UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Área de Concentração: Transportes

RICARDO LUIZ DE SOUZA VIEIRA

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS EM CENTROS URBANOS: UMA PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO APLICADO AO SERVIÇO DE *DELIVERY* COM BICICLETAS

VITÓRIA - ES

2019

RICARDO LUIZ DE SOUZA VIEIRA

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS EM CENTROS URBANOS: UMA PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO APLICADO AO SERVIÇO DE *DELIVERY* COM BICICLETAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Alcântara Cardoso.

Vitória - ES

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

V657r

Vieira, Ricardo Luiz de Souza, 1969-
Roteirização de veículos em centros urbanos : uma proposta de modelo matemático aplicado ao serviço de delivery com bicicletas / Ricardo Luiz de Souza Vieira. - 2019.
62 f. : il.

Orientadora: Patrícia Alcântara Cardoso.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Transporte urbano. 2. Transporte de carga. I. Cardoso, Patrícia Alcântara. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS EM CENTROS URBANOS: UMA PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO APLICADO AO SERVIÇO DE DELIVERY COM BICICLETAS

Ricardo Luiz de Souza Vieira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

Aprovada no dia **01 de abril de 2019** por:

Profa. Dra. Patrícia Alcântara Cardoso
Doutora em Engenharia de Produção
Orientadora – UFES

Profa. Dra. Marta Monteiro da Costa Cruz
Doutora em Engenharia de Transportes
Examinadora Interna – UFES

Adriana Leiras

Profa. Dra. Adriana Leiras
Doutora em Engenharia de Produção
Examinadora Externa – PUC / RJ

Vitória – ES, abril de 2019

AGRADECIMENTOS

A Deus que me proporcionou a graça da vida e que me deu forças para superar todas as dificuldades encontradas ao longo da minha trajetória.

À minha família, em especial à minha esposa Luciane, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e ajudando para que eu alcançasse o meu objetivo.

Aos meus pais que proporcionaram a base da minha formação como pessoa e me ensinaram os verdadeiros valores.

Agradeço especialmente à minha orientadora, Profa. Dra. Patrícia Alcântara Cardoso, que teve a sabedoria necessária para me direcionar nos momentos de grandes dificuldades no meu retorno para a vida acadêmica após vários anos. Agradeço pela confiança e amizade.

Aos demais professores do PPGEC, em especial à profa. Marta e ao Prof. Gregório, que me auxiliaram durante à minha trajetória no mestrado.

Ao meu amigo Marcos Wagner Jesus Servare Junior que me ajudou em um momento crucial do desenvolvimento do meu trabalho.

Aos amigos que sempre me incentivaram nos momentos em que pensei em desistir, em especial ao Marcos Monte e Flavio Souza.

Obrigado!

RESUMO

O crescimento das cidades tem tornado o transporte urbano de carga um grande desafio. É possível perceber que o ritmo de crescimento da infraestrutura viária urbana é menor do que o crescimento do número de veículos e de pessoas, de forma que os impactos negativos como congestionamento do trânsito, poluição e acidentes são cada vez mais impactantes. Um dos serviços de transporte que mais cresce nas cidades é o serviço de *delivery*, principalmente o de alimentos, sendo muito comum vermos motocicletas sendo utilizadas para fazer as entregas. Um importante conceito que surgiu para tratar da interação entre as pessoas e o meio ambiente urbano é o conceito de *City Logistics*, que sugere o uso de transporte urbano ambientalmente amigável. Neste sentido, o uso de bicicletas para o serviço de *delivery* surge como uma opção para reduzir os impactos negativos. Neste trabalho foi adaptado e implementado um modelo matemático de programação e roteirização de veículos aplicado ao serviço de *delivery* considerando o uso de bicicletas para fazer as entregas. Foi utilizado o software Cplex para rodar 48 cenários, onde foi possível demonstrar que o modelo pode ser resolvido de forma ótima para pequenas instâncias, podendo ser utilizado para otimizar rotas de entrega com bicicletas.

Palavras-chave: *City logistics*, problemas de coleta e entrega, *delivery*, problemas de roteirização de veículos, bicicleta de carga.

ABSTRACT

The growth of cities has made urban freight transport a major challenge. It is possible to see that the growth rate of urban road infrastructure is lower than the growth of the number of vehicles and people, so that the negative impacts such as traffic congestion, pollution and accidents are increasingly impacting. One of the fastest growing transportation services in the cities is the delivery service, mainly food delivery, and it is very common to see motorcycles being used to make deliveries. An important concept that has emerged to address the interaction between people and the urban environment is City Logistics, which suggests the use of environmentally friendly urban transport. In this sense, the use of bicycles for the delivery service appears as an option to reduce the negative impacts. In this work, a mathematical model for the vehicle routing and programming was modified and applied to the delivery service considering the use of bicycles to make deliveries. The software Cplex was used to run 48 scenarios, where it was possible to demonstrate that the model can be solved in an optimal way for small instances, so that it can be used to optimize delivery routes with bikes.

Keywords: City Logistics, pick-up and delivery problems, delivery, vehicle routing problems, cargo bike.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de sistema de distribuição em Londres - Inglaterra 20
Figura 2: Cubicycle da DHL 22
Figura 3: Classificação para os problemas de coleta e entrega 25
Figura 4: Sistema de integração para transporte de carga e passageiros 26
Figura 5: Exemplo explicativo do problema proposto 34
Figura 6: modelos de bicicletas e triciclos de carga 35
Figura 7: Lógica das janelas de tempo tipo Hard 41
Figura 8: Definição do nome dos cenários 43
Figura 9: Exemplo do modelo matemático no Cplex 44
Figura 10: Exemplo de arquivo de dados no Cplex 45
Figura 11: Rotas do cenário S-3-8-8 53
Figura 12: Rotas do cenário S-3-10-8 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de cenários de teste.....42
Tabela 2: Resultados para 4 e 6 pedidos 46
Tabela 3: Cenários com 8 pedidos 47
Tabela 4: Cenários com 10 pedidos 48
Tabela 5: Impacto da janela de tempo para cenários com 4 e 6 pedidos.....49
Tabela 6: Impacto da janela de tempo para cenários com 8 pedidos 50
Tabela 7: Impacto do raio de atuação de 1km e 2km 51
Tabela 8: Impacto do raio de atuação de 3km.....52
Tabela 9: janelas de tempo dos cenários S-3-8-8 e S-3-10-8.....53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRASEL	Associação Brasileira de Bares e Restaurantes
B2B	*Business to business*
B2C	*Business to consumer*
C2C	*Consumer to consumer*
CD	Centro de distribuição
CO_2	Dióxido de carbono
CVRP	*Capacitated vehicle routing problem*
DARP	*Dial-a-ride problem*
DARPTW	*Dial-a-ride problem with time windows*
FRT	*freight rapid transit*
GVRP	*Green vehicle routing problem*
HVRP	*Heterogeneous fleet vehicle routing problem*
ITS	*Intelligent transportation systems*
ONU	Organização das Nações Unidas
PDP	*Pick-up and delivery problem*
PDPTW	*Pick-up and delivery problem with time Windows*
PRT	*Personal rapid transit*
SMS	*Short message service*
VRP	*Vehicle routing problem*
VRPPD	*Vehicle routing problem with pick-up and delivery*
VRPTW	*Vehicle routing problem with time Windows*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
1.1. Objetivos 13
1.1.1. Objetivo Geral 13
1.1.2. Objetivos específicos 13
1.2. Estrutura do trabalho 14
2. REVISÃO DA LITERATURA 15
2.1. City Logistics 15
2.2. O Uso de Bicicletas para o Transporte de Carga 18
2.3. O Serviço de *Delivery* 22
2.4. Roteirização de veículos 23
2.5. Problema de Coleta e Entrega (*Pick-up and Delivery Problem*) 24
2.5.1. Modelo matemático para o PDP 29
2.5.1.1. Modelo de PDP sem janela de tempo 29
2.5.1.2. Modelo de PDP com janela de tempo 31
3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 34
3.1. Descrição do problema proposto 34
3.2. Bicicletas de carga 35
3.3. Considerações para a definição dos cenários de teste 36
4. MODELO MATEMÁTICO 37
4.1. Modelo Proposto 37
5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS 40
5.1. Cenários de teste 40
5.2. Impacto do número de pedidos 45
5.3. Impacto da janela de tempo 48
5.4. Impacto do raio de atuação e distância máxima permitida para a rota 50

6. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS 55

BIBLIOGRAFIA 57

ANEXO 1 61

1. INTRODUÇÃO

O transporte de carga é fundamental para o funcionamento e o desenvolvimento das cidades, e isto pode ser presenciado no nosso cotidiano através da circulação de caminhões, vans, motocicletas e outros veículos para esta finalidade. São vários os tipos de carga transportados: alimentos, bebidas, vestuário, encomendas, documentos, combustíveis, enfim, uma infinidade de produtos que são necessários para a economia e para a manutenção da vida urbana.

Melo e Baptista (2017) destacam que o aumento da urbanização, o crescimento da população, a mudança dos padrões de demanda e a redução de estoques das empresas têm feito com que as movimentações de frete nas cidades aumentem.

Além do aumento das movimentações devido ao frete, há também o deslocamento de pessoas e prestadores de serviço, todos competindo pelo uso das mesmas vias, causando algumas consequências negativas conforme apontado por Browne et al. (2012): congestionamento do tráfego, poluição local do ar, emissão de gases de efeito estufa, poluição sonora e segurança (acidentes).

Facchini (2006) destaca ainda alguns impactos negativos para as próprias empresas que atuam nas cidades e que precisam se deslocar para realizar as suas atividades, como: aumento nos tempos de entrega, baixa qualidade do serviço, dificuldade de efetuar manobras, dificuldade para encontrar vagas para estacionar próximas aos pontos de entrega e menor segurança.

O tema transporte é cada vez mais relevante no cenário mundial, uma vez que grande parte das emissões de gases de efeito estufa são geradas por este setor. De Carvalho (2011) destaca que o transporte é responsável por cerca de 20% das emissões de CO_2 (dióxido de carbono), que é um poluente global e um dos principais gases causadores do efeito estufa.

Diante do exposto, o uso de bicicletas para o transporte de carga se apresenta como uma alternativa sustentável. Esta não é uma ideia nova, Gruber et al. (2013) citam que nos anos 1950 e 1960 as bicicletas já eram utilizadas para esta finalidade, e continuou a ser utilizada nos anos 1970 nos Estados Unidos e nos anos 1980 na Alemanha. Leonardi et al. (2012) descrevem que no início do século XX era comum

o uso de bicicletas no Reino Unido para transporte de mercadorias das lojas (padarias, bolarias, mercadinhos...) para as casas das pessoas, para vender sorvetes no verão e para serviços postais (serviço este em que o uso de bicicletas sempre foi muito tradicional). Porém, em meados deste mesmo século, houve um declínio no uso de bicicletas e aumento do uso de carros e vans que proporcionaram uma redução considerável do custo do frete por unidade transportada devido à sua capacidade de carga e redução do preço de aquisição. O crescimento das cidades para locais mais distantes também colaborou para este declínio.

O uso de bicicletas para o transporte de carga também tem os seus desafios e dificuldades. Leonardi et al. (2012) citam alguns, como: baixa capacidade de carga, tanto em peso quanto em volume, o que limita os tipos de carga que podem ser transportados; baixa velocidade, o que aumenta o tempo de trabalho e limita a distância máxima percorrida para uma operação viável; e CD (centros de distribuição) localizados nos arredores das cidades, o que obriga a bicicleta a se deslocar em grandes distâncias quando trabalham em um modelo logístico que utiliza CD. Diante destes desafios e dificuldades, Leonardi et al. (2012) concluem que o uso de bicicletas para o transporte de carga é mais adequado nas seguintes condições:

- Distribuição de produtos de pequenos pesos, volumes e dimensões;
- Utilização em áreas urbanas centrais e congestionadas;
- Operações com baixo custo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo matemático para o problema de coleta e entrega aplicado ao serviço de *delivery*, considerando o uso de bicicletas para tal serviço, e realizar testes computacionais com cenários fictícios.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar o problema de coleta e entrega com bicicletas em centros urbanos dentro do contexto de *City Logistics*;

- Propor restrições técnicas necessárias para o uso de bicicletas no serviço de *delivery*.

1.2. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. No próximo capítulo é feita uma revisão da literatura sobre *city logistics*, uso de bicicletas para transporte de carga, o serviço de *delivery*, roteirização de veículos e o problema de coleta e entrega.

O capítulo 3 apresenta o problema a ser estudado e o capítulo 4 o modelo matemático proposto.

O capítulo 5 apresenta os experimentos computacionais, explica os cenários estudados e discorre sobre os resultados dos testes.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura será apresentada em cinco etapas. A primeira trata do tema *City Logistics*, trazendo os seus principais desafios. A segunda discorre sobre o uso de bicicletas para o transporte de carga e a terceira sobre o serviço de *delivery*. A quarta etapa trata da roteirização de veículos e a última especificamente dos problemas de coleta e entrega.

2.1. City Logistics

A população urbana do mundo cresce a cada ano. De acordo com um levantamento feito pela ONU – Organização das Nações Unidas (2018), atualmente 55,3% da população mundial vive nas cidades, sendo que no Brasil este percentual é ainda maior, 86,6%. Ainda, a tendência é de crescimento, a estimativa para o ano de 2050 é que o percentual da população urbana passe para 68,4% no mundo e 92,4% no Brasil.

Além do crescimento populacional outras tendências sugerem que a necessidade de transporte de carga nas cidades também irá crescer ao longo dos anos. Savelsbergh e Woensel (2016) citam algumas destas tendências:

- Aumento do comércio eletrônico: entre os anos de 2011 e 2014 o *e-commerce* B2C (*Business to Consumer*) dobrou e atingiu US$1.4 trilhões em todo o mundo, e a tendência é que aumente com a penetração da internet na vida das pessoas e novas tecnologia dos telefones móveis;
- Desejo por velocidade no atendimento: as pessoas querem cada vez mais ser atendidas de forma rápida e as empresas que conseguirem este atendimento terão vantagem sobre os seus concorrentes. Como exemplo, a Amazon possui um serviço para algumas cidades dos Estados Unidos que conseguem entregar em até uma hora.
- A economia compartilhada: duas vertentes deste modelo econômico são o consumo colaborativo, com foco em redes entre consumidores – C2C (*Consumer to Consumer)*, e os negócios colaborativos, com foco em modelos entre empresas – B2B (*Business to Business*).

- Conectividade digital, *Big Data* e automação: a geração de dados e a velocidade para o tratamento dos mesmos transformando-os em informações para a tomada de decisões já são uma realidade e tendem a ser cada vez mais desenvolvidas. As novas tecnologias de sensores e sistemas de localização utilizados em infraestrutura de transporte ajudam a melhorar a confiabilidade e a eficiência operacional das empresas.
- Novas tecnologias automotivas: veículos elétricos ou movidos a combustíveis não derivados do petróleo tendem a evoluir com o tempo, o que proporciona novas alternativas para o transporte de carga nas cidades. Outra inovação é a possibilidade de acesso ao porta-malas do carro, de forma que as empresas possam entregar mercadorias em porta-malas de carros ao invés das casas.

A interação entre pessoas, meio ambiente e transporte nas cidades é tratada através do conceito de *City Logistics*.

Taniguchi et al. (2001) apud Taniguchi (2014) define *City Logistics* como sendo um processo de otimização global das atividades de logística e transporte urbano por empresas privadas, com apoio de sistemas de informação, considerando a segurança no trânsito, congestionamento do tráfego, economia de energia e economia de mercado. O autor acrescenta que este é um processo que envolve quatro *stakeholders*: os embarcadores, os transportadores, os administradores e a população residente nas cidades, cada um com o seu próprio interesse, e por isso é necessário que haja uma coordenação entre eles de forma a conseguir evoluir na direção de cidades mais habitáveis e sustentáveis.

Savelsbergh e Woensel (2016) apresentam outros termos que também são utilizados para referir-se a *City Logistics*: frete urbano, logística de última milha, logística urbana e distribuição nas cidades. Entretanto, independentemente do termo utilizado, o objetivo é encontrar maneiras eficientes e eficazes de transportar produtos em áreas urbanas considerando os efeitos negativos para o trânsito, segurança das pessoas e meio-ambiente.

Crainic (2008) acrescenta que também é necessário considerar o desenvolvimento econômico e social das cidades e que as necessidades dos *stakeholders* devem ser avaliadas de forma integrada e não individual.

Em algumas cidades é possível encontrar medidas mitigadoras para reduzir os impactos negativos. Facchini (2006) classifica estas medidas em:

- Ações reguladoras / restritivas: são de responsabilidade do poder público, e incluem restrição de acesso e circulação de veículos pesados, tempos de permanência, dimensões e pesos dos veículos, cobrança para entrar e estacionar em área urbana dentre outras;
- Ações gerenciais: têm por objetivo melhorar a eficiência das transportadoras, sendo de sua responsabilidade. Incluem sistemas tecnológicos ligados à telemática e roteirização de entregas;
- Aperfeiçoamento de infraestrutura: algumas medidas são de responsabilidade da administração pública e outras podem ser da iniciativa privada. Alguns exemplos: construção e manutenção viária, estacionamentos e áreas específicas para carga e descarga e plataformas logísticas.

Entretanto, para Crainic (2008), o caminho para a melhoria neste processo é através da racionalização das atividades de distribuição resultando em menos veículos de transporte de carga circulando na cidade. Uma das maneiras mais eficientes de conseguir esta racionalização é através da consolidação de cargas de diferentes embarcadores e transportadores no mesmo veículo associado à coordenação das atividades de distribuição na cidade. Tem-se ainda um ganho maior se neste processo forem utilizados veículos que causam menos impactos negativos ao meio ambiente.

Taniguchi (2014) descreve o que considera como elementos essenciais para promover melhorias em *City Logistics*:

- tecnologias de informação e comunicação inovadoras e sistemas inteligentes de transporte (ITS – *Intelligent Transportation Systems*). O ITS permite coletar dados de forma precisa de todas as coletas, transporte e entrega de mercadorias pelos veículos e com isso alimentar sistemas de roteamento e planejamento para otimizar as operações;
- mudanças na forma de pensar (*mind-sets*) dos gestores de logística de forma a difundir entre seus colaboradores a ideia de uma logística verde, implantação de certificações de qualidade e meio-ambiente;

- parcerias público-privadas de forma a ouvir todos os *stakeholders* e permitir que participem desde a fase de planejamento. A troca de dados entre empresas privadas e o setor público ajuda a entender as situações da distribuição de mercadorias e os problemas relacionados. Este procedimento é adequado para prevenir que sejam criadas políticas públicas ineficazes.

2.2. O Uso de Bicicletas para o Transporte de Carga

O uso de bicicletas para o transporte de carga é definido por Schliwa et al. (2015) pelo termo *cycle logistics.* Este temo é utilizado tanto para bicicletas quanto para triciclos de carga, com propulsão elétrica ou humana, para o transporte de carga de um ponto A para B, principalmente em áreas urbanas. Normalmente os serviços realizados com bicicletas são: última milha, primeira milha e serviços expressos.

Leonardi et al. (2012) fazem uma avaliação de vantagens e desvantagens para o uso de bicicletas para distribuição urbana com relação aos veículos motorizados:

As vantagens são:

- Necessitam de menos espaço de calçada para carga e descarga;
- São mais fáceis de manobrar em situações de grande congestionamento;
- Em algumas cidades podem circular em faixas dedicadas a ônibus, ou até mesmo têm faixas exclusivas;
- Não têm restrição para circulação em centros urbanos;
- Menor custo de aquisição e custo operacional;
- Requerem menos espaço para estacionamento noturno;
- Normalmente não estão sujeitas à cobrança para estacionamento e nem a multas;
- Ciclistas não necessitam de licença para dirigir;
- Percepção positiva da população em função do menor impacto ambiental;
- São mais seguros em áreas com grande movimentação de pedestres;
- Em geral as cidades estão aumentando o sistema viário para bicicletas.

As desvantagens apresentadas estão relacionadas à pouca capacidade de carga, quando comparada aos veículos automotores, e à dificuldade de operar em distâncias maiores. Lenz e Riehle (2013) acrescentam ainda como desvantagens o

peso da bicicleta quando está carregada, a falta de segurança e a dificuldade de uso em terrenos irregulares.

A definição da distância máxima ideal para operação com bicicletas, ou o raio de atuação, não é bem definida entre os autores. Lenz e Riehle (2013) fizeram um levantamento em vários países da Europa e encontraram raios de atuação entre 4 a 50km, sendo a faixa mais frequente entre 10 a 20km, com cada bicicleta percorrendo de 80 a 120km por dia. As maiores distâncias são feitas com bicicletas elétricas dependendo da autonomia da bateria. Já Wrighton e Reiter (2016) defendem que o raio de atuação ideal deve ser de no máximo 7km e Leonardi et al. (2012) não citam um valor ou uma faixa de valores, apenas que as distâncias devem ser curtas.

Vários autores citam o uso de bicicletas de carga dentro de um contexto logístico mais abrangente, principalmente associados com o uso de centros de distribuição urbano e com outros veículos de distribuição.

Browne et al. (2011) apresentaram o resultado de um teste realizado em uma empresa de distribuição de produtos de papelaria e escritório na cidade de Londres que consistiu em mudar o sistema de distribuição urbana. No modelo original a distribuição era feita com veículos automotores diretamente de um depósito no subúrbio para os clientes no centro da cidade. O modelo testado consistiu em introduzir um pequeno centro de consolidação na entrada da cidade para fazer o transbordo do veículo que vem do depósito para vans e triciclos elétricos para então fazer a distribuição para os clientes. Além da introdução do centro de consolidação urbana e dos veículos e triciclos elétricos, houve também a mudança do veículo de transporte entre o depósito e o centro de consolidação, passando de vans com capacidade bruta de 3,5 toneladas para um caminhão com capacidade de 18 toneladas. A figura 1 apresenta o modelo original e o modelo de teste.

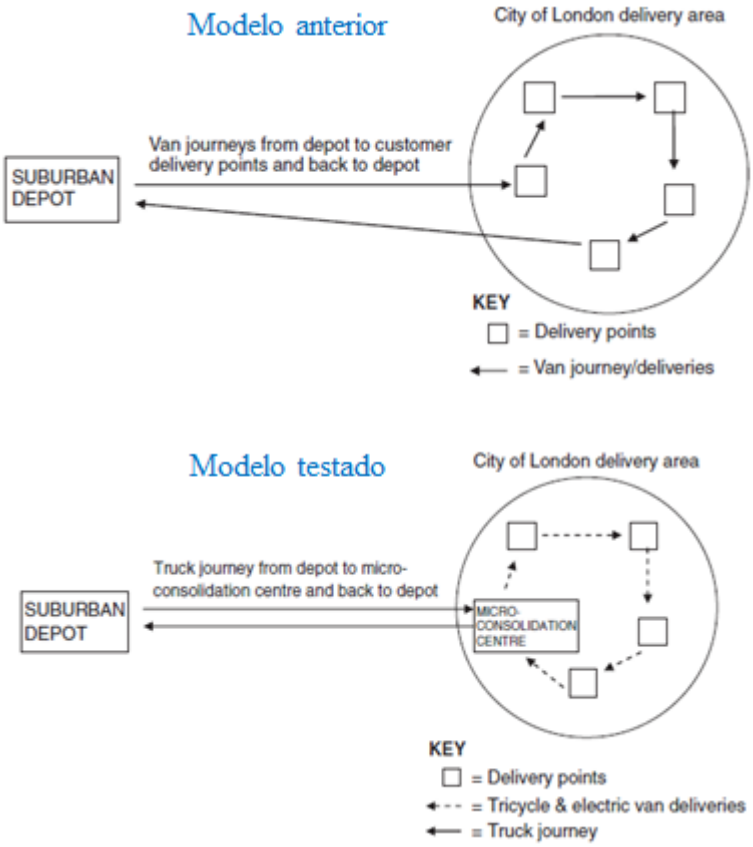


Figura 1: Exemplo de sistema de distribuição em Londres - Inglaterra

Fonte: adaptado de Browne et al. (2011)

Os principais resultados foram: redução da distância total percorrida em 20%, redução das emissões de CO_{2eq}. em 54%, aumento da distância percorrida por encomenda dentro da cidade devido à menor capacidade de carga das vans e triciclos elétricos. Gupta (2017), Schliwa et al. (2015) e Lenz e Riehle (2013) também defendem que o uso de de centros de consolidação urbana de carga é importante para uma operação eficiente com bicicletas, principalmente em áreas muito congestionadas.

Leonardi et al. (2014) apresentam um projeto europeu denominado *BentoBox* que envolve o uso de bicicletas elétricas para entrega de encomendas em armários colocados em shopping centers. O processo funciona da seguinte maneira: as mercadorias armazenadas em um depósito são colocadas em boxes e transportadas por bicicletas elétricas até um shopping center. Estes boxes são então colocados em um banco de armários automatizado em horário fora de expediente do shopping. O destinatário recebe automaticamente um SMS ou e-mail informando da chegada da

sua encomenda e pode ir busca-la a qualquer horário de acordo com sua conveniência. A estimativa com este projeto é uma substituição de 85% das rotas feitas por veículos comerciais leves por bicicletas cargueiras.

O uso de bicicletas para o transporte de cargas em centros urbanos pode ser visto como um fator que contribui para a melhoria da mobilidade urbana, e por isso também deve ser uma preocupação do poder público. Koning e Conway (2016) avaliaram os impactos do aumento do uso de bicicletas e triciclos cargueiros na cidade de Paris no período de 2001 e 2014, para isso fizeram uma pesquisa com 9 empresa que utilizam bicicletas de carga. Os autores explicam que em 2001 a cidade de Paris estava passando por um grave problema de congestionamento, período em que 35% das pessoas utilizavam carros para locomoção e 90% do transporte de carga era feita por caminhões e vans. Foi então que o governo local iniciou o desenvolvimento de políticas para fortalecer o uso de bicicletas, tanto para transporte de pessoas quanto de carga. Dentre estas políticas estão:

- Aumento da rede viária para bicicletas em 355km;
- Aumento de 20.000 vagas de estacionamento para bicicletas, obtidas com a redução do espaço de estacionamento de veículos;
- Introdução do serviço de compartilhamento de bicicletas.
- Limitação do tempo máximo de carga e descarga;
- Aumento da quantidade de locais de carga e descarga;
- Adaptação de vias dedicadas a ônibus para atender também o transporte de carga;
- Criação de espaços logísticos urbanos para transferência de carga de caminhões para veículos menores e sustentáveis.

Além disso, as bicicletas de carga em Paris são regulamentadas como bicicletas normais, e por isso podem utilizar a infraestrutura viária das mesmas e estacionar em calçadas. A pesquisa demonstrou que as políticas implementadas foram altamente eficazes, resultando em grande aumento do uso de bicicletas para transporte de carga. Entre 2001 e 2014 o aumento foi de 103tkm[1] para 1.107tkm, sendo que 63% deste total foi transportado por bicicletas de carga elétricas. Esta

[1] Tonelada*quilômetro: de acordo com os autores, corresponde ao peso total da carga transportada por bicicleta multiplicado pela distância total percorrida.

movimentação de carga por bicicletas corresponde a 60% do total transportado. Os benefícios sociais com a redução de emissões e poluição, ruído e congestionamento, foram estimados em 800 mil Euros por ano neste período.

A figura 2 mostra um exemplo de bicicleta de carga, a *cubicycle* desenvolvida pela DHL com capacidade para 125kg.

Figura 2: Cubicycle da DHL

Fonte: (COSTA, 2015)

2.3. O Serviço de *Delivery*

Um tipo de serviço que está em constante crescimento nas cidades são os serviços de *delivery*. A associação entre a facilidade e segurança por não precisar sair de casa para comprar e o trânsito nas cidades sem dúvida é um dos impulsionadores deste serviço. Segundo Munaro (2018), o mercado mundial de entrega online de comida está superaquecido em todo o mundo. Na Inglaterra, por exemplo, o segmento cresceu 73% na última década. No Brasil a projeção de crescimento para 2019 é de 17,5%. Chicarelli (2018) destaca que a receita global do mercado on-line de *delivery* de comida atingiu os US$ 82,7 bilhões em 2018, com crescimento de 17%, e até 2023 a expectativa é de crescimento anual de 10,7% até atingir os US$ 137,6 bilhões.

Outro fator que ajuda a impulsionar o crescimento do *delivery* é o uso de aplicativos e plataformas coletivas de *e-commerce*. Melo (2018) cita uma pesquisa realizada

trimestralmente pela ABRASEL (Associação Brasileira de Bares e Restaurantes) que aponta alguns números interessantes: apenas 29% dos estabelecimentos trabalham com pedidos feitos exclusivamente por meio do telefone, 58% dos entrevistados utilizam plataformas coletivas e apenas 13% possuem ferramenta de *e-commerce* própria.

Grande parte deste serviço é realizado através de motocicletas. Entretanto, considerando os conceitos de *City Logistics*, a substituição destas por bicicletas pode trazer benefícios, uma vez que estas não poluem, causam menos acidentes e produzem pouco ruído.

2.4. Roteirização de veículos

No contexto de *City Logistics*, uma ação que pode mitigar os problemas causados pelo transporte urbano de cargas é a redução do fluxo de veículos de entrega nas cidades, e isso pode ser conseguido através da roteirização de veículos com o objetivo de minimizar as distâncias percorridas.

O problema de roteirização de veículos é um tema que possui um amplo campo de aplicação, atraindo o interesse de muitos pesquisadores. Pillac et al. (2013) explicam que o problema de roteirização de veículos (*VRP – vehicle routing problem*) é uma generalização do problema do caixeiro viajante, sendo definido como um Grafo G = (V, E, C), onde: $V = \{v_0, ..., v_n)$ representa o conjunto de vértices; $E = \{(v_i, v_j)/(v_i, v_j) \in V^2, i \neq j\}$ representa o conjunto de arcos e $C = c_{ij}, (v_i, v_j) \in E$ é a matriz de custo definida sobre os arcos, que podem representar distâncias, custos de viagem ou tempo de viagem. Tradicionalmente v_0 representa o depósito de origem e os demais vértices representam clientes ou solicitações a serem atendidas. O VRP consiste em encontrar um conjunto de rotas para k veículos idênticos baseados no depósito de origem de forma que cada cliente seja atendido uma única vez minimizando o custo total da rota. A partir desta formulação clássica surgiram diversas variantes, como: *Capacitated* VRP (CVRP), VRP *with Time Windows* (VRPTW), VRP *with pick-up and delivery* (PDP – *Pick-up and Delivery Problem*) em que mercadorias devem ser coletadas e entregues em quantidades específicas aos clientes e *Heterogeneous fleet* VRP (HVRP), onde os veículos têm diferentes capacidades.

Cattaruzza et al. (2017) fizeram uma pesquisa sobre a roteirização de veículos para o transporte urbano de carga e identificaram os principais desafios apresentados nos modelos de roteirização em cidades. O primeiro é a dependência do tempo, ou seja, do momento (hora do dia ou da noite) em que é melhor fazer o transporte das mercadorias em função do tráfego visando uma maior eficiência no transporte. Em seguida vem a distribuição multinível, em que são propostos modelos utilizando centros de distribuição localizados no contorno das cidades ou em locais específicos dentro das cidades visando a redução de custos. O terceiro é relacionado à transferência da carga de veículos grandes para veículos menores e mais eficientes para a distribuição de carga urbana, de forma que possam fazer várias viagens por dia entre os centros de distribuição e os clientes. Por último vem a dinâmica das cidades e o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação, que motivam o estudo da roteirização dinâmica em que as rotas podem ser redefinidas em função das informações recebidas.

Uma das tendências nos estudos de roteirização de veículos está associada ao conceito de *Green Logistics* (logística verde), e é chamada *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP). De acordo com Lin et al. (2014) o objetivo do GVRP é harmonizar os custos econômicos e ambientais através da otimização do consumo de energia no transporte. O custo do combustível ainda é um dos principais fatores de custo do transporte, portanto, a redução do seu consumo e as melhorias na eficiência do transporte são objetivos práticos a serem buscados através do GVRP.

2.5. Problema de Coleta e Entrega (*Pick-up and Delivery Problem*)

O problema a ser estudado neste trabalho é conhecido na literatura científica como *Pick-up and Delivery Problem* (PDP). Ropke et al. (2007) apresentam uma explicação bem completa para o problema: consiste em roteirizar veículos capacitados para satisfazer a um conjunto de requisições de transporte entre origens e destinos, sendo que cada rota deve iniciar e finalizar em um depósito comum e atender às restrições de precedência, em que a origem de cada pedido deve preceder o seu destino e ambas as localidades devem ser visitadas pelo mesmo veículo.

Uma extensão do PDP é o PDPTW (*pick-up and delivery problem with time windows*) em que são inclusas restrições de horário para coleta, entrega ou ambos, que é o modelo tratado neste trabalho. No caso de transporte de passageiros, o PDP é chamado de DARP (*Dial-a-ride Problem*). Por serem uma generalização do VRP, são problemas do tipo *NP-hard*.

Parragh et al. (2008) propõem uma classificação para os problemas de coleta e entrega conforme figura 3.

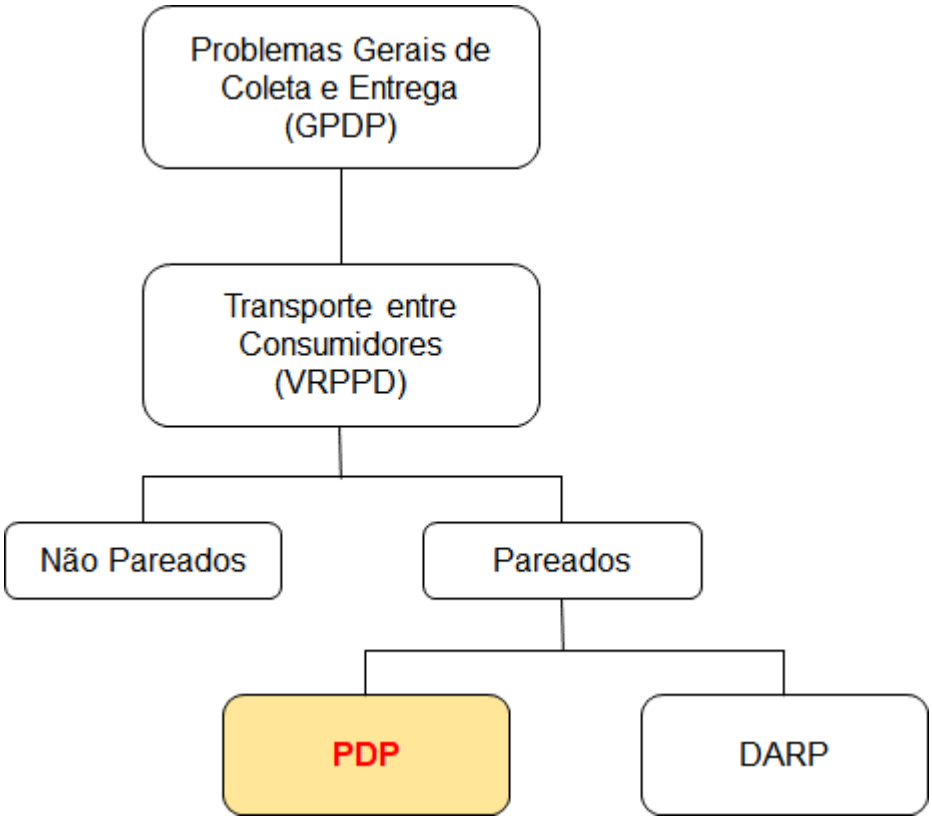


Figura 3: Classificação para os problemas de coleta e entrega

Fonte: Adaptado de Parragh et al. (2008)

A classe de problemas denominadas VRPPD (*Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery*) refere-se a problemas em que há a coleta e entrega de itens em determinados pontos. Esta se divide em duas subclasses, pareados, em que o item coletado já tem um destino associado, e não pareado, caso contrário. Quando o item transportado for “pessoa(s)” tem-se o DARP (*Dial-a-Ride Problem*), e quando for “material” tem-se o PDP (*Pick-up and Delivery Problem*).

Uma das tendências nos estudos do PDP é o serviço de transporte compartilhado entre carga e pessoas. Fatnassi et al. (2015) apresentam um estudo que avalia o potencial de integração entre o transporte de passageiros e de carga em uma rede de trânsito rápido de pessoas (PRT – *Personal Rapid Transit*) e de carga (FRT – *Freight Rapid Transit*) em áreas urbanas. Ambos são sistemas de transporte emergentes e sustentáveis que não utilizam motorista, os veículos são elétricos e possuem uma infraestrutura de pistas dedicadas para o seu deslocamento. O sistema de transporte de pessoas se assemelha ao sistema metroviário, porém com capacidade para poucas pessoas e sem paradas intermediárias (transporte ponto a ponto). Os autores destacam que este modo de transporte compartilhado pode ser ainda integrado com os sistemas de transporte existentes (ônibus, táxis, metrô...) possibilitando melhorar a mobilidade urbana. A figura 4 apresenta o sistema proposto.

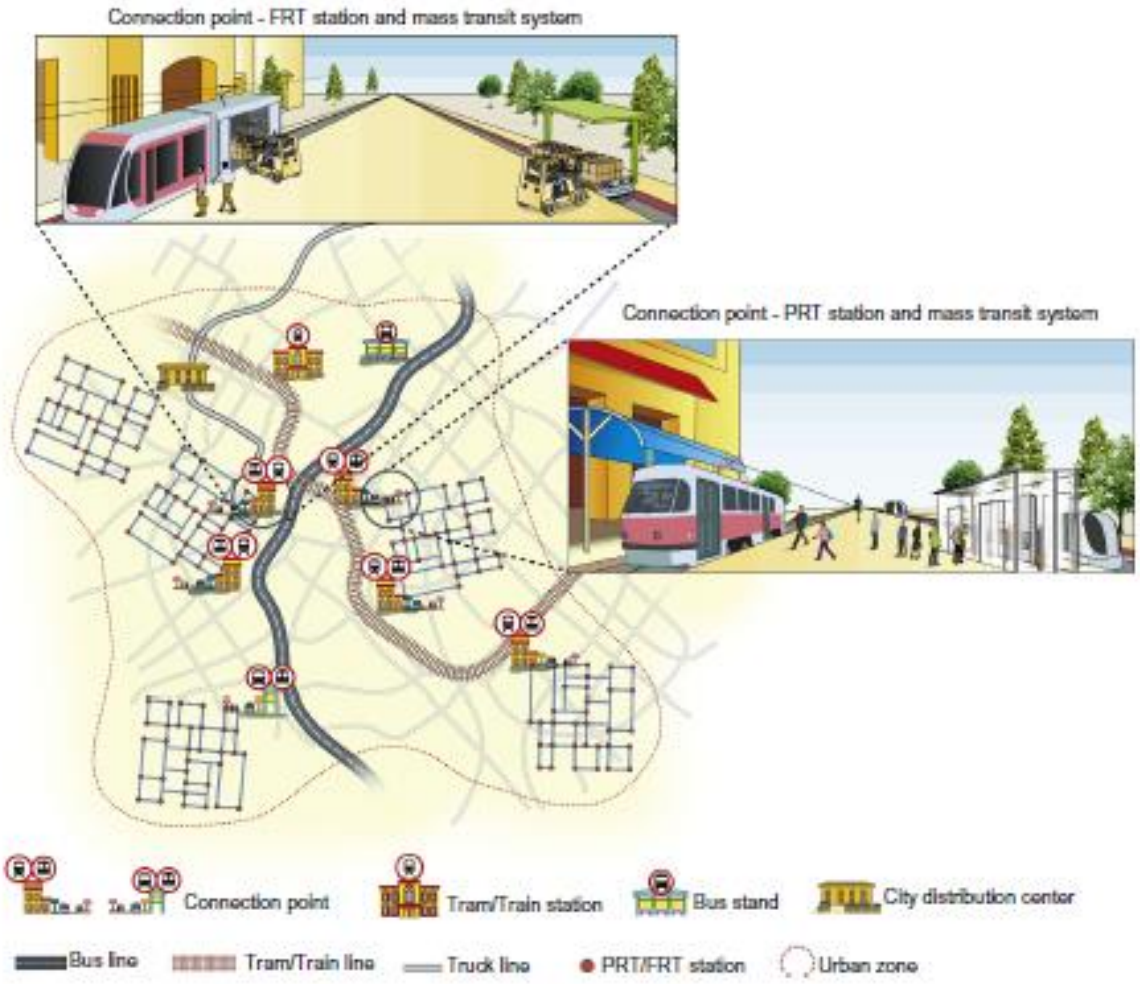


Figura 4: Sistema de integração para transporte de carga e passageiros

Fonte: Fatnassi et al. (2015)

O modelo desenvolvido tem como objetivos minimizar o consumo de energia total através da redução da movimentação de veículos vazios e o tempo de espera dos passageiros e das solicitações de transporte tendo como restrição o limite de capacidade das baterias dos veículos elétricos.

Nesta mesma linha, Pimentel e Alvelos (2018) propõe um sistema inteligente de suporte à decisão para um modelo de negócios que utiliza o sistema de ônibus urbano para o transporte de carga, como é comum encontrarmos no transporte intermunicipal e interestadual. Este modelo é apropriado para a entrega de encomendas para lojas, pequenos consumidores e entidades públicas e privadas em geral. Como as linhas de ônibus urbano utilizam rotas e horários fixos, é necessário associar às mesmas um serviço de *delivery* porta-a-porta operando de forma coordenada e sincronizada com a rede de ônibus. As cargas são transportadas de um fornecedor ou centro de distribuição até alguns pontos estratégicos da rede onde são transbordadas para os ônibus de acordo com o seu destino final. Depois seguem até pontos próximos do destino final onde são transbordadas dos ônibus para veículos de entrega e seguem até o destino final. Este processo deve ocorrer dentro das janelas de tempo combinadas. Ainda, para minimizar o tempo de manuseio e garantir proteção às cargas transportadas, são utilizados contêineres padrão ao longo de toda a rede.

O modelo matemático determinístico desenvolvido é um modelo de programação inteira mista cuja função objetivo é minimizar o tempo total de serviço.

Uma outra forma de compartilhamento é entre os recursos utilizados para fazer a distribuição. Lin (2011) propõe um modelo em que utiliza vans para o transporte de carga e de *footcouriers* (entregadores a pé). Os *footcouriers* podem coletar ou entregar encomendas mais leves de forma independente ou viajar com a van em seu percurso de ida e volta. Eles podem ser, inclusive, os próprios motoristas das vans em algumas situações. Este modelo favorece especialmente em situações em que há taxas para acesso das vans a determinadas regiões da cidade. O problema é modelado através programação inteira mista e de uma heurística baseada em

ejection chain. O objetivo é minimizar o custo total associado aos dois recursos satisfazendo às restrições de janela de tempo.

Wang (2018) faz um estudo sobre o problema de coleta e entrega de refeições. A logística de alimentos possui uma particularidade com relação à de outros produtos, que é o fato de os alimentos serem perecíveis. Por isso, o tempo decorrido entre a coleta no fornecedor e a entrega no cliente é um fator crítico na operação.

O autor considera que, na prática, os clientes preferem receber as suas encomendas em horários combinados, e não em janelas de tempo específicas. Por isso o seu modelo considera janelas de tempo com tamanho zero e adota uma penalidade para a diferença entre o horário de chegada e o horário combinado, quanto maior a diferença, maior a penalidade.

O autor apresenta três modelos de operação:

- Serviço exclusivo – o fornecedor contrata um serviço terceirizado exclusivo que entrega as refeições de acordo com a ordem dos pedidos. Após o término de uma rota de entrega o entregador retorna para coletar mais pedidos e fazer novas entregas. Este é um serviço fácil de gerenciar e de programar, porém, a distância percorrida sem carga é grande, uma vez que os entregadores sempre retornam vazios até o fornecedor.
- Serviço compartilhado – neste serviço é permitido que o entregador faça coleta em outros fornecedores após o término de sua rota.
- Serviço compartilhado *plus* – serviço em que é permitido que o entregador faça novas coletas em outros fornecedores mesmo durante a rota de entrega de um determinado fornecedor.

O problema foi modelado através de programação inteira mista em que a função objetivo é minimizar o custo total que é formado pelo custo fixo, custo variável das rotas, penalidades em função da diferença entre o horário de chegada e o horário combinado e duração da entrega.

Para a solução de pequenos problemas foi utilizado o Cplex 12.7. Porém, para a solução de problemas de larga escala foram utilizadas duas heurísticas: *iterated local search* e *large neighborhood search*. Os resultados mostraram que os serviços compartilhado e compartilhado *plus* permitiram reduzir os custos totais em 16% e 24% respectivamente.

2.5.1. Modelo matemático para o PDP

Serão apresentados dois modelos matemáticos para o PDP, o primeiro não considera janelas de tempo para coleta e entrega, e o segundo faz esta consideração e foi o modelo utilizado como base para o desenvolvimento deste trabalho.

2.5.1.1. Modelo de PDP sem janela de tempo

Este modelo foi proposto por Parragh et al. (2008). A notação utilizada é:

n Número de vértices de coleta;

$ñ$ Número de vértices de entrega. No caso de coleta e entrega pareado $n = ñ$;

P Vértices de coleta. $P = \{1,...,n\}$;

D Vértices de entrega. $D = \{n+1,...,n+ñ\}$;

K Conjunto de veículos;

q_i Demanda no vértice i; vértices de coleta possuem um valor positivo e de entrega um valor negativo; no depósito de origem (0) e de destino $(n + ñ + 1)$ a demanda é zero;

e_i Momento mais cedo para iniciar o serviço em i;

l_i Momento mais tarde para iniciar o serviço em i;

d_i Duração do serviço em i;

$c_{i,j}^k$ Custo para ir de i para j com o veículo k;

$t_{i,j}^k$ Tempo gasto para ir de i para j com o veículo k;

C^k Capacidade de carga do veículo k;

Considera-se que o problema é definido por um grafo completo $G = (V, A)$, onde V é o conjunto de vértices $V = \{0, n + ñ + 1\} \cup P \cup D$, e A é o conjunto de todos os arcos.

As variáveis de decisão são:

$x_{i,j}^k$ Variável binária, sendo 1 se o veículo k passar pelo arco (i, j) ou 0 caso contrário;

Q_i^k Peso da carga do veículo *k* quando sai do vértice *i*;

B_i^k Momento do início do serviço do veículo *k* no vértice *i*;

O modelo para o PDP com múltiplos veículos é o seguinte:

$$Min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{i,j}^k x_{i,j}^k \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^k = 1 \qquad \forall\, i \in P \cup D \quad (2)$$

$$\sum_{j:(0,j) \in A} x_{0,j}^k = 1 \qquad \forall\, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i:(i,n+ñ+1) \in A} x_{i,n+ñ+1}^k = 1 \qquad \forall\, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{i,j}^k - \sum_{i:(j,i) \in A} x_{j,i}^k = 0 \qquad \forall\, j \in P \cup D, k \in K \quad (5)$$

$$x_{i,j}^k = 1 \therefore B_j^k \geq B_i^k + d_i + t_{i,j}^k \qquad \forall\, (i,j) \in A, k \in K \quad (6)$$

$$x_{i,j}^k = 1 \therefore Q_j^k \geq Q_i^k + q_j \qquad \forall\, (i,j) \in A, k \in K \quad (7)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{C^k, C^k + q_i\} \qquad \forall\, i \in V, k \in K \quad (8)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \qquad \forall\, (i,j) \in A, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^k - \sum_{j:(n+i,j) \in A} x_{n+i,j}^k = 0 \qquad \forall\, i \in P, k \in K \quad (10)$$

$$B_i^k \leq B_{n+i}^k \qquad \forall\, i \in P, k \in K \quad (11)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total das rotas. A restrição (2) estabelece que cada vértice deve ser visitado apenas uma vez. As igualdades (3) e (4) garantem que cada veículo inicia e termina a sua rota no depósito. A restrição (5) garante a conservação do fluxo. As variáveis de tempo são utilizadas para eliminar subrota em (6), dado que $t_{i,j}^k > 0\ \forall\, (i,j) \in A$. As equações (7) e (8) garantem que a capacidade de carga do veículo não é excedida ao longo da rota e a restrição (9) garante que a variável de decisão é binária. A restrição (10) garante que a origem e o destino da carga serão visitados pelo mesmo veículo e a restrição (11) garante que a entrega só ocorre depois da coleta.

2.5.1.2. Modelo de PDP com janela de tempo

Este modelo foi proposto por Rodrigues et al. (2012). Considera a existência de n clientes (requisições de transporte) a serem atendidos por k veículos, sendo definido por um grafo completo $G = (N, A)$, onde $N = Nos \cup NosDrop \cup C_g$. O conjunto $Nos = \{1, \dots, n\}$ representa os nós de *pick-up*, o conjunto $NosDrop = \{n+1, \dots, 2n\}$ os nós de *delivery* e $C_g = \{0, 2n+1\}$ as garagens, sendo a garagem "0" a origem e a garagem "2n+1" o destino de cada veículo. O conjunto $K = \{1, \dots, kn\}$ representa os veículos disponíveis, sendo cada um com capacidade cap_k. O valor $|K|$ representa o número de veículos disponíveis. Cada requisição de transporte especifica um local de embarque "i" e um de desembarque "n+i". Para cada nó $i \in N$ é associada uma quantidade unitária de passageiros q_i, onde: $q_{n+1} = -q_i, i = (1, \dots, n)$ e uma duração de serviço d_i, onde $d_{n+i} = d_i, (i = 1, \dots, n)$. Nas garagens temos $q_0 = q_{2n+1} = 0$ e $d_0 = d_{2n+1} = 0$. A cada nó $i \in N$ tem-se associada uma janela de tempo $[e_i, l_i]$ representando o início e o fim da mesma respectivamente, isto é, os limites de horário de atendimento de uma requisição de *pick-up* ou *delivery*. Cada arco $(i, j) \in A$ tem associado um custo c_{ij}.

As variáveis de decisão são:

- $x_{i,j}^k =$ variável binária, sendo 1 se o veículo k trafega do nó i para o nó j e 0 caso contrário.
- $xb^k =$ variável binária, sendo 1 se o veículo k é utilizado e 0 caso contrário.
- $B_i^k =$ instante em que o veículo k começa a atender o nó i.
- $Q_i^k =$ número de cadeirantes no veículo k após visitar o nó i (no nosso caso é o peso total da carga no veículo k após visitar o nó i).

Considerando as definições acima, a formulação do modelo matemático é a seguinte:

Minimizar: $z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{i,j} x_{i,j}^k$ (1)

Sujeito a: $xb^k = \sum_{j \in N} x_{0,j}^k \quad \forall\, k \in K$ (2)

$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall\, i \in Nos$ (3)

$\sum_{j \in N} x_{i,j}^k - \sum_{j \in N} x_{n+i,j}^k = 0 \quad \forall\, i \in Nos, k \in K, n+i \in NosDrop$ (4)

$\sum_{j \in Nos} x_{0,j}^k \leq 1 \quad \forall\, k \in K$ (5)

$$\sum_{j \in N} x_{j,i}^{k} - \sum_{j \in N} x_{i,j}^{k} = 0 \qquad \forall\, i \in Nos \cup NosDrop, k \in K \tag{6}$$

$$\sum_{i \in NosDrop} x_{i,2n+1}^{k} \leq 1 \qquad \forall\, k \in K \tag{7}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{i,j}^{k} \leq |S| - 2 \qquad \forall\, k \in K \tag{8}$$

$$Q_j^k \geq \left(Q_i^k + q_j\right) x_{i,j}^{k} \qquad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K \tag{9}$$

$$Q_i^k \leq cap_k \qquad \forall\, i \in N, k \in K \tag{10}$$

$$Q_{2n+1}^k = 0 \qquad \forall\, k \in K, 2n+1 \in C_g \tag{11}$$

$$Q_0^k = 0 \qquad \forall\, k \in K \tag{12}$$

$$B_j^k \geq \left(B_i^k + d_i + t_{i,j}\right) x_{i,j}^{k} \qquad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K \tag{13}$$

$$e_i \leq B_i^k \leq l_i \qquad \forall\, i \in N, k \in K \tag{14}$$

$$x_{i,j}^{k} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i, j \in N, k \in K \tag{15}$$

$$xb^k \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K \tag{16}$$

$$Q_j^k \geq 0 \qquad \forall\, j \in N, k \in K \tag{17}$$

A função objetivo (1) tem por finalidade minimizar o custo total da viagem. A restrição (2) relaciona as variáveis xb^k e $x_{0,j}^{k}$, que controla a quantidade de veículos que sairão da garagem. A restrição (3) garante que cada requisição seja atendida uma única vez, e a restrição (4) garante que o local de embarque e desembarque de uma requisição será sempre atendida pelo mesmo veículo. As restrições (5), (6) e (7) garantem que a rota de cada veículo k irá iniciar e finalizar na garagem. A restrição (6) determina a continuidade do fluxo, de forma que o veículo que entra em um determinado nó deve deixar este mesmo nó. A restrição (8) garante que não serão geradas sub-rotas, sendo S um sub-grafo de G e $|S|$ representa o número de vértices deste sub-grafo. As equações (9), (10), (11) e (12) garantem que a carga do veículo após visitar determinado nó não ultrapassa a capacidade do veículo e que não exista carga na garagem. As restrições (9) e (13) asseguram a consistência nos cálculos da carga dos veículos e dos horários, e são não-lineares. Porém, elas podem ser linearizadas introduzindo uma constante. Considerando $M_b \geq \max\{0, l_i + d_i + t_{i,j} - e_j\}$ e $M_q \geq \min\{cap_k, cap_k + q_i\}$, as restrições (9) e (14) podem ser substituídas por:

$$Q_j^k \geq Q_i^k + q_j - M_q.\left(1 - x_{i,j}^k\right) \qquad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K \tag{18}$$

$$B_j^k \geq B_i^k + d_j + t_{i,j} - M_b.\left(1 - x_{i,j}^k\right) \quad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K \tag{19}$$

A restrição (14) garante a não violação da janela de tempo. As restrições (15) e (16) garantem que as variáveis $x_{i,j}^k$ e xb^k sejam binárias e a (17) garante que o número de cadeirantes no veículo k após visitar o nó j seja maior ou igual a zero.

Os dois modelos apresentados são muito semelhantes, sendo o segundo mais completo por apresentar restrições de janela de tempo. Outro ponto de destaque é que o primeiro modelo utiliza variável de tempo para eliminar subrota e o segundo utiliza uma restrição específica para este fim.

3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

3.1. Descrição do problema proposto

O problema é baseado em um modelo de rede de transporte composto por 3 entidades: transportador, fornecedores e clientes. A figura 5 apresenta um esboço explicativo.

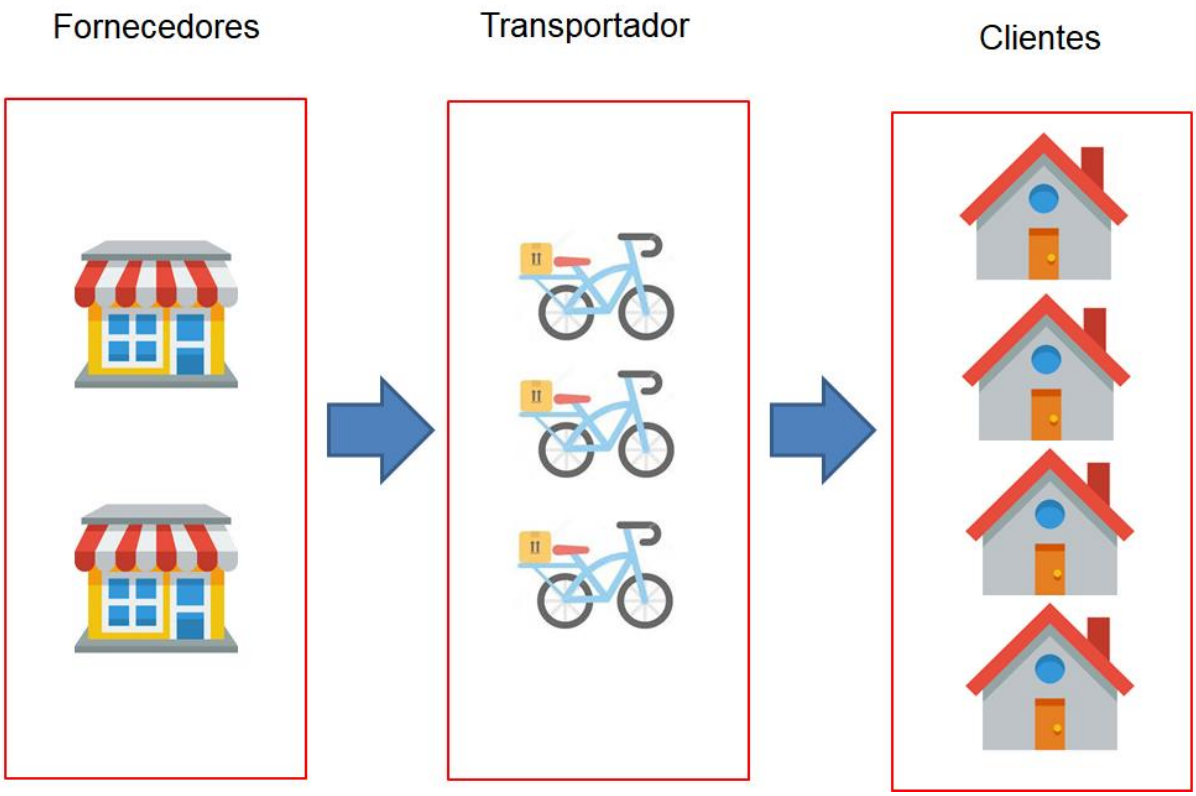


Figura 5: Exemplo explicativo do problema proposto

Neste modelo os fornecedores não têm uma estrutura de transporte própria e sim terceirizada e colaborativa, em que dois ou mais fornecedores utilizam um mesmo transportador. Este transportador passa recolhendo os pedidos nos fornecedores e realiza as entregas nos clientes.

Este formato de operação está alinhado com a sugestão proposta por Crainic (2008) citada anteriormente, que defende que é necessário racionalizar as atividades de distribuição de carga nas cidades de forma a ter menos veículos circulando, e uma das maneiras de conseguir esta racionalização é através da consolidação de cargas de diferentes embarcadores no mesmo veículo, como proposto neste trabalho.

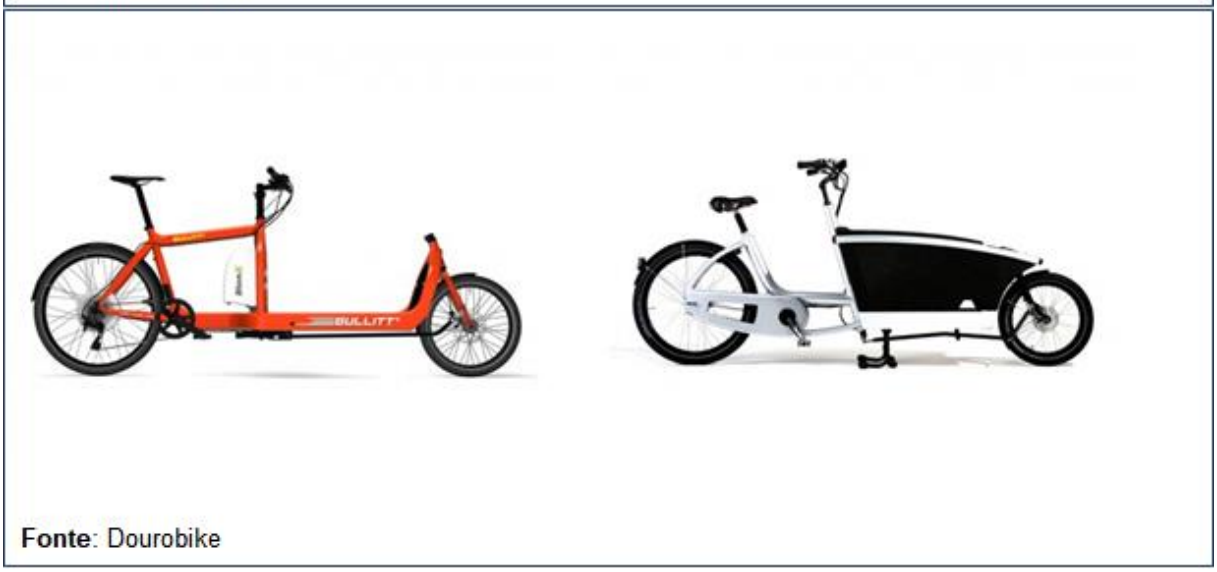
Este modelo se assemelha ao modelo estudado por Wang (2018), denominado *sharing plus service*, em que é permitido coletar novos pedidos mesmo antes de terminar as entregas que já se encontram no veículo.

3.2. Bicicletas de carga

Existem vários modelos de bicicletas cargueiras, e até mesmo bicicletas comuns podem ser utilizadas para o transporte de carga quando o ciclista leva uma caixa ou mochila nas costas. Para este trabalho não foi definido um modelo padrão de bicicleta, pois estamos considerando o transporte de pequenos itens, como remédios e pizzas.

A figura 6 apresenta alguns modelos de bicicletas e triciclos de carga.

Fonte: Mercado Livre



Fonte: Dourobike

Figura 6: modelos de bicicletas e triciclos de carga

3.3. Considerações para a definição dos cenários de teste

Os dados dos cenários de teste foram criados de forma a simular uma situação real do problema. Através de dados empíricos observados em uma empresa que faz o serviço de *delivery* na Grande Vitória – ES, foram definidos os seguintes parâmetros:

- Distância máxima por rota por ciclista: 10km;
- Velocidade média da bicicleta: 5km/h.

Com estas informações foram estabelecidas coordenadas máximas de 3km entre os clientes e o transportador, pois se considerarmos que o ciclista precisa se deslocar do depósito até os fornecedores, destes até os clientes e depois retornar ao depósito, esta é uma distância adequada para atender pelo menos um cliente dependendo da sua localização.

Foram definidos apenas dois fornecedores, ambos com localização fixa.

A localização dos clientes foi definida de forma aleatória, porém, dentro do limite de distância estabelecido. Esta definição foi feita porque não estamos considerando dados de geolocalização e nem estudando uma região específica.

As janelas de tempo foram definidas considerando duas situações:

- Janelas *soft*: o horário de recebimento pelo cliente é ampliado, como ocorre com os serviços de entrega de refeições *low carb* ou marmitas no horário de almoço. Simulando uma situação real, o fornecedor procura preparar as refeições o mais próximo possível da hora do almoço e os clientes não querem recebe-las muito tarde.
- Janelas *hard*: simula a entrega de pizzas, remédios, hambúrgueres, etc. Para este caso estabelecemos um tempo limite de 45 minutos após a solicitação do cliente para entrega, pois, consideramos este como sendo um prazo razoável para entrega no dia a dia.

4. MODELO MATEMÁTICO

O modelo proposto é uma extensão do modelo desenvolvido por Rodrigues et al. (2012), o qual foi adaptado para ser aplicado ao serviço de *delivery* utilizando bicicletas para entrega. Para isso foram acrescentadas restrições de distância máxima percorrida por rota. Tais restrições se justificam pelo fato de que bicicletas para entrega de carga em grandes distâncias não são viáveis, segundo Leonardi et al. (2012).

Desta forma, ao modelo de Rodrigues et al. (2012), foram acrescentados o parâmetro D_{max}^{k}, que limita a distância máxima percorrida pela bicicleta k em toda a sua rota e a variável $Rota_km^{k}$, que faz o cálculo da distância percorrida pela bicicleta k. O modelo completo incluindo as novas restrições que foram criadas com o novo parâmetro e a nova variável está detalhado a seguir.

4.1. Modelo Proposto

O modelo considera *Nc* clientes a serem atendidos por *K* bicicletas de capacidade homogênea *Cap*.

É definido por um grafo $G = (N, A)$, onde $N = Np \cup Nd \cup C_g$. O conjunto $Np = \{1, \dots, Nc\}$ representa os nós de coleta, o conjunto $Nd = \{Nc + 1, \dots, 2Nc\}$ os nós de entrega e $C_g = \{0, 2Nc + 1\}$ as garagens, sendo a garagem "0" a origem e a garagem "*2Nc+1*" o destino de cada bicicleta.

Cada pedido especifica um local de coleta *"i"* e um de entrega *"Nc+i"*. Para cada nó $i \in N$ é associada uma quantidade de carga a ser transportada, onde: $q_{Nc+i} = -q_i, i = (1, \dots, Nc)$ e uma duração de serviço D_i, onde $D_{Nc+i} = D_i, (i = 1, \dots, Nc)$. Nas garagens temos $q_0 = q_{2Nc+1} = 0$ e $D_0 = D_{2Nc+1} = 0$.

A cada nó $i \in N$ tem-se associada uma janela de tempo $[e_i, l_i]$ representando o início e o fim da mesma respectivamente, que são as janelas de tempo de coleta ou entrega. Cada arco $(i, j) \in A$ tem associada uma distância $Dist_{ij}$.

As variáveis de decisão são:

- $x_{i,j}^{k}$ = variável binária, sendo 1 se a bicicleta k trafega do nó i para o nó j e 0 caso contrário.
- xb^{k} = variável binária, sendo 1 se a bicicleta k é utilizada e 0 caso contrário.
- B_{i}^{k} = instante em que a bicicleta k começa a atender o nó i.
- Q_{i}^{k} = peso total da carga na bicicleta k após visitar o nó i.
- $Rota_km^{k}$ = distância máxima percorrida pela bicicleta em toda a sua rota.

Considerando as definições acima, a formulação do modelo matemático é a seguinte:

Minimizar: $z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} Dist_{i,j} x_{i,j}^{k}$ (1)

Sujeito a: $\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{i,j}^{k} = 1 \quad \forall\, i \in Np$ (2)

$xb^{k} = \sum_{j \in N} x_{0,j}^{k} \quad \forall\, k \in K$ (3)

$\sum_{j \in Np} x_{0,j}^{k} \leq 1 \quad \forall\, k \in K$ (4)

$\sum_{i \in Nd} x_{i,2Nc+1}^{k} \leq 1 \quad \forall\, k \in K$ (5)

$\sum_{j \in N} x_{j,i}^{k} - \sum_{j \in N} x_{i,j}^{k} = 0 \quad \forall\, i \in Np \cup Nd, k \in K$ (6)

$\sum_{j \in N} x_{i,j}^{k} - \sum_{j \in N} x_{Nc+i,j}^{k} = 0 \quad \forall\, i \in Np, k \in K, n + i \in Nd$ (7)

$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{i,j}^{k} \leq |S| - 2 \quad \forall\, k \in K$ (8)

$Q_{j}^{k} \geq \left(Q_{i}^{k} + q_{j}\right) x_{i,j}^{k} \quad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K$ (9)

$Q_{i}^{k} \leq Cap \quad \forall\, i \in N, k \in K$ (10)

$Q_{0}^{k} = 0 \quad \forall\, k \in K$ (11)

$Q_{2Nc+1}^{k} = 0 \quad \forall\, k \in K, 2Nc + 1 \in C_{g}$ (12)

$B_{j}^{k} \geq \left(B_{i}^{k} + D_{i} + t_{i,j}\right) x_{i,j}^{k} \quad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K$ (13)

$e_{i} \leq B_{i}^{k} \leq l_{i} \quad \forall\, i \in N, k \in K$ (14)

$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} Dist_{i,j} x_{i,j}^{k} \leq Dmax \quad \forall\, k \in K$ (15)

$Rota_km^{k} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} Dist_{i,j} x_{i,j}^{k} \quad \forall\, k \in K$ (16)

$x_{i,j}^{k} \in \{0,1\} \quad \forall\, i, j \in N, k \in K$ (17)

$$xb^k \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K \qquad (18)$$

$$Q_j^k \geq 0 \qquad \forall\, j \in N, k \in K \qquad (19)$$

$$Rota_km^k \geq 0 \qquad \forall\, k \in K \qquad (20)$$

A função objetivo (1) tem por finalidade minimizar a distância total das rotas de coleta e entrega. A restrição (2) garante que cada requisição seja atendida uma única vez. A restrição (3) controla a quantidade de bicicletas que saem do depósito. As restrições (4) e (5) garantem que as bicicletas iniciam e terminam no depósito. A restrição (6) garante a continuidade do fluxo, a bicicleta que entra no nó sai do mesmo. A restrição (7) garante que o pedido seja coletado e entregue pela mesma bicicleta. A restrição (8) garante que não serão geradas sub-rotas, sendo S um sub-grafo de G e $|S|$ representa o número de vértices deste sub-grafo. A equação (9) garante que a carga da bicicleta após visitar determinado nó não ultrapassa a sua capacidade e é uma equação não linear. Porém, ela pode ser linearizada introduzindo uma constante $M_q \geq \min\{cap_k, cap_k + q_i\}$. Desta forma, ela pode ser substituída pela equação: $Q_j^k \geq Q_i^k + q_j - M_q.\left(1 - x_{i,j}^k\right) \quad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K$ (21)

A restrição (10) garante que a bicicleta terá capacidade para transportar toda a carga. As restrições (11) e (12) garantem que a carga no depósito será igual a zero. A restrição (13) garante a consistência no cálculo dos horários de coleta e entrega, e também é não-linear. Da mesma forma anterior, ela pode ser linearizada introduzindo uma constante $M_b \geq \max\{0, l_i + D_i + t_{i,j} - e_j\}$, podendo ser substituída pela restrição:

$$B_j^k \geq B_i^k + D_j + t_{i,j} - M_b.\left(1 - x_{i,j}^k\right) \quad \forall\, i \in N, j \in N, k \in K \qquad (22)$$

A restrição (14) garante a não violação da janela de tempo. A restrição (15) garante que a distância máxima percorrida pela bicicleta na rota não ultrapasse o limite estabelecido e a restrição (16) calcula a distância percorrida pelas bicicletas na rota. As restrições (17) e (18) garantem que as variáveis $x_{i,j}^k$ e xb^k sejam binárias. A restrição (19) garante que a carga da bicicleta k seja maior ou igual a zero após visitar o nó j e a restrição (20) garante que a rota feita pela bicicleta k seja maior ou igual a zero. As restrições (15), (16) e (20) são as que foram introduzidas no modelo original.

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para a validação do modelo proposto foram desenvolvidos cenários de forma a verificar os impactos nos resultados através da variação do raio de atuação das bicicletas, das janelas de tempo e do número de pedidos dos clientes.

Não foram consideradas as dimensões dos pedidos e nem a sequência de armazenamento na caixa de entrega, considerou-se que estes fatores não seriam restrições para o modelo.

Também não foram consideradas as características de relevo da região de atuação das bicicletas e nem condições climáticas.

5.1. Cenários de teste

Os cenários foram criados com os seguintes parâmetros:

- Raio de atuação: foram considerados 3 raios de atuação diferentes, todos com referência à localização do transportador. Os raios considerados foram: 1km, 2km e 3km a partir do transportador.
- Localização das entidades: as distâncias entre os pontos de coleta e entrega foram definidas como distâncias euclidianas. Foram considerados 1 transportador, localizado na coordenada (0; 0) e 2 fornecedores, localizados nas coordenadas (0; 0,5) e (0,5; 0). A localização dos clientes foi definida aleatoriamente de acordo com o raio de atuação considerado. Foi utilizada a função ALEATÓRIO do Excel ®, que segue uma distribuição de probabilidade uniforme, para definir estas coordenadas.
- Janelas de tempo: foram consideradas dois tipos de janela de tempo – *Soft*, em que o horário de atendimento dos clientes é ampliado, como ocorre com serviços de *delivery* com entrega previamente agendada, como por exemplo, entrega de refeições *low carb*. Neste caso as janelas de tempo são fixas para as 3 entidades. *Hard* – em que o horário de atendimento dos clientes é mais curto, como ocorre com serviços de *delivery* de pizza, por exemplo. Neste caso as janelas de tempo do transportador e do fornecedor são fixas e dos clientes são variáveis e definidas aleatoriamente. Também aqui foi utilizada a

função ALEATÓRIO do Excel ® para definir as janelas de tempo. A lógica utilizada foi a seguinte:

- Início da janela de tempo: para o primeiro cliente foi gerado um número inteiro aleatório entre 0 e 30 minutos, sendo este valor somado à hora de início da atividade do fornecedor. Para os demais clientes foi utilizada a mesma lógica, porém, considerando um tempo inteiro aleatório entre 0 e 30 minutos a partir da hora de início do cliente anterior.
- Fim da janela de tempo: foram somados 45 minutos ao início da janela de tempo de cada cliente, considerando este um tempo de atendimento razoável para o cliente receber o seu pedido após tê-lo feito ao fornecedor.

A figura 7 apresenta um exemplo da lógica utilizada para a definição das janelas de tempo do tipo *Hard*.

Hora	*Fornecedor*	*Nº aleatório*
Início	09:00	12
Fim		

Cliente 1	*Nº Aleatório*
09:12	1
(+ 45min) 09:57	

Cliente 2
09:13
(+ 45min) 09:58

Figura 7: Lógica das janelas de tempo tipo Hard

- Distância máxima da rota: foram consideradas 2 distâncias máximas, 8km e 10km, ou seja, cada viagem feita pelo ciclista não deve exceder estes limites.
- Número de pedidos: foram considerados 4, 6, 8 e 10 pedidos, em que foram geradas redes com 10, 14, 18 e 22 nós respectivamente.
- Quantidade de cenários: foram criados 48, sendo 24 para janelas de tempo do tipo *Soft* e 24 para janelas de tempo do tipo *Hard*. A tabela 2 apresenta a relação de cenários.

Tabela 1: Relação de cenários de teste

CENÁRIOS					
nº	*Nome*	*TW*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*
1	S-1-8-4	Soft	1	8	4
2	S-1-8-6	Soft	1	8	6
3	S-1-8-8	Soft	1	8	8
4	S-1-8-10	Soft	1	8	10
5	S-1-10-4	Soft	1	10	4
6	S-1-10-6	Soft	1	10	6
7	S-1-10-8	Soft	1	10	8
8	S-1-10-10	Soft	1	10	10
9	S-2-8-4	Soft	2	8	4
10	S-2-8-6	Soft	2	8	6
11	S-2-8-8	Soft	2	8	8
12	S-2-8-10	Soft	2	8	10
13	S-2-10-4	Soft	2	10	4
14	S-2-10-6	Soft	2	10	6
15	S-2-10-8	Soft	2	10	8
16	S-2-10-10	Soft	2	10	10
17	S-3-8-4	Soft	3	8	4
18	S-3-8-6	Soft	3	8	6
19	S-3-8-8	Soft	3	8	8
20	S-3-8-10	Soft	3	8	10
21	S-3-10-4	Soft	3	10	4
22	S-3-10-6	Soft	3	10	6
23	S-3-10-8	Soft	3	10	8
24	S-3-10-10	Soft	3	10	10
25	H-1-8-4	Hard	1	8	4
26	H-1-8-6	Hard	1	8	6
27	H-1-8-8	Hard	1	8	8
28	H-1-8-10	Hard	1	8	10
29	H-1-10-4	Hard	1	10	4
30	H-1-10-6	Hard	1	10	6
31	H-1-10-8	Hard	1	10	8
32	H-1-10-10	Hard	1	10	10
33	H-2-8-4	Hard	2	8	4
34	H-2-8-6	Hard	2	8	6
35	H-2-8-8	Hard	2	8	8
36	H-2-8-10	Hard	2	8	10
37	H-2-10-4	Hard	2	10	4
38	H-2-10-6	Hard	2	10	6
39	H-2-10-8	Hard	2	10	8
40	H-2-10-10	Hard	2	10	10
41	H-3-8-4	Hard	3	8	4
42	H-3-8-6	Hard	3	8	6
43	H-3-8-8	Hard	3	8	8
44	H-3-8-10	Hard	3	8	10
45	H-3-10-4	Hard	3	10	4
46	H-3-10-6	Hard	3	10	6
47	H-3-10-8	Hard	3	10	8
48	H-3-10-10	Hard	3	10	10

- Nome dos cenários: foi definido conforme o exemplo da figura 8:

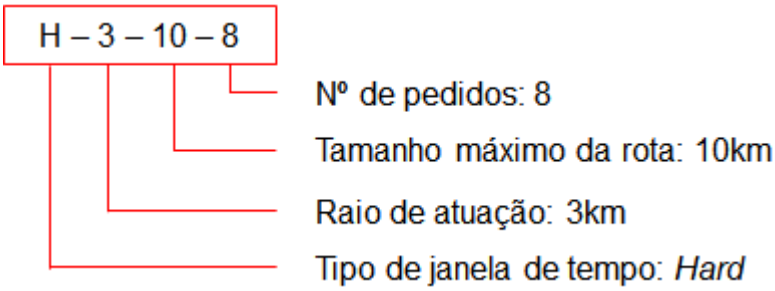


Figura 8: Definição do nome dos cenários

Além dos dados apresentados nos cenários foram definidos os seguintes parâmetros:

- Velocidade média das bicicletas: 5km/h;
- Capacidade de carga das bicicletas: 10kg;
- Tempo de atendimento do pedido: 10 minutos nos fornecedores e 5 minutos nos clientes;
- Peso dos pedidos: 1kg;
- Quantidade de bicicletas disponíveis: 5 unidades;
- Janelas de tempo *Soft*:
    - Transportador: 10:00 às 14:00;
    - Fornecedores: 10:30 às 11:30;
    - Clientes: 11:30 às 12:30;
- Janelas de tempo *Hard*:
    - Transportador: 8:00 às 14:00;
    - Fornecedores: 9:00 às 12:00;
    - Clientes: aleatório conforme explicado anteriormente.

Os dados de tempo foram passados para minutos para criar os arquivos de dados.

A modelagem foi feita através do CPLEX versão 12.6 utilizando um *laptop* com processador CORE i5 de 2,5GHz, 8GB de memória RAM e sistema operacional de 64 bits.

Foi considerada apenas uma garagem, na qual as bicicletas devem iniciar e terminar o seu turno de trabalho.

Os dados de distância são os mesmos entre os respectivos cenários com janela de tempo *Hard* e *Soft* para que possa ser feita uma comparação entre as mesmas considerando apenas o impacto das janelas de tempo. Exemplo: os cenários S-1-8-4 e H-1-8-4 têm os mesmos dados de distância.

As figuras 9 e 10 apresentam parte do modelo matemático e de um arquivo de dados respectivamente criados no CPLEX.

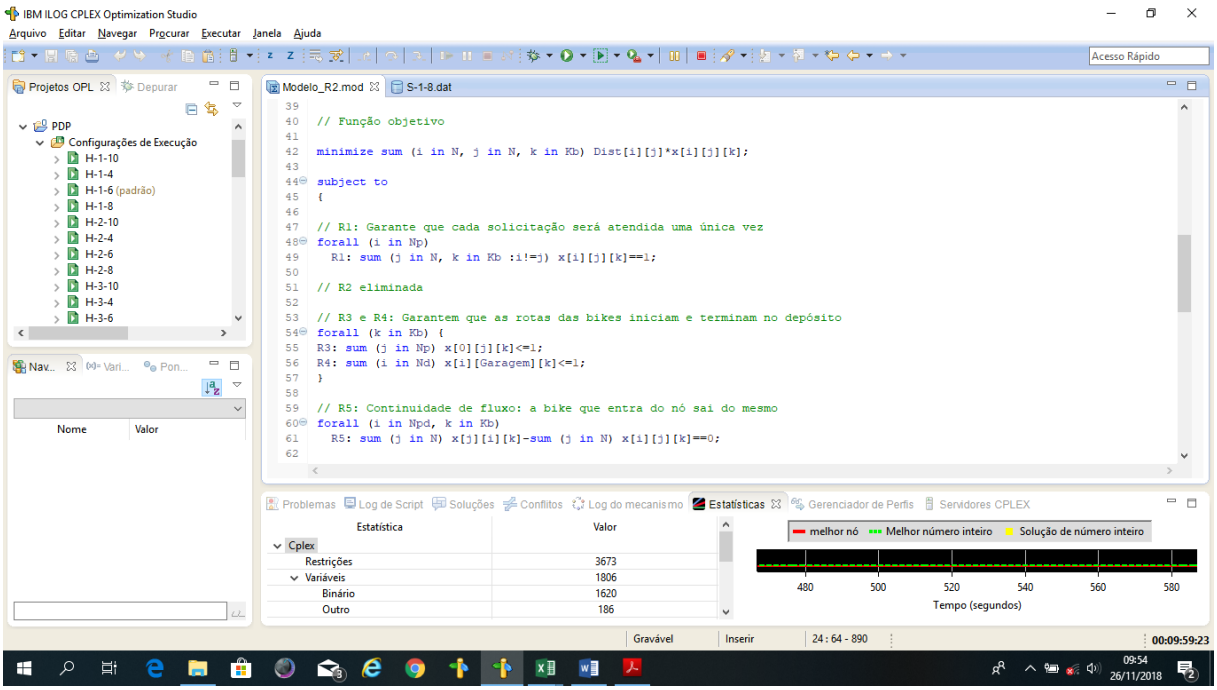


Figura 9: Exemplo do modelo matemático no Cplex

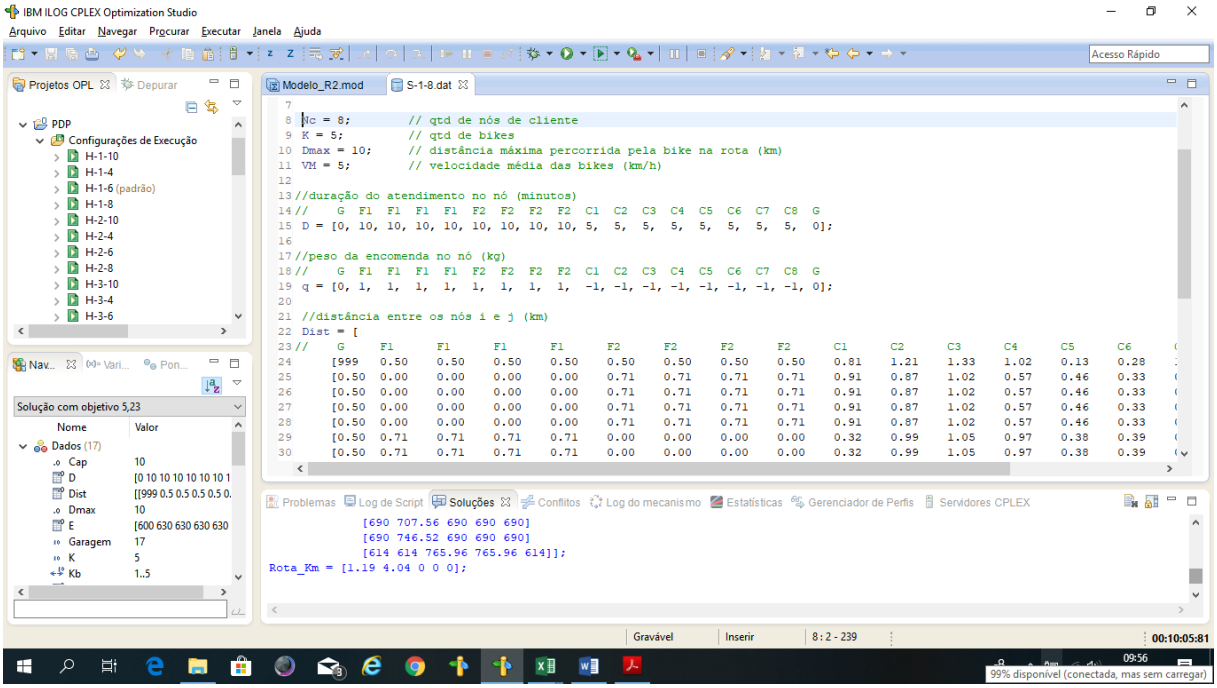


Figura 10: Exemplo de arquivo de dados no Cplex

5.2. Impacto do número de pedidos

O modelo atendeu bem para todos os 24 cenários com 4 e 6 pedidos, com um tempo de processamento menor que 2 minutos. Em apenas 2 destes cenários o modelo utilizou 3 bicicletas, nos demais utilizou apenas 2 bicicletas. A utilização de 3 bicicletas ocorreu no raio de atuação de 3 km a partir da origem. A tabela 3 apresenta os resultados para 4 e 6 pedidos.

Tabela 2: Resultados para 4 e 6 pedidos

CENÁRIOS						RESPOSTAS		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
1	S-1-8-4	Soft	1	8	4	2	4,21	00:00:00
2	S-1-8-6	Soft	1	8	6	2	4,74	00:00:02
5	S-1-10-4	Soft	1	10	4	2	4,21	00:00:00
6	S-1-10-6	Soft	1	10	6	2	4,74	00:00:02
9	S-2-8-4	Soft	2	8	4	2	7,82	00:00:00
10	S-2-8-6	Soft	2	8	6	2	8,21	00:00:24
13	S-2-10-4	Soft	2	10	4	2	7,82	00:00:00
14	S-2-10-6	Soft	2	10	6	2	8,21	00:00:02
17	S-3-8-4	Soft	3	8	4	2	13,1	00:00:00
18	S-3-8-6	Soft	3	8	6	2	15,81	00:00:03
21	S-3-10-4	Soft	3	10	4	2	11,26	00:00:00
22	S-3-10-6	Soft	3	10	6	2	13,57	00:00:05
25	H-1-8-4	Hard	1	8	4	2	4,21	00:00:00
26	H-1-8-6	Hard	1	8	6	2	5,5	00:01:18
29	H-1-10-4	Hard	1	10	4	2	4,21	00:00:00
30	H-1-10-6	Hard	1	10	6	2	5,5	00:01:16
33	H-2-8-4	Hard	2	8	4	2	7,87	00:00:00
34	H-2-8-6	Hard	2	8	6	2	9,25	00:00:56
37	H-2-10-4	Hard	2	10	4	2	7,87	00:00:00
38	H-2-10-6	Hard	2	10	6	2	9,25	00:01:49
41	H-3-8-4	Hard	3	8	4	2	13,26	00:00:00
42	H-3-8-6	Hard	3	8	6	3	19,61	00:00:11
45	H-3-10-4	Hard	3	10	4	2	12,43	00:00:00
46	H-3-10-6	Hard	3	10	6	3	19,02	00:00:30

Para os 12 cenários com 8 pedidos o modelo só não conseguiu rodar 3 cenários por falta de memória, e outros 2 cenários rodaram com tempo de processamento maior do que 1h. Estas situações ocorreram para janelas de tempo do tipo *Hard*, como apresentado na tabela 4.

Tabela 3: Cenários com 8 pedidos

CENÁRIOS						RESPOSTAS		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
3	S-1-8-8	Soft	1	8	8	2	5,23	00:13:41
7	S-1-10-8	Soft	1	10	8	2	5,23	00:10:05
11	S-2-8-8	Soft	2	8	8	2	5,23	00:09:42
15	S-2-10-8	Soft	2	10	8	2	5,23	00:10:29
19	S-3-8-8	Soft	3	8	8	4	26,74	00:35:48
23	S-3-10-8	Soft	3	10	8	2	14,8	00:06:47
27	H-1-8-8	Hard	1	8	8	---	---	Falta de memória
31	H-1-10-8	Hard	1	10	8	---	---	Falta de memória
35	H-2-8-8	Hard	2	8	8	2	13,56	00:30:13
39	H-2-10-8	Hard	2	10	8	2	13,54	01:04:55
43	H-3-8-8	Hard	3	8	8	---	---	Falta de memória
47	H-3-10-8	Hard	3	10	8	3	22,81	01:19:29

Nenhum dos 12 cenários com 10 pedidos foram concluídos. Um deles foi interrompido propositadamente após 5h de processamento e os outros não concluíram por falta de memória. A tabela 5 detalha estes cenários.

Tabela 4: Cenários com 10 pedidos

CENÁRIOS						RESPOSTAS		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
4	S-1-8-10	Soft	1	8	10	---	---	Falta de memória
8	S-1-10-10	Soft	1	10	10	---	---	Falta de memória
12	S-2-8-10	Soft	2	8	10	---	---	Falta de memória
16	S-2-10-10	Soft	2	10	10	---	---	Falta de memória
20	S-3-8-10	Soft	3	8	10	---	---	Falta de memória
24	S-3-10-10	Soft	3	10	10	---	---	Falta de memória
28	H-1-8-10	Hard	1	8	10	---	---	Falta de memória
32	H-1-10-10	Hard	1	10	10	---	---	Falta de memória
36	H-2-8-10	Hard	2	8	10	---	---	Falta de memória
40	H-2-10-10	Hard	2	10	10	---	---	Falta de memória
44	H-3-8-10	Hard	3	8	10	---	---	Cancelado após 5h
48	H-3-10-10	Hard	3	10	10	---	---	Falta de memória

Como não foi possível concluir os cenários com 10 pedidos, foi feito um teste com 9 pedidos com os mesmos dados do cenário S-1-10-10, apenas eliminando o último cliente, para verificar se o limite do modelo proposto são 8 ou 9 pedidos (considerando as demais variáveis constantes). Houve falta de memória após mais de 1 hora de processamento.

O cenário S-1-10-10 também foi testado com 2 bicicletas ao invés de 5 para verificar se esta condição possibilitaria o modelo a encontrar uma solução ótima para 10 pedidos, porém, também houve falta de memória.

Com estes resultados, conclui-se que o modelo proposto atende bem até o limite de 8 pedidos para janelas de tempo *Soft* e 6 pedidos para janelas de tempo *Hard,* considerando fixas as demais variáveis do experimento.

5.3. Impacto da janela de tempo

Considerando os cenários com 4 e 6 pedidos em que todos tiveram um resultado ótimo calculado pelo modelo, foram obtidos os seguintes resultados:

- Janela de tempo *Soft*: total de 103,7km, uso de 24 bicicletas, tempo médio aproximado de processamento de 3 segundos;
- Janela de tempo *Hard*: total de 117,98km, uso de 26 bicicletas, tempo médio de aproximado de processamento de 30 segundos

Portanto, para 4 e 6 pedidos o tempo médio de processamento dos cenários *Hard* foi 10 vezes maior do que o dos cenários Soft, e a distância total percorrida pelas bicicletas aumentou em 13,8%. A tabela 6 apresenta os resultados.

Tabela 5: Impacto da janela de tempo para cenários com 4 e 6 pedidos

CENÁRIOS						*RESPOSTAS*		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
1	S-1-8-4	Soft	1	8	4	2	4,21	00:00:00
2	S-1-8-6	Soft	1	8	6	2	4,74	00:00:02
5	S-1-10-4	Soft	1	10	4	2	4,21	00:00:00
6	S-1-10-6	Soft	1	10	6	2	4,74	00:00:02
9	S-2-8-4	Soft	2	8	4	2	7,82	00:00:00
10	S-2-8-6	Soft	2	8	6	2	8,21	00:00:24
13	S-2-10-4	Soft	2	10	4	2	7,82	00:00:00
14	S-2-10-6	Soft	2	10	6	2	8,21	00:00:02
17	S-3-8-4	Soft	3	8	4	2	13,1	00:00:00
18	S-3-8-6	Soft	3	8	6	2	15,81	00:00:03
21	S-3-10-4	Soft	3	10	4	2	11,26	00:00:00
22	S-3-10-6	Soft	3	10	6	2	13,57	00:00:05
25	H-1-8-4	Hard	1	8	4	2	4,21	00:00:00
26	H-1-8-6	Hard	1	8	6	2	5,5	00:01:18
29	H-1-10-4	Hard	1	10	4	2	4,21	00:00:00
30	H-1-10-6	Hard	1	10	6	2	5,5	00:01:16
33	H-2-8-4	Hard	2	8	4	2	7,87	00:00:00
34	H-2-8-6	Hard	2	8	6	2	9,25	00:00:56
37	H-2-10-4	Hard	2	10	4	2	7,87	00:00:00
38	H-2-10-6	Hard	2	10	6	2	9,25	00:01:49
41	H-3-8-4	Hard	3	8	4	2	13,26	00:00:00
42	H-3-8-6	Hard	3	8	6	3	19,61	00:00:11
45	H-3-10-4	Hard	3	10	4	2	12,43	00:00:00
46	H-3-10-6	Hard	3	10	6	3	19,02	00:00:30

Nos cenários com 8 pedidos e distância máxima de 10km por rota também é possível verificar o impacto entre as janelas *Hard* e *Soft*. Na tabela 7 é possível verificar um aumento considerável no tempo de processamento e na distância total percorrida com janelas de tempo *Hard*.

Tabela 6: Impacto da janela de tempo para cenários com 8 pedidos

CENÁRIOS						*RESPOSTAS*		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
7	S-1-10-8	Soft	1	10	8	2	5,23	00:10:05
15	S-2-10-8	Soft	2	10	8	2	5,23	00:10:29
23	S-3-10-8	Soft	3	10	8	2	14,8	00:06:47
31	H-1-10-8	Hard	1	10	8	---	---	Falta de memória
39	H-2-10-8	Hard	2	10	8	2	13,54	01:04:55
47	H-3-10-8	Hard	3	10	8	3	22,81	01:19:29

A partir destes resultados conclui-se que o modelo atende melhor a operações de *delivery* com janelas de tempo *Soft*, principalmente por conta do tempo de processamento, considerando fixas as demais variáveis do experimento.

5.4. Impacto do raio de atuação e distância máxima permitida para a rota

Considerando apenas os cenários que tiveram um resultado ótimo calculado, para o atendimento em raios de 1km e 2km, o modelo utilizou apenas 2 bicicletas, conforme tabela 8.

Tabela 7: Impacto do raio de atuação de 1km e 2km

CENÁRIOS						RESPOSTAS		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
1	S-1-8-4	Soft	1	8	4	2	4,21	00:00:00
2	S-1-8-6	Soft	1	8	6	2	4,74	00:00:02
3	S-1-8-8	Soft	1	8	8	2	5,23	00:13:41
5	S-1-10-4	Soft	1	10	4	2	4,21	00:00:00
6	S-1-10-6	Soft	1	10	6	2	4,74	00:00:02
7	S-1-10-8	Soft	1	10	8	2	5,23	00:10:05
9	S-2-8-4	Soft	2	8	4	2	7,82	00:00:00
10	S-2-8-6	Soft	2	8	6	2	8,21	00:00:24
11	S-2-8-8	Soft	2	8	8	2	5,23	00:09:42
13	S-2-10-4	Soft	2	10	4	2	7,82	00:00:00
14	S-2-10-6	Soft	2	10	6	2	8,21	00:00:02
15	S-2-10-8	Soft	2	10	8	2	5,23	00:10:29
25	H-1-8-4	Hard	1	8	4	2	4,21	00:00:00
26	H-1-8-6	Hard	1	8	6	2	5,5	00:01:18
29	H-1-10-4	Hard	1	10	4	2	4,21	00:00:00
30	H-1-10-6	Hard	1	10	6	2	5,5	00:01:16
33	H-2-8-4	Hard	2	8	4	2	7,87	00:00:00
34	H-2-8-6	Hard	2	8	6	2	9,25	00:00:56
35	H-2-8-8	Hard	2	8	8	2	13,56	00:30:13
37	H-2-10-4	Hard	2	10	4	2	7,87	00:00:00
38	H-2-10-6	Hard	2	10	6	2	9,25	00:01:49
39	H-2-10-8	Hard	2	10	8	2	13,54	01:04:55

Entretanto, para um raio de atendimento de 3km o modelo usou de 2 a 4 bicicletas de acordo com a distância máxima permitida por rota, conforme mostra a tabela 9.

Tabela 8: Impacto do raio de atuação de 3km

CENÁRIOS						RESPOSTAS		
nº	*Nome*	*Janela de Tempo*	*Raio (km)*	*Dmax (km)*	*Pedidos*	*Qtd. Bicicletas*	*Dist. Total (km)*	*T. Processam. (hh:mm:ss)*
17	S-3-8-4	Soft	3	8	4	2	13,1	00:00:00
18	S-3-8-6	Soft	3	8	6	2	15,81	00:00:03
19	S-3-8-8	Soft	3	8	8	4	26,74	00:35:48
21	S-3-10-4	Soft	3	10	4	2	11,26	00:00:00
22	S-3-10-6	Soft	3	10	6	2	13,57	00:00:05
23	S-3-10-8	Soft	3	10	8	2	14,8	00:06:47
41	H-3-8-4	Hard	3	8	4	2	13,26	00:00:00
42	H-3-8-6	Hard	3	8	6	3	19,61	00:00:11
45	H-3-10-4	Hard	3	10	4	2	12,43	00:00:00
46	H-3-10-6	Hard	3	10	6	3	19,02	00:00:30
47	H-3-10-8	Hard	3	10	8	3	22,81	01:19:29

Não foram testados raios maiores do que 3km, pois isto poderia ocasionar tamanhos de rota grandes para serem atendidas com bicicletas, conforme explicado anteriormente no item 3.3. Entretanto, foi feito um teste com um cenário com 6 pedidos, raio de 4km e distância máxima de rota de 10km de forma a testar esta hipótese. O modelo não conseguiu chegar a um resultado ótimo, sendo interrompido após 11 horas de processamento.

É possível observar que o raio de atuação e a distância máxima permitida para as rotas estão fortemente relacionadas, quanto menor o a distância máxima permitida maior a quantidade de bicicletas utilizadas. Para demonstrar esta relação será apresentado o detalhamento dos cenários S-3-8-8 e S-3-10-8, que possuem os mesmos dados, com exceção da distância máxima permitida para a rota das bicicletas, que são 8km e 10km respectivamente. Estes cenários utilizaram as janelas de tempo demonstradas na tabela 10.

Tabela 9: janelas de tempo dos cenários S-3-8-8 e S-3-10-8

Entidade	*Janela de tempo*	
	Início	*Fim*
Transportador	10:00	14:00
Fornecedor	10:30	11:30
Clientes	11:30	12:30

No cenário S-3-8-8 foram necessárias 4 bicicletas, que rodaram respectivamente 7,53km, 5,23km, 6,08km e 7,9km respectivamente. Já no cenário S-3-10-8 foram necessárias apenas 2 bicicletas que rodaram 9,57km e 5,23km respectivamente. As figuras 11 e 12 demonstram as rotas feitas pelas bicicletas nos dois cenários.

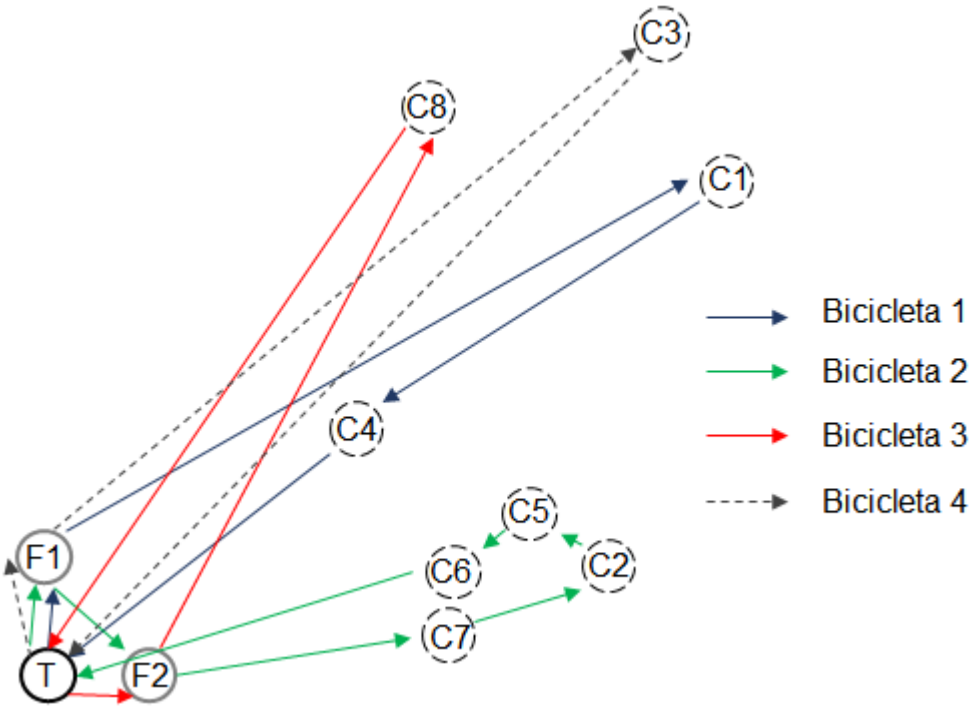


Figura 11: Rotas do cenário S-3-8-8

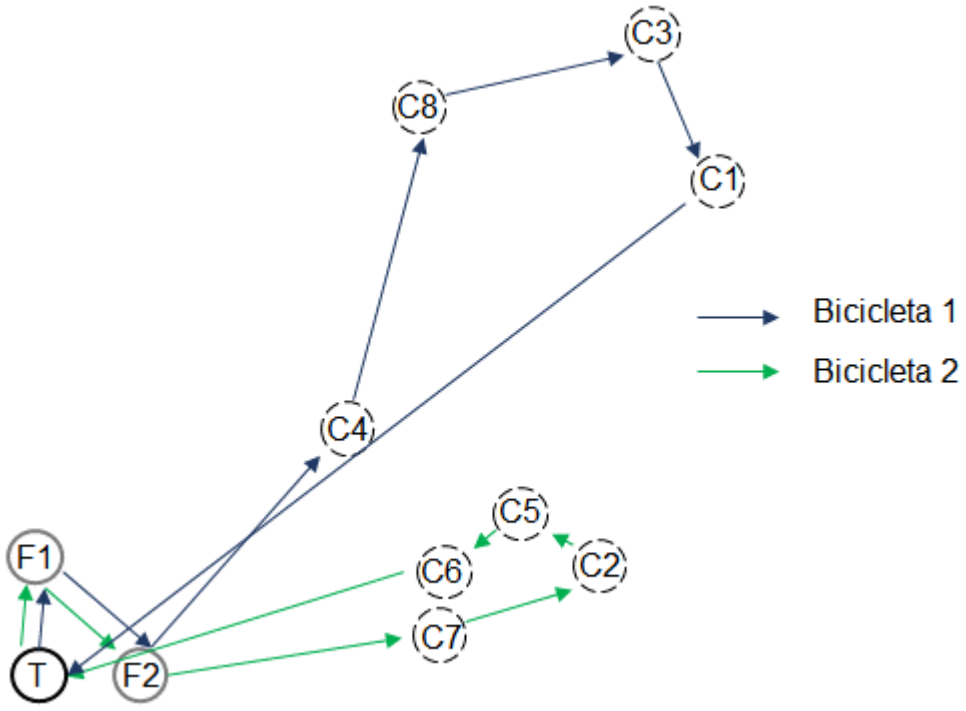


Figura 12: Rotas do cenário S-3-10-8

É possível perceber que com a redução da distância máxima permitida em um cenário em que os clientes estão mais distantes do transportador, o modelo precisa aumentar o número de bicicletas utilizadas. A rota com distância máxima de 10km utilizou 2 bicicletas que rodaram juntas 14,8km, enquanto a rota com distância máxima de 8km utilizou 4 bicicletas que rodaram juntas 26,74km, ou seja, 80,7% a mais que no cenário anterior.

Com isso conclui-se que a distância máxima permitida para as rotas das bicicletas é bastante sensível ao raio máximo de atuação do transportador, sendo que o modelo atende bem a qualquer raio de atuação desde que a distância máxima permitida para as rotas seja suficiente.

Observa-se com os testes que os fatores de maior impacto no modelo são o número de pedidos, como esperado, uma vez que este é um problema do tipo *np-hard*, e a janela de tempo que influencia no tempo de processamento e até mesmo na possibilidade de encontrar uma solução ótima ou não. Já o raio de atuação está relacionado com a distância máxima permitida para a rota e, desde que estes dois fatores sejam compatíveis, o modelo consegue atender bem mantendo as demais variáveis fixas.

6. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

O objetivo desta dissertação foi propor um modelo matemático de programação e roteirização de veículos que possa ser aplicado ao serviço de *delivery* utilizando bicicletas para esta finalidade. Foi apresentado um referencial teórico onde foi possível concluir que o principal fator restritivo para o uso de bicicletas para o transporte de carga é a distância máxima percorrida na rota, que não deve ser muito extensa de acordo com Leonardi et al. (2012). Para tanto foi adaptado o modelo de programação linear inteira mista proposto por Rodrigues et al. (2012) para o problema do tipo DARP-TW (*Dial-a-Ride Problem with Time Windows*), que muito se assemelha PDP-TW (*Pick-up and Delivery Problem with Time Windows*), sendo a principal diferença que este trata do transporte de carga e aquele do transporte de pessoas. A este modelo foram acrescentadas restrições de distância máxima percorrida para adequação ao uso de bicicletas. Até onde foi possível observar nas pesquisas realizadas, não foi encontrado um modelo de PDPTW com restrição de distância máxima percorrida na rota, sendo esta a principal contribuição deste trabalho.

Foram testados 48 cenários, variando o raio de atuação do transportador, tipo de janela de tempo, quantidade de pedidos e distância máxima percorrida na rota. Como visto anteriormente, o PDPTW é uma variação do problema do caixeiro viajante, portanto, do tipo *NP-Hard*. Com isso, conforme aumenta-se o tamanho das instâncias, aumenta-se também o tempo de processamento até determinado limite. Para o modelo proposto e as demais condições, concluiu-se que o modelo apresentado atende até o limite de 8 pedidos para janelas de tempo *Soft* e 6 pedidos para janelas de tempo *Hard* e raio de atuação de até 3km a partir do transportador, sendo mais adequado para serviços de *delivery* em que há programação antecipada da entrega.

As adaptações propostas mostraram-se bastante aderentes ao serviço de *delivery* com o uso de bicicletas. Como pôde-se observar na avaliação do impacto do raio de atuação e distância máxima permitida por rota, uma redução de 20% na distância máxima permitida por rota resultou em um aumento de 80,7% na distância percorrida pelas bicicletas.

No contexto de *City Logistics*, o uso de bicicletas para o transporte de carga em centros urbanos apresenta-se como uma boa alternativa para a redução de impactos negativos para as pessoas, porém, é importante ressaltar a importância de promover políticas públicas para a melhoria da logística nas cidades considerando impactos sociais, econômicos e ambientais.

Como proposta para estudos futuros sugere-se:

- Abordar outras restrições técnicas que não foram tratadas neste trabalho, mas que podem simular novas situações, como:
    - Variação da velocidade das bicicletas - para simular o serviço em casos de intempéries, bloqueios de vias e influência do relevo da região;
    - Restrições de dimensões das encomendas - para serviços terceirizados de entrega que atende a vários fornecedores ao mesmo tempo pode haver a necessidade de restringir algumas dimensões para conseguir um atendimento eficiente;
    - Variações da capacidade de carga das bicicletas: dependendo do tipo de serviço este fator pode ser restritivo;
    - Variação da distância máxima percorrida por bicicleta: pode-se considerar, por exemplo, que ciclistas diferentes têm resistências diferentes para fazer as entregas.
- Trabalhar o modelo com incertezas nos parâmetros utilizados;
- Tratar problemas dinâmicos em que há necessidade de replanejamentos frequentes;
- Estudar a análise de sensibilidade do modelo;
- Utilizar o modelo com um sistema de informações geográficas;
- Adaptar um aplicativo computacional.

Muitas são as possibilidades de estudo deste tema que é bastante abrangente e envolvente.

BIBLIOGRAFIA

BROWNE, Michael; ALLEN, Julian; NEMOTO, Toshinori; PATIER, Daniele; VISSER, Johan. Reducing social and environmental impacts of urban freight transport: A review of some major cities. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 39, p. 19-33, 2012.

BROWNE, Michael; ALLEN, Julian; LEONARDI, Jacques. Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. **IATSS research**, v. 35, n. 1, p. 1-6, 2011.

CATTARUZZA, Diego; ABSI, Nabiel; FEILLET, Dominique; GONZÁLEZ-FELIU, Jesús. Vehicle routing problems for city logistics. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 6, n. 1, p. 51-79, 2017.

Chicarelli, Ricardo. Delivery é o motor de crescimento para pequenas e médias empresas. Disponível em: < https://www.folhadelondrina.com.br/economia/delivery-e-motor-de-crescimento-para-pequenas-e-medias-empresas-1021626.html>. Acesso em: 28 de dezembro de 2018.

Costa, Ana Rita. DHL Express Holanda faz entregas em bicicleta. Disponível em: < https://www.logisticaetransporteshoje.com/transportes/dhl-express-holanda-faz-entregas-em-bicicleta/> Acesso em: 11 de março de 2018.

CRAINIC, Teodor Gabriel. City Logistics. **Tutorials in Operations Research: State-of-the-art Decision-making Tools in the Information-intensive age**, 2008.

DE CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2011.

FACCHINI, Daniela. Análise dos GAPS de percepção dos atores envolvidos no transporte urbano de carga em Porto Alegre. 2006.

FATNASSI, Ezzeddine; CHAOUACHI, Jouhaina; KLIBI, Walid. Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for

sustainable city-logistics. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 81, p. 440-460, 2015.

GRUBER, Johannes; EHRLER, Verena; LENZ, Barbara. Technical potential and user requirements for the implementation of electric cargo bikes in courier logistics services. In: **13th World Conference on Transport Research (WCTR)**. 2013.

GUPTA, Sanjay. Role of non-motorized transport in distribution of goods in the metropolitan city of Delhi. **Transportation research procedia**, v. 25, p. 978-984, 2017.

KONING, Martin; CONWAY, Alison. The good impacts of biking for goods: Lessons from Paris city. **Case studies on transport policy**, v. 4, n. 4, p. 259-268, 2016.

LENZ, Barbara; RIEHLE, Ernst. Bikes for urban freight? Experience in Europe. **Transportation Research Record**, v. 2379, n. 1, p. 39-45, 2013.

LEONARDI, Jacques; BROWNE, Michael; ALLEN, Julian; BOHNE, Simon; RUESCH, Martin. Best practice factory for freight transport in Europe: demonstrating how 'good' urban freight cases are improving business profit and public sectors benefits. **Procedia-Social and behavioral sciences**, v. 125, p. 84-98, 2014.

LEONARDI, Jacques; BROWNE, Michael; ALLEN, Julian. Before-after assessment of a logistics trial with clean urban freight vehicles: A case study in London. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 39, p. 146-157, 2012.

LIN, C. K. Y. A vehicle routing problem with pickup and delivery time windows, and coordination of transportable resources. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 11, p. 1596-1609, 2011.

LIN, Canhong; CHOY, K. L.; HO, G. T. S.; CHUNG, S. H.; LAM, H. Y. Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 4, p. 1118-1138, 2014.

Melo, Ana Rúbia. Marmita Delivery: em busca de praticidade e comidas saudáveis. Disponível em: < https://revistacasaejardim.globo.com/Casa-e-

Jardim/Reportagem/noticia/2018/06/marmita-delivery-em-busca-de-praticidade-e-comidas-saudaveis.html>. Acesso em: 28 de dezembro de 2018.

MELO, Sandra; BAPTISTA, Patrícia. Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries. **European transport research review**, v. 9, n. 2, p. 30, 2017.

Munaro, Juliana. Pedido de comida por aplicativo oferece comodidade e alavanca vendas de restaurantes. Disponível em: < https://g1.globo.com/economia/pme/pequenas-empresas-grandes-negocios/noticia/2018/12/23/pedido-de-comida-por-aplicativo-oferece-comodidade-e-alavanca-vendas-de-restaurantes.ghtml>. Acesso em: 28 de dezembro de 2018.

PARRAGH, Sophie N.; DOERNER, Karl F.; HARTL, Richard F. A survey on pickup and delivery problems. **Part II: Transportation between pickup and delivery locations, to appear: Journal für Betriebswirtschaft**, 2007.

PILLAC, Victor; GENDREAU, Michel; GUÉRET; Christelle; MEDAGLIA, Andrés L. A review of dynamic vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 1-11, 2013.

PIMENTEL, Carina; ALVELOS, Filipe. Integrated urban freight logistics combining passenger and freight flows–mathematical model proposal. **Transportation research procedia**, v. 30, p. 80-89, 2018.

RODRIGUES, Patricia Perreto; DE ALVARENGA ROSA, Rodrigo; RESENDO, Leandro Colombi. Proposta de um modelo matemático para o problema dial-a-ride aplicado ao transporte público de cadeirantes. **Transportes**, v. 20, n. 2, p. 33-41, 2012.

ROPKE, Stefan; CORDEAU, Jean-François; LAPORTE, Gilbert. Models and branch-and-cut algorithms for pick-up and delivery problems with time windows. **Networks**, v. 49, n. 4, p. 258-272, 2007.

SAVELSBERGH, Martin; VAN WOENSEL, Tom. 50th anniversary invited article—city logistics: Challenges and opportunities. **Transportation Science**, v. 50, n. 2, p. 579-590, 2016.

SCHLIWA, Gabriele; ARMITAGE, Richard; AZIZ, Sara; EVANS, James; RHOADES, Jasminte. Sustainable city logistics—Making cargo cycles viable for urban freight transport. **Research in Transportation Business & Management**, v. 15, p. 50-57, 2015.

TANIGUCHI, Eiichi. Concepts of city logistics for sustainable and liveable cities. **Procedia-social and behavioral sciences**, v. 151, p. 310-317, 2014.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Download/>. Acesso em: 27/12/2018.

WANG, Zheng. Delivering meals for multiple suppliers: Exclusive or sharing logistics service. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 118, p. 496-512, 2018.

WRIGHTON, Susanne; REITER, Karl. CycleLogistics – moving Europe forward! **Transportation Research Procedia**, v. 12, p. 950-958, 2016.

ANEXO 1

Dados para os cenários S-3-8-8 e S-3-10-8: distâncias e janelas de tempo

Distância - D (N, N):

(i)	(j)	0 *Garagem*	1 *F1*	2 *F1*	3 *F1*	4 *F1*	5 *F2*	6 *F2*	7 *F2*	8 *F2*	9 *C1*	10 *C2*	11 *C3*	12 *C4*	13 *C5*	14 *C6*	15 *C7*	16 *C8*	17 *Garagem*
0	Garagem	999,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	3,64	2,20	3,88	1,56	2,01	1,82	1,80	2,91	999,00
1	F1	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,71	0,71	0,71	3,37	2,19	3,52	1,38	1,96	1,80	1,85	2,51	0,50
2	F1	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,71	0,71	0,71	3,37	2,19	3,52	1,38	1,96	1,80	1,85	2,51	0,50
3	F1	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,71	0,71	0,71	3,37	2,19	3,52	1,38	1,96	1,80	1,85	2,51	0,50
4	F1	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,71	0,71	0,71	3,37	2,19	3,52	1,38	1,96	1,80	1,85	2,51	0,50
5	F2	0,50	0,71	0,71	0,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	1,70	3,56	1,15	1,52	1,33	1,30	2,67	0,50
6	F2	0,50	0,71	0,71	0,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	1,70	3,56	1,15	1,52	1,33	1,30	2,67	0,50
7	F2	0,50	0,71	0,71	0,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	1,70	3,56	1,15	1,52	1,33	1,30	2,67	0,50
8	F2	0,50	0,71	0,71	0,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	1,70	3,56	1,15	1,52	1,33	1,30	2,67	0,50
9	C1	3,64	3,37	3,37	3,37	3,37	3,25	3,25	3,25	3,25	999,00	2,03	0,79	2,10	1,97	2,15	2,36	1,37	3,64
10	C2	2,20	2,19	2,19	2,19	2,19	1,70	1,70	1,70	1,70	2,03	999,00	2,64	0,97	0,28	0,40	0,42	2,25	2,20
11	C3	3,88	3,52	3,52	3,52	3,52	3,56	3,56	3,56	3,56	0,79	2,64	999,00	2,44	2,52	2,67	2,90	1,10	3,88
12	C4	1,56	1,38	1,38	1,38	1,38	1,15	1,15	1,15	1,15	2,10	0,97	2,44	999,00	0,70	0,62	0,82	1,68	1,56
13	C5	2,01	1,96	1,96	1,96	1,96	1,52	1,52	1,52	1,52	1,97	0,28	2,52	0,70	999,00	0,20	0,38	2,03	2,01
14	C6	1,82	1,80	1,80	1,80	1,80	1,33	1,33	1,33	1,33	2,15	0,40	2,67	0,62	0,20	999,00	0,25	2,11	1,82
15	C7	1,80	1,85	1,85	1,85	1,85	1,30	1,30	1,30	1,30	2,36	0,42	2,90	0,82	0,38	0,25	999,00	2,36	1,80
16	C8	2,91	2,51	2,51	2,51	2,51	2,67	2,67	2,67	2,67	1,37	2,25	1,10	1,68	2,03	2,11	2,36	999,00	2,91
17	Garagem	999,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	3,64	2,20	3,88	1,56	2,01	1,82	1,80	2,91	999,00

Duração de atendimento no nó:

0 *Garagem*	1 *F1*	2 *F1*	3 *F1*	4 *F1*	5 *F2*	6 *F2*	7 *F2*	8 *F2*	9 *C1*	10 *C2*	11 *C3*	12 *C4*	13 *C5*	14 *C6*	15 *C7*	16 *C8*	17 *Garagem*
0	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	0

Peso da encomenda no nó:

0 *Garagem*	1 *F1*	2 *F1*	3 *F1*	4 *F1*	5 *F2*	6 *F2*	7 *F2*	8 *F2*	9 *C1*	10 *C2*	11 *C3*	12 *C4*	13 *C5*	14 *C6*	15 *C7*	16 *C8*	17 *Garagem*
0	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0