

MESTRADO
DECISÃO ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
RELATÓRIO DE ESTÁGIO

OTIMIZAÇÃO DE PERCURSOS DE FISCALIZAÇÃO
APEADA DE ESTACIONAMENTO

REINALDO DA SILVA FERREIRA

OUTUBRO – 2016

MESTRADO EM DECISÃO ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO RELATÓRIO DE ESTÁGIO

OTIMIZAÇÃO DE PERCURSOS DE FISCALIZAÇÃO
APEADA DE ESTACIONAMENTO

REINALDO DA SILVA FERREIRA

ORIENTAÇÃO:

PROFESSORA DOUTORA MARIA MARGARIDA DE OLIVEIRA
MOZ CARRAPA

ENGENHEIRO VASCO FERNANDES PIRES DAMAS MÓRA
ENGENHEIRO JOÃO NUNO AZEVEDO DE ALMEIDA RIBEIRO

OUTUBRO – 2016

- *Aos Meus Pais*

AGRADECIMENTOS

Numa tese de mestrado muitos estão sujeitos ao processo solitário que o seu desenvolvimento envolve, porém, uma tese de mestrado apenas está completa quando tem o contributo de várias pessoas das mais diversas áreas que de uma forma ou de outra tiveram influência.

Assim, deixo algumas palavras com os meus mais sinceros agradecimentos a todos os que de alguma forma contribuíram e me apoiaram nesta fase da minha formação académica.

Às *Coordenadoras do Mestrado* de Decisão Económica e Empresarial, agradeço a oportunidade de frequentar este mestrado, que tanto contribuiu para o meu desenvolvimento. E por todo o apoio direto e indireto desde o início do mestrado.

À *Prof.^a Doutora Margarida Vaz Pato* e ao *Dr. João Dias* pela proposta deste estágio, que sem dúvida se revelou numa experiência única a todos os níveis.

À *Prof.^a Margarida Moz*, agradeço toda a orientação e paciência. Sei que não poderia ter pedido por melhor orientação. E acima de tudo agradeço por todo o conhecimento transmitido, e por estar sempre presente mesmo nos momentos mais difíceis. Muito obrigado, por acreditar em mim e nas minhas capacidades.

À *EMEL*, os meus sinceros agradecimentos por esta oportunidade. Agradeço a todos os colaboradores com quem tive contacto e que me ajudaram neste estágio, em especial ao *Eng.^o Vasco Mora* e *Eng.^o João Ribeiro*, um agradecimento especial por toda a orientação e dedicação, por me terem posto fora da caixa e por todo o conhecimento transmitido.

A todos os *meus amigos*, agradeço toda a paciência e apoio. Sei que não foi fácil aguentar o meu mau feitio, mas não é mais que a vossa obrigação. Desculpem pela ausência, e obrigado por tudo.

À *minha irmã*, obrigado por todo o apoio e força nos momentos mais difíceis, pelas gargalhadas e alegria que transbordam e que levas sempre contigo para todo o lado e a todo o tempo.

Aos *meus pais*, que me ensinaram a lutar por aquilo em que acredito, e que aspiro a ser. Com vocês aprendi que quando a vontade é muita e o trabalho ainda é maior não existem limites para o que podemos alcançar. Obrigado pela oportunidade de realizar mais esta etapa da minha vida. A vocês, dedico este trabalho.

RESUMO

A EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A., é a entidade pública responsável pela gestão e fiscalização do estacionamento tarifado no município de Lisboa. Devido à crescente procura de estacionamento, a EMEL pretende que os seus Agentes de Fiscalização de Estacionamento (AFE) estejam presentes onde são mais necessários.

É função do AFE garantir que os utilizadores do estacionamento tarifado efetuam o respetivo pagamento, intervindo na presença de incumprimentos às normas de estacionamento presentes no Código da Estrada e legislação complementar.

A necessidade de fiscalização de um segmento de rua é determinada por um índice, designado por criticidade, que varia consoante a hora do dia. A criticidade depende de um conjunto de fatores, tais como, o tipo de tarifa aplicada, histórico de denúncias emitidas e tipo de infrações cometidas.

Dada a complexidade da dinâmica de estacionamento na cidade, a EMEL pretende um procedimento automático para construir percursos diários para cada AFE. Sendo que os percursos devem respeitar as limitações horárias dos turnos de cada AFE, e garantir que um segmento não é fiscalizado mais do que uma vez durante duas horas consecutivas.

Este problema é formulado numa rede orientada, onde os nós representam cruzamentos ou entroncamentos e os arcos representam segmentos ou ligações sem estacionamento tarifado (conectores). A cada arco está associado um benefício (criticidade), assim como um tempo de deslocação. Alguns arcos têm ainda associado um tempo de fiscalização. O objetivo do problema é determinar percursos de fiscalização para cada AFE maximizando uma função que representa a criticidade total que é a soma das criticidades dos segmentos que compõem os percursos determinados.

Depois de apresentados os procedimentos de recolha e armazenamento dos dados necessários são propostas heurísticas, uma construtiva e duas melhorativas, que retornam percursos diários para cada um dos AFE. Serão também apresentados e comentados os resultados das heurísticas propostas.

Palavras-Chave: Estacionamento; Fiscalização de Estacionamento; Agentes de Fiscalização de Estacionamento; Problemas com procura nos arcos; Heurísticas.

ABSTRACT

EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A., is a company owned by the Municipality of Lisbon who is in charge to manage and supervise on-street parking in the city. With the increasing demand for street parking, EMEL has the challenge of allocating efficiently the parking enforcement officers (PEO) assigned to on-street parking enforcement.

The PEO must ensure that the users of the street parking spots pay the correspondent fee, and also grantee that they respect the existing parking rules established in legislation.

The need of enforcement in each street is measured by an index named criticality, which vary with the hour of the day. The criticality depends on the occupancy rate per hour, the type of fee applied on the area, the historic of fines issued, the type of infringement, among others.

Due to the complexity of on-street parking in the city, EMEL aims at determining an automatic procedure to construct daily routes for each PEO. The daily routes must satisfy the PEO work schedules, not allowing a street segment to be supervised more than once on two following hours.

The problem is formulated in a network where nodes represent street intersections and arcs represent street segments between intersections. Each arc has a benefit (the criticality) associated, and a traversing time that consists in a crossing time without supervision. For some arcs an enforcement time is also considered if it is traversed with supervision. The objective is to maximize a function that represents the sum of criticality of the selected routes.

In this study, after collecting all the required data, a constructive heuristic and two improvement heuristics which return a daily route for each PEO are proposed. Computational results from experiments carried out on real data based instances will be presented.

Keywords: Street Parking; Street Parking Enforcement; Parking Enforcement Officers; Arc Routing Problem; Heuristics.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	VI
ÍNDICE DE QUADROS	VII
GLOSSÁRIO	VIII
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
I.1. Enquadramento	1
I.2. Objetivos do estágio	2
I.3. Estrutura do relatório de estágio	3
CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	4
II.1. EMEL	4
II.2. Fiscalização	4
II.3. Descrição do problema	7
II.4. Recolha de dados	10
CAPÍTULO III: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
CAPÍTULO IV: DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	15
IV.1. Tratamento de dados no <i>Software</i>	15
i. Construção da rede	15
ii. Cálculo da criticidade	17
iii. Tempo de deslocação e fiscalização	19
IV.2. Formalização do problema	20
IV.3. Heurísticas	23
i. Heurística construtiva	23
ii. Heurísticas melhorativas	28

CAPÍTULO V: RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	31
V.1. Análise comparativa de resultados das heurísticas	31
V.2. Análise de parâmetros	32
i. Denúncias esperadas	32
ii. Tempo de deslocação	33
V.3. Semana de testes piloto	34
CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS	39
ANEXOS	41
Anexo 1 – Plano de estágio	41
Anexo 2 – Escalas de trabalho dos AFE	43
Anexo 3 – Área de atuação do estágio.	43
Anexo 4 – Rede	44
Anexo 5 – Rede de deslocação/fiscalização dividida em subzonas	45
Anexo 6 – Resultados das instâncias de teste	47
Anexo 7 – Resultados da análise de parâmetros para as denúncias esperadas	48
Anexo 8 – Resultados da análise de cenários para tempos de deslocação	49
Anexo 9 – Resultados semana de testes piloto	49

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Procedimentos e ações de fiscalização para cada veículo	6
Figura 2 - Ligações em ruas com um sentido e estacionamento num único lado	16
Figura 3 - Ligações em ruas com dois sentidos e estacionamento nos dois lados	16
Figura 4 - Ligações em ruas com estacionamento em ambos os lados e placa central	16
Figura 5 - Ligações em ruas com um sentido e estacionamento nos dois lados	17
Figura 6 - Procedimento geral da heurística construtiva	26
Figura 7 - Procedimento de seleção de arcos da heurística construtiva	26
Figura 8 - Procedimento de verificação de tempo da heurística construtiva	27
Figura 9 - Procedimento de adição de arcos ao percurso da heurística construtiva	28
Figura 10 - Procedimento geral das heurísticas melhorativas	29
Figura 11 - Procedimento melhorativo para a heurística melhorativa M1	29
Figura 12 - Procedimento melhorativo para a heurística melhorativa M2	30
Figura 13 - Horários de fiscalização dos AFE e de exploração de estacionamento	43
Figura 14 - Zona 022 – Av. João XXI	43
Figura 15 - Rede de deslocação construída no âmbito do estágio	44
Figura 16 - Rede da subzona 1	45
Figura 17 - Rede da subzona 2	45
Figura 18 - Rede da subzona 3	46
Figura 19 - Rede da subzona 4	46
Figura 20 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 23 de setembro	49
Figura 21 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 26 de setembro	50
Figura 22 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 27 de setembro	50
Figura 23 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 30 de setembro	50
Figura 24 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 28 de setembro	50

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 1 - Variáveis e parâmetros da heurística construtiva	25
Tabela 2 - Variáveis e parâmetros das heurísticas melhorativas	28
Tabela 3 - Plano de estágio – Fiscalização de estacionamento	41
Tabela 4 - Resultados para a segunda instância de teste	47
Tabela 5 - Resultados para a primeira instância de teste	47
Tabela 6 - Valores da ponderação das n últimas fiscalizações	48
Tabela 7 - Resultados finais da primeira e segunda semanas sobre a análise comparativa entre denúncias realizadas e esperadas	48
Tabela 8 - Resultados da análise dos tempos de deslocação com diferentes cenários para dois percursos fixos de fiscalização realizados	49

GLOSSÁRIO

AFE – Agente de Fiscalização de Estacionamento

AOP – *Arc Orienteering Problem*

ARP – *Arc Routing Problem*

CE – Código da Estrada

CMC – Caminho Mais Curto

CML – Câmara Municipal de Lisboa

EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa

GRASP - *Greedy Randomised Adaptive Search Procedure*

ISEG – Instituto Superior de Economia e Gestão

MBCPP – *Maximum benefit Chinese Postman Problem*

MS – *Microsoft*

PATP – *Profitable Arc Tour Problem*

PCRPP – *Prize-Collecting Rural Postman Problem*

PMCARP – *Profitable Mixed Capacitated Arc Routing Problem*

RGE – Regulamento Geral de Estacionamento e Paragem na Via Pública

SA – Solução Admissível

SQL – *Structured Query Language*

TOARP – *Team Orienteering Arc Routing Problem*

UCARPP – *Undirected Capacitated Arc Routing Problem with profits*

UL – Universidade de Lisboa

VBA – *Visual Basic for Applications*

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

I.1. Enquadramento

O presente relatório de estágio surge no âmbito de um protocolo celebrado entre a EMEL E.M., S.A. (Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa) e o ISEG – UL (Instituto Superior de Economia e Gestão da Universidade de Lisboa).

Neste contexto, e no âmbito do Departamento de Exploração de Estacionamento, a EMEL propõe o desafio de desenvolver um instrumento de apoio a uma gestão mais eficiente, relacionada com a alocação dos seus recursos, nomeadamente os Agentes de Fiscalização de Estacionamento (AFE), onde são mais necessários. Pretende-se com este estágio o desenvolvimento de um estudo sobre a otimização dos percursos de fiscalização dos AFE, com a finalidade de conceber um *software* em MS Access.

Atualmente observa-se uma crescente preocupação em tornar as cidades contemporâneas cada vez mais inteligentes, organizadas e sustentáveis, de modo a solucionar problemas que advêm da intensiva utilização do espaço público. O crescente volume e exigências de deslocação, característicos de cidades onde o meio de transporte predominante é o automóvel, incentivam a necessidade de melhorar as condições de mobilidade. Boas condições de mobilidade quer de peões, quer de automobilistas são fundamentais para assegurar e elevar a qualidade de vida dos habitantes/visitantes, bem como, para atenuar as consequências do intenso tráfego automóvel [1].

A fiscalização de estacionamento na via pública apresenta-se como um instrumento fundamental para a aplicação das políticas de estacionamento público, onde as condições de mobilidade assumem uma grande relevância. Assim, na fiscalização está a garantia de que as normas de estacionamento vigentes no Código da

Estrada (CE) [2], Regulamento Geral de Estacionamento e Paragem na Via Pública (RGE) [3], e respetiva legislação complementar são respeitadas.

O estudo da problemática da otimização dos percursos de fiscalização é também incentivado pelo plano de expansão da EMEL para 2016 e 2017, no qual está previsto o início da exploração de estacionamento num conjunto de novas zonas regulamentares [4, p. 7]. Neste contexto a otimização dos percursos dos AFE revela-se crucial, uma vez que o rácio entre o número de lugares de estacionamento tarifado e o número de AFE (510 lugares/AFE [5, p. 15]) apresenta valores acima dos recomendados (200 a 250 lugares/AFE [6, p. 227]), apesar do crescente investimento na formação de novos AFE [5, p. 15] e modernização tecnológica.

Assim, o objeto deste estágio é a “Otimização de Percursos de Fiscalização Apeada de Estacionamento”.

I.2. Objetivos do estágio

A motivação para este estágio foi a aplicação e desenvolvimento dos conhecimentos adquiridos ao longo da minha formação académica, nomeadamente no mestrado em Decisão Económica e Empresarial, sobretudo nas áreas de Investigação Operacional, Logística e Redes e Computação.

O objetivo do estágio é conceber uma ferramenta, em *MS Access*, a disponibilizar à empresa no final do estágio, que incorpore o processo de otimização dos percursos de fiscalização dos AFE, e procedimentos complementares, contribuindo assim para uma fiscalização mais eficiente e eficaz.

Foi desenvolvido e aprovado pela EMEL e pelo ISEG um plano de estágio, cujas fases se podem consultar no Anexo 1. Neste são evidentes seis fases de desenvolvimento: 1) Realizar um plano de estágio; 2) elaborar um índice de criticidade, associado a um conjunto de elementos dinâmicos que define a necessidade de

fiscalização de uma rua numa determinada hora; 3) construir uma rede de deslocação/fiscalização dos AFE; 4) determinar uma função para o cálculo dos tempos de deslocação e fiscalização associados a cada rua; 5) propor um modelo matemático adequado ao problema da fiscalização e desenvolver métodos heurísticos de resolução do problema, em MS Access, utilizando a linguagem de programação VBA; 6) conceber um painel de análise entre percursos determinados pelo *software* e realizados pelos AFE (*dashboard*), Anexo 9.

I.3. Estrutura do relatório de estágio

O presente relatório de estágio está estruturado em seis capítulos. O capítulo II trata o enquadramento do problema. Após uma breve introdução sobre a empresa onde o estágio foi realizado, são descritos os aspetos relevantes no contexto da fiscalização. Descreve-se ainda neste capítulo o problema da otimização de percursos de fiscalização e o procedimento de recolha de dados. No capítulo III, expõe-se uma pesquisa sobre problemas de *Arc Routing*, em que o problema em estudo se insere, envolvendo também metodologias de resolução apresentadas pelos autores para esta categoria de problemas.

O capítulo IV é composto pela metodologia aplicada, onde é apresentado o *software*, a formalização do problema e são descritas as heurísticas, construtiva e melhorativas, propostas. Resultados obtidos em instâncias do problema são expostos e comentados no capítulo V, bem como uma análise de parâmetros e resultados obtidos na semana de testes piloto.

O capítulo VI é reservado a conclusões, onde são mencionadas as principais limitações da abordagem desenvolvida e potenciais desenvolvimentos futuros.

Por fim, são apresentadas referências bibliográficas que foram consultadas e que serviram de base para os desenvolvimentos teóricos e metodológicos concretizados durante o estágio.

CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

II.1. EMEL

A EMEL é uma entidade pública que tem como objeto social “a prestação de serviços de interesse geral no âmbito do desenvolvimento, gestão e exploração de soluções de mobilidade urbana, as quais incluem a construção, promoção e gestão de infraestruturas de estacionamento público urbano, a fiscalização do estacionamento público urbano” Art.º 3º nº1 dos Estatutos EMEL [7].

A empresa possui um único acionista, a Câmara Municipal de Lisboa (CML), e a sua Missão consiste no desenvolvimento de soluções de melhoria do estacionamento em Lisboa, e consequentes condições de mobilidade, proporcionando uma melhor qualidade de vida aos residentes e visitantes. “Ser *benchmark* nacional e internacional de estacionamento e mobilidade, contribuindo para que Lisboa seja uma *Smart city*” é a sua Visão [4, p. 3].

Desde 2010, a EMEL, tem vindo a progredir para um novo conceito de mobilidade e de gestão do espaço público [4, p. 1]. Assim, a EMEL assume o compromisso de “tornar Lisboa uma cidade mais moderna, mais acessível e mais sustentável, assegurando o necessário equilíbrio económico e social com o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas, de forma continuada e numa perspetiva de longo prazo.” [8].

II.2. Fiscalização

A fiscalização de estacionamento tarifado é delegada pela CML à EMEL segundo o Art.º 62º nº2 do RGE [3], e define-se como um instrumento essencial para a defesa dos residentes e da circulação na cidade, garantindo o respeito pelas regras de estacionamento e evitando a ocorrência de infrações prejudiciais à normal mobilidade

dos peões e automobilistas. Contudo, a ação de fiscalização apresenta um elevado peso nos custos e um reduzido contributo direto para as receitas da empresa [9].

A ação de fiscalização é uma atividade “intensiva em pessoal”, pois exige uma monitorização frequente do estacionamento na via pública, ao longo de todo o horário de exploração e numa ampla área, o município de Lisboa. Assim, é do interesse da EMEL desenvolver instrumentos de apoio que proporcionem aumentos na eficiência e eficácia da fiscalização, contribuindo para um maior cumprimento das regras de estacionamento.

A EMEL, em 2016, conta em média com 115 AFE por mês, para fiscalizar 52 300 lugares de estacionamento, tendo também autoridade para intervir na presença de infrações ao CE, em locais não destinados ao estacionamento de veículos. Esta autoridade advém do artigo 5.º n.º 3 al. c) do Decreto-Lei n.º 44/2005, de 23 de fevereiro [10, pp. 28-29], no qual os AFE são equiparados a agentes de autoridade, com as devidas limitações que surgem dos diferentes estatutos e competências delegadas.

Cada AFE trabalha em média 7,5 horas por dia, em dois turnos separados pelo tempo para almoço. O horário de exploração compreende o período diário em que os utilizadores de estacionamento devem pagar a respetiva tarifa de utilização. Por norma este é compreendido entre as 9 e as 19 horas nos dias úteis e entre as 9 e as 13 horas aos sábados, salvo algumas exceções. De modo a garantir que o horário de exploração é inteiramente coberto, existem duas escalas de trabalho distintas (ver Anexo 2).

O AFE no desempenho das suas funções, Art.º n.º 63º do RGE [3], tem um conjunto de procedimentos e ações que deve realizar. Ao aproximar-se de um veículo estacionado numa zona tarifada – “local da via pública especialmente destinado, por construção ou sinalização, ao estacionamento de veículos”, artigoº 1, al. aa) do CE [2, p. 10] – o AFE deve efetuar uma pesquisa visual que consiste em verificar a existência

de um talão de pagamento ou dístico (residente, empresa ou outro) válido. Se o veículo tiver um talão ou dístico válido o AFE deve seguir para o próximo veículo, caso contrário deve realizar uma pesquisa digital, de modo a verificar se este está a utilizar um meio de pagamento *digital* ou se, apesar de não visível, apresenta algum dístico válido nos sistemas da EMEL.

Após realizar a pesquisa digital, se o AFE verificar um incumprimento, então deve emitir uma denúncia. Define-se por denúncia a ação do AFE perante uma infração às regras de estacionamento presentes na legislação. Na inexistência de infrações, o AFE deve seguir para o próximo veículo. Compete também ao AFE emitir uma denúncia a cada veículo estacionado numa zona não destinada a estacionamento.

Os procedimentos e as ações para cada veículo, descritos nos parágrafos anteriores, são representados no fluxograma apresentado na Figura 1.

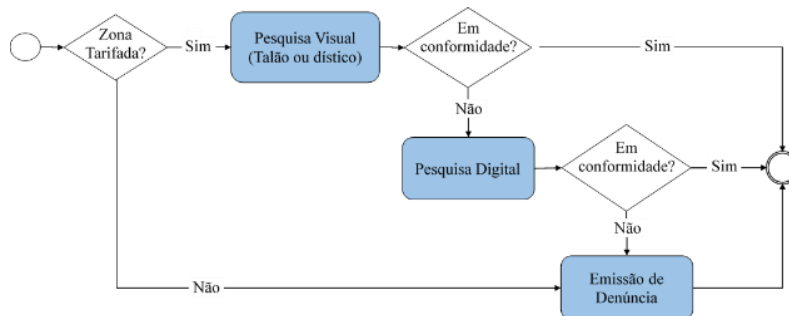


Figura 1 - Procedimentos e ações de fiscalização para cada veículo

As regras, descritas no CE, RGE e demais legislação, que delimitam o estacionamento na via pública determinam o tipo de infração. Relativamente a estas infrações, existem prioridades de intervenção determinadas pela EMEL suscetíveis de mudanças ao longo do tempo ou de área para área, consoante a evolução da dinâmica de estacionamento na cidade. Atualmente, os níveis de prioridade de intervenção são:

- Prioridade 1 – Infrações diretamente relacionadas com a mobilidade pedonal, por exemplo, estacionamento em cima dos passeios ou passeadeiras.

- Prioridade 2 – Todos os restantes tipos de infração relativa a estacionamento em local não tarifado.
- Prioridade 3 – Infrações em estacionamento tarifado, sendo as principais relativas a tempo excedido e a não pagamento da tarifa devida.

II.3. Descrição do problema

O concelho de Lisboa é dividido pelo RGE [3] em 55 zonas. Em cada zona existem ruas que necessitam de ser fiscalizadas, no entanto, a EMEL dispõe de um número limitado de AFE.

Para além da organização em áreas operacionais e zonas, também se subdividem as várias ruas em troços. O troço pode representar uma rua ou apenas uma fração da rua que se verifique ser homogénea em toda a sua extensão em características tais como freguesia, tipo de tarifa aplicada, e zona a que pertence. Os troços são subdivididos em segmentos e conetores – fração de troço entre dois cruzamentos, entroncamentos. Os segmentos são fiscalizáveis por estarem suscetíveis à ocorrência de infrações. Os conetores servem para a deslocação dos AFE e para garantir a ligação entre segmentos. O AFE pode emitir denúncias neste registando-as no segmento correspondente.

A fiscalização de um segmento numa determinada hora influencia a fiscalização/criticidade desse mesmo segmento nas três horas seguintes. Fiscalizar um segmento numa hora implica que este não pode voltar a ser fiscalizado nessa hora, nem na hora seguinte. Na segunda e terceira horas é possível fiscalizar de novo o segmento, no entanto, a sua criticidade assume valor zero, de modo a dar preferência a outros segmentos ainda não fiscalizados.

O percurso de um AFE tem início e fim em pontos designados de pontos base, previamente seleccionados por apresentarem uma proximidade a paragens ou estações

de transportes públicos. Entre os dois pontos base que servem de início e fim do percurso, o AFE tem segmentos para fiscalizar e conetores para percorrer.

A duração de um percurso é definida pela soma dos tempos associados aos segmentos e conetores que o compõem. Estes tempos são o tempo de deslocação, no caso de ser atravessado, ao qual acresce um tempo de fiscalização caso seja fiscalizado.

O tempo de deslocação representa o tempo necessário para o AFE percorrer o segmento ou o conector. O tempo de fiscalização, associado apenas aos segmentos, está relacionado com o tempo de execução dos procedimentos e ações de fiscalização.

Os segmentos a incluir no percurso têm características que os definem como mais ou menos suscetíveis à ocorrência de infrações, e que, conseqüentemente, determinam uma maior ou menor necessidade de fiscalização face a outros segmentos.

De modo a espelhar esta necessidade de fiscalização, fundamental para a seleção dos segmentos a fiscalizar, criou-se um índice crítico, doravante denominado de criticidade. Verificou-se que existem oscilações na procura de estacionamento ao longo do dia, que influenciam a necessidade de fiscalização [6, p. 203]. Assim, a cada segmento está associado um valor de criticidade por cada hora de exploração.

A criticidade, por sua vez, é influenciada pelo seguinte conjunto de fatores:

- **Ocupação do segmento numa determinada hora** – representa a média do número de veículos estacionados no segmento numa determinada hora. Quanto maior o número de veículos presentes num dado segmento a uma determinada hora, maior será a necessidade de fiscalizar esse segmento nessa hora, pois maior é a probabilidade de encontrar incumprimentos.

- **Inverso do nº de dísticos de residentes/ nº de estacionamentos** – representa o inverso do número de veículos com dístico de residente estacionados num determinado segmento em determinada hora, relativamente ao número de

estacionamentos nesse segmento e nessa hora. A natureza dos dísticos de residentes implica que um dado veículo pode estacionar na sua zona de residência e numa zona adjacente sem efetuar o pagamento da tarifa (Art.º 27º do RGE) [3]. Assim, a necessidade de fiscalizar um segmento numa hora com um elevado número de veículos com dístico de residente válido é reduzida.

- **Coroas tarifárias** – a cidade de Lisboa está organizada em coroas tarifárias, que determinam o período máximo de estacionamento admitido e as tarifas aplicáveis (Art.º 2º al. c) do RGE) [3]. Há três tipos de coroas: coroa vermelha que corresponde a eixos de alta rotação de estacionamento, coroa amarela e coroa verde que são associadas a áreas de média e baixa rotação, respetivamente (Art.º 15º do RGE) [3].

Com isto, espera-se uma criticidade superior em segmentos que pertencem à coroa vermelha, pois têm, em geral, procura por lugares de estacionamento superior à oferta. A coroa amarela apresenta uma necessidade de fiscalização superior à coroa verde. E na coroa verde, que tem uma menor procura por estacionamento, espera-se que a criticidade dos segmentos que a compõem seja inferior à dos restantes.

- **Denúncias emitidas** – com base no histórico existente, é possível verificar certos comportamentos padrão. Um elevado número de denúncias num segmento numa hora pode implicar que a probabilidade de aí encontrar infrações seja superior face a segmentos que nessa hora apresentem um histórico de denúncias relativamente baixo ou até nulo.

- **Prioridade de intervenção** – para além do número de denúncias emitidas em fiscalizações passadas é também essencial diferenciar a gravidade das infrações registadas em cada denúncia. Os segmentos que apresentam uma maior ocorrência de infrações de maior prioridade devem assumir uma maior necessidade de fiscalização, relativamente a segmentos que apresentam a ocorrência de infrações menos prioritárias.

- **Tempo decorrido desde a última fiscalização** – este indicador pretende garantir que um segmento não fique demasiado tempo sem ser fiscalizado, sendo incrementada a necessidade de fiscalização por cada dia sem fiscalização. Este indicador é crucial para manter o sistema atualizado relativamente aos segmentos que não necessitam de ser frequentemente fiscalizados, uma vez que estes, ao longo do tempo sem fiscalização, podem atrair estacionamento em infração.

Assim, pretende-se determinar percursos diários para os AFE, respeitando os seus horários de trabalho, garantindo a verificação de todas as restrições de fiscalização e maximizando a soma das criticidades dos segmentos que compõem os percursos.

II.4. Recolha de dados

Os dados recolhidos assumiram um papel fundamental no desenvolvimento deste estágio, pois determinaram os procedimentos a incluir no *software*, a sua implementação e a qualidade dos resultados obtidos.

Devido à total disponibilidade dos colaboradores da EMEL em fornecer toda a informação acessível e considerada necessária, foi possível incorporar no *software* dados relacionados com a caracterização dos AFE, das denúncias realizadas e da rede.

Durante o estágio foi facultado o acesso à base de dados onde estão presentes dados referentes às várias denúncias realizadas pelos AFE, em toda a cidade de Lisboa, a partir de janeiro de 2016. Para a construção da rede foi disponibilizado pela EMEL um conjunto de informações essenciais para determinar uma rede conexa.

Foram realizados vários acompanhamentos de fiscalização de estacionamento, em diferentes zonas regulamentares. Este trabalho de campo, além de útil na validação da rede e identificação de irregularidades, teve por objetivo recolher dados relacionados com os tempos de deslocação e fiscalização, essenciais para determinar uma velocidade média de deslocação e um tempo médio de execução de cada tarefa de fiscalização.

CAPÍTULO III: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema da otimização de percursos de fiscalização apeada de estacionamento é considerado neste trabalho como pertencente à categoria designada por *Arc Routing Problems With Profits*. Estes problemas, segundo Corberán e Laporte [11], caracterizam-se por serem *Arc Routing Problems* (ARP) em que há um conjunto de ligações que devem ser atravessadas (conjunto que pode ser vazio) e outro conjunto de ligações que podem ser atravessadas apenas se for proveitoso.

Em Corberán e Laporte [11], Claudia Archetti e M. Grazia Speranza [12] fazem uma resenha de vários problemas nesta categoria, como o problema do Carteiro Chinês com maximização de benefício (*Maximum Benefit Chinese Postman Problem*, MBCPP), introduzido por Malandraki e Daskin [13]. Neste problema pretende-se determinar uma rota para um veículo que começa e acaba num depósito, em que sempre que um arco é atravessado é recebido um benefício e o objetivo é maximizar o proveito total. O proveito de cada ligação varia com o número de travessias realizadas nessa ligação e é determinado pela diferença entre o benefício e o custo. Neste, existe ainda a possibilidade de não servir ligações com baixo benefício e servir várias vezes ligações com um alto benefício. Os autores propõem um algoritmo baseado num procedimento de *Branch-and-Bound*, sobre relaxações da formulação de fluxos apresentada. Aplicações para o MBCPP são, por exemplo, limpeza de ruas e planeamento de remoção de neve.

O *Prize-Collecting Rural Postman Problem* (PCRPP), introduzido por Aráoz et al. [14], assemelha-se ao MBCPP, com a diferença de que o benefício de cada ligação pode ser recolhido no máximo uma vez. Aráoz et al. [15] fazem um estudo teórico de formulações para o problema e mais tarde desenvolvem procedimentos, baseados em relaxações de restrições para obter majorantes, e heurísticas para obter minorantes para

o valor ótimo. Os autores referem como exemplo de aplicação a recolha de contentores de resíduos para reciclagem feita por empresas privadas.

O *Arc Orienteering Problem* (AOP) é definido numa rede orientada e tal como no PCRPP a rota tem início e fim num depósito e o benefício associado a cada ligação pode ser recolhido no máximo uma vez. Neste é introduzida uma restrição que limita o custo total da rota, e o objetivo é maximizar o benefício total. Este problema é proposto por Souffriau et al. [16] que o formulou para o planeamento automatizado de viagens turísticas personalizadas em bicicleta. É proposta uma metaheurística, baseada em GRASP.

Introduzido por Feillet et al. [17], o *Profitable Arc Tour Problem* (PATP) pretende determinar, para um conjunto de veículos, um conjunto de rotas que maximiza a diferença entre o benefício total recolhido e o custo total de deslocação. O benefício de cada ligação é constante e pode ser recolhido mais do que uma vez. Neste problema não são impostos pontos específicos de início e fim para as rotas, as rotas podem começar e acabar em qualquer nó, mas é imposto um limite para a duração de cada rota. Os autores propõem um algoritmo *Branch-and-Price* com uma fase de geração de colunas e uma fase de resolução de problemas de fluxos.

Archetti et al. [18] com o *Undirected Capacitated Arc Routing Problem with profits* (UCARPP) introduzem a capacidade dos veículos na categoria de problemas ARP *with profits*. No UCARPP pretende-se determinar um conjunto de rotas, com início e fim num depósito, para um conjunto de veículos, tendo em consideração a capacidade de cada veículo. O objetivo do problema é maximizar o benefício total recolhido. O benefício apenas pode ser recolhido uma vez em cada ligação pelo veículo que o serve. Tal como no PATP, a duração total de cada rota não deve exceder um limite previamente estabelecido.

Os autores propõem um algoritmo *Branch-and-Price* e três heurísticas: uma de pesquisa em vizinhanças de dimensão variável, e duas metaheurísticas de pesquisa *tabu* em que uma destas permite passar por soluções fora da região admissível. Aplicações referidas estão relacionadas com o apoio à tomada de decisão de empresas transportadoras, nomeadamente para determinar novos clientes que possam utilizar tempo ou capacidade restante na rota de um ou mais veículos, devido a haver outros clientes que não usam a total capacidade ou tempo.

O *Team Orienteering Arc Routing Problem* (TOARP) era considerado por Corberán e Laporte [11] como o problema de ARP *With Profits* mais recente na literatura.

Recentemente Benavet et al. [19] publicaram um novo artigo com a definição de novos problemas neste âmbito, nomeadamente o *Profitable Mixed Capacitated Arc Routing Problem* (PMCARP).

O TOARP, proposto por Archetti et al. [20], é uma variante do AOP para múltiplos veículos. Neste problema pretende-se determinar um conjunto de rotas, para um conjunto de veículos, que maximizem o benefício total recolhido, garantindo que a duração de cada rota não excede um limite de tempo previamente definido. Ao contrário do AOP, cada rota tem início e fim em depósitos distintos e os arcos são divididos em dois subconjuntos, um subconjunto de arcos que têm de ser servidos, e um outro de arcos que só são servidos se existir um benefício. Os arcos com benefício podem ser recolhidos no máximo uma vez, no entanto, podem ser atravessados várias vezes.

Em Archetti et al. [21] é desenvolvida uma matheurística para o TOARP, que incorpora procedimentos baseados na resolução de modelos de programação matemática. A matheurística neste artigo incorpora uma pesquisa *tabu* com

procedimentos de diversificação e intensificação baseados em modelos de programação linear binária e resolvidos usando um software comercial (CPLEX 12.2).

O problema da otimização de percursos de fiscalização apeada pode ser considerado uma variante do problema TOARP pois ambos são *ARP With Profits* para múltiplos veículos, considerando cada AFE como um veículo. Quer num quer noutro, o benefício pode ser recolhido no máximo uma vez, no caso dos percursos de fiscalização uma vez a cada duas horas. Porém, existem algumas diferenças tais como, no problema em estudo os arcos apenas são servidos se houver um benefício.

O problema em estudo também se aproxima de um PATP, pois em ambos o ponto de início e fim da rota é selecionado de um conjunto de nós, sem qualquer indicação prévia. No PATP, este conjunto é composto por todos os nós da rede, e no problema em estudo apenas pelos nós considerados como possíveis pontos base.

Por fim, o problema de otimização de percursos de fiscalização difere de todos os problemas apresentados por considerar uma variação horária, que tem influência sobre o benefício e tempo de fiscalização associados aos arcos.

Na pesquisa bibliográfica efetuada não foi encontrado nenhum trabalho que trate diretamente o problema da otimização de percursos de fiscalização apeada de estacionamento.

CAPÍTULO IV: DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

IV.1. Tratamento de dados no *Software*

O tratamento de dados assumiu um grande destaque ao longo deste estágio, pelos desafios implícitos e pelo tempo despendido nesta fase. Os procedimentos de tratamento de dados desenvolvidos foram incorporados no *software* utilizando linguagem de programação SQL. Foi desenvolvida uma base de dados que serve de suporte ao *software*. Esta está estruturada de modo a armazenar dados que serão sujeitos a procedimentos de transformação, assim como para armazenar todos os resultados obtidos com estes procedimentos e um pleno acesso ao histórico.

A construção da rede, o cálculo da criticidade e a determinação dos tempos de deslocação e de fiscalização constituem as principais componentes desenvolvidas no tratamento de dados.

i. Construção da rede

A área de atuação deste estágio foi a zona 22 (ver Anexo 3) sobre a qual foi construída a rede orientada, apresentada no Anexo 4, que é dividida em quatro subzonas delimitadas pela Avenida João XXI, Avenida de Roma e Praça de Londres. Esta zona de domínio foi escolhida devido à diversidade de características e dimensão que apresenta.

Os conceitos de segmento e de conector – fração de rua entre dois cruzamentos/entroncamentos – foram introduzidos na EMEL durante este estágio, e surgem devido às limitações de deslocação originadas pelo conceito de troços.

A rede orientada desenvolvida é composta por nós, que representam cruzamentos e entroncamentos, e por arcos que representam os segmentos e conectores. A orientação da rede é definida pelo sentido de circulação dos veículos, salvo algumas exceções.

Existem quatro tipos de ligações entre dois nós na rede:

Tipo 1) ruas com um ou dois sentidos e com estacionamento num único lado, em que a fiscalização ocorre no sentido de circulação dos veículos. Na Figura 2, está representado em a) o exemplo e em b) estão os arcos e nós correspondentes. Neste caso o arco a tracejado representa um conector no sentido oposto ao sentido do segmento.

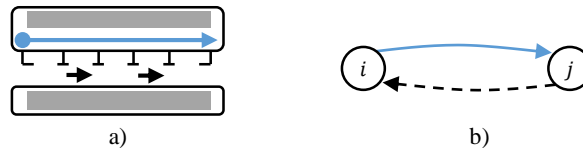


Figura 2 - Ligações em ruas com um sentido e estacionamento num único lado

Tipo 2) ruas com dois sentidos e estacionamento em ambos os lados, em que a fiscalização é realizada no sentido do trânsito em ambos os lados. A fiscalização de um lado de estacionamento não implica a fiscalização do outro (Figura 3).

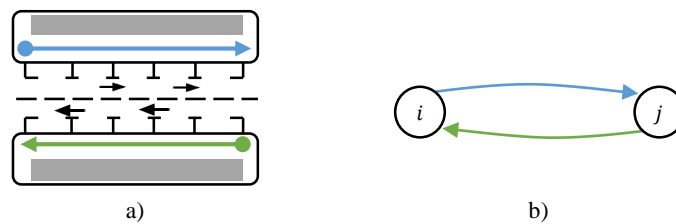


Figura 3 - Ligações em ruas com dois sentidos e estacionamento nos dois lados

Tipo 3) em ruas com estacionamento em ambos os lados e na placa central (Figura 4) são definidos dois segmentos que representam os mesmos lugares de estacionamento. Estes correspondem a dois arcos na rede com sentidos opostos e, se um é percorrido em fiscalização, o outro já não vai ser.

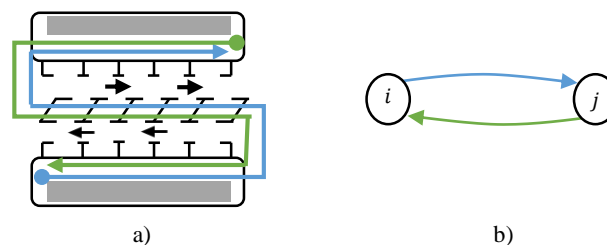


Figura 4 - Ligações em ruas com estacionamento em ambos os lados e placa central

Tipo 4) ruas com um sentido e estacionamento em ambos os lados e em que se se fiscalizar um lado tem que se fiscalizar o outro. Neste caso, exemplificado na Figura

5, existem apenas dois segmentos que representam a fiscalização dos mesmos lugares de estacionamento, só que em sentidos opostos (Figura 5, a). Considera-se que se um for percorrido em fiscalização o outro já não vai ser. Ambos os segmentos têm início e fim no mesmo nó, e são representados na rede por lacetes (Figura 5, b). Para representar os lacetes no modelo são acrescentados dois nós artificiais, i' e j' (Figura 5, c).

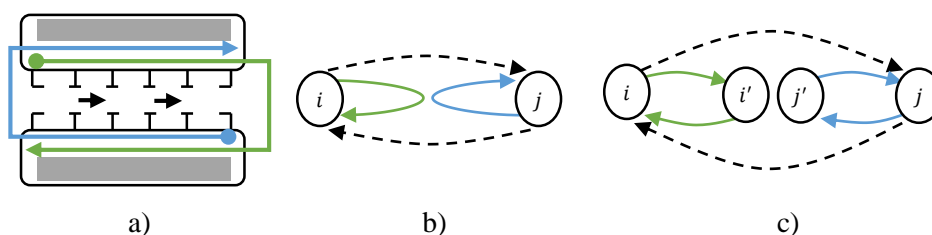


Figura 5 - Lições em ruas com um sentido e estacionamento nos dois lados

Em todos os casos os segmentos podem também ser utilizados como conectores, ou seja, podem ser percorridos sem fiscalização. No total, a rede da zona 22 é definida por 135 nós e 494 arcos, dos quais 234 são segmentos.

ii. Cálculo da criticidade

A criticidade é determinada por segmento e hora e pode ser interpretada como um sistema de pontos que permite priorizar a necessidade de fiscalização dos vários segmentos durante o horário de exploração. Devido à complexidade dos atributos que a definem, foram apenas abordados os seguintes atributos:

- Denúncias emitidas nas últimas n fiscalizações.
- Prioridade de intervenção relativamente aos tipos de infrações cometidas.
- Número de dias sem fiscalização, a uma determinada hora.

Assim, a criticidade do segmento (i, j) para a hora h pode ser representada pela expressão $C_{ijh} = D_{ijh} + N_{ijh}$, em que D_{ijh} representa a parcela de criticidade associada às denúncias emitidas e à prioridade das infrações cometidas no segmento (i, j) na hora h , enquanto N_{ijh} é a parcela da criticidade relacionada com o número de dias em que, na hora h , o segmento (i, j) está sem fiscalização.

Nos dados disponibilizados cada denúncia é discriminada por um conjunto de características, tais como, data e hora de realização, tipo de infração cometida, trecho em que foi emitida, número de porta mais próximo e AFE que a realizou. Os dados disponibilizados não possuíam nenhuma referência ao novo conceito de segmento, pelo que foi necessário desenvolver uma tabela referencial que, com base nos números de porta contidos em cada segmento e o trecho a que o segmento pertence, permite identificar as denúncias emitidas em cada segmento.

O cálculo de D_{ijh} processa-se em duas fases. A primeira fase está associada à atualização de dados. Nesta fase, são identificadas as denúncias emitidas no segmento (i, j) , na hora h , desde o último processamento de dados realizado pelo *software*. Ao agrupar estas denúncias por dia de realização e tipo de infração cometida é determinado o número de denúncias realizadas no mesmo dia d , no mesmo segmento (i, j) , na hora h e com o mesmo nível hierárquico de infração b . Posteriormente, é associado a cada tipo b de infração um peso, p_b , que traduz a sua gravidade. Por fim, são somados os valores obtidos com os diferentes tipos de infração.

A segunda fase corresponde à ponderação dos dados obtidos nas últimas n fiscalizações do segmento (i, j) na hora h . Nesta, ponderam-se os valores obtidos na fase anterior e em fiscalizações anteriores realizadas ao segmento (i, j) e hora h . De seguida, selecionam-se apenas as últimas n fiscalizações e multiplica-se por um peso w_n . Por fim, são somados os valores obtidos, finalizando o valor de D_{ijh} .

A parcela da criticidade referente ao número de dias sem fiscalização, N_{ijh} , determina o número de infrações que se espera encontrar por cada dia de não fiscalização. Pois, espera-se que por cada dia sem fiscalização as ocorrências de infrações aumentem.

Devido à falta de dados mais precisos, considera-se que um segmento foi fiscalizado numa determinada hora se houver denúncias registadas, caso contrário, conclui-se que este não foi fiscalizado. Esta hipótese implica a exclusão de casos em que se fiscalizou um segmento numa hora, mas não foi emitida qualquer denúncia.

Na parcela do número de dias sem fiscalização é determinado para cada segmento e cada hora, o número de dias úteis que passaram desde a última fiscalização realizada até ao momento em questão. Posteriormente, o número de dias sem fiscalização é multiplicado pelo número de lugares existentes no segmento e por um parâmetro, $p_{N\text{ão}Fisc}$. Ao considerar o número de lugares de estacionamento pretende-se influenciar esta parcela com a oferta de estacionamento existente em cada segmento.

iii. Tempo de deslocação e fiscalização

No *software* foram incluídas as fórmulas de cálculo dos tempos de deslocação e de fiscalização associados aos segmentos e conetores da rede.

O tempo de deslocação, associado a todos os segmentos e conetores, não depende da hora de exploração. Este é determinado multiplicando o comprimento do segmento/conetor por uma velocidade média de deslocação do AFE.

O tempo de fiscalização, associado apenas a segmentos, depende da hora de exploração. Este pode ser representado pela expressão $TF_{ijh} = TVis_{ijh} + TDig_{ijh} + TDen_{ijh}$. Estas parcelas estão associadas ao tempo que o AFE requer para realizar as tarefas de fiscalização, nomeadamente pesquisas visuais, digitais e emissão de denúncias, respetivamente. Todas as parcelas do tempo de fiscalização são determinadas de forma semelhante, multiplicando o número de ocorrências que se espera encontrar no segmento numa determinada hora pelo tempo médio de realização para cada ocorrência.

Devido à falta de informação sobre o número de ocorrências de pesquisas visuais e digitais que permitam determiná-las em cada segmento e hora, optou-se por simplificar o problema ao considerar uma percentagem de ocorrência fixa para todos os segmentos e horas. Ao multiplicar esta percentagem pelo número de lugares existentes obtém-se o número esperado de ocorrências.

Na parcela do tempo de fiscalização relativa à emissão de denúncias, o número de denúncias esperadas, a multiplicar pelo tempo médio de emissão, é determinado por uma média móvel de denúncias emitidas nesse segmento, hora e nas últimas n fiscalizações.

IV.2. Formalização do problema

A formalização deste problema ocorre num grafo orientado em que os nós representam cruzamentos e entroncamentos e os arcos representam segmentos e conetores.

Cada nó base foi duplicado, de modo a criar uma cópia que serve exclusivamente como ponto base, enquanto os originais passam a ser nós comuns de passagem. A cada cópia estão associados dois arcos, um de saída em direção ao nó original e um de entrada vindo do nó original. Estes arcos podem ser considerados como conetores com um tempo de deslocação nulo.

Para a formalização deste problema são definidos os seguintes índices, conjuntos, parâmetros e variáveis.

ÍNDICES

(i, j) – Segmento/Conetor; k – Agente de Fiscalização de Estacionamento (AFE);

i, j – Nós; h – Hora de exploração ($h = 0$, primeira hora de fiscalização);

CONJUNTOS

V – Conjunto de nós;

V^c – Conjunto de cópias dos nós que podem ser pontos base, $V^c \subset V$;

S – Subconjunto de nós, à exceção das cópias dos pontos base, $S \subseteq V \setminus V^c$;

A – Conjunto de arcos (segmentos e conetores);

A_R – Conjunto de segmentos (arcos fiscalizáveis), $A_R = A_R^1 \cup A_R^2 \cup A_R^3 \cup A_R^4$;

$A_R^1 = \{\text{Conjunto de arcos do tipo 1}\}$; $A_R^2 = \{\text{Conjunto de arcos do tipo 2}\}$;

$A_R^3 = \{\text{Conjunto de arcos do tipo 3}\}$; $A_R^4 = \{\text{Conjunto de arcos do tipo 4}\}$;

$A_R^1 \cap A_R^2 \cap A_R^3 \cap A_R^4 = \emptyset$;

$A_R(S)$ – Conjunto de segmentos $(i, j) \in A_R: i, j \in S$;

H – Conjunto de horas de exploração;

K – Conjunto de AFE;

PARÂMETROS

T_k – Duração total (em minutos) do turno do AFE k .

C_{ijh} – Criticidade do segmento $(i, j) \in A_R$, durante a hora $h \in H$.

TD_{ij} – Tempo necessário (em minutos) para se deslocar no arco $(i, j) \in A$.

TF_{ijh} – Tempo necessário (em minutos) para fiscalizar o segmento $(i, j) \in A_R$, durante a hora $h \in H$.

VARIÁVEIS INTEIRAS

x_{ijh}^k – Número de vezes que o AFE k atravessa o arco (i, j) , durante a hora h , $\forall (i, j) \in A$; $\forall h \in H$; $\forall k \in K$

VARIÁVEIS BINÁRIAS

$y_{ijh}^k = \begin{cases} 1, & \text{se o AFE } k \text{ fiscaliza o segmento } (i, j), \text{ durante a hora } h, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \forall (i, j) \in A_R;$

$\forall h \in H; \forall k \in K$

É proposta a seguinte formulação matemática para o problema dos percursos de fiscalização de estacionamento, baseada na formalização para o TOARP apresentada por Archetti e Speranza [12, p. 295].

FUNÇÃO OBJETIVO

$$(1) \quad \max \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \left(\sum_{(i,j) \in A_R \setminus A_R^4} C_{ijh} y_{ijh}^k + \sum_{(i,j) \in A_R^4} \left(\frac{1}{2} C_{ijh} y_{ijh}^k \right) \right)$$

A função objetivo consiste em maximizar a criticidade total do percurso, obtida pelo somatório das criticidades de todos os segmentos fiscalizados, durante todas as horas por todos os AFE.

RESTRICÇÕES

- $$(2) \quad \sum_{j:(i,j) \in A} \sum_{h \in H} x_{ijh}^k = \sum_{j:(j,i) \in A} \sum_{h \in H} x_{jih}^k \quad \forall i \in V \setminus V^c; \forall k \in K$$
- $$(3') \quad \sum_{\substack{(i,j) \in A: \\ i \in V^c, j \in V \setminus V^c}} x_{ij0}^k = 1 \quad \forall k \in K$$
- $$(3'') \quad \sum_{\substack{(i,j) \in A: \\ i \in V \setminus V^c, j \in V^c}} \sum_{h \neq 0} x_{ijh}^k = 1 \quad \forall k \in K$$
- $$(4) \quad \sum_{\substack{(i,j) \in A: \\ i \in V \setminus S, j \in S}} \sum_{h \in H} x_{ijh}^k \geq \sum_{h \in H} y_{tzh}^k \quad \forall S \subset V \setminus V^c; \forall (t, z) \in A_R(S); \forall k \in K$$
- $$(5) \quad x_{ijh}^k \geq y_{ijh}^k \quad \forall (i, j) \in A_R; \forall h \in H; \forall k \in K$$
- $$(6) \quad \sum_{k \in K} (y_{ijh}^k + y_{ij(h+1)}^k) \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A_R; \forall h \in H \setminus \{|H|\}$$
- $$(7) \quad y_{ijh}^k + y_{jih}^k \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A_R^3; \forall h \in H; \forall k \in K$$
- $$(8) \quad y_{ii'h}^k = y_{i'ih}^k \quad \forall (i, i') \in A_R^4; \forall h \in H; \forall k \in K$$
- $$(9) \quad y_{ii'h}^k + y_{i'ih}^k + y_{jj'h}^k + y_{j'jh}^k \leq 2 \quad \forall (i, j) \in A_R^4; i \neq j; \forall h \in H; \forall k \in K$$
- $$(10) \quad \sum_{(i,j) \in A} \sum_{h \in H} TD_{ij} x_{ijh}^k + \sum_{(i,j) \in A_R} \sum_{h \in H} TF_{ijh} y_{ijh}^k \leq T_k \quad \forall k \in K$$
- $$(11) \quad x_{ijh}^k \geq 0 \text{ e inteiros} \quad \forall (i, j) \in A; \forall h \in H; \forall k \in K$$
- $$(12) \quad y_{ijh}^k \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_R; \forall h \in H; \forall k \in K$$

O conjunto de restrições (2) garante que o número de vezes que um AFE entra num dado nó i , é igual ao número de vezes que sai desse mesmo nó, para todos os nós à exceção dos nós base.

A garantia de que cada percurso se inicia num nó base e finaliza noutra (ou no mesmo) nó base está no conjunto de restrições (3') e (3''). As restrições (3') garantem que na primeira hora de fiscalização, em que $h = 0$, o AFE sai de um dado nó $i \in V^c$, que pertence ao conjunto de cópias dos pontos base. Quanto às restrições (3'') garantem que o AFE retorna à cópia de um ponto base.

As restrições (4) referem-se à conectividade dos percursos. Este conjunto de restrições evitam a criação de subcircuitos isolados do ponto base, pois dado um segmento $(t, z) \in A_R(S)$, para o AFE k fiscalizar este segmento, terá de atravessar pelo menos um arco (i, j) , com $i \in V \setminus S$ e $j \in S$.

As restrições (5) garantem que os segmentos $(i, j) \in A_R$ atribuídos para fiscalização ao AFE k na hora h são atravessados. No conjunto de restrições (6) define-se que um dado segmento $(i, j) \in A_R$, não pode ser fiscalizado mais do que uma vez a cada duas horas de exploração. As restrições (7) referem-se às ligações de tipo três, que se são fiscalizadas num sentido não podem sê-lo no sentido contrário. As restrições (8) e (9) estão relacionadas com as ligações do tipo quatro, as restrições (8) referem-se à divisão dos lacetes, e as (9), juntamente com as (8), indicam que se uma ligação (representada por um lacete) é fiscalizada num sentido, então não pode sê-lo no sentido contrário (representada pelo outro lacete).

Relacionado com a restrição de tempo do percurso de cada AFE, está o conjunto de restrições (10).

Os conjuntos de restrições (11) e (12) definem o tipo de variáveis do modelo.

IV.3. Heurísticas

Devido à complexidade do problema não se optou por um método exato de resolução, mas por uma abordagem heurística. Neste capítulo é proposta uma heurística construtiva, e duas heurísticas melhorativas. Todas as heurísticas foram programadas em *MS Access*, utilizando a linguagem de programação *VBA*.

i. Heurística construtiva

Definida a rede orientada e conexa relativa à zona de deslocação dos AFE, o conjunto de pontos base, o conjunto de turnos, com hora de início e duração, as equipas de AFE e respetivos turnos, a heurística construtiva proposta seleciona, para cada AFE

e para cada turno, um nó base que serve de início para o percurso. A partir deste, adicionam-se arcos ao percurso do AFE, com base num conjunto de critérios, enquanto houver tempo disponível. Sempre que um arco é adicionado ao percurso, além de se ter em conta todas as restrições do problema, é necessário contar com o tempo para terminar num ponto base.

Antes de aplicar a heurística construtiva, realiza-se um conjunto de pré-processamentos com vista a identificar todos os dados necessários para executar a heurística.

Um dos pré-processamentos consiste em determinar para cada nó o caminho mais curto (CMC) entre este e um ponto base. Os problemas CMC são resolvidos com o algoritmo de *Dijkstra* que foi programado no *MS Access*, em linguagem de programação VBA, com base em [22], e incorporado no *software*.

Os dados de *input* para a heurística são: - os arcos e a sua situação em cada hora; - o CMC desde cada nó j até o ponto base mais próximo (cmc_j); - um parâmetro ($fiscalizável_{ijh}$) que é igual a *TRUE* se o arco (i, j) pode ser fiscalizado na hora h , e *FALSE* caso contrário; - um tempo de deslocação (TD_{ij}) e de fiscalização (TF_{ijh}) do arco (i, j) na hora h ; - e um valor de criticidade (C_{ijh}) para o arco (i, j) na hora h .

Associado a todo o arco (i, j) na hora h define-se outro parâmetro, denominado por criticidade por minuto ($Cmin_{ijh}$), que é determinado pelo quociente entre a criticidade e a soma dos tempos de deslocação e de fiscalização, e serve de critério de seleção de segmentos a incluir no percurso.

Em experiências iniciais verificou-se que ao considerar a criticidade como critério de seleção havia percursos de grande duração e criticidade, mas com muito poucos segmentos. No entanto, outros percursos que, embora compostos por segmentos com ligeiramente menos criticidade e tempos de deslocação mais baixos, tinham maior

criticidade total por terem maior número de segmentos. Assim, optou-se por definir o conceito de criticidade por minuto e usá-lo como critério de seleção de segmentos.

Por fim, são ainda inicializados a zero dois parâmetros auxiliares, $utilizado_{ijh}$, que representa o número de vezes que o arco (i, j) é atravessado na hora h e $fiscalizado_{ijh}$ que assume valor h se o segmento (i, j) é adicionado ao percurso para fiscalização na hora h .

Pretende-se obter dois percursos diários para cada AFE, um por cada turno, que devem corresponder a caminhos entre dois pontos base.

Para a heurística construtiva é definida a notação que consta da Tabela 1.

DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO
$hora_inicio_k$	Hora de início do turno atribuído ao AFE k
$duracao_turno_k$	Duração do turno atribuído ao AFE k
h	Variável incremental que representa a hora do relógio
T_k	Duração máxima para o percurso do AFE k
$soma_t$	Tempo despendido desde o início do percurso até ao nó j do último arco (i, j) adicionado ao percurso
$muda_h$	Variável que indica se é necessário incrementar a hora h
$contador$	Contador de arcos adicionados ao percurso do AFE k
$selecionado$	Assume valor 1 se existir pelo menos um arco que pode ser incluído no percurso, e valor 0 se nenhum arco pode ser incluído no percurso sem violar as restrições existentes
V^c	Conjunto de pontos base
$ponto_base_k$	Ponto base que serve de início para o percurso do AFE k
$tempo_{ijh}$	Tempo de deslocação e fiscalização no arco (i, j) a incluir no percurso na hora h
cmc_j	O CMC entre o nó j e o ponto base mais próximo
t_cmc_j	Tempo de deslocação do cmc_j
n_arcos_{ih}	Número de arcos que saem do nó i na hora h
p	Contador auxiliar do procedimento de verificação de tempo

Tabela 1 - Variáveis e parâmetros da heurística construtiva

Na Figura 6, é apresentado o pseudocódigo do procedimento geral da heurística construtiva, composto por um passo de inicialização e um passo iterativo. O passo iterativo é constituído por um ciclo, onde são realizados três subprocedimentos enquanto houver algum arco que possa ser incluído no percurso de fiscalização sem comprometer nenhuma restrição.

Uma solução admissível (SA) do problema para o AFE k é determinada quando a variável *selecionado* tomar valor *FALSE*.

```

Passo 1 {inicialização}
Para cada AFE  $k$ 
  Para cada turno do AFE  $k$ 
     $h = \text{hora\_início}_k$ 
     $T_k = \text{duração\_turno}_k$ 
     $\text{soma}_t = 0$ 
     $\text{muda}_h = 0$ 
     $\text{contador} = 0$ 
     $\text{selecionado} = \text{TRUE}$ 
    Selecionar aleatoriamente  $\text{ponto\_base}_k \in V'$ . Fazer  $i = \text{ponto\_base}_k$ .
  Passo 2 {iterativo}
    Enquanto  $\text{selecionado} = \text{TRUE}$ 
      Procedimento seleção de arcos
      Procedimento verificação de tempo
      Procedimento adição de arcos ao percurso
    Fim (enquanto)
    Guardar percurso determinado
  Fim (de para)
Fim (de para)
  
```

Figura 6 - Procedimento geral da heurística construtiva

No procedimento de seleção de arcos, Figura 7, estão presentes os critérios de seleção de potenciais arcos a incluir no percurso de fiscalização. Este procedimento consiste em selecionar, do conjunto de arcos (i, j) que saem do nó i e ainda não fiscalizados na hora h , o segmento para fiscalização com maior criticidade por minuto ($Cmin_{ijh}$). Neste conjunto, caso existam apenas conectores ou segmentos já fiscalizados, então seleciona-se o arco (i, j) com menor número de travessias ($utilizado_{ijh}$) e em caso de empate o de menor tempo de deslocação (TD_{ij}).

Procedimento seleção de arcos

Ordenar os arcos (i, j) que saem do nó i na hora h , com $fiscalizado_{ijh} \neq h$, por ordem não crescente de $Cmin_{ijh}$.

Se existir pelo menos um arco com $fiscalizável_{ijh} = \text{TRUE}$, **então** selecionar o primeiro arco (i, j) nessas condições. Fazer $\text{tempo}_{ijh} = TD_{ij} + TF_{ijh}$.

Senão reordenar os arcos que saem do nó i na hora h , por ordem não decrescente de $utilizado_{ij}$ e em caso de empate por ordem não decrescente de TD_{ij} .

Selecionar o primeiro arco (i, j) . Fazer $\text{tempo}_{ijh} = TD_{ij}$

Fim (se)

Identificar cmc_j e t_cmc_j , do nó j do arco selecionado.

Fim (Procedimento seleção de arcos)

Figura 7 - Procedimento de seleção de arcos da heurística construtiva

Selecionado o potencial arco (i, j) a incluir no percurso, é necessário identificar o CMC desde o nó j até um ponto base e o seu respetivo tempo de deslocação.

Segue-se o procedimento de verificação de tempo que consiste em testar a seguinte condição: a soma do tempo despendido até ao nó i com o tempo necessário

para fiscalizar ou atravessar o arco (i, j) e com o tempo de deslocação do cmc_j , tem de ser inferior ou igual à duração máxima do percurso do AFE k , no respetivo turno.

Se a condição se verificar, então continua-se para o procedimento seguinte, caso contrário, verifica-se se existe algum arco do conjunto de arcos que saem do nó i , na hora h que respeite a condição.

Numa situação em que nenhum arco do conjunto mencionado verifica a condição de tempo, então seleciona-se para atravessar sem fiscalização o arco (i, j) , que pertence ao cmc_i . Contudo, se o nó i é o último nó do CMC, ou seja, i é um ponto base ($i \in V'$), então não existem mais arcos que possam ser adicionados ao percurso, sem violar as restrições existentes, logo *seleccionado* = *FALSE*. O pseudocódigo do procedimento de verificação de tempo é apresentado na Figura 8.

```

Procedimento verificação de tempo
   $p = 1$ ;
  Determinar  $n\_arcos_{ih}$  que saem do nó  $i$  na hora  $h$ .  $\parallel i$  é o nó final do último arco adicionado ao percurso
  Ordenar os arcos que saem do nó  $i$  na hora  $h$ , com  $fiscalizado_{ijh} \neq h$ , por ordem não crescente de  $Cmin_{ijh}$ , e em caso de
  empate por ordem não decrescente de  $TD_{ij}$ .
  Fazer  $t\_usado = soma\_t + tempo_{ijh} + t\_cmc_j$ 
  Enquanto  $t\_usado > T_k$ 
    Se  $p \leq n\_arcos_{ih}$ . Então seleccionar o arco  $(i, j)$  na  $p$ -ésima posição.
      Se o arco  $(i, j)$  tiver  $fiscalizável_{ijh} = TRUE$ . Então fazer  $tempo_{ijh} = TD_{ij} + TF_{ijh}$ .
      Senão fazer  $tempo_{ijh} = TD_{ij}$ 
      Fim (se)
      Identificar  $cmc_j$  e  $t\_cmc_j$ , do nó  $j$  do arco seleccionado.
    Senão
      Se  $i \in V'$ . Então fazer seleccionado = FALSE;  $tempo_{ijh} = 0$ ;  $t\_cmc_i = 0$ .
      Senão seleccionar o arco  $(i, j)$  do  $cmc_i$ . Fazer  $tempo_{ijh} = TD_{ij}$ .
      Fim (se)
    Fim (se)
  Fazer  $t\_usado = soma\_t + tempo_{ijh} + t\_cmc_j$ 
   $p = p + 1$ 
Fim (de enquanto)
Fim (Procedimento verificação de tempo)

```

Figura 8 - Procedimento de verificação de tempo da heurística construtiva

Por fim, é realizado o procedimento de adição de arcos ao percurso, Figura 9, caso *seleccionado* = *TRUE*, ou seja, caso exista algum arco (i, j) a adicionar ao percurso. Neste, o arco (i, j) que verificou a condição de tempo no procedimento anterior é adicionado ao percurso. E são atualizados os parâmetros e variáveis envolventes.

<p>Procedimento adicionar arcos ao percurso</p> <p>Se selecionado = True então</p> <p> Se o arco (i, j) selecionado tiver $fiscalizável_{ijh} = TRUE$. Então fazer $fiscalizado_{ijh} = h$; $fiscalizado_{ij(h+1)} = h + 1$; $fiscalizável_{ijh} = FALSE$; $fiscalizável_{ij(h+1)} = FALSE$; $C_{ij(h+2)} = 0$; $C_{ij(h+3)} = 0$.</p> <p> Fim (se)</p> <p> Fazer $utilizado_{ijh} = utilizado_{ijh} + 1$; $i = j$; $soma_t = soma_t + tempo_{ijh}$; $muda_h = muda_h + tempo_{ijh}$; $contador = contador + 1$.</p> <p> Se $muda_h \geq 60$, então fazer $h = h + 1$ e $muda_h = muda_h - 60$.</p> <p> Fim (se)</p> <p>Fim (se)</p>

Figura 9 - Procedimento de adição de arcos ao percurso da heurística construtiva

ii. Heurísticas melhorativas

Duas heurísticas melhorativas, M1 e M2, são propostas neste capítulo. Estas consistem na pesquisa de soluções de melhor valor com base numa solução inicial, como por exemplo a SA determinada na heurística construtiva.

As heurísticas melhorativas baseiam-se em trocas de arcos, de uma solução inicial, por arcos alternativos. Depois de cada troca são aplicados os procedimentos da heurística construtiva para determinar uma nova SA.

Na Tabela 2, são definidas variáveis e parâmetros para as heurísticas M1 e M2.

DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO
m	Iteração da heurística melhorativa
$sa_inicial$	SA inicial
S	Conjunto de arcos (i, z) que saem do nó i e ainda não afetos para fiscalização na hora h
$ S $	Número de arcos $(i, z) \in S$
x^*	Melhor solução admissível encontrada até ao momento
x^m	SA determinada em m
C	Conjunto de arcos que compõem a solução x^*
$ C $	Número de arcos existentes em C
a	Contador auxiliar do procedimento melhorativo da segunda heurística melhorativa (M2)

Tabela 2 - Variáveis e parâmetros das heurísticas melhorativas

Na Figura 10, está representado o procedimento genérico para as heurísticas melhorativas, com o passo de inicialização e o passo iterativo. No passo de inicialização identifica-se uma SA inicial, assim como o conjunto de arcos que a define. No passo iterativo, enquanto o número de iterações for inferior ao número de arcos que compõem a solução inicial, define-se o conjunto S que representa o conjunto de potenciais arcos a trocar pelo arco (i, j) na m -ésima posição da solução inicial. Este conjunto S é

composto pelos arcos (i, z) que saem do nó i na hora h , com $z \neq j$, e com $fiscalizado_{izh} \neq h$, ou seja, que ainda não estão afetos a um percurso de outro AFE.

Se não houver nenhum arco (i, z) nas condições mencionadas, ou seja, se o conjunto S é um conjunto vazio, então segue-se para a iteração seguinte. Caso contrário, se existir pelo menos um arco (i, z) , eliminam-se os arcos da solução inicial posteriores ao nó i e aplica-se o procedimento melhorativo correspondente à heurística pretendida.

Determinada uma nova SA, com M1 ou M2, se a nova SA der melhor valor à função objetivo, atualiza-se a melhor solução encontrada até ao momento, x^* .

```

Passo 1 {inicialização}
   $m = 1$ 
   $x^* = sa\_inicial$ 
  Definir  $C$ , com base em  $x^*$ 
Passo 2 {iterativo}
  Repetir
    Identificar o arco  $(i, j)$  da solução  $x^*$  na  $m$ -ésima posição.
    Definir o conjunto  $S$ , e determinar  $|S|$ .
    Se  $|S| > 0$ , então eliminar da solução  $x^*$  o arco  $(i, j)$  e posteriores ao arco  $(i, j)$ .
      Procedimento melhorativo
      Se  $f(x^*) < f(x^m)$  então  $x^* = x^m$  e atualizar  $C$ .
      Fim (de se)
      Fazer  $m = m + 1$ .
    Senão fazer  $m = m + 1$ .
    Fim (de se)
  Até que  $m = |C|$ 
Fim

```

Figura 10 - Procedimento geral das heurísticas melhorativas

O procedimento melhorativo para a primeira heurística M1, Figura 11, consiste em selecionar do conjunto S o segmento (i, z) com maior criticidade por minuto ($Cmin_{ijh}$). Caso no conjunto S não existam segmentos para fiscalizar, ou seja, se apenas existirem conetores, então seleciona-se o arco (i, z) com o menor número de travessias realizadas ($utilizado_{izh}$), e em caso de empate escolhe-se o que tem menor tempo de deslocação (TD_{iz}). Posteriormente, é aplicado o procedimento construtivo a partir do arco (i, z) selecionado de modo a determinar uma nova SA.

```

Procedimento melhorativo – M1
  Se existir em  $S$  pelo menos um arco  $(i, z)$  com  $fiscalizavel_{ijh} = TRUE$ , então ordenar os arcos  $(i, z) \in S$ , com  $fiscalizado_{ijh} \neq h$ , por ordem não crescente de  $Cmin_{ijh}$  e selecionar o primeiro arco  $(i, z)$ .
  Senão ordenar os arcos  $(i, z) \in S$ , por ordem não decrescente de  $utilizado_{ijh}$  e em caso de empate por não decrescente de  $TD_{iz}$ .
  Selecionar o primeiro arco  $(i, z)$ .
  Fim (de se)
  Aplicar o procedimento construtivo, para determinar  $x^m$ .
Fim (de procedimento)

```

Figura 11 - Procedimento melhorativo para a heurística melhorativa M1

Na Figura 12 é apresentado o pseudocódigo para o procedimento melhorativo da segunda heurística melhorativa (M2). Neste procedimento, são selecionados todos os arcos que saem do nó i . Em cada iteração, é aplicado sobre cada arco $(i, z) \in S$ o procedimento construtivo de modo a determinar uma nova SA. Determinadas as SA, uma por cada arco, escolhe-se a que dá melhor valor à função objetivo como solução da iteração m da heurística, x^m , e em caso de empate escolhe-se arbitrariamente uma das melhores.

<p>Procedimento melhorativo – M2</p> <p>a=1</p> <p>Para cada arco $(i, z) \in S$</p> <p style="padding-left: 2em;">Aplicar o procedimento construtivo, para determinar x^a.</p> <p style="padding-left: 2em;">Fazer $a = a + 1$</p> <p>Fim (de para)</p> <p style="padding-left: 2em;">Selecionar x^a com $\max(f(x^a))$, e fazer $x^m = x^a$.</p> <p>Fim (de procedimento)</p>
--

Figura 12 - Procedimento melhorativo para a heurística melhorativa M2

CAPÍTULO V: RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Inicialmente, foram feitos testes preliminares às heurísticas com duas instâncias de teste de pequena dimensão. Depois, efetuou-se o trabalho de campo, numa semana de testes piloto, em que os AFE fiscalizaram e criticaram os percursos obtidos com as heurísticas. Neste capítulo, em primeiro lugar, apresentam-se e comentam-se os resultados dos testes preliminares. Em segundo lugar, descreve-se um estudo de ajustamento de alguns parâmetros, nomeadamente, do tempo de deslocação e do número esperado de denúncias, para determinar os valores da velocidade dos AFE e da criticidade dos segmentos a usar na semana de testes piloto.

V.1. Análise comparativa de resultados das heurísticas

As heurísticas, construtiva e melhorativas, propostas foram aplicadas a duas instâncias de teste, Instâncias I e II, correspondentes a problemas das duas subzonas da rede, representadas na Figura 18 e na Figura 19 do Anexo 5, respetivamente. Ambas as instâncias, têm dois AFE disponíveis que trabalham dois turnos de 150 e 165 minutos. As melhores soluções obtidas pelas heurísticas são comparadas de forma a analisar comportamentos sobre a criticidade total, percentagem de tempo total em fiscalização, número de SA analisadas e tempo computacional. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5 e Tabela 4 do Anexo 6, respetivamente para as Instâncias I e II.

Como se pode verificar a heurística melhorativa M2 determina, em geral, os percursos com maior criticidade total. No entanto, as soluções obtidas com M2 encontram-se entre as piores no que respeita à média das percentagens de tempo em fiscalização. O tempo computacional é um outro ponto fraco de M2, que requer um maior esforço computacional, causado pelo maior número de SA que analisa.

A heurística M1 obtém resultados de boa qualidade sem consumir um excessivo tempo computacional. Considera-se que poderá ser uma boa opção para casos em que

seja necessário determinar percursos de fiscalização num curto espaço de tempo. A heurística M1, obtém os melhores valores para a percentagem de tempo em fiscalização e o valor da criticidade das soluções dadas por M1 são, regra geral, e nestas duas instâncias, pouco inferiores à criticidade das soluções obtidas por M2.

A heurística construtiva, quer a nível de criticidade total, quer a nível de percentagem de tempo em fiscalização dá piores resultados que as melhorativas, mas necessita de aproximadamente 1 minuto para determinar uma SA.

Seria necessário que a experiência computacional preliminar testasse um maior número de instâncias para permitir tirar conclusões mais robustas sobre o desempenho das heurísticas, no entanto, optou-se pela heurística M2 para os percursos utilizados na semana de testes piloto.

Os resultados apresentados foram obtidos pelo *software* com dados atualizados ao dia 23 de setembro de 2016, e um Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T8300, 2.50GHz.

V.2. Análise de parâmetros

De forma a obter resultados de boa qualidade com o *software* desenvolvido, foram feitas análises aos parâmetros associados às denúncias e tempo de deslocação.

i. Denúncias esperadas

Foi comparado o número de denúncias emitidas com o número de denúncias esperadas, em duas semanas distintas. Nesta análise, o número de denúncias esperadas foi determinado com base numa ponderação das denúncias emitidas nas últimas n fiscalizações, considerando vários valores para n ($n \in \{1,2,19,20\}$) e duas ponderações distintas: “monótona”, em que o peso é igual para as n fiscalizações; “crescente”, que reflete a importância das fiscalizações mais recentes (Tabela 6 - Anexo 7).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 7 - Anexo 7, verifica-se que na primeira semana foram emitidas um total de 306 denúncias, e na segunda semana

335 denúncias. Verifica-se que, para as semanas estudadas, a melhor aproximação entre denúncias emitidas e esperadas, com um erro médio diário de 8%, é obtida com uma ponderação crescente das últimas 20 fiscalizações. Conclui-se que uma série histórica mais longa contribui diretamente para uma melhor projeção das denúncias esperadas.

ii. Tempo de deslocação

De modo a parametrizar o tempo de deslocação, foi desenvolvido um conjunto de cenários com base em dois percursos manuais realizados, A e B. Nos diferentes cenários foram consideradas várias velocidades de deslocação pedonal (2,95 km/h; 2,5 km/h; 2 km/h) foi utilizada a heurística construtiva fixando os segmentos dos percursos, com os diversos valores para a velocidade de deslocação e obtiveram-se as durações heurísticas, que foram comparadas com as durações reais.

Para o percurso de fiscalização A (ver Tabela 8 - Anexo 8) observa-se que o cenário que melhor se ajusta à duração real do percurso é o que utiliza uma velocidade de 2,95 km/h, com um erro relativo de 0,27%. Quanto ao percurso de fiscalização B (ver Tabela 8 - Anexo 8), ao contrário do percurso A, a melhor aproximação é obtida para o cenário com 2km/h, com um erro relativo de 0,51%.

A análise de comparação de cenários é inconclusiva quanto à velocidade pedonal a utilizar na determinação de percursos. Os resultados obtidos podem estar influenciados por os percursos A e B terem sido feitos por diferentes AFE, que possuem diferentes velocidades de deslocação. Com isto, verifica-se a importância de incluir no *software* o perfil dos AFE, isto é, poder considerar diferentes velocidades de deslocação dependendo do AFE para o qual se pretende determinar o percurso.

Os resultados podem também refletir a utilização da percentagem fixa de ocorrências de pesquisas visuais e digitais, que influenciam o tempo total do percurso.

V.3. Semana de testes piloto

Entre o dia 23 e o dia 30 de setembro, a EMEL disponibilizou um AFE que realizou os percursos de fiscalização obtidos com o *software*. Para esta experiência foi utilizada a heurística melhorativa M2. Posteriormente, foram analisados os desvios de criticidade, de denúncias e de tempos do percurso. A partir da análise realizada, foi possível tirar conclusões e realizar adaptações para os dias seguintes. Nesta semana foram consideradas as 20 últimas fiscalizações, $n = 20$, com uma ponderação crescente.

Em reuniões com a coordenação da EMEL, ficou delineada uma preferência por percursos cujo tempo despendido em conetores fosse o mínimo possível. A heurística M2 encontra percursos de maior criticidade, mas com um elevado número de conetores. Assim, cada percurso realizado na semana de testes piloto foi, de entre os percursos com uma criticidade não inferior a 80% da criticidade do melhor percurso encontrado, aquele com menor tempo despendido em conetores.

No primeiro dia, os percursos de fiscalização incidiram sobre a subzona representada na Figura 16 – Anexo 5. Uma vez que a análise das velocidades de deslocação foi inconclusiva, optou-se por uma velocidade intermédia de 2,5 km/h. No percurso da manhã foram fiscalizados 21 segmentos, com uma criticidade total de 285,95, e no da tarde foram fiscalizados 13 segmentos, e uma criticidade de 228,61, Figura 20 – Anexo 9.

Para o percurso da manhã eram esperadas 22 denúncias, no entanto, foram emitidas apenas 11, enquanto para a tarde apenas foram emitidas 4 denúncias de 14 esperadas. As elevadas diferenças entre o número de denúncias esperadas e emitidas surgem do facto de, na ponderação das n últimas fiscalizações, apenas se considerar os

segmentos em que ocorreram denúncias, e não os segmentos que foram fiscalizados mesmo sem denúncias, provocando assim um aumento da expectativa de denúncias.

Como os percursos realizados pelo AFE são os sugeridos pelo *software*, é possível ter informação sobre os segmentos que foram fiscalizados, mesmo sem denúncias. Assim, passou-se a introduzir a informação das “não ocorrências”, para os outros dias de teste, para verificar a diferença entre denúncias emitidas e esperadas.

A velocidade de 2,5 km/h revelou-se demasiado baixa, ou seja, o AFE demorava menos tempo do que o esperado. Registaram-se erros referentes à duração do percurso de 48,71% para a manhã e de 66,30% para a tarde, ambos abaixo da duração esperada.

Os testes dos restantes dias, foram realizados com um outro AFE, e numa outra subzona apresentada na Figura 19 – Anexo 5. Devido aos resultados obtidos no primeiro dia, a velocidade de deslocação pedonal foi atualizada para 3 km/h.

No segundo dia verificou-se uma melhoria dos indicadores face ao dia anterior, Figura 21 - Anexo 9. Foram fiscalizados 12 segmentos com uma criticidade total de 216,34 para o turno da manhã, e 15 segmentos com uma criticidade total de 89,87 durante a tarde. Eram esperadas 4 denúncias a mais do que as emitidas tanto para a manhã como para a tarde. Por fim, verificou-se uma maior aproximação entre os tempos esperados e realizados, porém o AFE continua a demorar mais tempo do que esperado.

O terceiro dia, teve um comportamento semelhante ao dia anterior, Figura 22 - Anexo 9. Neste dia, foram fiscalizados no total 32 segmentos com uma criticidade total de 306,55. Tanto as denúncias esperadas como os tempos foram superiores aos reais.

Com base nos resultados do segundo e terceiro dia, optou-se por diminuir a velocidade de deslocação de 3 km/h para 2,9 km/h.

No quarto dia, Figura 24 - Anexo 9, apesar de diminuída a velocidade os erros referentes à duração aumentaram, podendo estes estar relacionados com

acontecimentos esporádicos, como por exemplo, abordagens de civis para pedir informações ou fazer reclamações.

No último dia (ver Figura 23 - Anexo 9) no percurso da manhã 10 segmentos foram fiscalizados com uma criticidade total de 53,47. Foram emitidas 10 denúncias, 5 a menos do que o esperado, com um erro na duração total do percurso de 8,79%. Quanto ao percurso da tarde, com uma criticidade total de 23,31 foram fiscalizados 12 segmentos, e realizadas 6 de 13 denúncias esperadas. Neste, o AFE demorou menos do que o esperado com um erro de 31,83%.

Nesta semana de testes piloto, conclui-se que houve um ajustamento crescente do erro relativo aos tempos dos percursos. Contudo, existem casos esporádicos associados a acontecimentos que não é possível controlar e que afetam os tempos do percurso, tais como, abordagens de civis ou comunicação de parquímetros avariados.

Não é possível concluir a existência de uma aproximação entre denúncias emitidas e esperadas. Nesta semana verifica-se um erro diário médio de 6,7 denúncias, que diminui para um erro de 5,7 denúncias, se o dia primeiro não for considerado.

Por fim, o AFE realizou em média 18 denúncias por dia, este valor está próximo da média diária de denúncias emitidas por AFE, para o mesmo período, que varia entre 16 e 19 denúncias. O AFE deu um *feedback* positivo e considerou que os percursos sugeridos estavam de acordo com a realidade da fiscalização na subzona em questão.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES

A fiscalização de estacionamento é uma ação essencial para garantir o respeito pelas normas de estacionamento presentes na legislação, contribuindo para melhores condições de mobilidade. A fiscalização de estacionamento na cidade de Lisboa é delegada à EMEL, empresa que acolheu este estágio para desenvolver um software para otimizar percursos dos agentes de fiscalização de estacionamento. A empresa caracteriza como de extrema importância a melhoria/otimização de várias operações complexas e vitais para a empresa, como a do planeamento otimizado dos percursos dos AFE.

O problema da otimização de percursos de fiscalização apeada de estacionamento é um problema que pode ser estudado como um ARP *with profits*. Neste relatório de estágio, é proposta uma formalização para o problema em estudo, que é uma adaptação da formalização do *Team Orienteering Arc Routing Problem* (TOARP), apresentada por Archetti e Speranza [12]. Devido à dimensão do problema e à sua elevada complexidade foi proposta uma abordagem heurística. Assim, foi desenvolvida uma heurística construtiva e duas heurísticas melhorativas. As heurísticas propostas, programadas em linguagem VBA, foram introduzidas no *software*, em MS Access. Foi desenvolvido também um conjunto de procedimentos que determinam valores para a criticidade, tempos de deslocação e fiscalização, entre outros, programados em linguagem SQL.

O *software*, disponibilizado à EMEL, está ainda numa fase inicial, existindo ainda espaço para melhorias. Uma das principais limitações existentes que deve assumir especial atenção em desenvolvimentos futuros, é a determinação de percursos mais equilibrados no que respeita à criticidade total. Ou seja, atualmente o *software*, determina um percurso para cada AFE com base no percurso determinado para o AFE

anterior, à exceção do primeiro percurso que não tem antecessor. Isto implica que os primeiros percursos determinados têm uma maior criticidade, havendo um desequilíbrio nos percursos, pois os primeiros possuem uma maior exigência. Assim, futuramente, devem ser desenvolvidos métodos que considerem uma distribuição mais equilibrada da criticidade/exigência de fiscalização pelos vários percursos determinados.

Em desenvolvimentos futuros, devem ser incluídas na criticidade as restantes componentes abordadas no subcapítulo II.3, de modo a tornar mais completa e dinâmica a determinação da necessidade de fiscalização dos vários segmentos. Quanto ao tempo de fiscalização, devem ser desenvolvidos métodos para determinar o número de ocorrências (pesquisas visuais e digitais) por segmento, hora de exploração, e ocorrências encontradas nas últimas fiscalizações.

A hipótese de considerar que um segmento foi fiscalizado apenas se existem denúncias emitidas deve ser abandonada. A inclusão das “não ocorrências”, ou seja, das fiscalizações de segmentos em que não é emitida qualquer denúncia deve ser tido em conta em futuros trabalhos.

Assim, neste estágio foi possível desenvolver um *software* protótipo que inclui parte da complexidade da ação de fiscalização. Este *software*, tem uma grande potencialidade de aplicação e de extensão para toda a cidade de Lisboa, como uma ferramenta de apoio aos AFE, de modo a tornar a fiscalização cada vez mais eficiente e eficaz. Espera-se, assim, contribuir para uma cidade mais organizada, com melhores condições de mobilidade e conseqüentemente maior qualidade de vida para todos os seus cidadãos.

REFERÊNCIAS

- [1] EMEL, “A Mobilidade - Ação da EMEL,” [Online]. Available: <https://www.emel.pt/pt/mobilidade/a-mobilidade/accao-emel/>. [Acedido em 03 Setembro 2016].
- [2] Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, “Código da Estrada - Lei n.º 72/2013 de 3 de setembro,” 2013. [Online]. Available: http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/CodigoDaEstrada/Documents/Codigo_Estrada_2014_versaoWEB.pdf. [Acedido em 18 Julho 2016].
- [3] Câmara Municipal de Lisboa, “Retificação à Deliberação n.º 47/AM/2013 (Proposta n.º 254/CM/2013) - Regulamento Geral de Estacionamento e Paragem na Via Pública,” 2013. [Online]. Available: https://www.emel.pt/fotos/legislacao/regulamento_geral_de_estacionamento_republicac_a_o_abril_2014_142367367354242e0c88225.pdf. [Acedido em 18 Julho 2016].
- [4] EMEL, “Plano de Atividades e Orçamento para 2016,” [Online]. Available: <http://www.am-lisboa.pt/documentos/1444409279C8iVY1uq2Ug90OG0.pdf>. [Acedido em 2016 Setembro 03].
- [5] EMEL, “Relatório e Contas 2015,” 2015. [Online]. Available: https://www.emel.pt/fotos/financeiro/relatorio_e_contas_emel_2015_1295057369579b60618d78d.pdf. [Acedido em 2016 Setembro 03].
- [6] Câmara Municipal de Lisboa, “Lisboa: O Desafio da Mobilidade,” 2015. [Online]. Available: <http://www.cm-lisboa.pt/fileadmin/VIVER/Urbanismo/urbanismo/livros/mobilidade.pdf>. [Acedido em 2016 Julho 18].
- [7] EMEL, “Estatutos,” 2015. [Online]. Available: https://www.emel.pt/fotos/gca/estatutos_emel_janeiro_2015_12267149654e0b7027c851.pdf. [Acedido em 18 Julho 2016].
- [8] EMEL, “Mensagem da Administração,” [Online]. Available: <https://www.emel.pt/pt/a-emel/mensagem-da-administracao/>. [Acedido em 2016 Setembro 03].
- [9] EMEL, “Fiscalização,” [Online]. Available: <https://www.emel.pt/pt/mobilidade/a-mobilidade/accao-emel/fiscalizacao/>. [Acedido em 2016 Setembro 03].
- [10] EMEL, “Decreto-Lei n.º44/2005, de 23 de fevereiro,” 2005. [Online]. Available: https://www.emel.pt/fotos/legislacao/dl_44-2005-

competencias_fiscalizacao_emel_40981412254242c679a211.pdf.

[Acedido em 18 Julho 2016].

- [11] Á. Corberán e G. Laporte, *Arc Routing: Problems, Methods and Applications*, Philadelphia: MOS-SIAM Series on Optimization, 2014.
- [12] C. Archetti e M. G. Speranza, “Arc Routing Problems with Profits,” em *Arc Routing: Problems, Methods and Applications*, Philadelphia, MOS-SIAM Series on Optimization, 2014, pp. 281-299.
- [13] C. Malandraki e M. Daskin, “The maximum benefit Chinese postman problem and the maximum benefit traveling salesman problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 65, pp. 218-234, 1993.
- [14] J. Aráoz, E. Fernández e C. Zoltan, “Privatized rural postman problem,” *Computers & Operations Research*, vol. 33, n° 12, pp. 3432-3449, 2006.
- [15] J. Aráoz, E. Fernández e O. Meza, “Solving the prize-collecting rural postman problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 196, pp. 886-896, 2009.
- [16] W. Souffriau, P. Vansteenwegen, G. Berghe e D. Van Oudheusden, “The planning of cycle trips in the province of East Flanders,” *OMEGA*, vol. 39, n° 2, pp. 209-213, 2011.
- [17] D. Feillet, P. Dejax e M. Gendreau, “The Profitable Arc Tour Problem: Solution with a Branch-and-Price Algorithm,” *Transportation Science*, vol. 39, n° 4, pp. 539-552, 2005.
- [18] C. Archetti, D. Fiellet, A. Hertz e M. Speranza, “The undirected capacitated arc routing problem with profits,” *Computers & Operations Research*, vol. 37, n° 11, pp. 1860-1869, 2010.
- [19] E. Benavent, Á. Corberán, L. Gouveia, M. C. Mourão e L. S. Pinto, “Profitable mixed capacitated arc routing and related,” *TOP*, vol. 23, pp. 244-274, 2014.
- [20] C. Archetti, M. Speranza, Á. Corberán, J. Sanchis e I. Plana, “The team orienteering arc routing problem,” *Transportation Science*, vol. 48, n° 3, pp. 442-457, 2014.
- [21] C. Archetti, Á. Corberán, I. Plana, J. Sanchis e M. Speranza, “A matheuristic for the Team Orienteering Arc Routing Problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 245, n° 2, pp. 392-401, 2015.
- [22] M. Syslo, N. Deo e J. Kowalik, *Discrete Optimization Algorithms With Pascal Programs*, Mineola, New York: Courier Corporation, 2006, pp. 227-235.

ANEXOS

Anexo 1 – Plano de estágio

Tabela 3 - Plano de estágio – Fiscalização de estacionamento

Semana	Data de Início	Data de Fim	Duração (dias)	Atividade
1 – 2	01 Fev.	12 Fev.	10	1. Cronograma, definição do programa de atividades
1	01 Fev.	05 Fev.	5	- Definir as várias fases/atividades do Estágio
2	08 Fev.	12 Fev.	5	- Validação do cronograma por parte da EMEL / ISEG - Identificação de todas as variáveis objetivo, Restrições
3 – 8	15 Fev.	25 Mar.	10	2. Algoritmo do Índice de Criticidade
3	15 Fev.	19 Fev.	5	- Identificação e parametrização das variáveis explicativas. - Desenvolvimento da proposta para o modelo de atualização do IC. - Desenho conceptual da interface para o IC.
8	22 Fev.	25 Mar.	5	- Conclusão e validação da proposta do algoritmo do IC. - Simulação e Avaliação dos resultados do IC. - Apresentação da proposta de modelo e de resultados do IC. - Entrega de utilizáveis (<i>Deliverables</i>) do IC
9 – 12	28 Mar.	22 Abr.	20	3. Construção do Grafo
9	28 Mar.	01 Abr.	5	- Identificação e parametrização das variáveis explicativas * Realização de um percurso com um AFE. - Início da construção da proposta de grafo.
10	04 Abr.	08 Abr.	5	- Proposta de modelo de atualização de dados para o grafo. - Definição do modelo de tempos de deslocação / fiscalização de cada troço (por hora).
11	11 Abr.	15 Abr.	5	- Conclusão e validação da proposta de grafo, por hora. - Desenho conceptual do interface para o grafo. - Simulação e Avaliação de resultados. - Apresentação (modelo e resultados) e entrega de utilizáveis do Grafo.
12	18 Abr.	22 Abr.	5	- Elaboração do Capítulo - IC e Grafo.
13 – 18	25 Abr.	03 Jun.	40	4. Proposta de Modelo para dois ou mais AFE numa hora
13	25 Abr.	29 Abr.	5	- Pesquisa bibliográfica.
14	02 Mai.	06 Mai.	5	- Apresentação e validação do modelo teórico. - Início do desenvolvimento da proposta de modelo (heurística).
15	09 Mai.	13 Mai.	5	- Conclusão e validação da proposta de modelo (heurística).
16	16 Mai.	20 Mai.	5	- Construção e validação do <i>pseudocódigo</i> - Programação da proposta de modelo para apenas um AFE
17	23 Mai.	27 Mai.	5	- Desenho conceptual do interface - Início dos testes e avaliação do modelo.
18	30 Mai.	03 Jun.	5	- Continuação dos testes e avaliação do modelo.

				<ul style="list-style-type: none"> - Validação e apresentação da proposta de modelo e resultados. - Entrega dos utilizáveis (<i>deliverables</i>) do modelo para apenas um AFE - Início dos Testes de rua.
19 – 24	06 Jun.	15 Jul.	40	5. Proposta de Modelo para múltiplos AFE para mais de uma hora
19	06 Jun.	10 Jun.	5	- Pesquisa bibliográfica para a proposta de modelo para múltiplos AFE.
20	13 Jun.	17 Jun.	5	<ul style="list-style-type: none"> - Validação do modelo teórico. - Desenvolvimento da proposta de modelo para múltiplos AFE (heurística).
21	20 Jun.	24 Jun.	5	<ul style="list-style-type: none"> - Conclusão e validação da proposta de modelo (heurística). - Desenvolvimento e validação do <i>pseudocódigo</i>.
22	27 Jun.	01 Jul.	5	<ul style="list-style-type: none"> - Programação da proposta de modelo. - Desenho conceptual da interface para o modelo de múltiplos AFE
23	04 Jul.	08 Jul.	5	<ul style="list-style-type: none"> - Testes e avaliação de resultados. - Apresentação da proposta de modelo e resultados. - Entrega de utilizáveis do modelo para múltiplos AFE.
24	11 Jul.	15 Jul.	5	- Elaboração do Capítulo – Percursos para múltiplos AFE.
25 – 26	18 Jul.	29 Jul.	10	6. Desenho de uma interface de programação utilizável pela EMEL
25	18 Jul.	22 Jul.	5	- Validação final do desenho conceptual da Interface.
26	25 Jul.	29 Jul.	5	- Concretização/ implementação.
27 – 31	01 Ago.	02 Set.	25	7. Avaliação de resultados
27	01 Ago.	05 Ago.	5	<ul style="list-style-type: none"> - Formação à EMEL- Funcionamento dos modelos e escolha de cenários. - Cenário 1.
28	08 Ago.	12 Ago.	5	- Cenário 2.
29	15 Ago.	19 Ago.	5	- Cenário 3.
30	22 Ago.	26 Ago.	5	- Cenário 4.
31	29 Ago.	02 Set.	5	- Desenvolvimento do Capítulo – Avaliação e Simulação dos modelos.
32- 35	05 Set.	29 Set.	20	8. Correções pontuais/finais à solução
32	05 Set.	09 Set.	5	- Calibrações finais do modelo.
33	12 Set.	16 Set.	5	<ul style="list-style-type: none"> - Continuação de calibrações finais. - Início de testes ao modelo final calibrado.
34	19 Set.	23 Set.	5	- Continuação dos testes ao modelo final calibrado.
35	26 Set.	29 Set.	5	- Desenvolvimento do Capítulo – Ponderações finais.
35	-	30 Set.		9. Entrega do <i>software</i> e do código fonte associado 0

Anexo 2 – Escalas de trabalho dos AFE

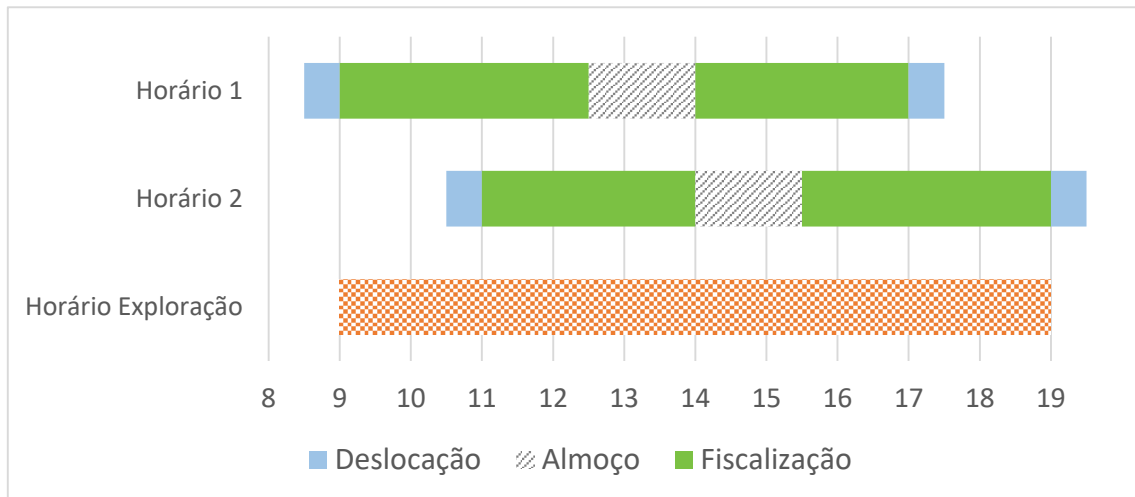
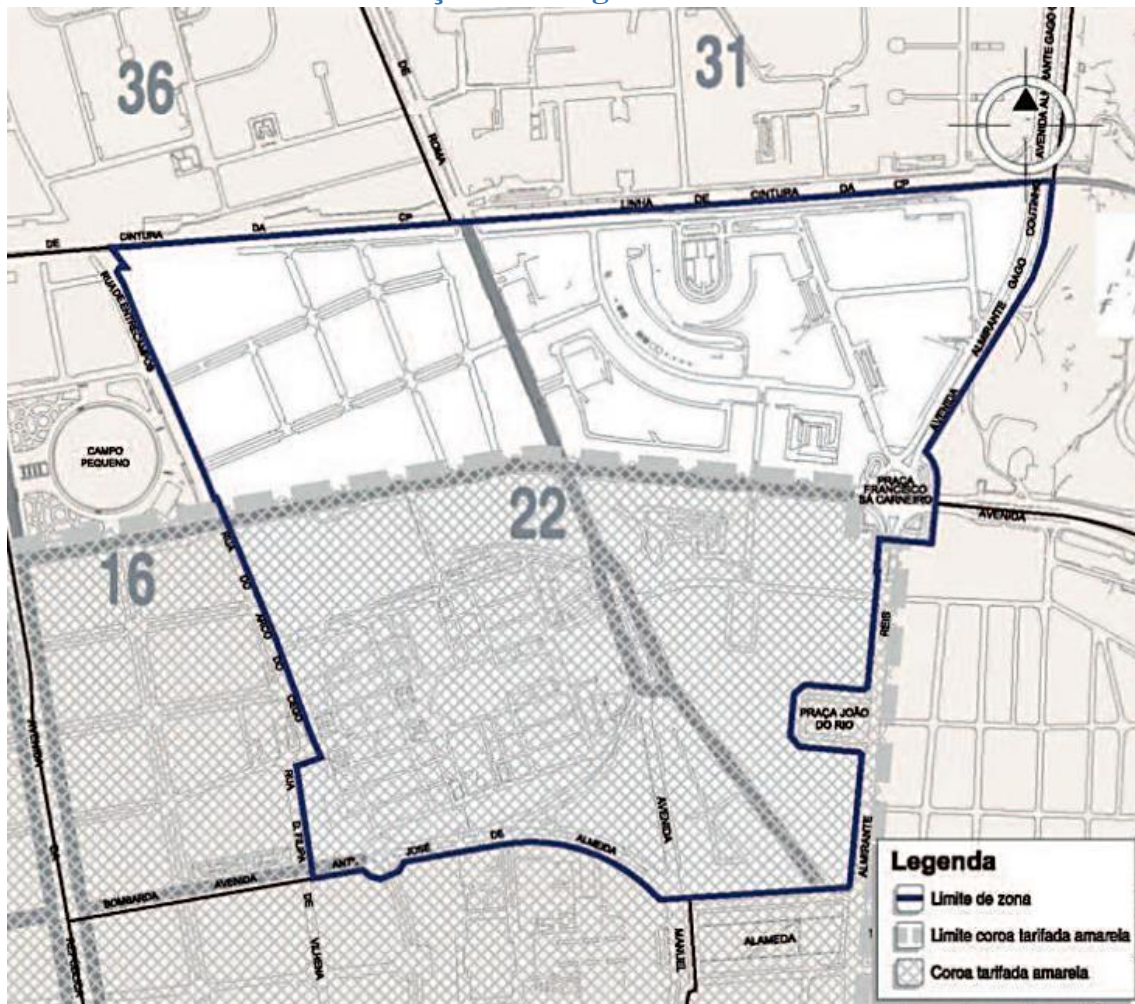


Figura 13 - Horários de fiscalização dos AFE e de exploração de estacionamento

Anexo 3 – Área de atuação do estágio.



Fonte: Boletim Municipal, RGE [3, p. 580 (52)]

Figura 14 - Zona 022 – Av. João XXI

Anexo 4 – Rede

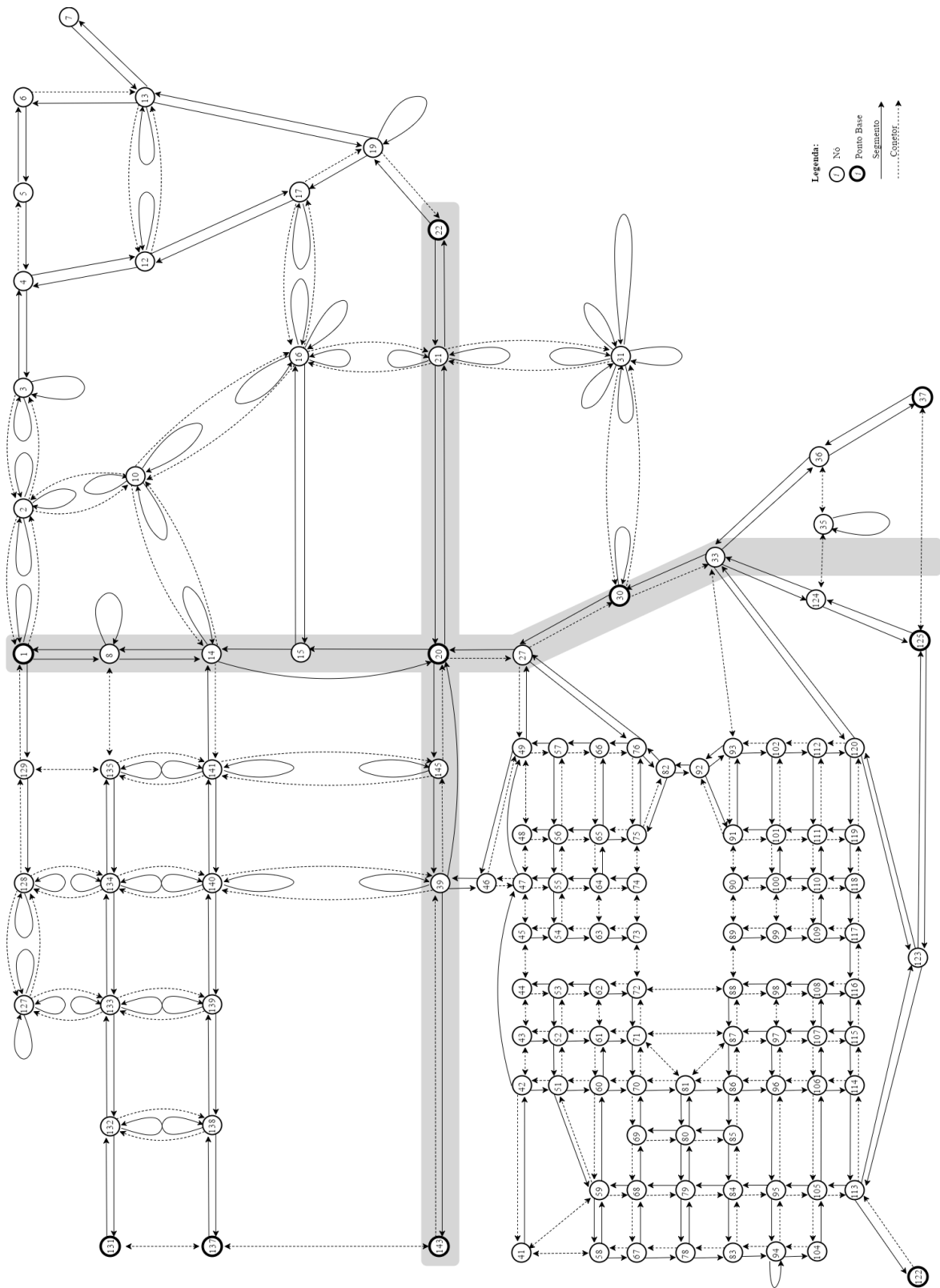


Figura 15 - Rede de deslocação construída no âmbito do estágio

Anexo 5 – Rede de deslocação/fiscalização dividida em subzonas

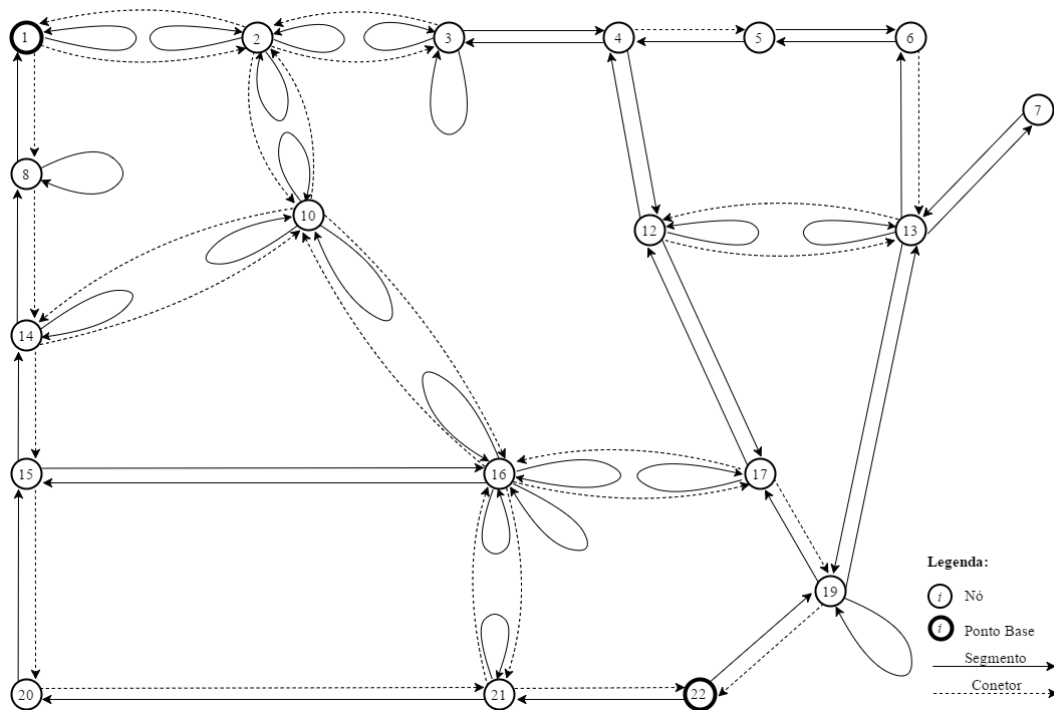


Figura 16 - Rede da subzona 1

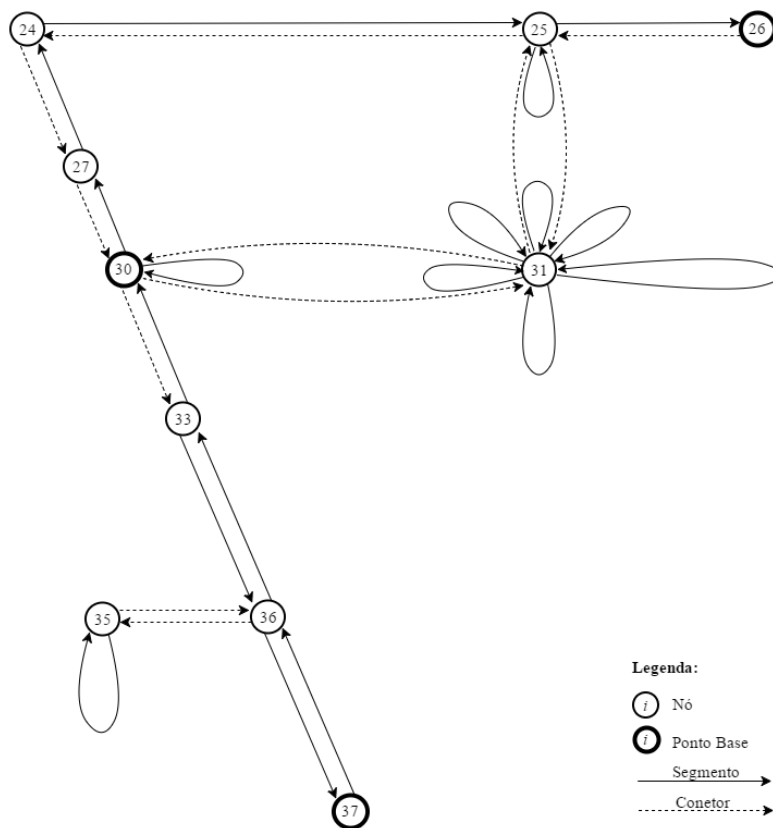


Figura 17 - Rede da subzona 2

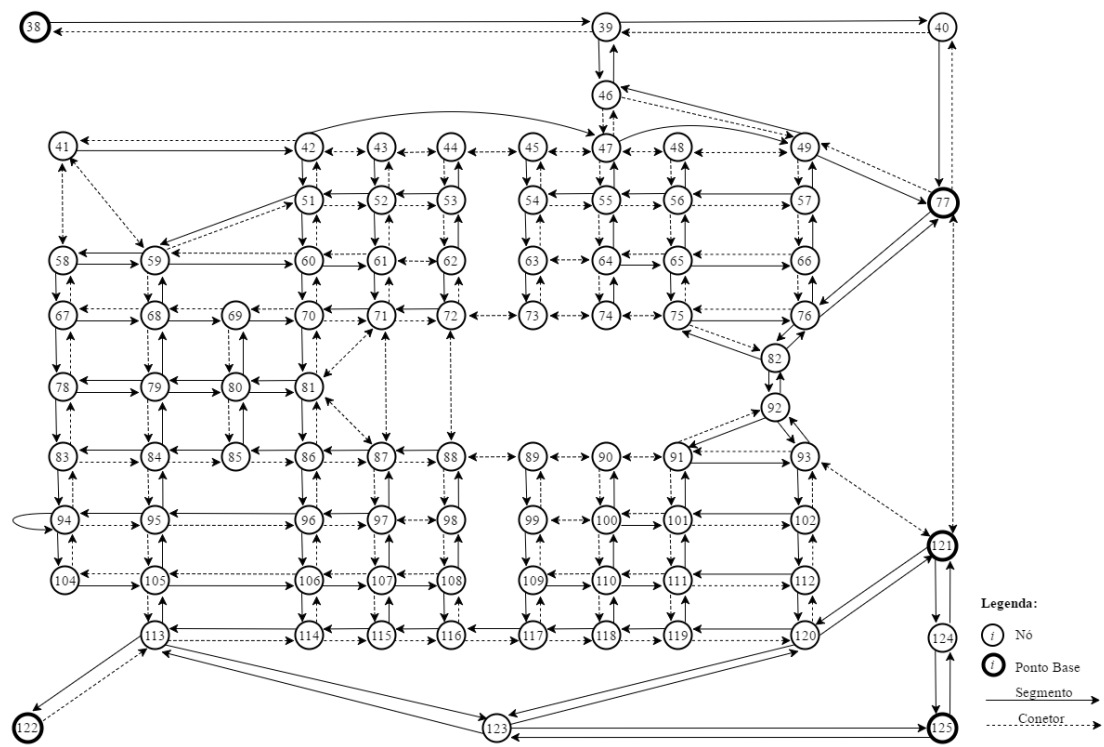


Figura 18 - Rede da subzona 3

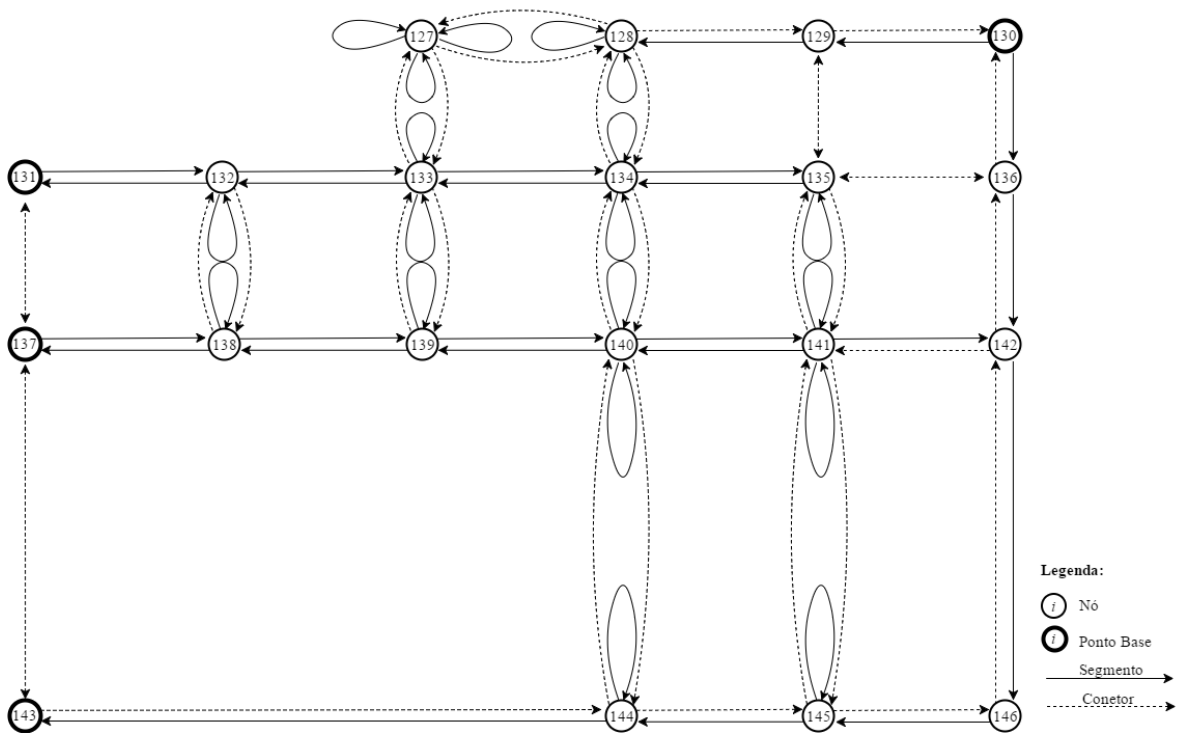


Figura 19 - Rede da subzona 4

Anexo 6 – Resultados das instâncias de teste

Tabela 5 - Resultados para a primeira instância de teste

AFE	Turno	Heurística	Criticidade	Aumento Criticidade	Duração (minutos)	% Tempo em fiscalização	Número de SA	Tempo Computacional (seg)	
			Absoluto	Relativo					
A	1	Construtiva	479.3	-	-	149.6	94.0%	1	1.47
		M1	734.3	255.0	53%	148.7	90.0%	71	164.20
		M2	809.4	330.1	69%	149.8	83.9%	240	563.55
	2	Construtiva	634.2	-	-	164.2	78.1%	1	2.11
		M1	781.7	147.5	23%	164.5	91.6%	77	156.91
		M2	791.6	157.4	25%	164.4	86.8%	234	422.56
B	1	Construtiva	564.3	-	-	149.9	86.6%	1	2.06
		M1	564.3	0.0	0%	148.4	84.8%	71	159.75
		M2	624.0	59.7	11%	148.8	87.2%	171	305.24
	2	Construtiva	208.2	-	-	163.2	71.1%	1	1.28
		M1	340.6	132.4	64%	164.8	86.8%	63	94.14
		M2	351.1	142.9	69%	164.6	91.3%	115	134.39

Tabela 4 - Resultados para a segunda instância de teste

AFE	Turno	Heurística	Criticidade	Aumento Criticidade	Duração (minutos)	% Tempo em fiscalização	Número de SA	Tempo Computacional (seg)	
			Absoluto	Relativo					
A	1	Construtiva	317.8	-	-	149.2	86.8%	1	0.55
		M1	327.2	9.4	3%	147.7	89.9%	20	11.81
		M2	327.2	9.5	3%	148.9	88.4%	83	42.87
	2	Construtiva	123.1	-	-	163.5	92.1%	1	0.42
		M1	141.2	18.1	15%	163.7	93.9%	19	9.58
		M2	134.1	11.0	9%	160.7	87.8%	89	38.53
B	1	Construtiva	206.9	-	-	149.5	68.0%	1	0.64
		M1	268.3	61.5	30%	148.6	73.9%	32	17.72
		M2	295.8	88.9	43%	147.7	77.2%	78	38.10
	2	Construtiva	19.0	-	-	163.0	76.4%	1	0.47
		M1	94.2	75.3	397%	164.3	90.2%	18	8.61
		M2	139.7	120.7	636%	162.9	68.5%	135	54.52

Anexo 7 – Resultados da análise de parâmetros para as denúncias esperadas

Tabela 6 - Valores da ponderação das n últimas fiscalizações

n últimas fiscalizações	$n=1$	$n=2$		$n=19$		$n=20$	
		Monótona	Crescente	Monótona	Crescente	Monótona	Crescente
1	1.00	0.50	0.70	0.053	0.10	0.05	0.09
2	-	0.50	0.30	0.053	0.10	0.05	0.09
3	-	-	-	0.053	0.10	0.05	0.09
4	-	-	-	0.053	0.10	0.05	0.09
5	-	-	-	0.053	0.10	0.05	0.09
6	-	-	-	0.053	0.07	0.05	0.09
7	-	-	-	0.053	0.06	0.05	0.09
8	-	-	-	0.053	0.06	0.05	0.05
9	-	-	-	0.053	0.06	0.05	0.05
10	-	-	-	0.053	0.06	0.05	0.05
11	-	-	-	0.053	0.03	0.05	0.05
12	-	-	-	0.053	0.03	0.05	0.05
13	-	-	-	0.052	0.03	0.05	0.05
14	-	-	-	0.052	0.03	0.05	0.01
15	-	-	-	0.052	0.03	0.05	0.01
16	-	-	-	0.052	0.01	0.05	0.01
17	-	-	-	0.052	0.01	0.05	0.01
18	-	-	-	0.052	0.01	0.05	0.01
19	-	-	-	0.052	0.01	0.05	0.01
20	-	-	-	-	-	0.05	0.01
Total	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 7 - Resultados finais da primeira e segunda semanas sobre a análise comparativa entre denúncias realizadas e esperadas

	Semana	Real (R)	$n=1$	$n=2$		$n=19$		$n=20$	
				Monótona	Crescente	Monótona	Crescente	Monótona	Crescente
Denúncias	1	306	306	338	351	304	336	298	326
	2	335	308	358	360	324	367	320	359
	Total	641	614	696	711	628	703	618	685
Erro Absoluto (A)	1	0	0	-32	-45	2	-30	8	-20
	2	0	27	-23	-25	11	-32	15	-24
	Total	0	27	-55	-70	13	-62	23	-44
	Erro Diário Médio	0	4.4%	7.9%	9.8%	2.1%	8.8%	3.7%	6.4%
Erro Relativo $\left(\frac{ A }{R}\right)$	1	0.0%	11.0%	12.8%	16.6%	10.4%	10.2%	9.7%	7.5%
	2	0.0%	8.0%	11.5%	12.7%	11.1%	9.6%	11.4%	8.6%
	Erro Diário Médio	0.0%	9.5%	12.2%	14.6%	10.7%	9.9%	10.5%	8.0%

Anexo 8 – Resultados da análise de cenários para tempos de deslocação

Tabela 8 - Resultados da análise dos tempos de deslocação com diferentes cenários para dois percursos fixos de fiscalização realizados

Percurso de Fiscalização de Estacionamento	A				B			
	Real (R)	Cenário (C)			Real (R)	Cenário (C)		
Velocidade (km/h)	-	2.95	2.5	2	-	2.95	2.5	2
Número de Segmentos	23	23	23	23	8	8	8	8
Criticidade	61	61	61	61	16	16	16	16
Denúncias	19	19	19	19	5	5	5	5
Tempo* (T)	195.53	196.06	206.91	224.72	75.97	66.41	69.88	75.58
Erro Absoluto* (R-T)	-	0.53	11.38	29.19	-	-9.56	-6.09	-0.39
Erro Relativo $\frac{ R - T }{R}$	-	0.27%	5.82%	14.93%	-	12.58%	8.01%	0.51%
Distribuição de Erros de Tempos*								
Min	-	-6.43	-6.00	-5.30	-	-5.53	-5.13	-4.48
Percentil 5	-	-2.98	-2.56	-1.86	-	-5.14	-4.60	-3.71
Percentil 50	-	0.26	0.59	1.58	-	-0.26	-0.08	0.21
Percentil 95	-	3.64	4.07	4.77	-	1.15	1.73	2.69
Máx	-	4.52	5.06	5.95	-	2.62	3.18	4.09
Distância (km)	2.96	2.96	2.96	2.96	0.95	0.95	0.95	0.95
Tempo (horas)	3.26	3.27	3.45	3.75	1.27	1.11	1.16	1.26
Velocidade Total (km/h)	0.91	0.91	0.86	0.79	0.75	0.86	0.81	0.75

*minutos

Anexo 9 – Resultados semana de testes piloto

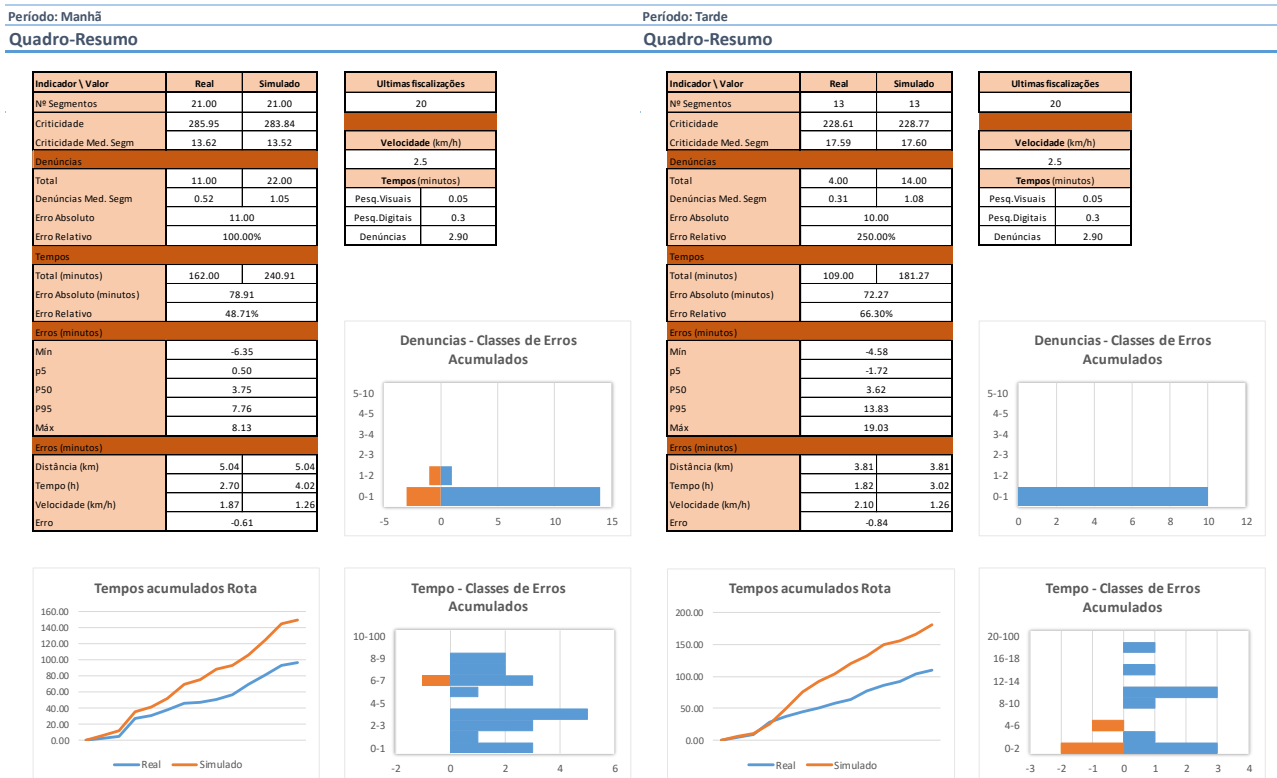


Figura 20 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 23 de setembro

Período: Manhã

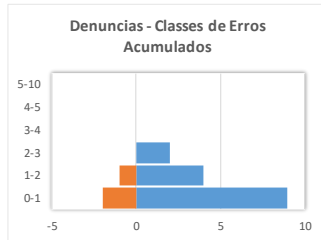
Período: Tarde

Quadro-Resumo

Quadro-Resumo

Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	12	12
Criticidade	216.34	215.68
Criticidade Med. Segm	18.03	17.97
Denúncias		
Total	7.00	11.00
Denúncias Med. Segm	0.58	0.92
Erro Absoluto	4.00	
Erro Relativo	57.14%	
Tempos		
Total (minutos)	140.00	125.32
Erro Absoluto (minutos)	-14.68	
Erro Relativo	-10.49%	
Erros (minutos)		
Min	-14.75	
p5	-6.10	
P50	0.86	
P95	3.58	
Máx	5.54	
Erros (minutos)		
Distância (km)	3.46	3.46
Tempo (h)	2.33	2.09
Velocidade (km/h)	1.48	1.66
Erro	0.17	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
3.0	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10



Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	15	15
Criticidade	89.87	76.18
Criticidade Med. Segm	5.99	5.08
Denúncias		
Total	14.00	18.00
Denúncias Med. Segm	0.93	1.20
Erro Absoluto	4.00	
Erro Relativo	28.57%	
Tempos		
Total (minutos)	149.00	136.28
Erro Absoluto (minutos)	-12.72	
Erro Relativo	-8.54%	
Erros (minutos)		
Min	-13.02	
p5	-4.76	
P50	-0.84	
P95	4.34	
Máx	8.63	
Erros (minutos)		
Distância (km)	3.44	3.44
Tempo (h)	2.48	2.27
Velocidade (km/h)	1.39	1.52
Erro	0.13	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
3.0	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10

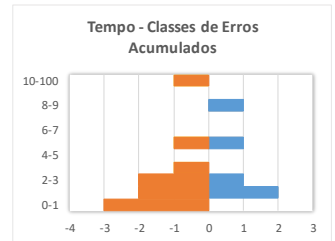
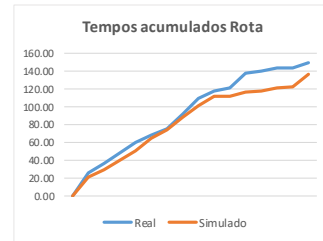
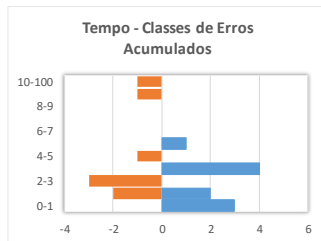
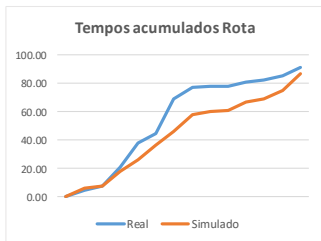
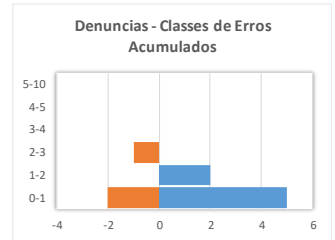


Figura 21 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 26 de setembro

Período: Manhã

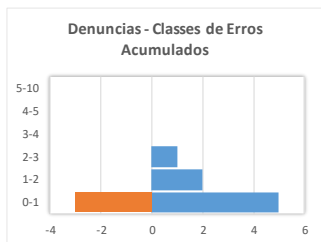
Período: Tarde

Quadro-Resumo

Quadro-Resumo

Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	15	15
Criticidade	207.25	203.80
Criticidade Med. Segm	13.82	13.59
Denúncias		
Total	10.00	19.00
Denúncias Med. Segm	0.67	1.27
Erro Absoluto	9.00	
Erro Relativo	90.00%	
Tempos		
Total (minutos)	145.00	143.09
Erro Absoluto (minutos)	-1.91	
Erro Relativo	-1.32%	
Erros (minutos)		
Min	-12.03	
p5	-3.85	
P50	0.47	
P95	4.24	
Máx	6.48	
Erros (minutos)		
Distância (km)	4.28	4.28
Tempo (h)	2.42	2.38
Velocidade (km/h)	1.77	1.80
Erro	0.02	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
3.0	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10



Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	17	17
Criticidade	99.30	96.26
Criticidade Med. Segm	5.84	5.66
Denúncias		
Total	12.00	18.00
Denúncias Med. Segm	0.71	1.06
Erro Absoluto	6.00	
Erro Relativo	50.00%	
Tempos		
Total (minutos)	155.00	147.55
Erro Absoluto (minutos)	-7.45	
Erro Relativo	-4.81%	
Erros (minutos)		
Min	-9.67	
p5	-4.46	
P50	-0.14	
P95	3.49	
Máx	6.27	
Erros (minutos)		
Distância (km)	3.56	3.56
Tempo (h)	2.58	2.46
Velocidade (km/h)	1.38	1.45
Erro	0.07	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
3.0	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10

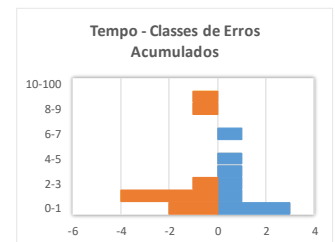
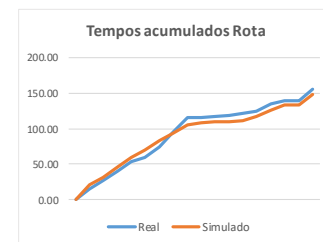
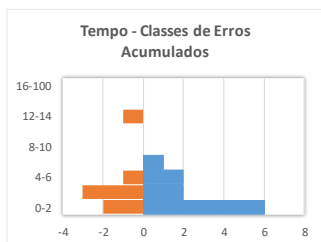
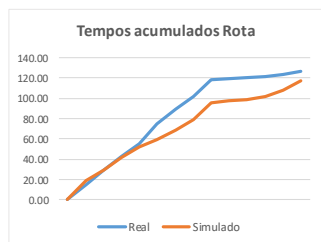
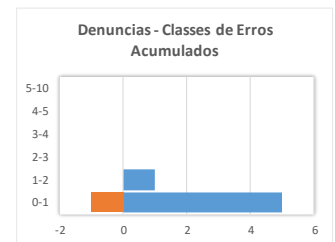


Figura 22 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 27 de setembro

Período: Manhã

Quadro-Resumo

Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	9	9
Criticidade	151.86	151.89
Criticidade Med. Segm	16.87	16.88
Denúncias		
Total	5.00	8.00
Denúncias Med. Segm	0.56	0.89
Erro Absoluto	3.00	
Erro Relativo	60.00%	
Tempos		
Total (minutos)	128.00	107.49
Erro Absoluto (minutos)	-20.51	
Erro Relativo	-16.02%	
Erros (minutos)		
Min	-8.25	
p5	-7.00	
P50	-0.74	
P95	1.40	
Máx	2.83	
Erros (minutos)		
Distância (km)	2.85	2.85
Tempo (h)	2.13	1.79
Velocidade (km/h)	1.34	1.59
Erro	0.25	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
2.9	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10

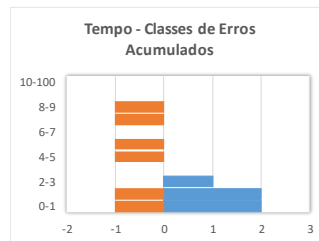
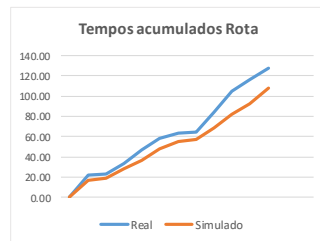
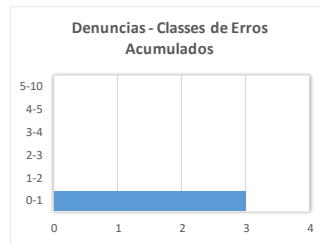


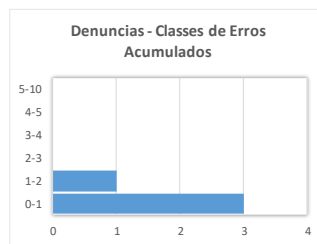
Figura 24 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 28 de setembro

Período: Manhã

Quadro-Resumo

Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	10	10
Criticidade	53.47	51.75
Criticidade Med. Segm	5.35	5.17
Denúncias		
Total	10.00	15.00
Denúncias Med. Segm	1.00	1.50
Erro Absoluto	5.00	
Erro Relativo	50.00%	
Tempos		
Total (minutos)	128.00	139.25
Erro Absoluto (minutos)	11.25	
Erro Relativo	8.79%	
Erros (minutos)		
Min	-5.31	
p5	-4.21	
P50	0.45	
P95	8.94	
Máx	11.50	
Erros (minutos)		
Distância (km)	3.84	3.84
Tempo (h)	2.13	2.32
Velocidade (km/h)	1.80	1.66
Erro	-0.15	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
2.9	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10



Período: Tarde

Quadro-Resumo

Indicador \ Valor	Real	Simulado
Nº Segmentos	12	12
Criticidade	30.27	23.31
Criticidade Med. Segm	2.52	1.94
Denúncias		
Total	6.00	13.00
Denúncias Med. Segm	0.50	1.08
Erro Absoluto	7.00	
Erro Relativo	116.67%	
Tempos		
Total (minutos)	90.00	118.65
Erro Absoluto (minutos)	28.65	
Erro Relativo	31.83%	
Erros (minutos)		
Min	-6.51	
p5	-5.39	
P50	3.89	
P95	7.51	
Máx	9.60	
Erros (minutos)		
Distância (km)	2.88	2.88
Tempo (h)	1.50	1.98
Velocidade (km/h)	1.92	1.45
Erro	-0.46	

Ultimas fiscalizações	
20	
Velocidade (km/h)	
2.9	
Tempos (minutos)	
Pesq.Visuais	0.05
Pesq.Digitais	0.3
Denúncias	2.10

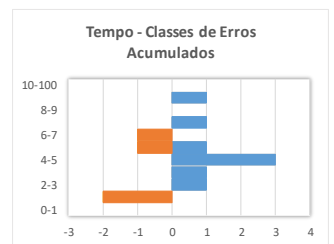
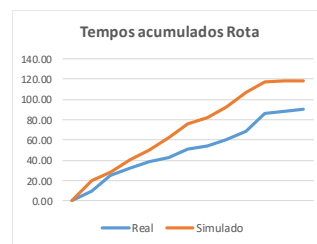
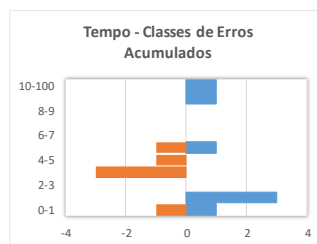
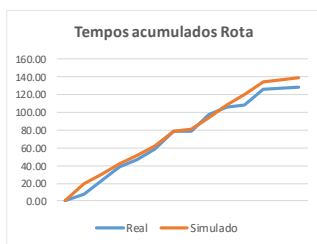
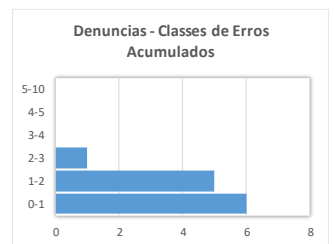


Figura 23 - Resultados da semana de testes piloto para o dia 30 de setembro