently derived from simple averaging rules. This study aims at providing an actionable clustering of regional areas in accordance with the EMS demand and response patterns to guide resource allocation, followed by a correlation analysis and discovery of temporal rules on how context factors affect EMS demand.

18. *João Palet*, 86447

Título: Context-based predictive models for medical emergencies

Orientação por Vasco Manquinho e Rui Henriques

Descrição: This work proposes a forecasting tool of emergencies and other relevant urban events, sensitive to both their type and severity, along with their spatial distribution. Specifically, it relies on a sequential composition of long short-term memory (LSTM) units, able to incorporate both historical and prospective sources of external context to guide the forecasting task. In addition, it describes the spatial probability distribution of urban events through the application of a spatio-temporal kernel density estimation (stKDE) that takes into account not only the temporal patterns of emergencies but also the aforementioned sources of external context.

https://www.dropbox.com/s/gpxjrxqsydqcg8e/MScThesis_JoaoPalet.pdf?dl=0

13 Doutoramentos

19. *João Aparício*, 97155

Título: Knowledge acquisition from dynamic multimodal networks

Orientação por Francisco Santos e Rui Henriques

Descrição: Multilayer networks are used to model and understand key aspects of urban systems, including mobility patterns, ecosystems, and societal structures. This proposal aims at understanding the dynamics of these networks by developing novel computational solutions bridging network science and machine learning concepts. This primary goal is subdivided into specific objectives: i) discovery of patterns in temporal networks able to answer to unique challenges pertaining to their structure, including network heterogeneity, topology, spatiotemporal distribution of weights, presence of annotations; ii) using patterns for both descriptive ends and predictive ends; and iii) an associative/unified model between Data Science and Network Science stances. The contributions will be primarily validated in multimodal transportation networks from different cities.

20. *Sofia Cerqueira*, 81200

Título: Artificial intelligent solutions to aid transportation and civil engineering

Orientação por Rui Henriques, Elisabete Arsénio e José Barateiro

Descrição: The scope of this research is still under definition. The primary tasks tackled in this thesis are driven by four major challenges observed in the context of urban mobility: i) the need to assess vulnerabilities in origin-destination matrices of public traffic flow against reference dynamics of private vehicles, including expectations on travelling time and walking needs; ii) the need to discriminate the profiles of passengers that quit public transportation during the first year of the pandemic and did not returned, against those who return and those that never quit; iii) the need for local revisions (spatial-wise and time-wise) to the network design and frequency of public carriers in the presence of large-scale public events; and iv) the need to incorporate principles of social and environmental sustainability throughout the optimization of public transport networks.

21. *João Rico*, 58414

Título: Graph neural network principles for spatiotemporal traffic forecasting

Orientação por Arlindo Oliveira e José Barateiro

Descrição: A core component of ITS is traffic forecasting, which goal is to measure, model and predict traffic conditions in real-time, accurately and reliably, in order to optimize the flow and mitigate the congestion of traffic, and to respond adequately to other problems such as traffic light control, time of arrival estimates, and planning of new road segments. However, this is a challenging problem due to several important factors. The successful forecasting of traffic conditions requires adequately handling heterogeneous data (e.g. loop counter and floating car data) with complex spatiotemporal dependencies, which are typically sparse, incomplete and high-dimensional. In addition, it requires

computing in real-time and the inclusion of external factors such as weather conditions and road accidents. This thesis aims at studying and proposing deep learning principles for spatiotemporal event prediction, particularly graph neural networks, to answer these challenges.

22. *Guilherme Varela*, 94704

Título: Coordination mechanisms for large-scale reinforcement learning based adaptive traffic signal control

Orientação por Francisco Melo e Alberto Sardinha

Descrição: Adaptive traffic signal control (ATSC) is at the core of intelligent transportation systems. Properly calibrated signal plans can alleviate bottlenecks preventing mounting congestion. Reinforcement Learning (RL) based controllers react online and adapt those reactions as more data becomes available. Despite the advantages, incumbent systems can manage hundreds of intersections while RL-based systems face challenges to scale up. To address this challenge, this thesis considers the distributed learning paradigm where agents are geographically scattered, can communicate and interact only with the neighbors. To this end, network agents able to learn from partial information of their surroundings and decentralized principles for decoupling vast transportation networks are explored.

https://www.dropbox.com/s/fygnr110kg02vzy/PhDCAT_GuilhermeVarela.pdf?dl=0

23. *Miguel Garção Silva*, 11183

Título: Modeling spatio-temporal network data

Orientação por Rui Henriques e Sara C. Madeira

Descrição: The collection of spatiotemporal data in recent years raised new opportunities in many domains, including urban mobility and utility management. Sustainability is highlighted in the United Nations 2030 Agenda for Sustainable Development. However, to our knowledge, no methodologies integrate the analysis of water and energy consumption simultaneously. From a computational stance, the analysis of such consumption patterns is further challenged by the heterogeneous, sparse, spatio-temporal, and streaming nature of this data. This research project aims to propose more effective data mining approaches to address these challenges, focusing on the discovery of actionable patterns of consumption in spatio-temporal heterogeneous data for both descriptive and predictive ends. To this end, subspace clustering, temporal pattern mining, and generative approaches will be explored. This work will be developed in the context of innovative R&D projects – WISDom, ILU and AQUAMONITOR – addressing real-world open challenges of urban mobility and utility distribution networks.

24. *Leonor Pimenta*, 81155

Título: Anomalous and emerging pattern discovery from spatiotemporal urban data

Orientação por Vasco Manquinho e Rui Henriques

Descrição: The increasing collection of urban data in recent years raises new opportunities for municipalities in the areas of mobility, supply of utilities, and response to unexpected events. As a consequence, research collaborations are emerging in these areas, including ILU, WISDOM, and Data2Help projects. Pattern discovery from urban data is challenged by their spatiotemporal nature, heterogeneity, and large volume. In this context, this doctoral research aims to comprehensively propose effective data mining approaches for the discovery of actionable patterns in spatiotemporal heterogeneous urban data, such as patterns of congestion, emerging trends in traffic and medical emergencies, or deviant patterns of utility consumption and circulation. The contributions of this thesis will be conducted in close articulation with the aforementioned projects.

25. *Han Shao*

Título: Real-time analytics on high fidelity synchronized measurements

Orientação por Elisabetta Tedeschi, Hugo Morais e Rui Henriques

Descrição: High-frequency disturbances from power converters on system operation call for high fidelity measurements. Synchronized waveform monitoring (SWM) is an emerging technology that extends the scope of synchrophasor technologies by providing wider bandwidth measurements including

harmonics and electromagnetic transients across wide geographical areas. Today with the help from 5G wireless and fiber optics, it is possible to acquire waveform measurements from the meters in real time. The technology has great potential however the application is in its infancy. This PhD aims at developing a real time data analytic workflow, and through historical and formulated disturbance patterns, detect disturbances and identify the root causes. Applications will be developed for monitoring and protection of weak AC systems in urban and OG domains.

14 Outros trabalhos

PosDocs

Três investigadores internacionais concluíram os seus PosDocs no contexto do projeto ILU:

26. *Anna Carolina Finamore*

Tópico: generative models for descriptive and predictive urban data analytics

Acompanhamento: Francisco Melo, Alberto Sardinha, Rui Henriques

27. *Thomas James Tiam-Lee*

Tópico: spatiotemporal data mining for knowledge extraction in urban data domains

Acompanhamento: Vasco Manquinho e Rui Henriques

28. *Marta Bubicz* (co-supervised by Elisabete Arsénio)

Tópico: environmental and social sustainable urban systems; public transport resilience

Acompanhamento: Elisabete Arsénio, José Barateiro, Rui Henriques

Estágios e outros trabalhos de investigação

29. *Sofia Carvalho*, 89539 (ongoing MSc thesis)

Título: Uso de veículos autónomos para melhorar as condições de trânsito

30. *Ana Santos*, 84364 (isolated study)

Título: Estudo de correlações entre procura e meteorologia no sistema de partilha de bicicletas GIRA

31. *Pedro Remédios*, 83551 (isolated study)

Título: Teoria de jogos aplicada ao escalonamento em tempo real do metropolitano de Lisboa

32. *Leonardo Alexandre*, 94054 (ongoing PhD)

Título: Descoberta de padrões discriminativos de alvos categóricos e numéricos

33. *Pedro Caldeira*, 81888 (isolated study)

Título: Princípios estatísticos para detecção de anomalias em multi-conjuntos de eventos

34. *Joana Coutinho*, 87666 (isolated study)

Título: Índices espaço-temporais de vulnerabilidade na resposta a emergências

35. *Rui Nóbrega*, 87703 (isolated study)

Título: Integração de fontes heterogêneas de dados espaço-temporais

36. *Pedro Rodrigues*, 87696 (isolated study)

Título: Associação entre ocorrências urbanas e contexto situacional

Parte V:

ILU APP

15 Introdução

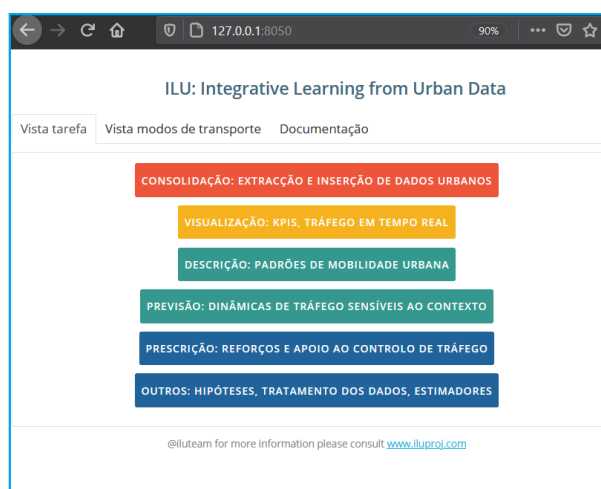
ILU APP é a denominação do sistema de recomendação que integra as contribuições computacionais decorrentes dos trabalhos desenvolvidos no projeto ILU. As facilidades disponibilizadas pela ILU APP estão alinhadas com a estrutura do projeto ILU, e consequentemente organizadas em torno de quatro grupos de contribuições – *consolidação*, *descrição*, *previsão* e *otimização* – onde cada grupo opera sobre fontes de dados heterogêneas de tráfego urbano (sensores na rodovia, METRO, CARRIS, GIRA) e contexto situacional (meteorologia, eventos públicos, planeamento urbano, interdições), com vista a apoiar o planeamento da mobilidade urbana pelas transportadoras e CML de uma forma multimodal, transparente, e alinhada com as contínuas mudanças na cidade.

O sistema de recomendação ILU APP é disponibilizado sob a forma de protótipo funcional junto dos parceiros, respondendo ao conjunto de requisitos funcionais desenhados para as Tarefas 3 a 7, permitindo um acesso continuado e seguro pelo browser ou, em alternativa, de forma programática com recurso a APIs padrão.

O sistema ILU APP procura ainda satisfazer os seguintes requisitos de qualidade:

- modularidade e adaptabilidade das funcionalidades incorporadas;
- aplicabilidade a novos conjuntos dados (por exemplo, respeitantes a novos períodos de análise);
- confiabilidade dos resultados, incluindo garantias de significância estatística;
- proteção e integridade de dados;
- usabilidade de navegação, visualização e exportação de resultados;
- acessibilidade das funcionalidades, permitindo a disponibilização das facilidades via interfaces web e APIs padrão;
- extensibilidade por forma a potenciar a aplicação das contribuições a outras cidades.

O menu inicial permite a navegação pelas facilidades disponíveis, podendo estas ser agrupados por tarefa ou modalidade de transporte.



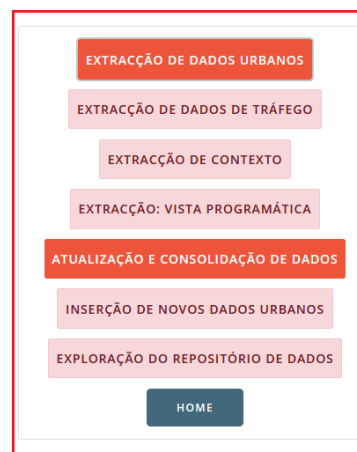


16 Consolidação

Entrando no menu de consolidação (à direita), podemos aceder a facilidades de navegação, extração, e atualização das fontes de dados urbanos e do contexto situacional disponível na cidade. Estas facilidades operam sobre um repositório de dados que segue um esquema multi-dimensional que permite o acesso eficiente aos dados em conformidade com critérios espaçotemporais e modais de interesse.

O menu de extração de dados de tráfego permite especificar critérios de interesse por forma a seleccionar amostra de dados para as diferentes modalidades de tráfego, incluindo tráfego rodoviário (espiras e WAZE) e transporte público (METRO, CARRIS ou GIRA). A título ilustrativo, estes menus permitem:

- (a) seleccionar o nível de agregação temporal e espacial dos dados;
- (b) especificar restrições caléndricas e horárias;
- (c) seleccionar estações, rotas e/ou sensores de interesse;
- (d) transformar, visualizar e exportar as vistas produzidas.



Cada modalidade de tráfego tem o seu conjunto único de parâmetros. Por exemplo, na selecção de espiras é permitida a especificação de zonas e códigos, enquanto que na selecção de congestionamentos rodoviários é possível definir o tipo de irregularidade alvo. Para a selecção de validações na CARRIS é permitida a restrição por linhas, cores e paragens. A título de exemplo final, os dados referentes à rede pública de bicicletas de Lisboa (GIRA) permite a especificação das estações alvo e de parâmetros de interesse, como a opção entre o acesso aos dados brutos (check-ins e check-outs por estação) ou o recurso a agregações espaçotemporais (capazes de monitorizar estatísticas de procura, capacidade e ocupação nas docas).

A extração de fontes de contexto situacional permite adicionalmente o acesso a:

- ao contexto meteorológico (e.g. intensidade de vento, temperatura, humidade, precipitações acumuladas) nas três principais estações da cidade;
- eventos públicos de interesse obtidos a partir da ocupação de grandes espaços públicos;

- ocorrências, incluindo acidentes rodoviários e outro tipo de emergências, abertura de portas, serviços de limpeza, incêndios, atividades de resgate, conflitos legais, deslocações, entre outros eventos de proteção civil.

Estas fontes de contexto podem ser extraídas de forma consolidada com os dados de tráfego urbano. A título ilustrativo, o utilizador poderá por exemplo selecionar todos os eventos de tráfego e respetivo contexto disponível (e.g., polos urbanos, acidentes, e meteorologia) para uma dada Freguesia de Lisboa (e.g., Areeiro) e período de tempo (e.g., dias úteis entre as 14h e as 16h).

O menu de atualização e inserção de novos dados urbanos permite, com recurso a facilidades de upload drag-and-drop, a especificação de pastas com novos conjuntos de dados a inserir no sistema. O sistema deteta de forma autónoma, quais os novos dados a inserir e se existem entradas redundantes com entradas já previamente inseridas.

Adicionalmente, são disponibilizadas as seguintes facilidades:

- *Exploração básica.* Este menu permite o acesso ao back-end do sistema, contendo facilidades de exploração do esquema relacional e multi-dimensional dos dados, e permitindo uma consulta direta à estrutura e conteúdos das tabelas na base de dados tal como se encontram armazenadas no sistema de recomendação.
- *Extração programática.* Este menu devolve ao utilizar exemplos de como aceder aos conjuntos

de dados previamente identificados de forma programática por forma a facilitar o desenvolvimento de funcionalidades capazes de comunicar com a ILU APP. O acesso aos dados pode ser realizado com recurso a: 1) código **python**, 2) interface gráfica da APP, 3) links HTML, e a 4) scripts executáveis na linha de comandos.

Extracção programática dos dados urbanos

Nota introdutória

Notas:
Data can be accessed via code, gui, html links and command line:

- Python code: open ILU app > ilu query, "py where" is the desirable source (carris, ccoc, espiras, gira, metro, rede, waze...)
- HTML API: run ILU app and access data using custom links in browser (GET cuba/metro/cut-date:2013,1-2014,2(category:5)
- Interactive: ILU graphical interface > consolidação > extracção > tráfego | contexto | outros
- Others: command line (run ILU app and use slicer <https://pythonhosted.org/cubes/slicer.html>)

Guia de extracção

Fonte de dados:
Carris

Visualizar:
☒ Exemplos ☐ Semantica dos pedidos

Modo:
☒ Python ☐ Html api

RUN QUERY

Relevant links:
[Slicing and dicing cubes data \(check also ILU model below\)](#)
[ILU cubes model](#)
[Additional details on querying cubes data](#)

Guia:

```
query_carris.retrieve_data(
    idate = datetime(2018,10,2),
    fdate = datetime(2018,10,4),
    dias = [[1,2,3,4,5],[6]], #separar dados: dias uteis e sábados
    paragens = {'estacoes group 1': ['est1a', 'est1b'],
                'estacoes group 2': ['est2']},
    carreiras = {'carreiras group 1': ['nr_carreira_1'],
                'carreiras group 2': ['nr_carreira_2a', 'nr_carreira_2b']},
    sentidos = ['ASC', 'DESC', 'CIRC'],
    minutos = 15)
```

Backend

Note
This screen conveys information pertaining to the backend of the ILU app. We highly suggest you to use the graphical and programmatic interfaces for retrieving urban data. Please only continue if you want to understand the architecture of ILU app or contribute to this project.

IlU app architecture

- ILU application ARCHITECTURE (module viewpoint)
- Multi-dimensional data schema (DW)
- Relational data schema

Query relational data

Table:

View:
☒ Sample ☐ Columns ☐ Statistics

Alternative: directly query data

Query:
select * from <tablename> limit 10

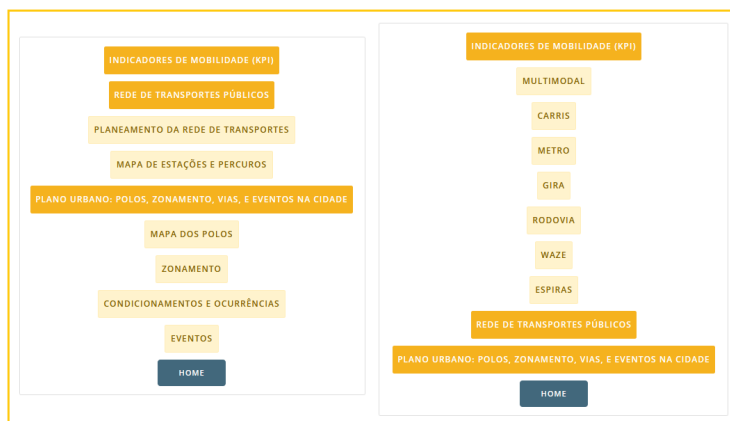
☐ Run query

RUN QUERY

Output:
Select data source and options...

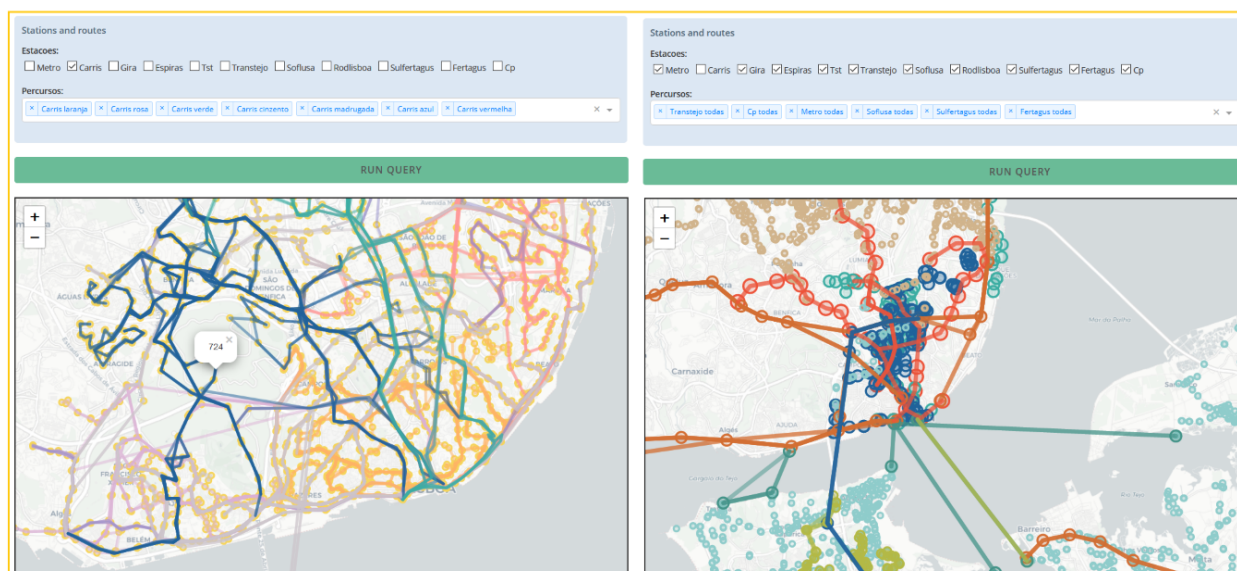
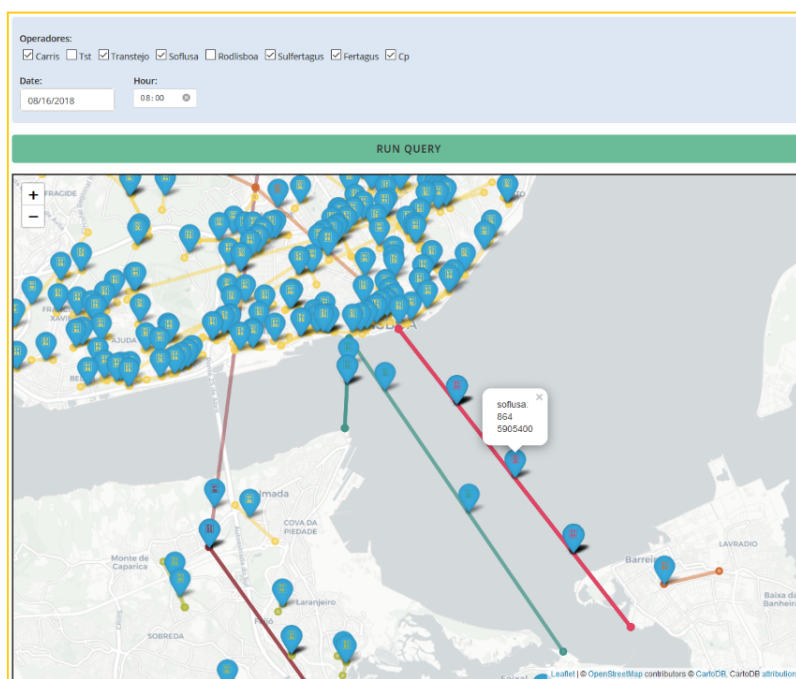
17 Visualização

O menu de visualização reúne três grandes grupos de funcionalidades:



1. exploração do planeamento da rede de transportes da área metropolitana de Lisboa, incluindo METRO, CARRIS, GIRA, TST, TransTejo, Soflusa, Rodoviária de Lisboa, Fertagus, CP. Estes menus possibilitam a extracção de detalhes do roteamento dos diferentes operadores, bem como a posição esperada versus real dos veículos na cidade em diferentes momentos por forma a analisar desvios de relevo. A calendarização das transportadoras está carregada no

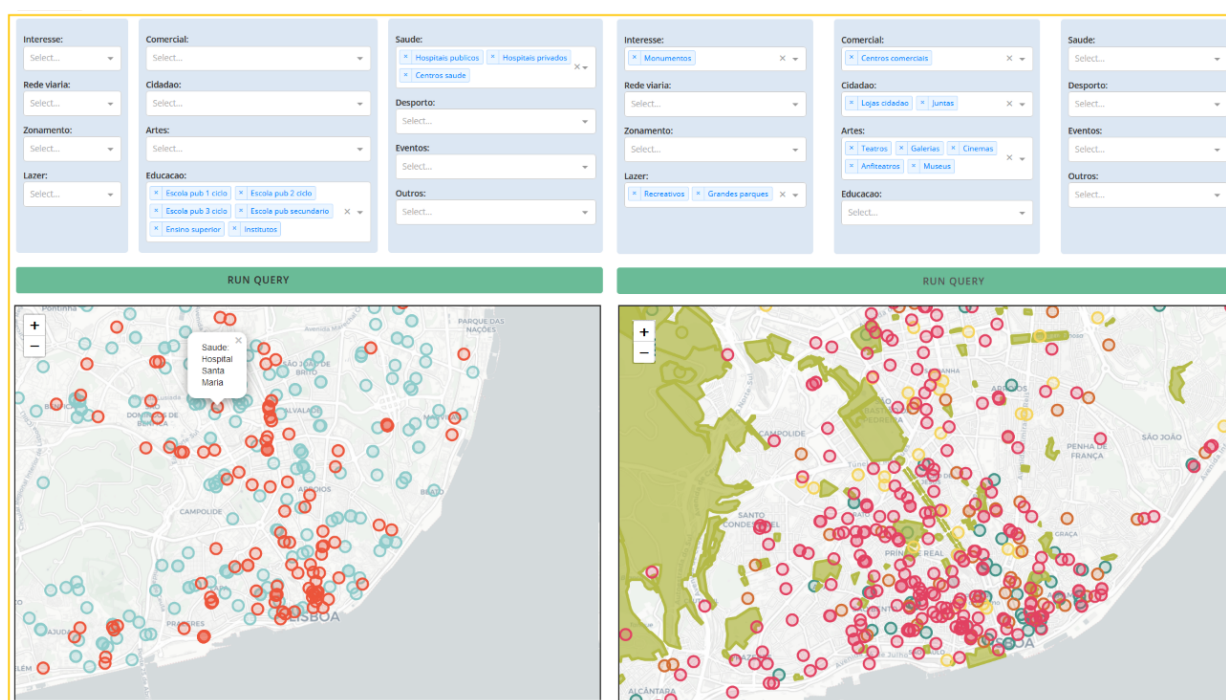
sistema e pode ser facilmente atualizada na presença de alterações ao planeamento. Na visualização apresentada, estão identificados os trechos percorridos para um conjunto seleccionado de transportadoras às 12h de um dia útil em Outubro de 2019;



2. facilidades de exploração da planta urbana da cidade, que permite a visualização integrada de um conjunto diverso de pontos e vias de interesse em Lisboa, incluindo:

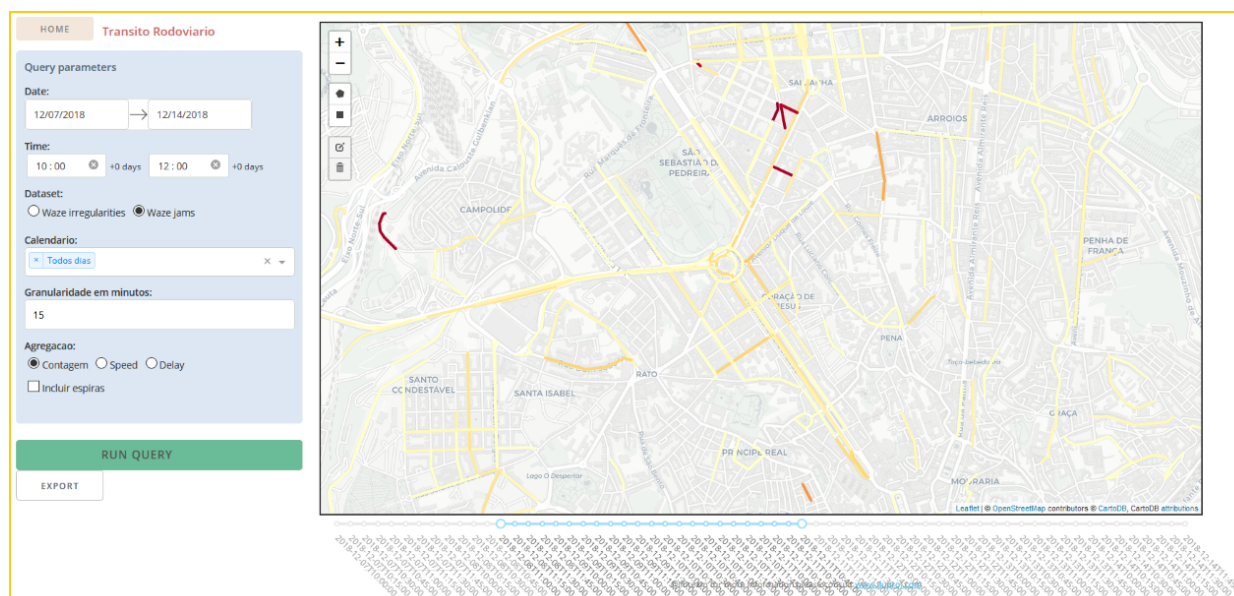
- mapa da rede viária, incluindo declives, ciclovias, rodovia, ferrovia e, entre outros, pontos de carregamento MobiE;
- locais de interesse: monumentos, estatuária, cemitérios, quiosques, alojamento;

- agentes de atuação: bombeiros, PSP, Polícia Municipal;
- zonas de lazer: miradouros, parques de merendas e recreativos, grandes parques, jardins;
- zonas comerciais: centros comerciais, feiras, mercados, fundações, incubadoras, e re-censeamento comercial;
- espaços do cidadão: embaixadas, juntas, lojas do cidadão, lojas sociais, e conservatórias;
- zonas culturais: teatros, museus, galerias, cinemas, anfiteatros, e centros de artes performativas;
- escolas e afins: escolas públicas e privadas (pré-escolar, primeiro/segundo/terceiro ciclos, secundárias), universidades, centros de formação, centros de investigação, laboratórios, espaços criativos, bibliotecas, entre outros;
- espaços de saúde: hospitais públicos/privados/militares, centros de saúde e de cuidados, farmácias;
- entidades e instalações desportivas, entre outros.



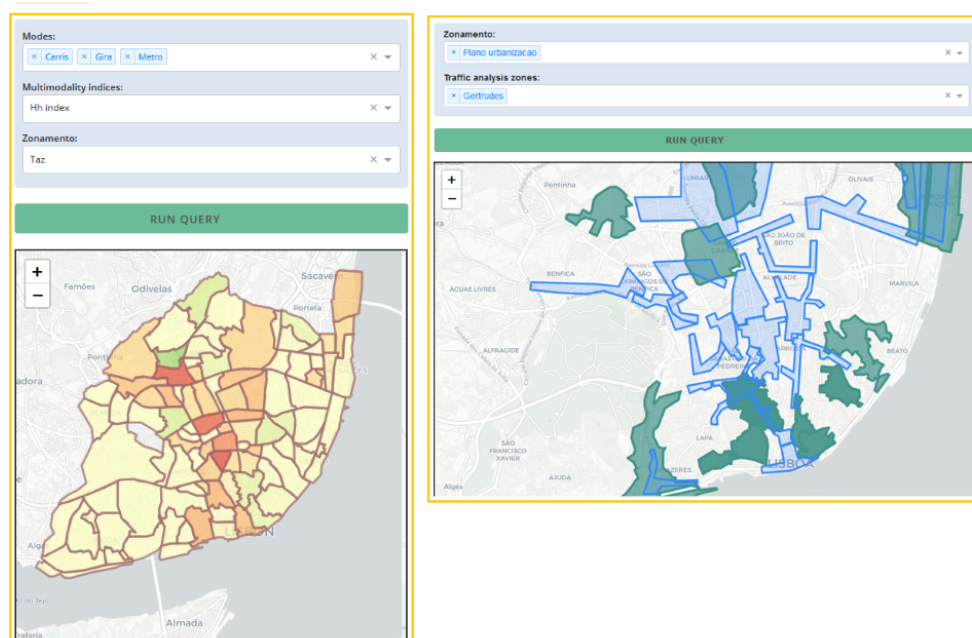
A inclusão destes polos atratores e geradores de tráfego é essencial para explicar a distribuição espacotemporal de tráfego na cidade, incluindo picos de tráfego junto a polos de interesse (e.g. escolas) ou em períodos atípicos (e.g. eventos públicos em grandes salas);

- dashboards com indicadores de performance (KPIs) calculados com base em agregações no espaço (e.g. traffic analysis zones, freguesias) e no tempo, e que permitem de uma forma avançada acompanhar aspectos de mobilidade no trânsito rodoviário e na procura-e-oferta observada na rede de transportes públicos. Complementarmente, são também disponibilizadas formas de identificar e visualizar os congestionamentos ativos num determinado período de tempo.



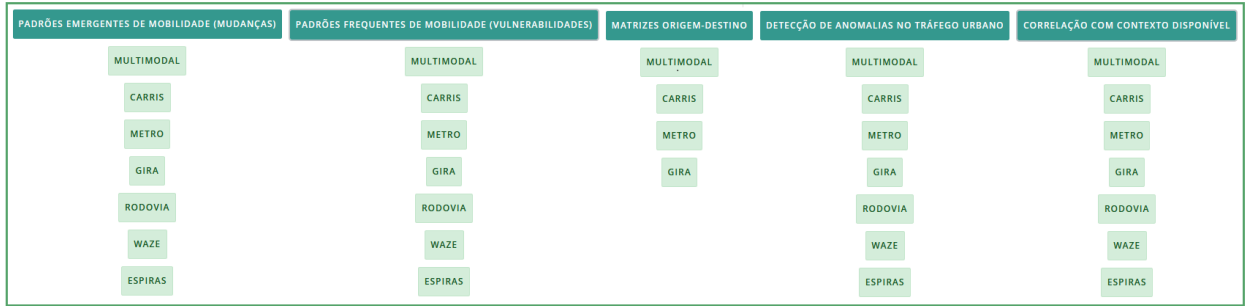
Finalmente, e ainda no contexto dos KPIs, são oferecidos indicadores espacotemporais de coordenação multimodal. Os indicadores identificados podem ser calculados para diferentes granularidades espaciais. Neste contexto, implementamos um conjunto de funcionalidades SIG relacionadas com os diferentes critérios de zonamento na cidade, incluindo:

- traffic analysis zones (TAZ) e limites de Freguesia;
- zonas de controlo semafórico integrado GERTRUDE;
- áreas de reabilitação urbana (ARU);
- outros: principais quarteirões, planos de urbanização, planos de pormenor.



18 Descrição

Ao nível da descrição, são suportados mecanismos para: 1) a descoberta de padrões de tráfego, incluindo padrões frequentes, periódicos, emergentes e padrões anômalos; 2) inferência dinâmica de matrizes origem-destino; e 3) associações de relevo contra contexto situacional disponível.



Por exemplo, a descoberta de padrões emergentes no tráfego rodoviário contempla congestionamentos cuja recorrência no tempo, limites máximos à velocidade de circulação ou extensão espacial tem vindo progressivamente a crescer ou decrescer.

HOME

Descrição: Padrões no trânsito rodoviário

Parameters

Date:

08/15/2018

→

09/27/2018

Calendário:

Todos dias

Granularidade em minutos:

60

Start hour:

00:00

End hour:

23:59

Dataset:

Espiras

Waze

☒ Integrative

Method:

Two step regression

☒ Biclustering

Attributes:

All

Selection map

Biclustering main parameters

Coherency assumption:

Constant

Coherency strength:

3

Quality:

70

Biclusters plot:

☒ Real chart

☐ Discrete chart

☐ Real heatmap

☐ Discrete heatmap

Biclusters:

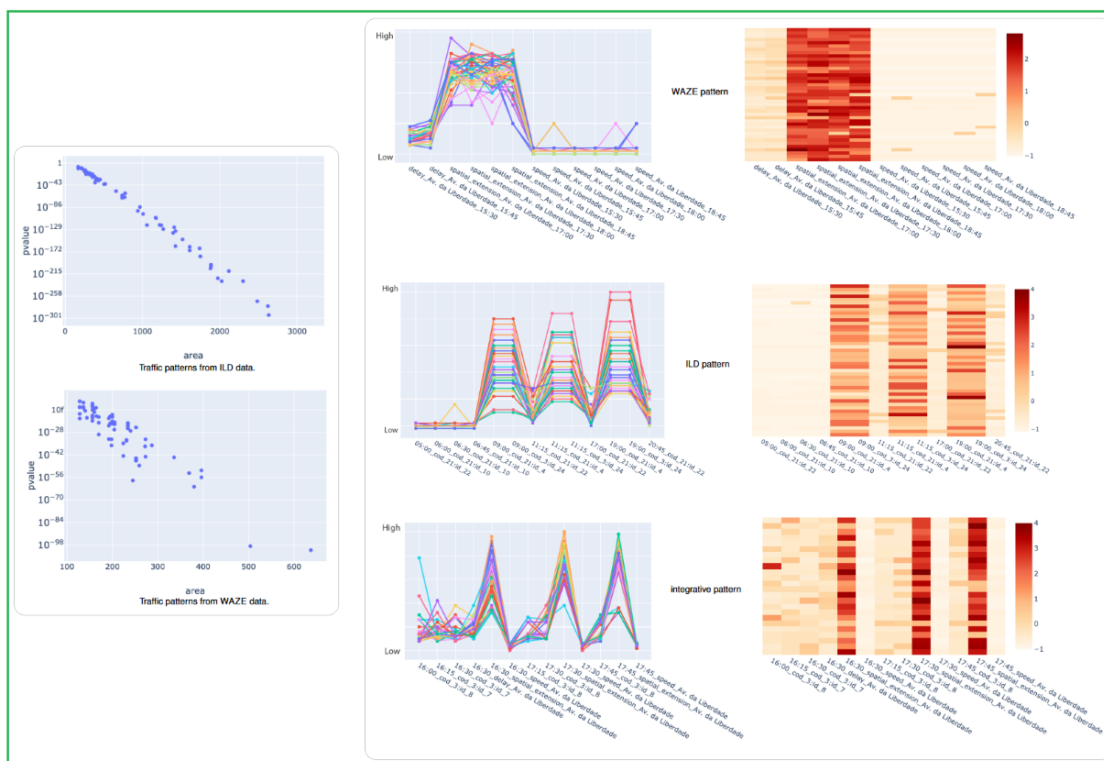
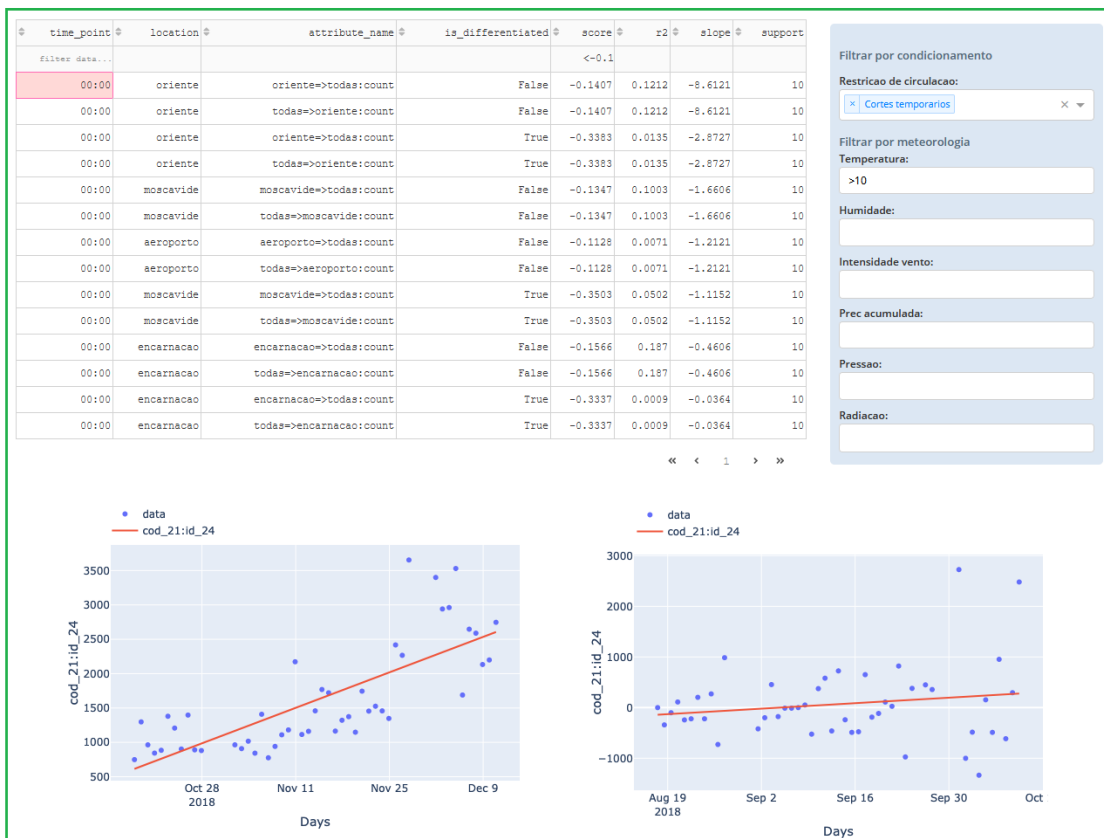
No biclusters available yet

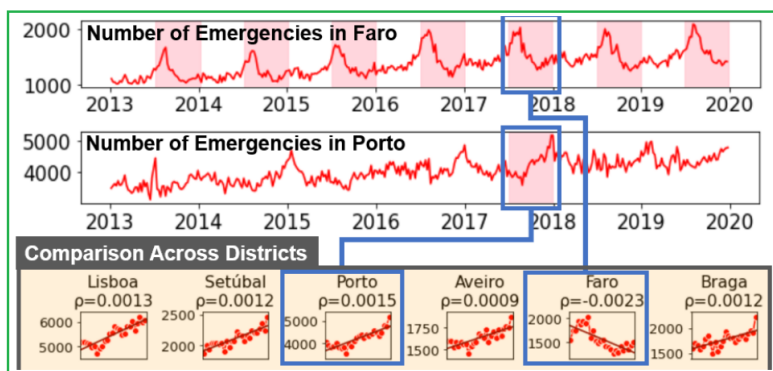
RUN QUERY

time_point	location	attribute_name	is_differenced	score	r2	slope	normalized_slope	support
05:00	cod_3: id_13	cod_3: id_13	False	-0.2447	0.1714	-120	-1	9
02:00	cod_3: id_13	cod_3: id_13	False	-0.2362	0.1094	-120	-1	9
01:00	cod_3: id_13	cod_3: id_13	False	-0.2316	0.0495	-120	-1	9

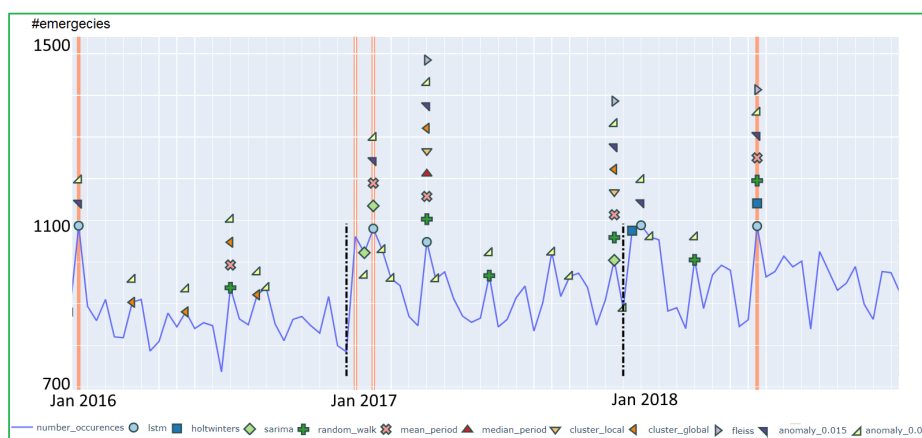
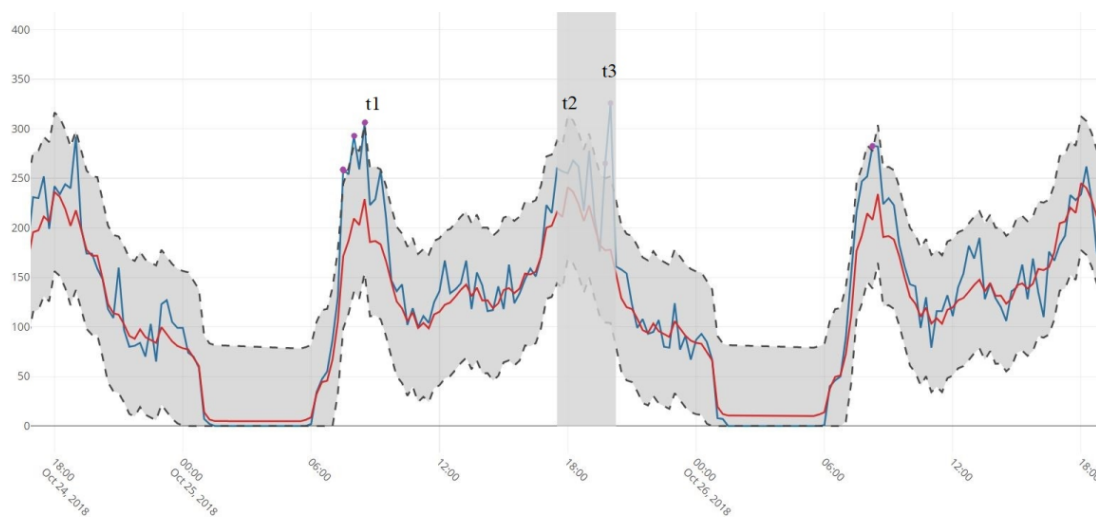
☒ Congestionamentos

☒ Descongestionamentos

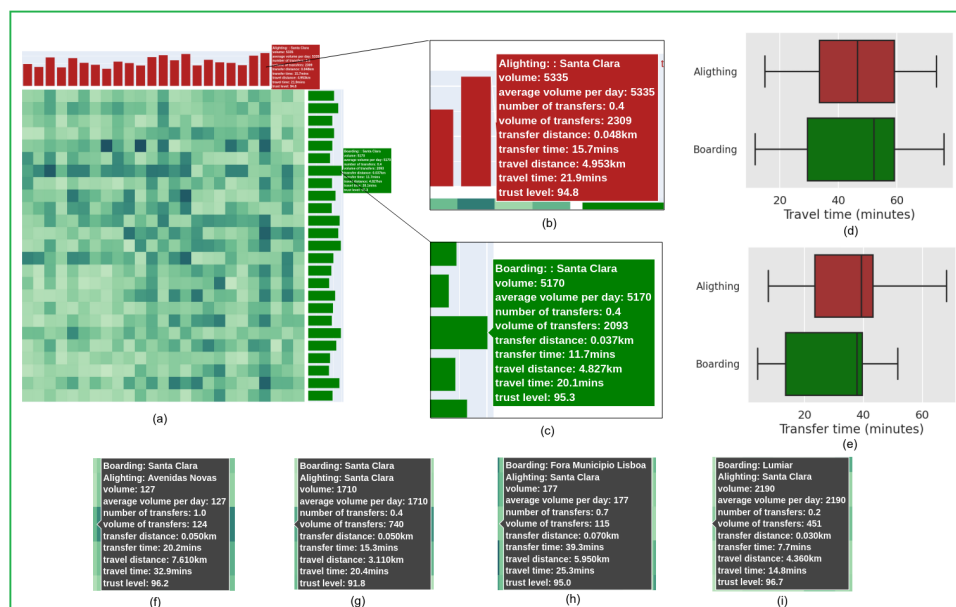
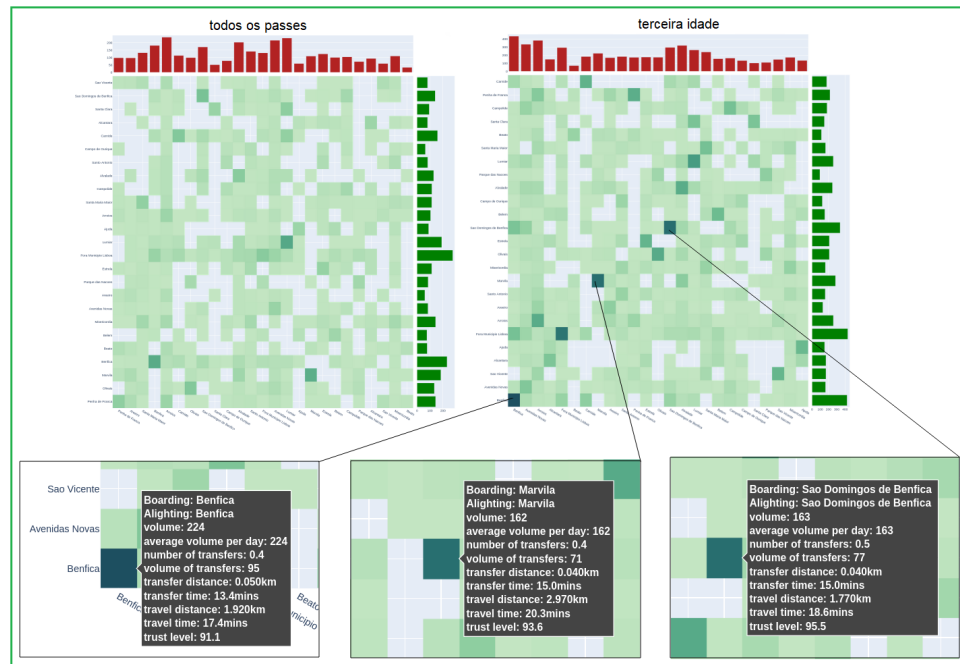


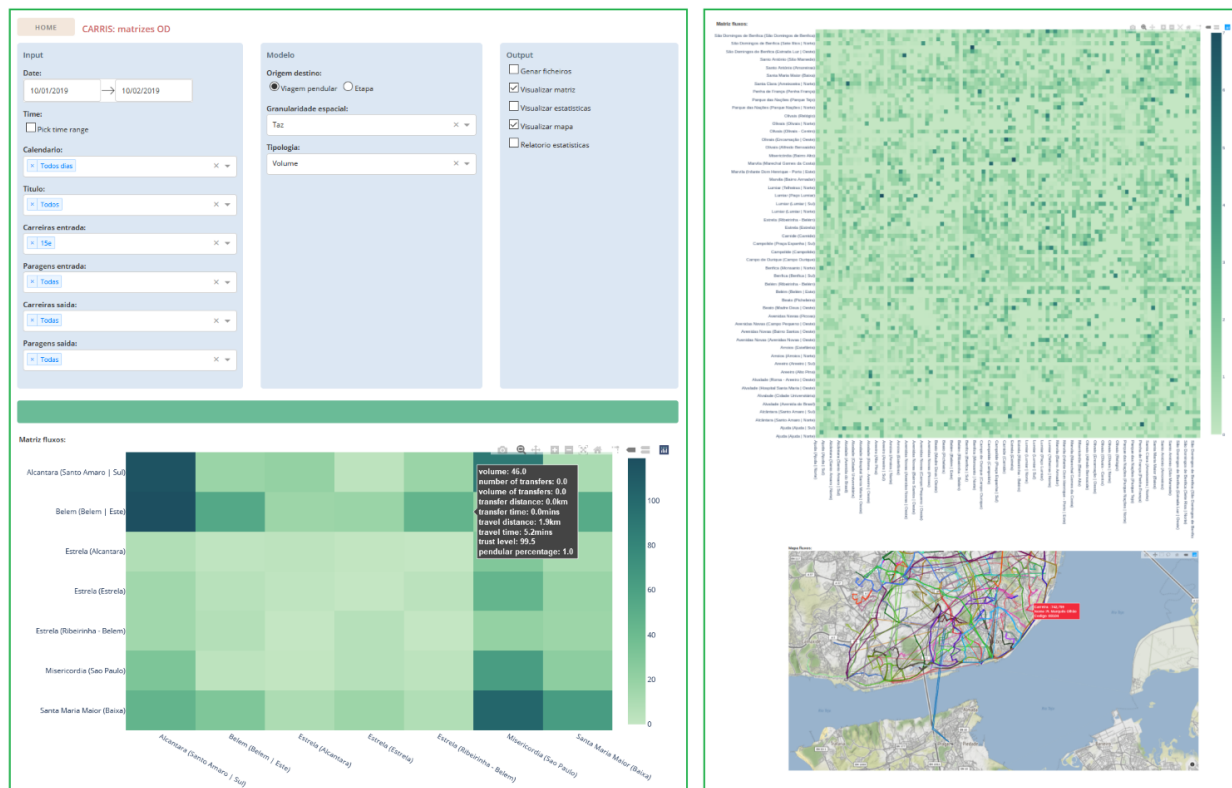


Outro exemplo, a descoberta de padrões anómalos na rede de transportes públicos deteta por sua vez desvios significantes entre a procura observada e a esperada, permitindo uma sinalização automática destas ocorrências por forma a permitir a atuação das transportadoras sempre que necessário. Nas visualizações apresentadas são, respetivamente, identificados desvios na procura de duas estações do METRO e na ocorrência de emergências médicas em Lisboa. Neste último caso, são produzidos consensus a partir de um elevado número de algoritmos para detecção de anomalias, garantindo sensibilidade a variáveis de contexto.

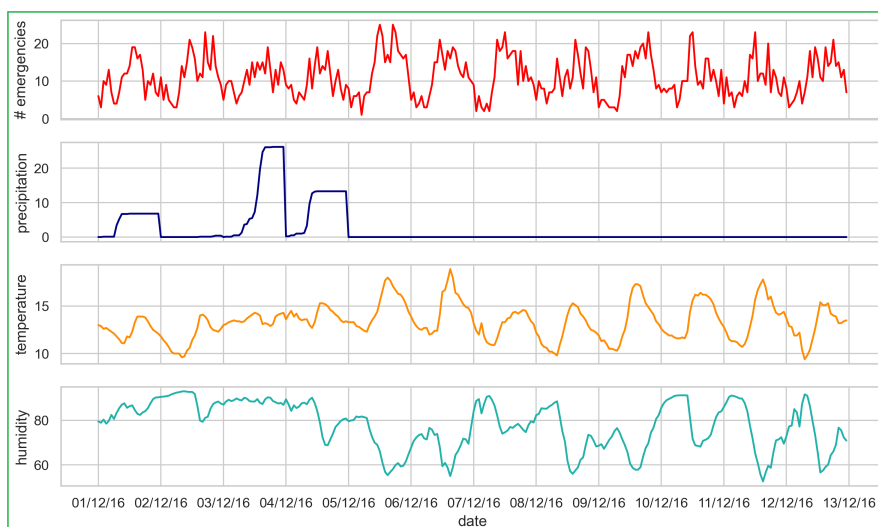


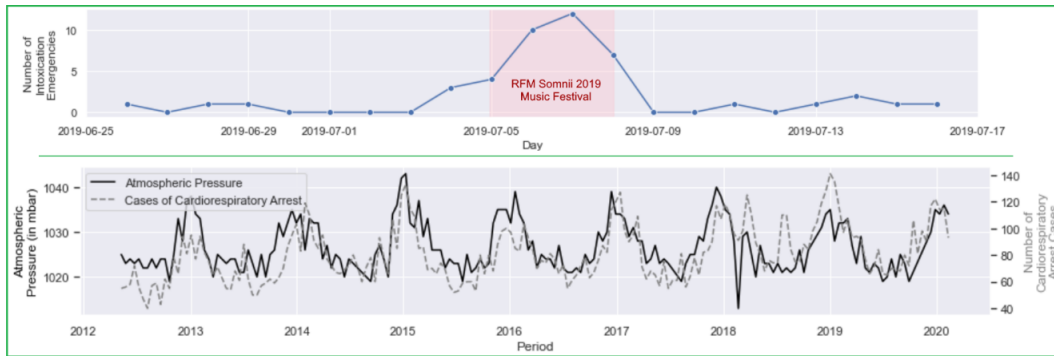
Ainda ao nível da descrição, uma das facilidades de maior relevância para os parceiros públicos é a inferência de matrizes origem-destino de forma dinâmica e multimodal (sensível a transbordos entre diferentes operadores) a partir dos movimentos individuais na rede dada por validações no sistema VIVA card. As matrizes origem-destino permitem obter uma visão detalhada dos principais fluxos na cidade ao longo do dia, e detetar vulnerabilidades na rede pública de transportes, como aspetos de equitatividade nas deslocações entre diferentes pontos na cidade. Para este fim, além das vistas clássicas centradas no volume, é adicionalmente disponibilizado um conjunto diverso de estatísticas por origem-destino, incluindo tempos de viagem e espera, número de transbordos, ou distância percorridas a pé nos transbordos.





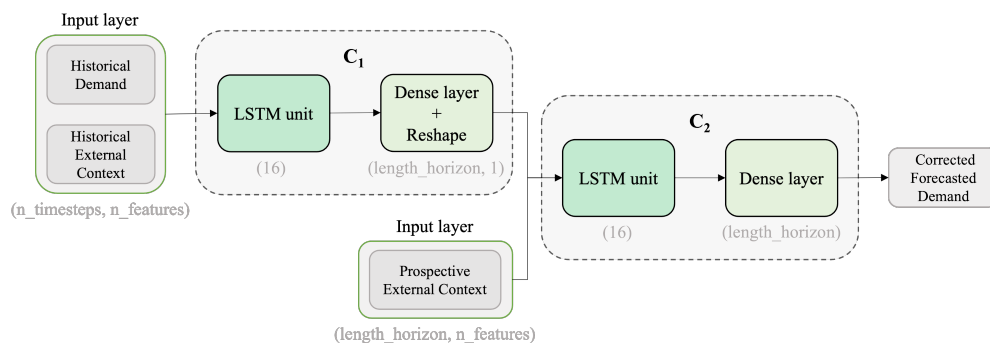
Finalmente, associações com contexto são facilitadas, bastando seleccionar para este fim as fontes de dados de interesse e âmbito espacial e temporal para análise, sendo posteriormente apresentados correlogramas ou vistas concomitantes anotadas.



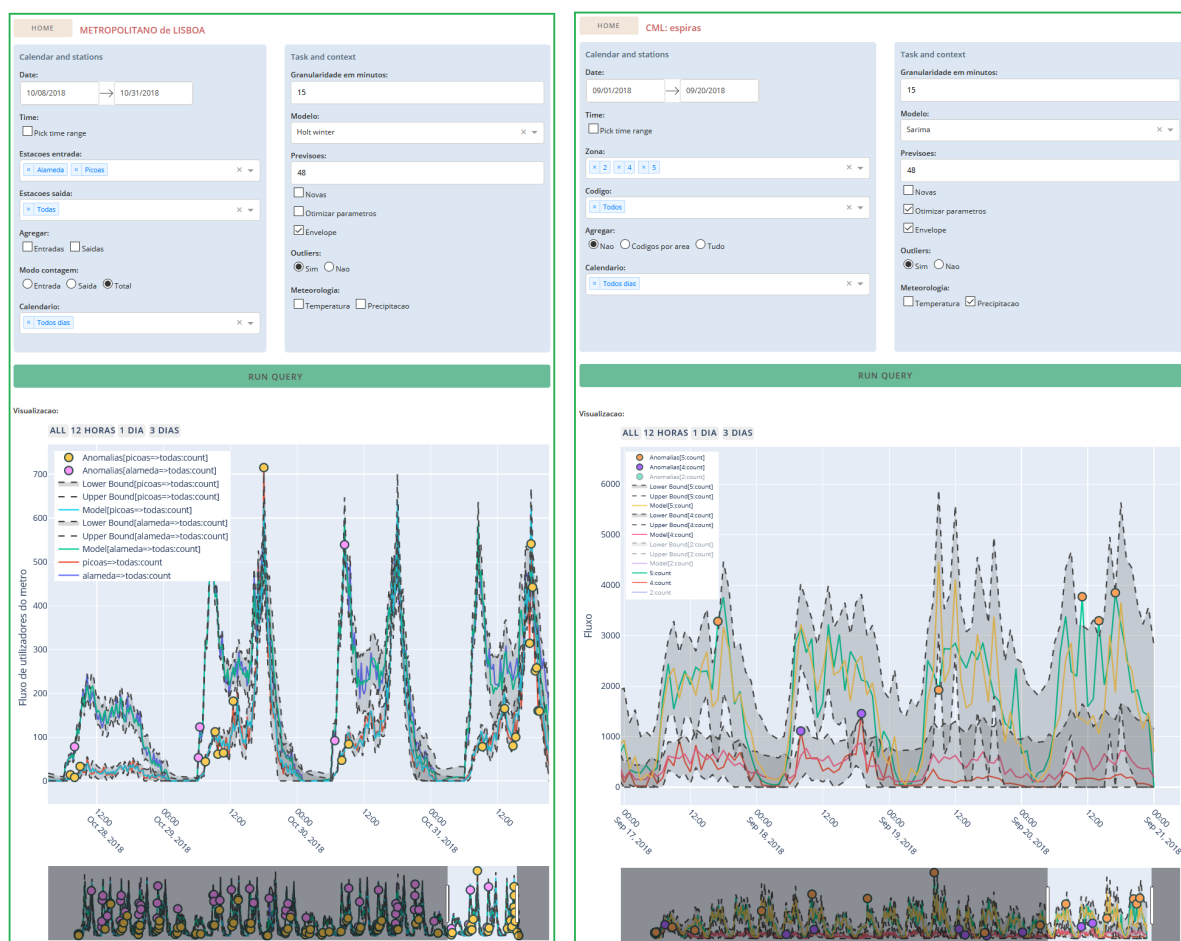


19 Previsão

Ao nível da previsão, a ILU APP faz um amplo recurso a abordagens de aprendizagem profunda e associativa para apoiar a previsão a curto-prazo do tráfego rodoviário e da procura na rede de transportes públicos, na ausência e presença de contexto situacional. Para este fim, é apenas necessária a selecção do modo de transporte, fontes de dados associadas (incluindo contexto disponível), granularidade temporal e períodos de histórico e previsão (possibilitando previsões de curto, médio ou longo prazo), e distribuição espacial da previsão sempre que desejado. Destacamos modelos de aprendizagem profunda baseados em LSTMs capazes de incorporar contexto histórico (e.g. ocorrências, registos meteorológicos) e prospetivo (e.g. previsões meteorológicas, eventos planeados) de acordo com arquiteturas sequenciais propostas no projeto ILU.

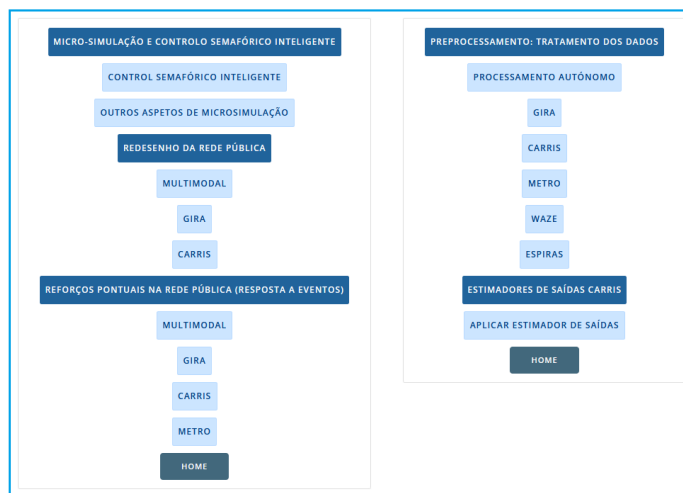


Os painéis de previsão são acompanhados de facilidades de navegação espaçotemporal, contribuindo para a usabilidade do utilizador. É também possível avaliar detalhadamente o comportamento dos modelos quando os dados referentes ao período sob previsão estão disponíveis.



20 Otimização

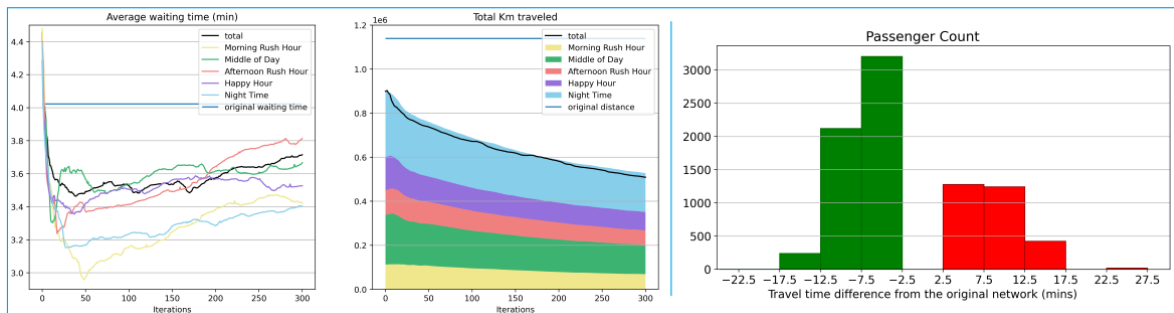
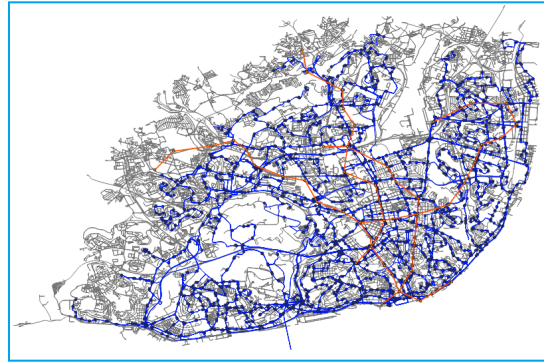
Em conformidade com os objetivos delineados na Tarefa 7, a ILU APP recorre a princípios de controlo e micro-simulação por forma a traduzir o conhecimento anterior em recomendações.



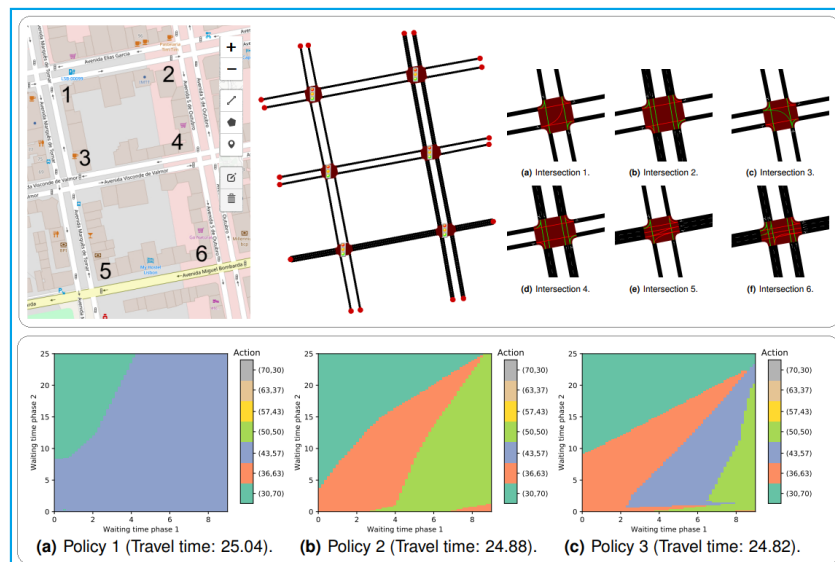
Neste contexto, são disponibilizados dois grandes conjuntos de facilidades:

1. otimizadores da oferta na rede de transportes públicos por forma a sugerir revisões ao roteamento e escalonamento de carreiras e apoiar necessidades de reforço. Tal como os módulos de descrição e previsão, também estas funcionalidades estão disponibilizadas publicamente como *open-source software* para a comunidade científica e transportadoras não parceiras:

- https://github.com/CronoPT/bus_network_optimization inclui facilidades de optimização multi-objetivo (e.g., novos algoritmos genéticos, geração e adaptação de rotas);
- https://github.com/CronoPT/gtfs_to_osm inclui facilidades de pre-processamento como projeções entre as redes de transportes (GTFS), rodoviária, ciclovável, e pedonal (OSM).



2. modelos de controlo semafórico inteligente. Estas facilidades têm um ponto de dependência com micro-simuladores, e, por conseguinte, não são facilidades stand-alone na ILU APP.



21 Outras facilidades

Finalmente, são ainda disponibilizadas na ILU APP contribuições complementares, incluindo:

- estimadores das saídas na rede da CARRIS (dada a ausência de validações nos destinos);

The screenshot shows the 'CARRIS: estimador de saídas' web application. It has a top navigation bar with 'HOME' and the title. The interface is divided into three main columns: Input, Modelo, and Output.

Input Column:

- Date:** Two date pickers showing '10/02/2018' and '10/16/2018'.
- Time:** A checkbox for 'Pick time range'.
- Paragens:** A dropdown menu with 'Todas' selected.
- Carreiras:** A dropdown menu with 'Todas' selected.
- Filtrar sentido:** A dropdown menu with 'Todos' selected.
- Calendário:** A dropdown menu with 'Todos dias' selected.

Modelo Column:

- Saídas:** Checkboxes for 'Transbordo' (checked), 'Movimento pendular' (checked), 'Metro' (unchecked), and 'Padrao' (unchecked).
- Pressupostos:** A dropdown menu with 'Todos' selected.
- Maxima distancia transbordo (metros):** A text input field with '1000'.
- Maximo tempo transbordo (minutos):** A text input field with '90'.

Output Column:

- Checkboxes for 'Atualizar saídas' (checked), 'Gerar saídas' (checked), 'Relatorio estatísticas' (checked), and 'Visualizar graficos' (checked).

At the bottom, there is a large green button labeled 'RUN QUERY'.

- algoritmos para o tratamento totalmente autónomo de dados urbanos, particularmente relevantes para lidar com dados ruidosos ou sujeitos a falhas, incluindo alguns dos sensores localizados na cidade (e.g., problemas de calibração nas espiras fixas no pavimento, falhas de transmissão no sistema de validação de viagens na rede GIRA/EMEL).



Parte VI:

Notas finais

22 Indicadores de realização

	planeado	executado	saldo
A - Publicações			
Artigos em revistas internacionais	6	17	+11
Artigos em revistas nacionais	0	0	0
Livros	0	0	0
B - Comunicações			
Comunicações em encontros científicos internacionais	9	23	+14
Comunicações em encontros científicos nacionais	2	2	0
C - Relatórios	3	32	+29
D - Organização de seminários e conferências	1	5	+4
E - Formação avançada			
Teses de Mestrado	6	18	+12
Teses de Doutoramento (concluídas)	1	0	-1
Teses de Doutoramento (em curso)	0	6	+6
F - Modelos	4	14	+10
G - Aplicações computacionais	3	12	+9
H - Instalações piloto	0	0	0
I - Protótipos laboratoriais	0	0	0
J - Patentes	0	0	0

23 Desvios e inclusões

Transcrição da comunicação de desvios e alterações ao plano extraída dos relatórios anuais FCT.

Primeiro ano (1/2019–12/2019)

A. Desvios na produção científica.

A1. Não existem atrasos na execução das tarefas em relação à proposta realizada.

A2. Complementarmente às contribuições e entregáveis especificados no plano de trabalhos, foi avaliada a possibilidade de incluir dois novos entregáveis:

- facilidades avançadas de navegação e visualização das múltiplas fontes de dados urbanos no contexto das Tarefas 3 e 4. Foi verificada a viabilidade de conduzir esta contribuição sem efeitos colaterais no esforço alocado às restantes atividades. Por forma a reforçar as competências associadas a esta contribuição, a inclusão da investigadora Elsa Cardoso à equipa do INESC-ID foi validada pela FCT a 26 de Julho de 2019;
- condução de uma demonstração piloto com recurso a instrumentos para controlo de tráfego a produzir no contexto da Tarefa 7. Para este fim, foram adicionados à equipa do projeto ILU, três investigadores do Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança do LNEC, cuja inclusão foi validada pela FCT a 3 de Setembro de 2019. No contexto do trabalho desenvolvido, foi verificado que a programação do caso de estudo prático implicaria, designadamente, a alteração de sistemas não-abertos e a recolha em campo de informação adicional não contida

no Laboratório de Dados Urbanos de Lisboa. Neste sentido, e atendendo à duração do projeto, verificou-se não ser viável a condução deste caso de estudo prático como contribuição adicional aos entregáveis já definidos na proposta do projeto ILU.

B. *Desvios na comunicação científica.* O número total de publicações científicas aceites (6 publicações) está em linha com o estimado. No entanto, foi apenas realizada uma publicação em revistas internacional. Este facto deve-se aos tempos alargados de revisão de artigos científicos em revistas de excelência, sendo esperada a recuperação e cumprimento deste indicador ao longo da duração do projeto.

C. *Desvios na execução orçamental.* Execução orçamental ligeiramente abaixo do estimado devido a dois fatores. Primeiro, na rubrica de bens e outros serviços, foi estimado um custo para a aquisição e instalação de sensores de tráfego rodoviário no valor total de 9400Eur. Este valor não foi executado dado que estes custos estão a ser suportados pelo nosso parceiro público, Câmara Municipal de Lisboa. Foi recentemente dirigido um e-mail à FCT para avaliar a possibilidade de converter estes fundos noutras rubricas. Segundo, existe um desfasamento temporal na contratação de recursos no LNEC. Esperamos corrigir este desvio ao longo de 2020.

Segundo ano 1/2020–12/2020

A. Desvios na produção científica.

A1. Não existem atrasos na execução das tarefas em relação à proposta realizada.

A2. No anterior relatório de progresso referente a 2019, foi avaliada no ponto A2 da secção de desvios à produção científica a possibilidade de adicionar uma nova contribuição de forma complementar e adicional aos objetivos do projeto ILU. Esta contribuição seria a condução de uma demonstração piloto com recurso a instrumentos para controlo de tráfego a produzir no contexto da Tarefa 7. Para este fim, foram adicionados à equipa do projeto ILU, três investigadores do Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança do LNEC. Nesse mesmo relatório de progresso, foi indicado que a programação do caso de estudo prático implicaria, designadamente, a alteração de sistemas não-abertos e a recolha em campo de informação adicional não contida no Laboratório de Dados Urbanos de Lisboa. Neste sentido, e atendendo à duração do projeto, verificou-se não ser viável a condução deste caso de estudo prático como contribuição adicional aos entregáveis já definidos na proposta do projeto ILU. Como resultado, foi realizado um pedido de desafetação dos investigadores dedicados a esta contribuição. O pedido foi validado pela FCT a 27 de Maio de 2020.

B. *Desvios na comunicação científica.* O número total de publicações científicas aceites (8 publicações aceites em 2020, 14 no total) está em linha com o estimado.

C. *Desvios na execução orçamental.* Execução orçamental ligeiramente abaixo do estimado devido a dois fatores. Primeiro, subexecução da rubrica de missões devido ao contexto pandémico. Mediante aferição de presença em conferências virtuais para 2021, no final do primeiro trimestre de 2021 será reavaliado o montante disponível na rubrica de missões por forma a identificar necessidades de conversão ou libertação de valor. Segundo, existe ainda um desfasamento temporal na contratação de recursos humanos no LNEC. No entanto, é esperada a correção deste desvio ao longo de 2021.

Terceiro ano (1/2021–12/2021)

A. *Desvios na produção científica.* Não existem atrasos na execução das tarefas em relação à proposta realizada. Complementarmente às contribuições e entregáveis especificados no plano de trabalhos inicial, foram aprovadas (10383392) em 2021 três novas subtarefas (6B, 7B e 8B) motivadas pela necessidade de incorporar aspetos de resiliência no planeamento da mobilidade urbana devido ao impacto do atual contexto pandémico nos diferentes modos de transporte:

- Tarefa 6-B que visa estender os modelos descritivos e preditivos da mobilidade urbana para contextos pandémicos, caracterizados por alterações significativas no volume e distribuição da procura por modo de transporte;
- Tarefa 7-B que responde à necessidade de apoiar o redesenho do roteamento e escalonamento de carreiras no município de Lisboa de forma multimodal e resiliente para responder às dinâmicas mudanças observadas em contexto pandémico;
- Tarefa 8-B, correspondente à necessidade de responder a requisitos adicionais colocados pelas transportadoras, em particular facilidades de imputação de saídas na CARRIS, identificação de transbordos por passageiro no METRO, e inferência de matrizes origem-destino multimodais.

O desenvolvimento das contribuições associadas a estas tarefas, e respetiva produção dos entregáveis, está a decorrer sem desvios, tendo já sido desenvolvidos diversos modelos computacionais que se encontram já disponíveis nos parceiros e descritos em publicações científicas.

B. *Desvios na comunicação científica.* Sem desvios. O número total de publicações científicas aceites está em linha com o estimado: 28 publicações no total (12 em revista, 16 em conferência), das quais 18 publicações aceites em 2021. Dada a dimensão e relevo societal do projeto ILU, a equipa espera continuar a produzir publicações científicas de elevado relevo no último semestre do projeto. Adicionalmente, os membros equipa do projeto ILU estão ativamente envolvidos no apoio à realização em Lisboa de um dos maiores forums mundiais em Transportes (TRA, <https://traconference.eu/>), que realizar-se-á em 2022 em Lisboa.

C. *Desvios na execução orçamental.* Tendo em conta a extensão da data de término do projeto, a execução orçamental está em linha com o esperado, sendo esperada uma elevada taxa de execução nas principais rúbricas. Salienta-se, no entanto, o risco de subexecução da rúbrica de missões devido à elevada redução de custos com missões internacionais por força da realização online das mesmas em contexto pandémico.

Relatório final

A. *Desvios na produção científica*

A1. Não ocorreram desvios à calendarização das tarefas planeadas na proposta inicial, tendo as mesmas sido realizadas com sucesso no tempo previsto.

A2. O projeto sofreu uma extensão de 6 meses face ao planeamento original (10383392) por forma a incluir três novas subtarefas (6B, 7B e 8B), aprovadas em 2021 (10383392), e motivadas pela necessidade de incorporar aspetos de resiliência no planeamento da mobilidade urbana devido ao impacto do atual contexto pandémico nos diferentes modos de transporte. O dossier em anexo,

inclui a timeline original e atualizada resultante da inclusão destas novas subtarefas. Não ocorreram desvios à execução destas novas subtarefas (6B, 7B e 8B), tendo as mesmas sido realizadas com sucesso no tempo previsto.

B. *Desvios na comunicação científica.* Não ocorreram desvios por defeito, tendo sido realizadas 42 publicações revistas-por-pares:

- 17 publicações científicas em revistas internacionais Q1 (ISI/SJR), i.e. +11 que estimado;
- 23 publicações nas conferências internacionais de maior visibilidade nos domínios do ILU, i.e. +14 que estimado;
- 2 publicações em conferências nacionais, em linha com estimado;
- mais de 5 publicações arXiv, atualmente sob revisão em revistas/conferências de referência.

Restantes objetivos de comunicação científica em linha com estimado (detalhes no dossier anexado):

- noticição ampla do projeto ILU na comunicação social (Agência Lusa, DN);
- organização de duas conferências (ETC 2021, TRA 2022) e 3 seminários com parceiros e transportadoras, abertos ao público;
- 12 pacotes de software e 1 sistema de recomendação.

24 Execução Orçamental

A. *Taxas de execução*

- execução do orçamento total do projeto acima de 90%;
- INESC-ID e LNEC com taxas aproximadas de execução de 95% e 85%, respetivamente;
- execução da rubrica de recursos humanos de 95%;
- cada restante rubrica (equipamento, missões, demonstração e divulgação dos resultados, aquisição de outros bens e serviços) com taxas estimadas de execução acima de 70%.

B. *Alterações face ao plano inicial*

Foram aprovadas as seguintes conversões centrais:

- a elevada redução de custos com missões internacionais por força da realização online das mesmas em contexto pandémico motivou a conversão de 7k Eur (Missões) em 7k Eur em Demonstração de Resultados (#10383391)
- a aquisição de bens pelo parceiro público (CML) motivou a conversão de 9.4k Eur (Aquisição de Bens) em 5.5k + 2.7k Eur em Recursos Humanos e 1.2k Eur Missões (#10241283/#10270004/#10479743)
- a atualização dos valores anuais das bolsas motivaram a conversão de 1k Eur da rubrica de Missões em 1k Eur em Recursos Humanos (#10479743).

Complementarmente às conversões indicadas, a rubrica de Recursos Humanos sofreu alterações locais no número e tipologia de bolsas (#10311038/#10241283/#10383391) por forma a acomodar um maior número de bolseiros no projeto (16 mestrandos, 4 doutorandos, 2 pós-doutorandos).

C. Sumário do orçamento aprovado e executado

C1. Orçamento aprovado

Rúbrica	Total (kEur)	INESC-ID (kEur)	LNEC (kEur)
Global	299.7	189.5	110.2
Recursos Humanos	188.0	117.7	70.3
Equipamento	15.4	8.6	6.8
Missões	15.9	12.8	3.1
Demonstração e Divulgação dos Resultados	17.4	10.6	6.8
Aquisição de Outros Bens e Serviços	2.4	1.2	1.2

C2. Orçamento executado (estimativa dada a presença de faturas sob aprovação)

Rúbrica	Total (kEur)	INESC-ID (kEur)	LNEC (kEur)
Global	274.9	181.3	93.7
Recursos Humanos	181.5	117.5	64.0
Equipamento	12.0	8.5	3.5
Missões	11.6	9.5	2.1
Demonstração e Divulgação dos Resultados	12.2	8.0	4.2
Aquisição de Outros Bens e Serviços	2.5	1.3	1.2

25 Impactos sociais esperados

Excertos do pedido de comunicação dirigido pela FCT ao PI em 2020

Impactos esperados para o cidadão. A otimização da mobilidade urbana alinhada com os dados de tráfego urbanos permitirá: 1) detetar e colmatar vulnerabilidades existentes na oferta de transportes públicos e na circulação rodoviária; 2) que as decisões tomadas pelo município e transportadoras sejam totalmente transparentes para o cidadão (objetivamente derivadas a partir dos dados reais); 3) um alinhamento continuado da rede de transportes públicos com as atuais transformações na cidade, garantindo que a oferta acompanha as emergentes mudanças à procura na cidade, uma necessidade crescente dadas as transformações e novas normativas observadas em contexto pandémico.

A título ilustrativo, a identificação de padrões de deslocação multimodal a partir das validações de títulos na rede pública de transportes permite: compreender necessidades de transbordos entre diferentes pontos da cidade com vista a equidade de acessos; melhorar interfaces na rede de transportes (incluindo fluxos com rede cicloviável); e identificar sinergias ao nível da oferta que possam estar subexploradas. A identificação destes padrões multimodais tem ainda o potencial de revelar necessidades de reforço ao nível da oferta (ao nível do planeamento estratégico) e, na presença de eventos planeados ou ocorrências inesperadas, identificar necessidades de reforço temporário (ao nível da gestão operacional da oferta).

O projeto ILU disponibiliza ainda contribuições iniciais em duas outras áreas de atuação, que podem ser aprofundadas em subsequentes projetos científicos. Primeiro, gestão inteligente de semáforos, painéis eletrónicos, e parques de estacionamento na cidade. Segundo, a operacionalização, expansão

e balanceamento inteligente da rede GIRA e novos velocípedes.

Complementarmente aos benefícios identificados, o projeto ILU impulsionará uma gestão da mobilidade centrada nos dados, focada nas necessidades do cidadão, transparente e potencialmente auditável pelo cidadão.

Impactos na administração pública. O sistema de recomendação ILU APP é pioneiro em mobilidade urbana, permitindo uma análise multimodal, dinâmica e sensível ao contexto do tráfego urbano; oferecendo um meio para uma coordenação objetiva e transparente entre os operadores, autoridades e municípios, capaz de permitir um alinhamento continuado da rede de transportes com as atuais transformações na cidade. Este sistema de recomendação, entregue sob a forma de um protótipo funcional aos parceiros públicos do projeto, permite apoiar:

- decisões estratégicas (ligadas ao planeamento da mobilidade da cidade); e
- decisões operacionais (e.g. sinalização de vulnerabilidades, reforços à oferta).

O sistema ILU APP está desenhado por forma a satisfazer os requisitos de qualidade (interoperabilidade, modularidade, confiabilidade, usabilidade, integridade de dados, acessibilidade, extensibilidade) e pode ser configurado de forma segura num servidor, permitindo um acesso continuado e seguro pelo browser ou, em alternativa, de forma programática com recurso a APIs padrão.

A nível das tarefas de descrição, são suportados mecanismos para a descoberta de padrões de tráfego, incluindo padrões frequentes, periódicos, emergentes e padrões anómalos. Por exemplo, a descoberta de padrões emergentes no tráfego rodoviário contempla congestionamentos cuja recorrência no tempo, limites máximos à velocidade de circulação ou extensão espacial tem vindo progressivamente a crescer ou decrescer. Outro exemplo, a descoberta de padrões anómalos na rede de transportes públicos deteta por sua vez desvios significantes entre a procura observada e a esperada, permitindo uma sinalização automática destas ocorrências por forma a permitir a atuação das transportadoras sempre que necessário. Ainda ao nível da descrição, uma das facilidades de maior relevância para os parceiros públicos é a inferência de matrizes origem-destino de forma dinâmica e multimodal (sensível a transbordos entre diferentes operadores) a partir dos movimentos individuais na rede dada por validações no sistema VIVA card. As matrizes origem-destino permitem obter uma visão detalhada dos principais fluxos na cidade ao longo do dia, e detetar vulnerabilidades na rede pública de transportes, como aspetos de equitatividade nas deslocações entre diferentes pontos na cidade.

Ao nível das tarefas de previsão, a ILU APP faz um amplo recurso a abordagens de aprendizagem profunda e associativa para apoiar a previsão a curto-prazo do tráfego rodoviário e da procura na rede de transportes públicos, na ausência e presença de contexto situacional. Recentemente, o recurso à ILU APP permitiu medir o impacto causado pela presença de histórico e prospeção meteorológica na previsão de fluxos na rodovia e ciclovias.

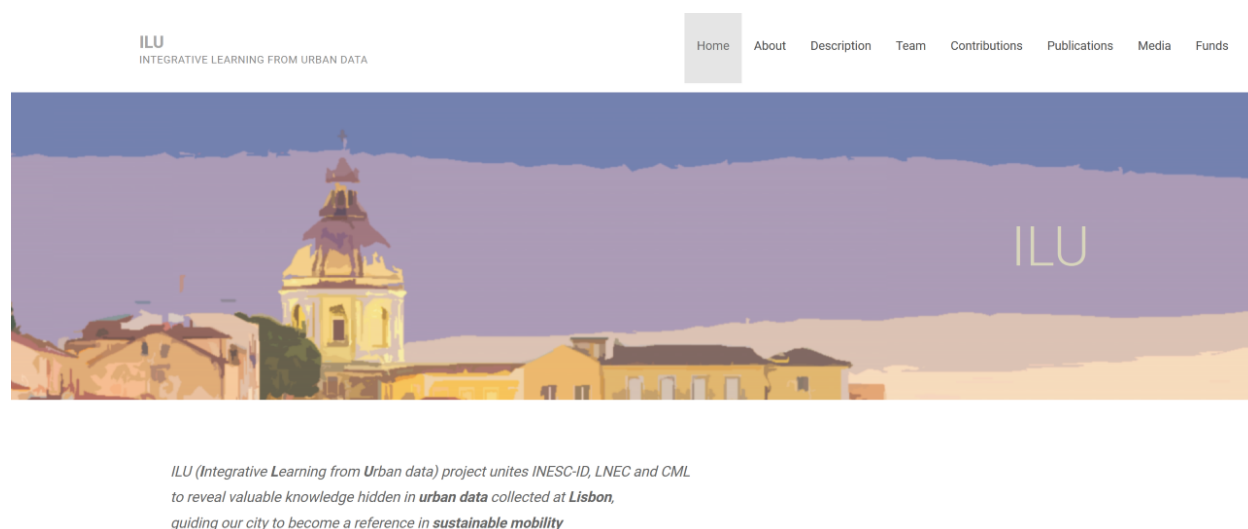
Ao nível das tarefas de decisão/otimização, a ILU APP recorre a princípios de controlo e micro-simulação por forma a traduzir o conhecimento anterior em recomendações. Em particular, modelos de controlo semaforico inteligente, bem como otimizadores da oferta na rede de transportes públicos, incluindo revisões ao atual roteamento, capacidade e frequência.

Finalmente, são ainda disponibilizadas contribuições complementares, incluindo estimadores de saídas na rede da CARRIS e algoritmos para processamento autónomo de dados urbanos, dada elevada susceptibilidade de algumas fontes a ruído e falhas.

26 Website

O site do projeto ILU foi criado no primeiro trimestre de vida e, em conformidade com o regulamento para projetos financiados pela FCT, é um espaço de partilha de informação de relevo ligada ao projeto. O site possibilita a consulta de informação por parte da FCT (entidade financiadora), entidades que participam no projeto, e público em geral. Tem os seguintes propósitos:

- permitir o acesso a informação essencial relativa ao projeto: âmbito, objetivos, fundos
- listar as principais contribuições do projeto, incluindo publicações científicas
- incluir iniciativas de divulgação, incluindo notificação nos media, e outros eventos de relevo
- descrever os principais marcos atingidos e outras notas associadas ao progresso dos trabalhos



FIM