

Luís Pedro Neiva Faria Ribeiro

# ESCOLHA DE PERCURSOS E ATRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO: MÉTODOS E APLICAÇÕES A COIMBRA

ROUTE CHOICE AND TRAFFIC ASSIGNMENT:  
METHODS AND APPLICATIONS TO COIMBRA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,  
orientada pelo Professor Doutor João António Duarte Zeferino e pelo Professor Doutor António José Pais Antunes

Coimbra, 7 de Setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Luís Pedro Neiva Faria Ribeiro

# **Escolha de Percursos e Atribuição de Tráfego: Métodos e Aplicações a Coimbra**

## **Route Choice and Traffic Assignment: Methods and Applications to Coimbra**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, orientada pelo Professor Doutor João António Duarte Zeferino e pelo Professor Doutor António José Pais Antunes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais todo o apoio, ajuda e compreensão que me proporcionaram ao longo deste percurso que tanto ambicionei. Expresso também a minha gratidão a toda a minha família que esteve sempre presente nos momentos importantes.

Aos meus orientadores, Professor João Zeferino e Professor António Pais Antunes, devo um profundo agradecimento pelo acompanhamento, conhecimento, paciência e disponibilidade manifestados ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também aos docentes e ao restante grupo constituinte do Departamento de Engenharia Civil toda a sua contribuição para a minha formação académica e crescimento como pessoa.

Por fim, não posso deixar de agradecer a todos os meus amigos que me apoiaram nesta caminhada.

A todos vocês dedico este trabalho, pois tornaram tudo mais fácil.

## RESUMO

Nos dias de hoje, cada vez mais se observa que os volumes de tráfego rodoviário têm vindo a aumentar de uma forma bastante significativa, tendo esse fator um impacto negativo nas redes rodoviárias de cada país. Dado que as redes mais congestionadas são as redes urbanas, essas são aquelas a que mais estudos estão sujeitas. Sendo assim, através de simulações do comportamento dos condutores, existem diferentes métodos que abordam esta problemática, permitindo encontrar melhores percursos e definir soluções que melhorem o desempenho de uma rede rodoviária.

Os métodos de atribuição de tráfego estão relacionados com o modelo clássico de transportes, visto que o processo de planeamento de transportes utiliza habitualmente uma abordagem baseada em quatro modelos (quatro passos) que são acionados de forma sequencial. Neste contexto, o modelo de atribuição (quarto passo) tem o objetivo de determinar a forma como as viagens entre as várias zonas de origem e as várias zonas de destino são atribuídas à rede rodoviária, ou seja, qual o volume de tráfego em cada eixo. Em geral, assume-se o princípio da atribuição de equilíbrio, de acordo com o qual nenhum condutor pode melhorar o seu tempo ou custo de viagem alterando o seu percurso.

Este documento analisa os problemas da escolha de percursos e os métodos de atribuição de tráfego mais conhecidos, incluindo os métodos estocásticos que têm em consideração as diferentes perceções dos condutores apesar destes nem sempre escolherem o melhor percurso. Foi usado um modelo da rede rodoviária de Coimbra para exemplificar a aplicação dos métodos de atribuição de tráfego e assim comparar os resultados obtidos. Os métodos utilizados foram o método do tudo ou nada, o método iterativo e o método de equilíbrio estocástico. Os resultados apresentados foram obtidos através do *software Transplan+*.

**Palavras-chave:** Escolha de Percursos, Atribuição de Tráfego, Método de Equilíbrio Estocástico, Simulação de Transportes.

## ABSTRACT

Nowadays, it is observed that the volume of road traffic is increasing in a very significant way, with this reality having a negative impact on the road networks of every country. Since the most congested networks are urban networks, these are the ones more widely studied. Through simulations of driver behavior, there are different methods to address road congestion, allowing to define solutions that improve the performance of a road network.

The methods of traffic assignment are related to the classic transport model, since the transport planning process usually uses an approach based on four models (four steps) that are triggered sequentially. In this context, the allocation model (step 4) aims to determine how trips between the various zones of origin and destination of traffic are allocated to the road network, i.e., to determine the traffic volume on each one of its segments. In general, the equilibrium principle is assumed to hold, according to which no driver can improve his time or cost of travel by changing his/her travel route.

This paper reviews route choice issues and the best-known traffic assignment methods, including stochastic methods that take into account the different perceptions of drivers regarding the best route alternatives. A model of the road network of Coimbra used to exemplify the application of traffic assignment methods and compare the results they provide. Specifically, the methods used are: the all-or-nothing method; the iterative method; and the stochastic user equilibrium method. The results were obtained through the Transplan+ transport modeling software.

**Keywords:** Route Choice, Traffic Assignment, Stochastic User Equilibrium, Transport Modeling.

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação e Objetivo .....	1
1.2 Estrutura do Trabalho .....	2
2 ESCOLHA DE PERCURSOS .....	4
2.1 Considerações Iniciais .....	4
2.2 Modelo Clássico de Transportes.....	5
2.3 Atribuição de Viagens .....	6
2.3.1 Escolha de Percursos .....	7
2.3.2 Curvas Tempo-Tráfego e Velocidade-Tráfego.....	9
2.3.3 Atribuição de Tráfego sem Congestionamento .....	11
2.3.4 Métodos Estocásticos .....	12
2.3.5 Atribuição de Tráfego com Congestionamento.....	14
2.3.5.1 Método Incremental.....	15
2.3.5.2 Método Iterativo .....	16
2.3.5.3 Método de Equilíbrio Estocástico .....	16
3 METODOLOGIA.....	17
3.1 Método do Tudo ou Nada.....	19
3.2 Método Incremental.....	21
3.3 Método Iterativo .....	22
3.4 Método de Equilíbrio Estocástico.....	24
3.5 Atribuição de Transportes Públicos.....	27
4 ESTUDO DE CASO .....	30
4.1 Rede rodoviária de Coimbra.....	30
4.2 Dados .....	31
4.3 Resultados.....	36
4.3.1 Sem Transporte Público .....	37
4.3.1.1 Método do Tudo ou Nada.....	37

4.3.1.2 Método Iterativo .....	38
4.3.1.3 Método de Equilíbrio Estocástico .....	39
4.3.2 Com Transporte Público .....	41
4.3.2.1 Método Iterativo .....	41
4.3.2.2 Método de Equilíbrio Estocástico .....	42
4.3.3 Resumo dos Resultados .....	44
5 CONCLUSÃO .....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
ANEXO A .....	A-1
ANEXO B .....	B-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva Velocidade - Tráfego.....	9
Figura 2.2 – Curva Tempo - Tráfego.....	10
Figura 2.3 – Destinos do nó B .....	13
Figura 2.4 – Diferentes percursos entre A e B .....	13
Figura 3.1 – Rede exemplo.....	17
Figura 3.2 – Método do tudo ou nada aplicada na rede exemplo .....	20
Figura 3.3 – Método incremental aplicada na rede exemplo.....	22
Figura 3.4 – Método iterativo aplicado na rede exemplo .....	23
Figura 3.5 – Distribuição dos custos num eixo .....	25
Figura 3.6 – Método estocástico aplicado na rede exemplo com 25% de intervalo.....	26
Figura 3.7 – Método estocástico aplicado na rede exemplo com 10% de intervalo.....	27
Figura 3.8 – Atribuição de transporte público aplicado na rede exemplo.....	29
Figura 4.1 – Enquadramento da cidade de Coimbra .....	31
Figura 4.2 – Rede rodoviária do caso em estudo.....	32
Figura 4.3 – Quantidade de viagens com destino a cada nó.....	33
Figura 4.4 – Quantidade de viagens com origem a cada nó .....	34
Figura 4.5 – Diferentes velocidades existentes na rede.....	35
Figura 4.6 – Número de vias da rede.....	36
Figura 4.7 – Método do tudo ou nada aplicado na rede de Coimbra.....	37
Figura 4.8 – Método iterativo aplicado na rede de Coimbra.....	39
Figura 4.9 – Método estocástico aplicado na rede de Coimbra.....	40
Figura 4.10 – Método iterativo aplicado na rede de Coimbra com transporte público .....	42
Figura 4.11 – Método estocástico aplicado na rede de Coimbra com transporte público .....	43
Figura 4.12 – Rede rodoviária com os eixos numerados.....	44



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Informação dos eixos.....	18
Quadro 3.2 – Matriz OD.....	18
Quadro 3.3 – Informação dos eixos com autocarros .....	28
Quadro 4.1 – Resumo dos resultados (Sentido A) .....	45
Quadro 4.2 – Resumo dos resultados (Sentido B).....	46

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e Objetivo

Desde os tempos mais primitivos que o ser humano tem a necessidade de se deslocar e também de movimentar mercadorias de uns locais para outros. Primeiramente começaram-se a utilizar animais para o auxílio desta prática e mais tarde com a invenção da roda e do trenó houve um aumento bastante significativo da eficiência dos transportes. Por volta desta altura houve também a invenção de alguns transportes aquáticos bastante rudimentares. No passado recente, além do desenvolvimento dos transportes terrestres e aquáticos surgiu também o transporte aéreo.

Com a evolução do transporte terrestre era necessário a construção de meios mais adequados para se fazerem estas viagens. Assim apareceram as primeiras estradas pavimentadas, de modo a facilitarem esta tarefa. Posto isto, tanto as estradas como os próprios transportes continuaram a evoluir até aos dias de hoje.

Com esta evolução exponencial existente no ramo dos transportes criou-se um sistema de transportes onde existe uma oferta e uma procura. A oferta é constituída pelas infraestruturas fixas (redes de transportes) e pela infraestrutura circulante (meios de transporte). A procura de transportes acontece de acordo com a necessidade que as pessoas têm de se deslocar para o emprego, escolas, fazer compras, turismo, entre muitas outras. Um ponto que também tem muito peso na procura de transportes é a movimentação de mercadorias, sendo que este está mais relacionado com empresas e não com a vida particular das pessoas.

O presente trabalho foca-se nos transportes terrestres que circulam nas redes rodoviárias, e estes estão divididos em transportes particulares e transportes públicos. De forma a estudar e a tentar simular o comportamento dos condutores nas redes rodoviárias é aconselhável seguir-se o modelo clássico de transportes. Este está dividido em quatro passos, sendo esses a geração de viagens, a distribuição de viagens, a repartição modal e a atribuição de tráfego. Neste documento irá dar-se uma maior importância ao último passo do modelo clássico de transportes (atribuição de tráfego).

Devido à grande complexidade das redes de estradas atuais, na maior parte das vezes quando se quer resolver um problema de atribuição de tráfego ou da melhor escolha de percursos é necessário recorrer-se a métodos já estudados.

Os métodos existentes para a modelação da escolha de percursos desempenham um papel bastante importante em várias aplicações de transportes. O comportamento dos métodos de escolha de percursos é essencial, visto que estes fornecem a possibilidade de avaliar a perceção dos condutores consoante as características da estrada e, de uma certa forma, facultam também as condições de tráfego futuras. Acima de tudo são estudos complicados de serem feitos, visto que existe uma grande complexidade em representar o comportamento humano. Por exemplo, a ideia que as pessoas têm do tempo de viagem é variável, visto que as condições do tráfego mudam constantemente. Posto isto, os métodos que maior destaque apresentam nesta dissertação são o método do tudo ou nada, o método incremental, o método iterativo e o método de equilíbrio estocástico.

Os objetivos desta dissertação são comparar os resultados obtidos através de diferentes métodos de atribuição de tráfego recorrendo-se a simulações realizadas com a ajuda do *software Transplan+*. Este *software* está programado para aplicar o modelo clássico de transportes, no entanto, apenas o módulo da atribuição de viagens é importante para este trabalho. Existem duas redes rodoviárias diferentes, uma mais pequena para facilitar a discussão detalhada dos resultados e a outra é baseada na rede rodoviária da cidade de Coimbra. Apesar da presença de duas redes rodoviárias, o principal objetivo deste documento é estudar o tráfego rodoviário da cidade de Coimbra e assim compará-lo com os diferentes métodos de atribuição de tráfego, com uma maior atenção para o método de equilíbrio estocástico.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Neste primeiro capítulo tem-se o enquadramento geral do tema a ser abordado nesta dissertação, expondo a sua importância no panorama atual. Mencionam-se também os objetivos do presente trabalho, bem como a sua estruturação.

O segundo capítulo está reservado para a revisão bibliográfica, onde o modelo clássico de transportes ocupa grande parte deste capítulo, com maior importância a atribuição de viagens. Na atribuição de tráfego são descritos vários métodos, fazendo-se referência às suas origens e aplicações.

No terceiro capítulo são apresentados os métodos de atribuição de tráfego utilizados nesta dissertação, de uma forma mais pormenorizada. Para isso foi criada uma rede exemplo onde foi possível efetuarem-se as diferentes simulações.

No quarto capítulo foram aplicados alguns dos métodos apresentados no capítulo 3 à rede rodoviária da cidade de Coimbra e compararam-se os resultados obtidos através dos diferentes métodos de atribuição de tráfego.

O último capítulo destina-se às devidas conclusões.

## 2 ESCOLHA DE PERCURSOS

### 2.1 Considerações Iniciais

Em várias componentes do planeamento do sistema de transportes, como no estudo da repartição modal, existe um pequeno número de alternativas e estas são fáceis de serem visualizadas, tais como, carros, autocarros, comboios, entre outras. Na escolha do destino existem inúmeras opções que podem ser tidas em conta, no entanto estas são também fáceis de visualizar (por exemplo: regiões, cidades, um apartamento, um restaurante). Contudo, quando se fala na escolha de percursos existe uma longa lista de alternativas difíceis de enumerar e de visualizar. De facto, quando se pretende ir de um local para outro em que se tenha uma densa rede urbana existem centenas de trajetos possíveis. Segundo Bovy (2009) vários desses trajetos existentes são desconhecidos pela população geral devido ao facto de que existem vários percursos similares com vários troços em comum. O comportamento da escolha de trajetos consiste em existirem percursos alternativos disponíveis e em ser feita a escolha de um determinado percurso a partir do conjunto que estes formam.

Como se sabe, os condutores têm diferentes objetivos quando iniciam as suas viagens. Alguns deles pretendem diminuir o tempo de viagem, outros sentem-se desconfortáveis com estradas bastante congestionadas, outros preferem conduzir por locais familiares, enquanto outros procuram novas paisagens. Cada um destes critérios pode corresponder a diferentes caminhos e cada estrada pode ser destinada para objetivos específicos (Patriksson, 2015).

Segundo Bovy (2009) os requerimentos estabelecidos para achar a escolha mais indicada não são muito rigorosos, assim como nem todas as alternativas mais relevantes devem ser incluídas nas opções de escolha desde que os resultados sejam satisfatórios.

Os utilizadores não consideram todas as alternativas praticáveis e delimitam assim apenas algumas das que estão disponíveis. Alguns trajetos podem não ser satisfatórios devido a um conjunto de restrições, por exemplo um troço com apenas um sentido. Enquanto outras alternativas não são praticáveis devido ao facto de essas opções serem irrealistas, como por exemplo estar sempre a entrar e a sair de uma autoestrada.

## 2.2 Modelo Clássico de Transportes

O modelo de transportes foi criado no final da década de 60 e é um dos mais utilizados e fiáveis de se usar quando se quer resolver um problema de atribuição de tráfego. Este também é conhecido pelo modelo dos quatro passos, visto que este se divide em quatro módulos sendo esses a geração de viagens, a distribuição de viagens, a repartição modal e a atribuição de tráfego (Rasouli e Timmermans, 2012).

Explicando agora de uma forma mais pormenorizada o primeiro passo deste modelo, sabe-se que no módulo de geração de viagens determina-se o número de viagens que acontecem de uma origem “j” para um destino “k”, dando origem assim a uma matriz designada por origem-destino (Matriz OD), ou são determinados indicadores do número dessas viagens. A matriz OD pode ser achada através de diferentes métodos, como por exemplo, a utilização de indicadores/atração de viagens previamente calibrados e tabelados; através da realização de inquéritos nas diferentes zonas de tráfego com as famílias, empresas e instituições lá presentes, relacionando o número de viagens com diferentes origens e destinos através de uma regressão múltipla; Utilização de um Inquérito Origem-Destino onde se obtém o total de viagens geradas e atraídas em cada uma das zonas.

No módulo Distribuição estuda-se o número de viagens entre cada zona de origem e cada zona de destino, ou seja, obtém-se uma matriz que traduz o tempo de viagens de todos os pontos para todos os pontos presentes numa rede. Este ponto baseia-se, normalmente, no conceito de modelo gravitacional, podendo este ser de dois tipos:

- Sem restrições – quando não se conhece o número de viagens com origem/destino em cada zona;
- Com restrições – quando se conhece o número de viagens com origem/destino em cada zona.

No terceiro módulo determina-se a forma como as viagens se repartem entre os diferentes modos de transporte. Sendo assim, existem alguns fatores de escolha que influenciam o tipo de transporte, tais como, as características do viajante (se o utilizador possui automóvel, carta de condução, rendimento ou profissão), as características das viagens (qual o propósito da deslocação, a hora do dia a que é feita a viagem tendo em conta que, por exemplo, não há transportes públicos à noite com tanta frequência) e as características dos modos (tempo de viagem, custo da viagem, disponibilidade, fiabilidade, conforto e segurança).

Por fim, no quarto e último módulo deste modelo determina-se o volume de tráfego em cada eixo, por modo de transporte. É neste último passo que se faz a escolha de percursos e todos os métodos que irão ser mencionados daqui para a frente pertencem a este subcapítulo do modelo dos transportes.

Os tipos de modelos que são usados para a atribuição de tráfego enquadram-se nos modelos matemáticos, ou seja, tentam replicar um sistema real e o seu comportamento através de equações matemáticas. Apesar de serem representações simplificadas, esses modelos são bastante complexos e necessitam de uma grande quantidade de dados. Uma importante vantagem destes modelos matemáticos é que durante a sua formulação e calibração é possível aprender-se muito através das diversas experiências a que o utilizador está sujeito.

### **2.3 Atribuição de Viagens**

Os métodos de atribuição de tráfego possuem um conjunto de regras de forma a identificarem as rotas desejáveis (mais rápidas, custo mais baixo), sendo que os dados básicos de entrada necessários para qualquer modelo de atribuição de tráfego são:

- Uma matriz OD estimando a procura. Normalmente, esta traduz a hora de ponta em áreas urbanas congestionadas. Por vezes, é feita uma matriz com o período de vinte e quatro horas para redes que não apresentam hora de ponta;
- Uma rede com as propriedades de cada troço conhecidas;
- Princípios que sejam relevantes para o problema em questão.

Dificuldades na recolha de informação é provavelmente a principal razão para o facto de existir um número limitado de estudos sobre a escolha de percursos. Não só obter informação sobre o comportamento dos condutores na escolha de rotas é bastante complicado, como também transformar essa informação para ser aplicada nas simulações é bastante exigente. Esta é recolhida maioritariamente através de entrevistas. Ben-Akiva et al (1984) recolheram informação parando os carros na berma da estrada e fazendo dessa forma questionários aos condutores e analisam a mesma pedindo aos condutores para descreverem o caminho escolhido perante uma sequência de segmentos. Vrtic e Axhausen (2006) recolhem informação sobre longas viagens pedindo aos viajantes para lhes dizerem os nomes das cidades de origem e de destino e também, no máximo, três localidades pelas quais tenham passado.

Muitos condutores não fazem a escolha ótima do seu trajeto, e um dos principais fatores para não o fazerem é a falta de informação atempadamente. Atualmente, muitos estudos são feitos com a ajuda de novas tecnologias, como por exemplo o GPS e o telemóvel. Contudo, mesmo

recorrendo a essas novas tecnologias há sempre erros que são inevitáveis. Estes acontecem devido ao raio de cobertura dos satélites, as características do recetor também têm influência e há também o problema ambiental, causados pelas condições atmosféricas. Outram e Thompson (1978) compararam os objetivos dos condutores com os seus reais percursos e concluíram que a percentagem dos utilizadores que atingiram os seus objetivos é bastante baixa.

Existem inúmeros métodos estudados e desenvolvidos, porém nem todos são aqui mencionados. Estes dividem-se em dois grandes grupos: estáticos e dinâmicos. Neste documento apenas alguns métodos estáticos vão ser analisados. Dentro destes têm-se os métodos estocásticos e os métodos determinísticos (tudo ou nada, incremental e iterativo), que irão ser aprofundados mais à frente.

Lidar com a inconsistência dos utilizadores é complicado nestes métodos, por isso muitos deles desprezam este fator e designam-se por determinísticos. O problema destes métodos determinísticos é que ao serem realizadas várias simulações de um mesmo caso, os fins obtidos resultam sempre na mesma distribuição de fluxos. Posto isto, os modelos que procuram considerar a inconsistência dos utilizadores dizem-se estocásticos. Nestes métodos os condutores estão sujeitos à aleatoriedade, não se obtendo assim os mesmos resultados depois de várias repetições.

### **2.3.1 Escolha de Percursos**

Existem dois algoritmos base usados para encontrar o caminho mais curto numa rede urbana. Um deles é o algoritmo de Moore (1957) e o outro é o algoritmo de Dijkstra (1959). A principal diferença entres estes é a forma como escolhem o nó que o utilizador deve seguir. No algoritmo de Moore o nó é selecionado através de uma tabela, tabela essa que contém todos os nós. O último nó a lá ser inserido será a primeira escolha deste algoritmo. No de Dijkstra o primeiro nó selecionado é aquele que se encontra mais próximo da origem (Deng et al, 2012). Sabe-se que o algoritmo de Dijkstra é superior ao de Moore, particularmente em redes maiores, contudo é mais difícil de programar.

Os algoritmos que são usados pelos diferentes modelos de atribuição de tráfego têm como objetivo tentar representar o comportamento dos condutores numa determinada rede de tráfego.

O método do caminho mais curto é um método determinístico e baseia-se numa repetição que consiste em encontrar o caminho mais curto sempre que o utilizador chega a algum nó, ou seja, o *software* está programado para que sempre que tenha de ser tomada uma decisão, essa



será o caminho mais curto. A identificação de eixos relevantes é a principal razão por detrás do esforço aplicado para se desenvolverem modelos de escolha de percursos que funcionem em grandes redes urbanas. Existem várias modificações feitas no algoritmo do método do caminho mais curto de modo a tentar-se resolver a igualdade que existe entre as alternativas, criando assim alguma heterogeneidade nas soluções (Akgün et al, 2000). Uma dessas modificações é a exclusão de troços e é baseada na procura de uma forma repetitiva do caminho mais curto após removidos alguns caminhos mais curtos ou mesmo todos, tendo em atenção estudos anteriores. Sendo assim, esta abordagem transmite alguma desigualdade perante as alternativas restantes, visto que os troços que serão eliminados dependem de cada utilizador. A implementação desta abordagem em serem eliminados alguns troços é um pouco problemática do ponto de vista comportamental. Isto acontece quando se está na presença de uma grande rede urbana em que quando há a eliminação de um troço, os utilizadores optam pelos troços mais próximos, não havendo assim uns resultados bastante diferentes dos originais. Para além disso, como foi referido anteriormente a remoção dos troços é feita de uma forma opcional, não existindo assim um critério para o fazer.

A premissa básica na atribuição de tráfego baseia-se na ideia que o condutor toma as suas decisões de uma forma racional, ou seja, este escolhe o percurso que mais lhe convém. Um elevado número de fatores influenciam a escolha do percurso, sendo estes o tempo de viagem, a distância, os custos monetários, os congestionamentos, o tipo de manobras necessárias, o tipo de estrada, o cenário, os sinais de trânsito, os trabalhos na estrada (obras) e o hábito de cada um. A criação de uma expressão de custo generalizado que incorpore todos estes elementos é praticamente impossível de se fazer, pelo que existem várias aproximações.

O princípio básico que se tem em conta quando se está perante um problema de atribuição de tráfego é o custo de deslocação. Sendo assim, um utilizador que disponha de mais do que uma alternativa para fazer uma viagem, vai ponderar uma série de fatores para a fazer. Este é descrito através de uma expressão com vários parâmetros.

$$c_{ij}^k = a_1 t_{ij}^k + a_2 e_{ij}^k + a_3 d_{ij}^k + T_{ij}^k + p_j^k + B^k \quad (1)$$

Em que:

$c_{ij}^k$  – custo generalizado de deslocação da zona i para a zona j, através do modo k;

$t_{ij}^k$  – tempo de deslocação, dentro do veículo;

$T_{ij}^k$  – tempo de deslocação;

$e_{ij}^k$  – tempo adicional de deslocação, fora do veículo;

$d_{ij}^k$  – distância percorrida no veículo;

$p_j^k$  – custos associados ao fim da viagem (exemplo: tarifas de estacionamento);

$B^k$  – penalidade modal;

$a_1$  – valor do tempo para os utilizadores;

$a_2$  – valor do tempo adicional;

$a_3^k$  – valor do quilómetro percorrido.

### 2.3.2 Curvas Tempo-Tráfego e Velocidade-Tráfego

A relação entre a velocidade dos utentes numa rede e o tráfego lá existente é conhecida, sendo que este conceito foi originalmente desenvolvido para eixos de grande comprimento, como por exemplo as autoestradas, túneis, entre outros. Esta relação é apresentada na Figura 2.1, e pode-se ver que quando o tráfego aumenta a velocidade tem tendência a diminuir. Quando a estrada chega ao seu limite máximo de capacidade ( $V_{m\acute{a}x}$ ), observam-se valores baixos de velocidade e tráfego.

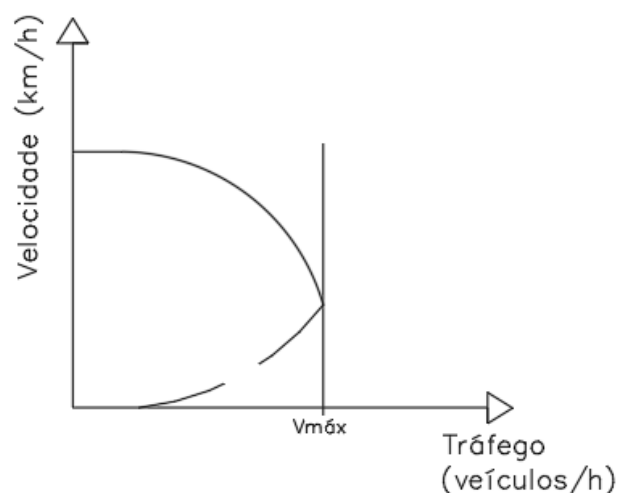


Figura 2.1 - Curva Velocidade-Tráfego

Contudo, nesta dissertação dar-se-á mais importância a outro tipo de curvas, designadas por tempo-tráfego. Esta curva pode-se ver na Figura 2.2.

Assim, os métodos de atribuição de tráfego que têm em conta o congestionamento dependem destas curvas. Para isso, é necessário recorrer-se a algumas funções que relacionam os atributos de um eixo (capacidade, velocidade) com o tráfego na rede (Sharma et al, 2012). A relação entre tempo e tráfego também pode ser considerada como custo-tráfego, sendo que:

$$C_a = C_a(\{V\}) \quad (2)$$

Onde “ $C_a$ ” é o custo do eixo “ $a$ ” e “ $V$ ” é o tráfego em toda a rede. Contudo, esta função pode ser simplificada, apresentando-se da seguinte forma:

$$C_a = C_a(V_a) \quad (3)$$

Sendo que o custo do eixo “ $a$ ” apenas depende do tráfego existente nesse mesmo eixo.

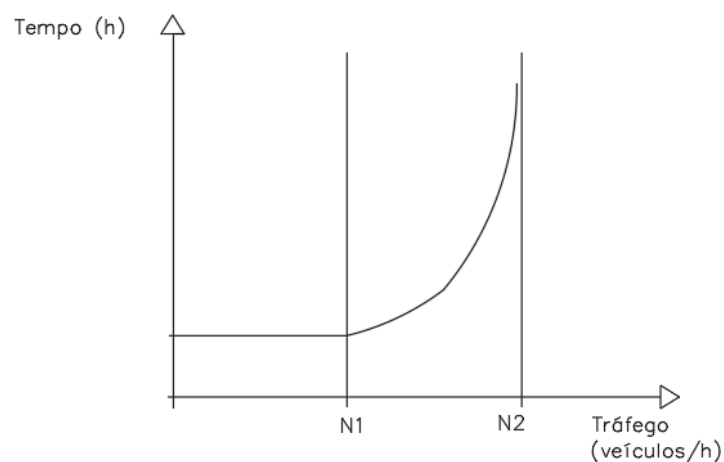


Figura 2.2 - Curva Tempo-Tráfego

Como é possível visualizar na Figura 2.2 o tempo (ou custo) mantém-se constante até atingir um determinado valor de tráfego numa via, denominado por tráfego de circulação livre (N1), e só a partir desse momento é que existe uma variação da curva acima representada. O tempo (ou custo) a partir de N1 aumentam até atingir a máxima capacidade que esse eixo consegue suportar (N2).

Estas curvas de velocidade-tráfego e tempo-tráfego são dadas pelas equações (4) e (5) presentes no *Bureau of Public Roads* (1964). Sendo assim, o tempo de viagem e a velocidade são dados por:

$$t = t_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{V}{Q} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

$$S = \frac{L}{t_0 \times \left[ 1 + \alpha \left( \frac{V}{Q} \right)^\beta \right]} \quad (5)$$

Em que,

t – tempo de viagem

$t_0$  – tempo de viagem em vazio (sem fluxo)

$\alpha, \beta$  – parâmetros de calibração

V – volume de tráfego

Q – máximo fluxo que o eixo suporta (capacidade)

L – distância

S – velocidade

### 2.3.3 Atribuição de Tráfego sem Congestionamento

Neste caso não se tem em conta as curvas tempo-tráfego, visto que apenas interessam os tempos no “vazio”, ou seja, sem veículos nas estradas. O problema de estimar quantos veículos circulam numa determinada estrada já vem desde há bastante tempo. Começou-se a dar mais importância a este tópico quando se começaram a desenvolver as primeiras autoestradas. No início o objetivo era desviar o trânsito das estradas locais e, para isso, foram usados rácios (proporção entre valores) do tempo de viagem, custos, conforto e do nível de serviço. Contudo, não se conseguiam fazer estudos concretos acerca deste tema ou resolver um problema relacionado com uma rede de estradas onde se queria, por exemplo, implementar uma fábrica num determinado local e observar como os condutores se comportavam. Sendo assim, foi criado um algoritmo – algoritmo de Moore – que determinava o caminho mais curto, atribuindo-se todo o tráfego para esse percurso. Este método é chamado de tudo ou nada. Estes estudos aconteceram no período entre 1960 e 1975 (Ying et al, 2011).

Este é dos métodos mais simples de atribuição de tráfego e assume que não há problemas de congestionamento na rede e que todos os condutores adotam os mesmos comportamentos quando tomam a decisão de escolher o seu percurso. A ausência dos efeitos de congestionamento mostra que os custos dos eixos são fixos. Sendo assim, todos os condutores são atribuídos apenas a um percurso, enquanto os outros trajetos alternativos e menos

atrativos não são considerados. Possivelmente, este é o método mais simples, mas não é o mais eficaz.

#### **2.3.4 Métodos Estocásticos**

Os métodos estocásticos apresentados nesta subsecção não têm em consideração o tráfego existente na rede rodoviária. Estes modelos são caracterizados pelas diferentes decisões tomadas pelos utilizadores, ou seja, o comportamento dos condutores não pode ser considerado homogéneo. Existem vários casos em que um indivíduo que se vai deslocar do ponto A para o ponto B escolhe diferentes percursos. Uns condutores dão prioridade ao tempo de viagem enquanto outros valorizam mais a distância percorrida. Há também aqueles utilizadores que escolhem um percurso e não sabem se esse é o preferencial, e isso acontece devido ao conhecimento limitado do “sistema”, ou seja, o comportamento dos condutores é inconsistente.

Existem dois tipos de métodos estocásticos quando não existe congestionamento numa rede: método estocástico baseado na simulação e método estocástico baseado na proporção. O primeiro baseia-se na simulação de Monte Carlo para representar a variabilidade e imprevisibilidade dos condutores. A simulação de Monte Carlo é um método estatístico, e este é capaz de transformar diferentes alternativas em resultados numéricos. Dito isto, sabe-se que se está na presença de um método heurístico. Esta simulação tem sido usada diversas vezes de forma a obterem-se aproximações numéricas de funções complexas em que não é viável, ou mesmo impossível, obter uma solução analítica ou determinística. Este método diz que para cada eixo de uma rede rodoviária devem existir dois tipos de avaliação: uma que deve apresentar os custos objetivos achados através de um observador e outra deve apresentar os custos subjetivos achados por cada condutor (Gupta, 2010).

Os métodos estocásticos baseados na proporção são baseados num algoritmo que divide as chegadas a um nó entre todos os possíveis nós de saída, sendo este o oposto do método do tudo ou nada que associa todas as viagens apenas a um nó de saída. Muitas vezes estes métodos invertem a solução do problema, ou seja, a divisão das viagens num nó é feita tendo em conta de onde essas viagens vêm e não para onde vão (Figura 2.3).

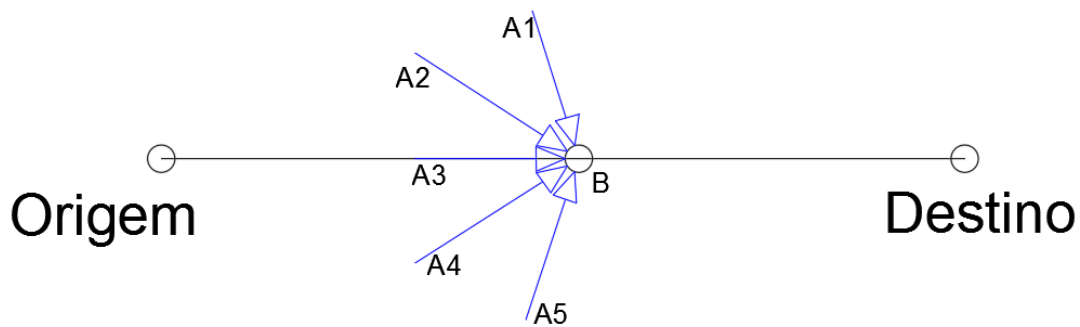


Figura 2.3 – Destinos do nó B

Na Figura 2.4 tem-se um exemplo da aplicação do método de Dial (1971), apresentado no *Modelling Transport* (Ortúzar e Willumsen 2011), de uma cidade em que nos arredores da mesma existe uma autoestrada e há também uma estrada que atravessa o centro da cidade com três variações.

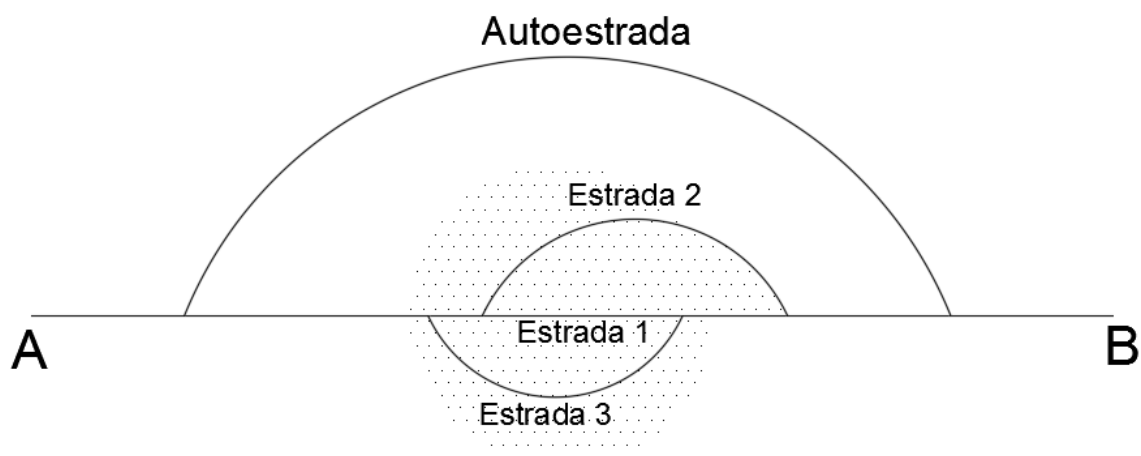


Figura 2.4 – Diferentes percursos entre A e B

Assume-se que existem 4000 viagens do ponto A para o ponto B e que todos os percursos têm aproximadamente os mesmos custos. Neste caso, o algoritmo de Dial irá dividir as 4000 viagens da seguinte forma: 1000 serão atribuídas à autoestrada e as outras 3000 serão divididas em partes iguais pelas restantes estradas que passam no centro da cidade. Contudo, muitos utilizadores considerariam apenas duas opções: passar pela autoestrada ou pela cidade, ou seja, não havia a divisão pelas estradas urbanas. Um dos problemas deste método é considerar todas as possibilidades de percursos, mesmo que um trajeto se diferencie de outro por um aspeto insignificante e não mude praticamente nada os custos de viagem. Em termos

comportamentais o método de Dial ignora a relação que existe entre percursos semelhantes. Este método tende a deslocar o tráfego para secções mais densas da rede, onde existam eixos mais curtos (Ortúzar e Willumsen, 2011).

Vários estudos são feitos de forma a tentar desenvolver novos métodos estocásticos ou então a tentar melhorar os já existentes. O problema com que muitos investigadores se deparam divide-se em três componentes:

- Como identificar o conjunto de percursos executáveis, eficientes e distintos considerados pelos condutores quando fazem as suas escolhas;
- Como estimar os parâmetros dos modelos de escolha de percursos;
- Como integrar de uma forma mais eficiente o mecanismo de escolha numa atribuição de tráfego.

Uma alternativa na escolha do conjunto de percursos é fazendo de uma forma repetida uma procura do caminho mais curto na rede urbana. Os vários métodos aqui aplicados produzem soluções estocásticas e os pares O/D são processados simultaneamente (Prato, 2009).

A abordagem comportamental dos métodos estocásticos diz que os condutores não têm noção do real custo dos caminhos, ou seja, estes classificam o custo de cada caminho com erros. No entanto, a percepção dos condutores varia sendo que esses erros não são sempre iguais (Cascetta et al, 1988). Os métodos estocásticos tendem a gerar percursos mais heterogéneos, visto que existe uma maior incerteza na escolha dos troços (Prato, 2009).

### **2.3.5 Atribuição de Tráfego com Congestionamento**

A essência do equilíbrio de Wardrop (Wardrop, 1952) é que os condutores irão lutar para encontrar o caminho mais curto (o que oferece menor resistência) desde a sua origem até ao seu destino. O equilíbrio da rede acontece quando todos os condutores não conseguirem diminuir o seu tempo de viagem. Sendo assim, a partir do momento que o sistema esteja em equilíbrio nenhum condutor vai ganhar com a mudança de trajetória já estabelecida. Este é um método determinístico e baseia-se em dois princípios. O primeiro diz que o tempo de viagem em todos os percursos utilizados são iguais e que o equilíbrio está estabelecido quando um utilizador não consegue diminuir o seu tempo de viagem na rede. O segundo princípio refere que quando o equilíbrio é achado o tempo médio de viagem naquela rede é o mínimo possível, implicando que cada utilizador escolha o percurso mais rápido.

Quando se quer prever acontecimentos futuros numa rede rodoviária têm de ser feitas algumas estimativas relacionadas com a distribuição do tráfego pelas diferentes estradas afetadas. Posto isto, deve-se achar uma matriz OD assumindo-se que todos os veículos irão escolher o

percurso mais rápido. Contudo, sabe-se que a velocidade é dada por uma função que varia com o fluxo do tráfego em cada eixo da rede. Assim, o problema é descobrir como é que o tráfego se distribui pelas diferentes estradas constituintes da rede em questão e se a distribuição feita é a mais eficiente de modo a encontrar o equilíbrio geral da rede rodoviária.

Como foi referido anteriormente, o equilíbrio de Wardrop tem como princípio reduzir ao máximo o tempo global de percurso de cada condutor dentro de uma rede. Contudo, se um utente pretende ir de um local A para um local B, admitindo que não existe congestionamento pelo caminho mais curto, o percurso de todos os utentes entre A e B irá ser o mesmo, deixando as estradas alternativas, que seriam um percurso mais longo, vazias. No entanto, se houver congestionamento do percurso mais curto, o tráfego irá dispersar-se pelas estradas alternativas até haver um equilíbrio total da rede. Quer-se dizer com isto que o percurso ideal neste método não é necessariamente o caminho à partida mais curto.

Os métodos analítico, incremental, iterativo e de equilíbrio estocástico a seguir apresentados são todos métodos que têm em consideração o tráfego existente na rede rodoviária.

#### 2.3.5.1 Método Incremental

O método incremental é um método que procura o equilíbrio da rede rodoviária e que considera o congestionamento existente na mesma. Este divide a matriz OD num determinado número de matrizes, multiplicando a matriz OD original por um parâmetro. O número de matrizes achadas depende do parâmetro usado, ou seja, quanto menor este for mais matrizes se têm. Estas matrizes secundárias vão sendo utilizadas nas diferentes iterações até perfazerem a totalidade da matriz OD original. Estas iterações ajudam a perceber quais os melhores percursos e qual o melhor equilíbrio para a rede, sendo este o tempo mínimo para todos os utilizadores da mesma. Este método é fácil de ser executado manualmente, no entanto, as redes rodoviárias utilizadas nestes casos devem ser bastante simples. O primeiro método incremental surgiu no final da década de 50 e chama-se o procedimento de *quantal loading* (Patriksson, 2015).

O método incremental baseia-se no princípio de Equilíbrio de Wardrop. Neste método fazem-se iterações, ou seja, o tráfego atribuído a um determinado eixo não irá ser atribuído a outro eixo na iteração seguinte. Este método vai “procurando” o caminho mais curto atribuindo tráfego aos eixos que assim o permitam achar, no entanto quando esses mesmos eixos começam a ter um volume considerável de tráfego, tendo em conta a sua capacidade, este método procura outro eixo para determinar assim um melhor percurso para o utente (Ferland et al, 1975).



### 2.3.5.2 Método Iterativo

O método iterativo é um método que também procura o equilíbrio de tráfego numa rede rodoviária e aplica-se tendo em atenção a presença de tráfego na mesma. Segundo Sheffi (1985) este é um método que utiliza algoritmos convergentes de forma a achar-se a solução para a atribuição de tráfego. Também neste método são realizadas iterações e este termina quando não existe variação de valores nas últimas iterações. Primeiramente faz-se uma atribuição através do método do tudo ou nada com a matriz OD e acha-se o volume de tráfego em cada eixo. De seguida, através de uma expressão apresentada no capítulo seguinte, vão-se somando os valores de volume de tráfego da atribuição realizada através do método do tudo ou nada com a iteração anterior. Isto é realizado individualmente para cada eixo da rede rodoviária (Liu et al, 2009). Este método também é conhecido como o método das médias sucessivas precisamente por existirem as somas anteriormente mencionadas.

### 2.3.5.3 Método de Equilíbrio Estocástico

Outros métodos estocásticos foram apresentados anteriormente, sendo que a principal diferença entre esses e o método de equilíbrio estocástico é que esta simulação considera a existência de tráfego na rede rodoviária e procura o equilíbrio da mesma.

Este método foi proposto por Daganzo e Sheffi (1977) e a principal ideia foi apresentar um método em que os utentes de uma rede rodoviária não tivessem, de uma forma irrealista, o conhecimento total dos custos de cada percurso, sendo que este conceito de os condutores terem pleno conhecimento dos custos dos percursos é apresentada no equilíbrio de Wardrop. A forma mais simples de explicar este método estocástico é, segundo Martin Hazelton (1998), quando se tem uma simulação de atribuição de tráfego e um utilizador tem de escolher um percurso, ele irá escolher aquele que ele entende que tem o mínimo custo. No entanto, esse mesmo utilizador pode estar errado e esse não ser o percurso com menor custo, mas esse é o objetivo deste método estocástico, visto que quanto mais parecida a simulação for com a realidade melhor.

### 3 METODOLOGIA

Esta secção tem como principal objetivo introduzir os pontos mais importantes desta dissertação, sendo um deles a atribuição de tráfego, com um maior destaque, e o outro a repartição modal. Como exemplificado anteriormente estes dois temas correspondem a módulos do modelo clássico de transportes. A repartição modal é o terceiro passo desse modelo e a atribuição de tráfego é o quarto passo. Nesta secção irá ser apresentada em primeiro lugar a atribuição de tráfego e só de seguida a repartição modal, isto porque a repartição modal feita para esta dissertação foi realizada de outra forma em comparação com a forma tradicional explicada pelo modelo dos quatro passos, e será apresentada na subsecção 3.5.

Para se perceber melhor cada um dos métodos que serão de seguida apresentados, foi criada uma pequena rede com diferentes características em cada eixo e com a respetiva matriz OD. Posteriormente aplicou-se esta informação, contida em dois ficheiros denominados *Links Data* e *OD matrix* no *software Transplan+* para se analisarem os diferentes resultados e poder-se assim comparar cada um deles com os diferentes métodos utilizados. A rede criada é apresentada no Figura 3.1 e é constituída por apenas 6 eixos e 5 nós, sendo que um deles é auxiliar (nó E).

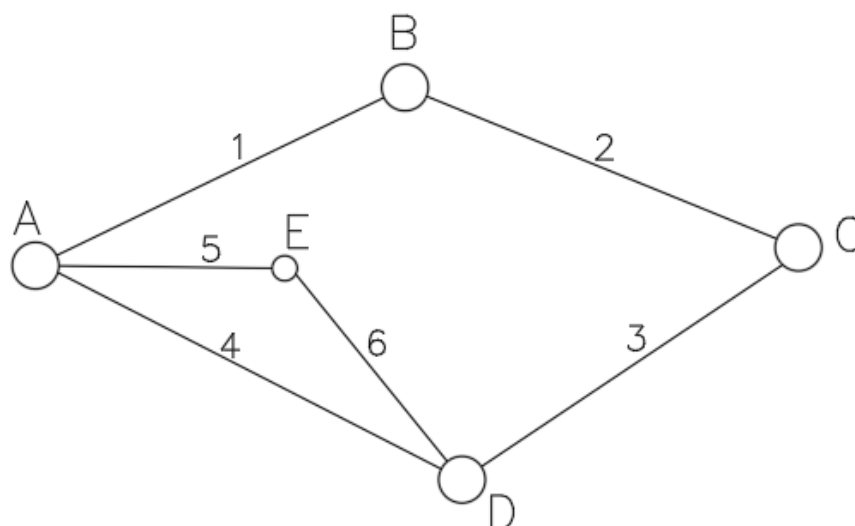


Figura 3.1 – Rede exemplo

Após a criação da rede rodoviária exemplo foi necessário definir as características dos eixos, criando-se assim o ficheiro *Links Data*. Deste ficheiro foram retiradas as características de cada eixo, sendo estas apresentadas no Quadro 3.1. Faltando apenas saber as viagens que ocorrem entre os diferentes nós, criou-se a matriz OD (Quadro 3.2). Tanto a construção do Quadro 3.1 como do Quadro 3.2 foram previamente pensados de forma a serem obtidos os resultados que melhor consigam explicar e exemplificar cada um dos seguintes métodos apresentados.

Quadro 3.1 – Informação dos eixos

Eixo	De:	Para:	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Capacidade	Sentido	Faixas
AB	1	2	10	50	1500	2	1
BC	2	3	10	50	1500	2	1
CD	3	4	8	50	1500	2	1
AD	1	4	12	50	1500	2	1
AE	1	5	7	50	1500	2	1
ED	5	4	6	50	1500	2	1

Quadro 3.2 – Matriz OD

Matriz OD	A	B	C	D	E
A	0	75	375	525	0
B	75	0	225	450	0
C	375	225	0	150	0
D	525	450	150	0	0
E	0	0	0	0	0

É importante referir que este exemplo foi criado tendo em conta as curvas tempo-tráfego, curvas estas que foram previamente apresentadas no segundo capítulo do presente trabalho. Os parâmetros de calibração usados para este exemplo foram  $\alpha=0.34$  e  $\beta=4$ . Após a criação deste exemplo, para facilitar a observação da distribuição do tráfego através de diferentes métodos, aplicou-se o *software Transplan+* de forma a ser possível obter esses mesmos resultados. Este programa desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (Zeferino, 2016) permite aplicar o modelo clássico de transportes, em particular achar a atribuição de tráfego numa rede através de quatro métodos distintos. Esses métodos são o método do tudo ou nada, incremental, iterativo e o do equilíbrio estocástico. É importante referir que estes quatro métodos se dividem em dois grupos. O método do tudo ou nada corresponde a um método de atribuição de tráfego sem congestionamento e os três restantes consideram congestionamento. Os métodos que

apresentam congestionamento foram em primeiro lugar apresentados como o equilíbrio de Wardrop. Nestes métodos onde se tem em conta o tráfego existente na rede, normalmente utilizam-se as curvas de tempo-tráfego para achar o equilíbrio ideal na rede. Os métodos incremental e iterativo são uma forma de determinar o equilíbrio de Wardrop, no primeiro caso de forma aproximada. Nas subsecções seguintes todos estes métodos são descritos de uma forma mais pormenorizada.

### 3.1 Método do Tudo ou Nada

O método do tudo ou nada é o processo mais simples que existe quando se trata da atribuição de tráfego numa rede rodoviária, visto que uma das principais características deste é que durante a sua aplicação não existe tráfego nos eixos, ou seja, o congestionamento existente na rede é nulo. Com isto quer-se dizer que os percursos assumidos por todos os utentes têm sempre o mesmo custo generalizado, e como o objetivo dos utilizadores é minimizá-lo, acabam por escolher todos o mesmo itinerário. No entanto, isto acaba por não ser o que acontece na realidade, pois muitas vezes existe o congestionamento de um eixo, acabando por compensar escolher um percurso mais longo, mas com menos tráfego. Mesmo sabendo das desvantagens deste método numa rede rodoviária com grande volume de tráfego, o método do tudo ou nada é bastante útil em redes com baixos volumes de tráfego, visto que não chega a existir o congestionamento das estradas da respetiva rede.

Assim, quando se aplica o algoritmo de atribuição de tráfego neste método obtém-se o fluxo de tráfego “V” entre os nós, por exemplo, “A” e “B” ( $V_{A,B}$ ). Dá-se início ao algoritmo com  $V_{A,B}=0$ , ou seja, assume-se que não existe tráfego na respetiva rede. Sendo assim tem-se:

1. Colocar as origens do nó “B” para o destino “j”;
2. Se (A,B) é o percurso realizado até se chegar a “B”, então fazendo uso do algoritmo de Dijkstra para calcular os caminhos mais curtos, tem-se o seguinte incremento:  $V_{A,B}=V_{A,B}+T_{ij}$ , sendo que  $T_{ij}$  é o volume de tráfego representado na matriz OD do ponto “i” para “j”;
3. Colocar as origens do nó “B” para o nó “A”;
4. Se  $A=i$  termina (e passa-se para o próximo par  $i,j$ ), se  $A \neq i$  voltar ao passo 2.

Tendo em consideração estes quatro passos pode-se agora aplicar o método do tudo ou nada na rede exemplo apresentada anteriormente, de forma a facilitar a observação dos resultados e a validar a veracidade do *software Transplan+*. Após a introdução da *OD matrix* e *Links Data* anteriormente apresentadas no respetivo *software*, obtém-se a distribuição de tráfego presente na Figura 3.2.

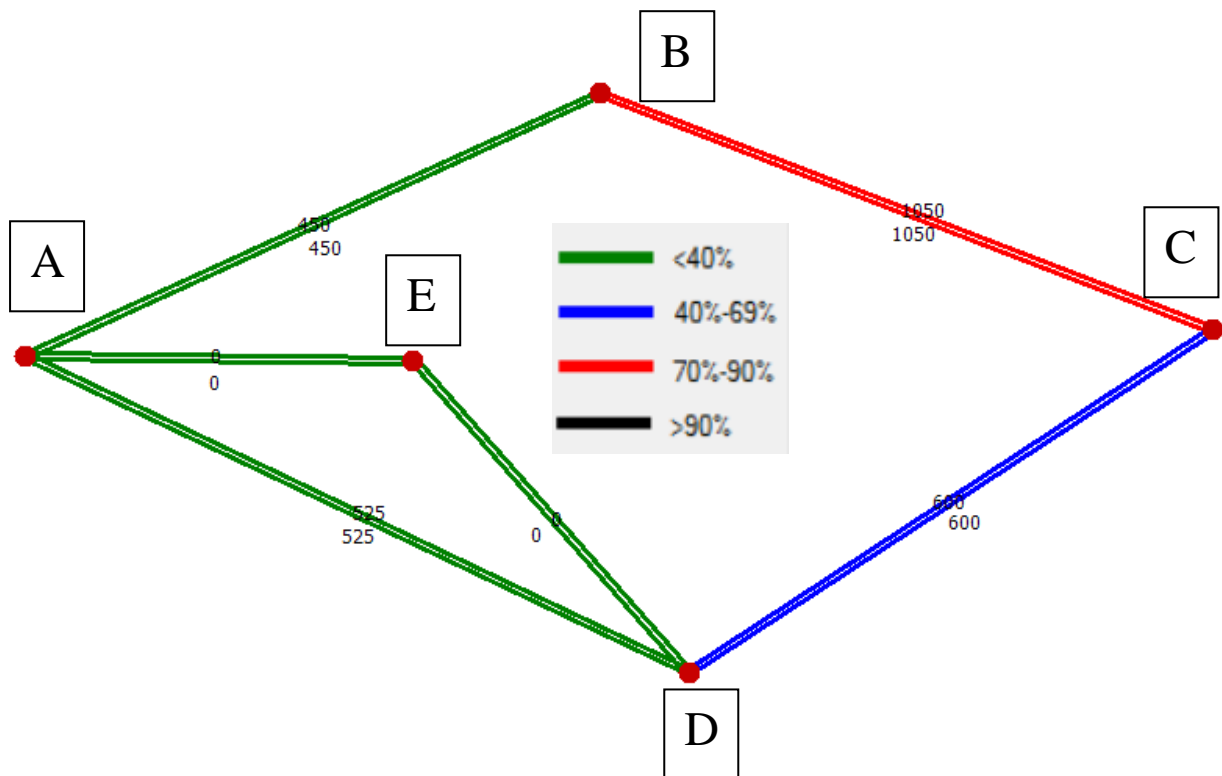


Figura 3.2 – Método do tudo ou nada aplicado na rede exemplo

A partir da Figura 3.2 e dos restantes resultados fornecidos pelo *Transplan+* pode-se concluir que existe um eixo (BC) um pouco congestionado com 70% de ocupação da sua capacidade total. Nesse mesmo eixo passam 1050 veículos com uma velocidade média de 46.2 km/h e demoram cerca de 13 minutos a realizar este trajeto. No eixo AB tem-se 450 utentes a circular a uma velocidade média de 49.9 km/h demorando um tempo de 12 minutos a chegar do nó A ao nó B. A capacidade utilizada do eixo AB nesta simulação é de 30%. Tanto o eixo AE como o ED apresentam os mesmos resultados, visto que nenhum condutor os utiliza. O eixo CD é eixo que a seguir a BC apresenta maior percentagem de ocupação, perfazendo os 40%. Neste eixo circulam 600 veículos a uma velocidade média de 49.6 km/h, demorando cerca de 9.7 minutos. Faltando apenas analisar o eixo AD, sabe-se que este apresenta uma boa circulação automóvel à semelhança do eixo AB. Este apresenta-se com 35% de ocupação da via, com 525 automóveis em circulação a uma velocidade de 49.7 km/h e com um tempo de viagem de 14.5 minutos. Por fim, tem-se um tempo médio de viagem total de 12.4 minutos e uma velocidade média total de 48.3 km/h. É importante referir que o tráfego é igual em ambos os sentidos de cada eixo. Como é de esperar, com a aplicação deste método, sabe-se que os

veículos têm tendência a circular pelos mesmos percursos, o que provoca na maior parte das vezes algum congestionamento.

### 3.2 Método Incremental

O método incremental é um método que considera o tráfego existente na rede, ao contrário do método do tudo ou nada. Este procura o equilíbrio, sendo que o melhor percurso individual é aquele que minimiza o tempo geral de todos os percursos existentes nessa rede rodoviária. Começa-se por aplicar um incremento “ $a_i$ ” à matriz OD, sendo que  $\sum_i a_i = 1$ . Este método utiliza esse valor, por exemplo em percentagem, para diminuir o número de viagens que acontecem entre os pontos de uma rede e observa os resultados obtidos. Por exemplo se for aplicado um incremento de 25%, em primeiro lugar multiplicam-se todos os valores da matriz OD por 0.25 e observam-se os resultados, até totalizar os 100%. O algoritmo pode ser escrito da seguinte forma:

1. Selecionar um conjunto de custos para cada eixo, preferencialmente sem tráfego. Colocar todos os fluxos de tráfego iguais a zero ( $V_a=0$ ). Selecionar um incremento “ $a_i$ ” para aplicar na matriz OD, de forma a que

$$\sum_i a_i = 1, \text{ com } i=0;$$

2. Aplicando o algoritmo de Dijkstra constroem-se os percursos com menor custo por cada origem, com  $i=i+1$ ;
3. Aplicar o método do tudo ou nada com a matriz OD  $T_i=a_iT$ , sendo T a matriz OD original, obtendo-se assim uns fluxos de tráfego auxiliares  $F_a$ . Os fluxos de tráfego acumulados em cada eixo são dados por  $V_a^i=V_a^{i-1}+F_a$ ;
4. Achar um novo conjunto de custos baseados nos fluxos  $V_a^i$ ; se todas as frações de T não foram utilizadas voltar ao passo 2; caso contrário acaba.

Após a aplicação do método incremental com a ajuda do software *Transplan+*, chegou-se aos resultados apresentados na Figura 3.3. Assim, pode-se observar uma rede rodoviária em que nenhum dos seus eixos se apresenta realmente congestionado, ou seja, a capacidade total da via não excede os 70% de ocupação. Os eixos AE e ED, à semelhança do método do tudo ou nada, também não têm qualquer veículo a circular. Dos restantes quatro eixos, o AB é o que menor volume de tráfego apresenta, sendo que apenas 17.5% da sua capacidade é utilizada. Neste eixo circulam 262 veículos a uma velocidade de 50 km/h e com um tempo de viagem entre os nós A e B de 12 minutos. O eixo BC é aquele que maior volume de tráfego apresenta, com cerca de 862 veículos a circular a uma velocidade média de 48.2 km/h. Este troço faz-se em cerca de 12.4 minutos e apresenta-se com 57.5% de ocupação. Como é possível visualizar na Figura 3.3, o eixo CD e AD apresentam resultados bastante parecidos, sendo que no primeiro existem 788 automóveis com uma velocidade de 48.2 km/h e no segundo tem-se

712 utentes com uma velocidade de 49.1 km/h. A capacidade do eixo CD é de 52.5% e a do eixo AD é de 47.5%.

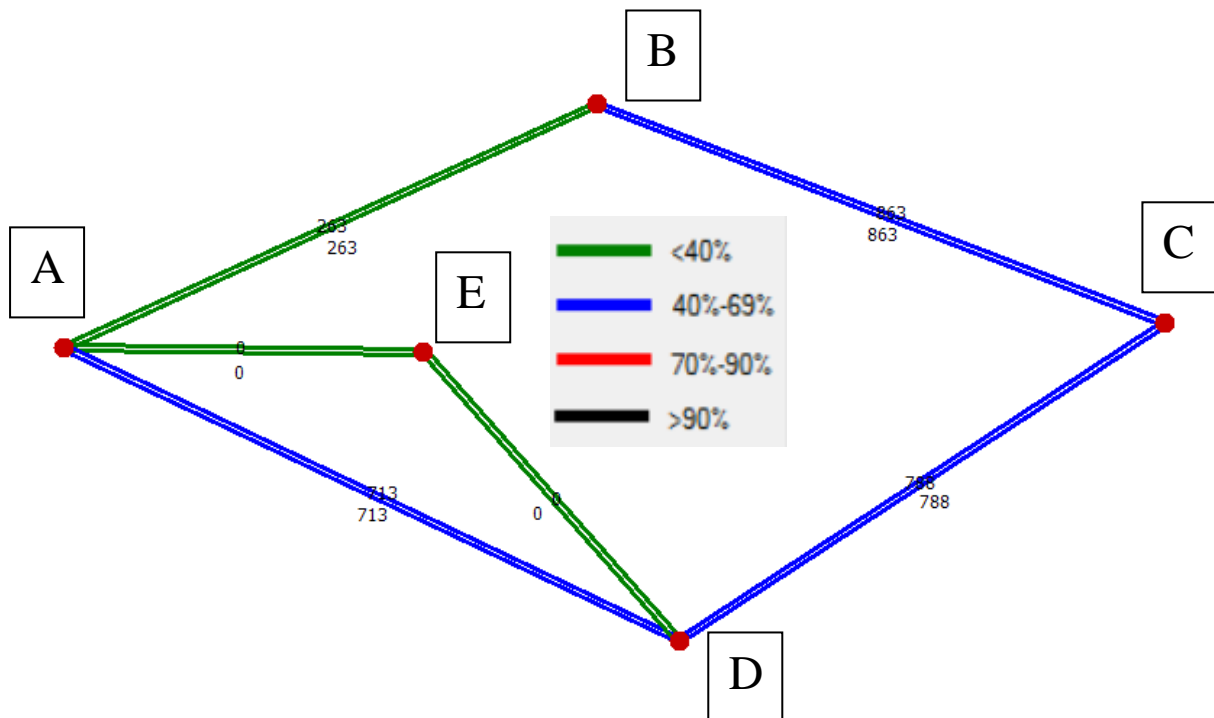


Figura 3.3 – Método incremental aplicado na rede exemplo

### 3.3 Método Iterativo

O método iterativo, à semelhança do método incremental, é um método que considera o congestionamento existente numa rede rodoviária e também tem como objetivo achar o equilíbrio de tráfego nessa mesma rede. Como no final estes métodos procuram o equilíbrio em termos do custo global das várias alternativas, cada utente efetua o percurso que menos custo individual apresenta.

Este método também é conhecido como o método das médias sucessivas, visto que no seu fluxograma apresenta médias sucessivas entre os volumes auxiliares, fluxos auxiliares e fluxos de tráfego.

Num algoritmo de atribuição através de iterações, o tráfego que se pretende achar para um determinado eixo é calculado através do tráfego da iteração anterior e do tráfego auxiliar achado através de uma atribuição realizada pelo método do tudo ou nada. O algoritmo pode ser descrito de acordo com os seguintes passos:

1. Iniciar com todos os fluxos de tráfego iguais a zero ( $V_a=0$ );  $n=0$ , em que “n” é o número da iteração;
2. Iniciar iterações:  $n=n+1$ ;
3. Fazer uma atribuição de tráfego através do método do tudo ou nada obtendo-se uns fluxos de tráfego auxiliares ( $F_a$ );
4.  $V_a^n=(1-\phi) V_a^{n-1} + \phi F_a$ , com  $\phi=1/n$
5. Achar um novo conjunto de custos baseados nos fluxos ( $V_a^n$ ). Se os fluxos de tráfego não se alterarem de uma forma significativa durante duas iterações pode-se parar. Caso contrário, voltar ao passo 2.

De seguida, aplicou-se o algoritmo do método iterativo dando origem a um resultado bastante semelhante ao do método incremental (Figura 3.4).

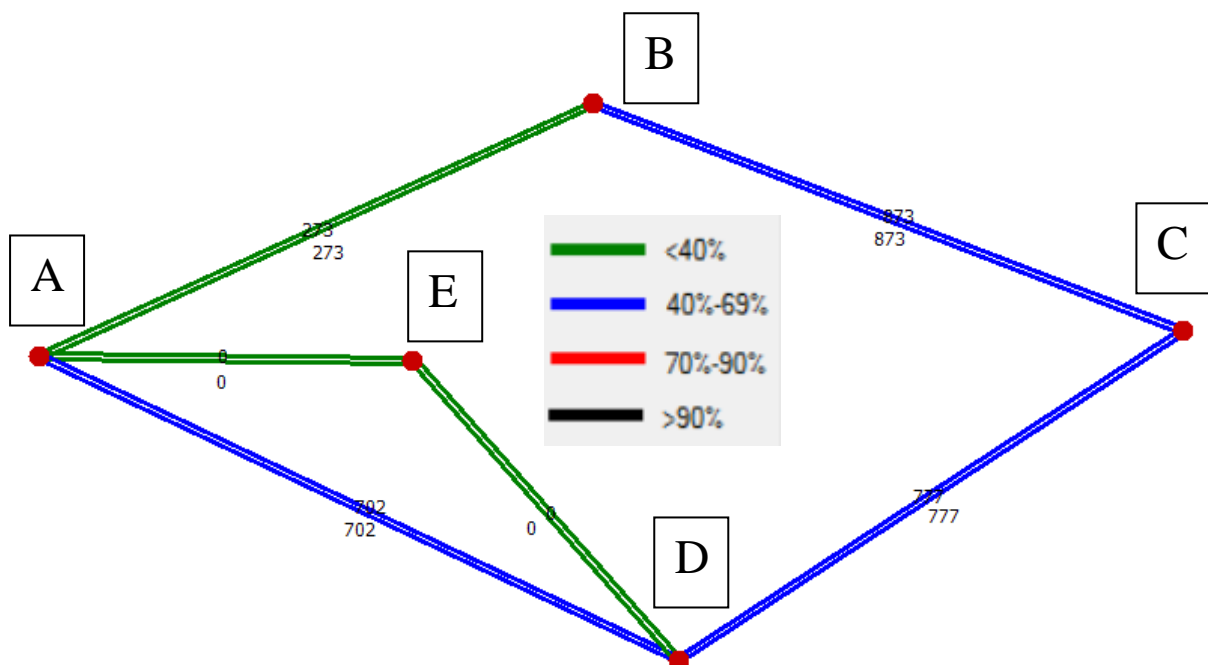


Figura 3.4 – Método Iterativo aplicado na rede exemplo

Como se pode ver através da rede rodoviária exemplo apresentada na Figura 3.4, tem-se um equilíbrio de tráfego parecido com a Figura 3.3 como já era de esperar, visto que estes dois métodos de atribuição são bastante semelhantes. As pequenas alterações que acontecem neste caso não são consideráveis, sendo que a circulação automóvel irá ocorrer sem grandes problemas e sem nenhum congestionamento. Tendo isto em conta e observando os resultados obtidos através do *software Transplan+* pode-se dizer uma vez mais que os eixos AE e ED não apresentam qualquer volume de tráfego. O eixo AB tem uma ocupação de 18.2% com



273 veículos a circular em a uma velocidade média de 50 km/h e com um tempo médio de viagem de 12 minutos. No eixo BC circulam 873 veículos a uma velocidade média de 48.1 km/h com um tempo médio de viagem de 12.5 minutos. Este eixo apresenta-se com 58.2% de capacidade utilizada. No eixo CD e AD tem-se 777 utentes para o primeiro e 702 para o segundo e ambos têm uma percentagem de ocupação da via entre os 45% e os 50%. O tempo médio de viagem total é de 12.2 minutos e a velocidade média de circulação é de 48.8 km/h.

Tanto no método incremental como no método iterativo sabe-se que a rede deve estar em equilíbrio, logo a deslocação de A para C através dos eixos AB e BC demora o mesmo tempo de viagem do que ser feita pelos eixos AD e DC. O mesmo acontece para os utilizadores que se queiram deslocar de B para D. Para o método iterativo o tempo total de viagem entre os nós A e C através dos eixos AB e BC é de 24.4 minutos. O mesmo tempo de 24.4 minutos acontece através dos eixos AD e DC.

### 3.4 Método de Equilíbrio Estocástico

O método estocástico, como já foi mencionado no capítulo anterior, dá importância à imprevisibilidade dos condutores na escolha de um percurso. Sendo assim, existem abordagens estocásticas na atribuição de tráfego em que se considera tráfego na rede e outras em que isso não acontece. Neste caso, este método estocástico considera a existência de congestionamento na rede rodoviária e, como tal, procura o equilíbrio da mesma.

A diferença entre este método estocástico e o equilíbrio de Wardrop é que no primeiro cada condutor define o seu próprio custo de percurso, enquanto no equilíbrio de Wardrop existe apenas uma definição de custo de percurso atribuída a todos os utentes da rede (Ortúzar e Willumsen, 2011).

Como todos os métodos apresentados este tem as suas vantagens e desvantagens. Aplicando este num caso real pode-se dizer que é o que se aproxima mais da realidade, visto que tem em consideração os efeitos humanos e, em questões práticas, os algoritmos que são executados têm propriedades convergentes, e isso nem sempre é fácil de se obter. Segundo Sheffi (1985) é possível achar um algoritmo convergente. Esse é bastante semelhante ao algoritmo que foi apresentado no método iterativo, sendo que a única diferença se encontra no passo 3. No método iterativo, no passo 3, tem-se uma atribuição feita através do método do tudo ou nada, ao passo que aqui é realizada uma atribuição estocástica. Quer-se com isto dizer que, consoante os dados introduzidos no *Transplan+*, uma determinada percentagem dos utilizadores representados na matriz OD irão escolher o seu percurso de acordo com uma determinada margem que abrange mais que do que o custo real do eixo. Isto é facilmente traduzido através de uma exemplificação gráfica (Figura 3.5). Na Figura 3.5 é possível

visualizar-se uma distribuição normal em que a curva lá representada traduz os custos subjetivos considerados por cada utilizador, enquanto a linha vertical representa o custo objetivo do eixo. Dentro das linhas vermelhas encontra-se o intervalo que os condutores podem utilizar na sua escolha do percurso, sendo que este representa uma distribuição uniforme. De modo a entender-se de uma forma mais simples o que representa o intervalo nestes métodos, apresenta-se de seguida um exemplo: se o custo objetivo é de 10€ e o intervalo utilizado é de 25%, os custos subjetivos dos utilizadores vão variar entre 7.5€ e 12.5€. É importante referir que o intervalo definido pela distribuição uniforme fica ao critério do utente que realiza a simulação.

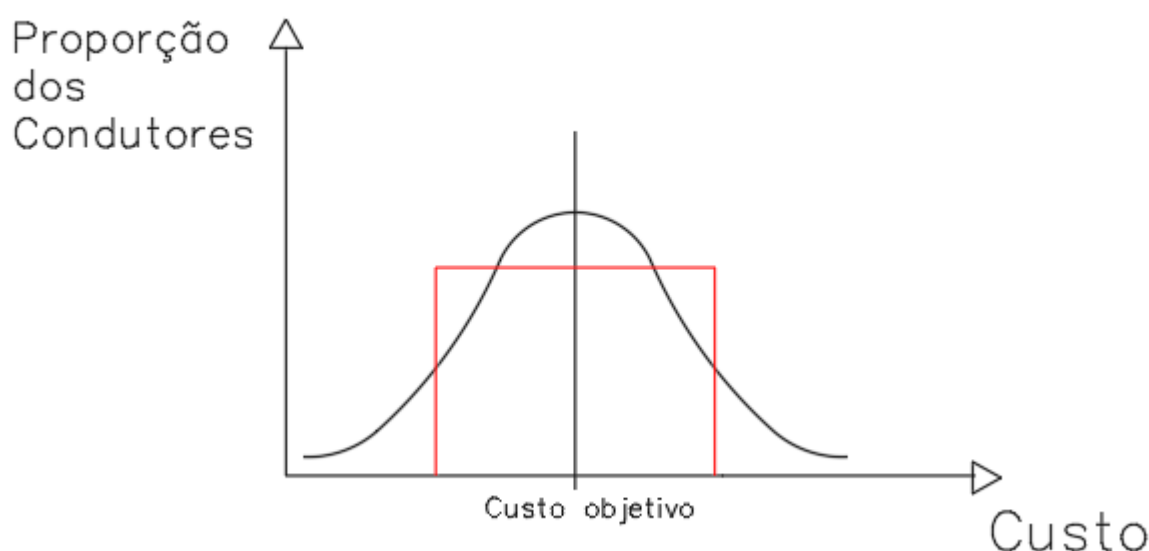


Figura 3.5 – Distribuição dos custos num eixo

No caso de uma atribuição estocástica é necessário fazer várias repetições, uma vez que os resultados obtidos em cada simulação nunca são iguais à previamente feita. Sendo assim, após a realização de dez simulações para cada um dos intervalos é achada uma média dos resultados. Para esta rede exemplo também se fez mais do que uma tentativa em relação aos intervalos considerados. Primeiramente utilizou-se um intervalo de 25% (Figura 3.6) e da segunda vez um intervalo de 10% (Figura 3.7).

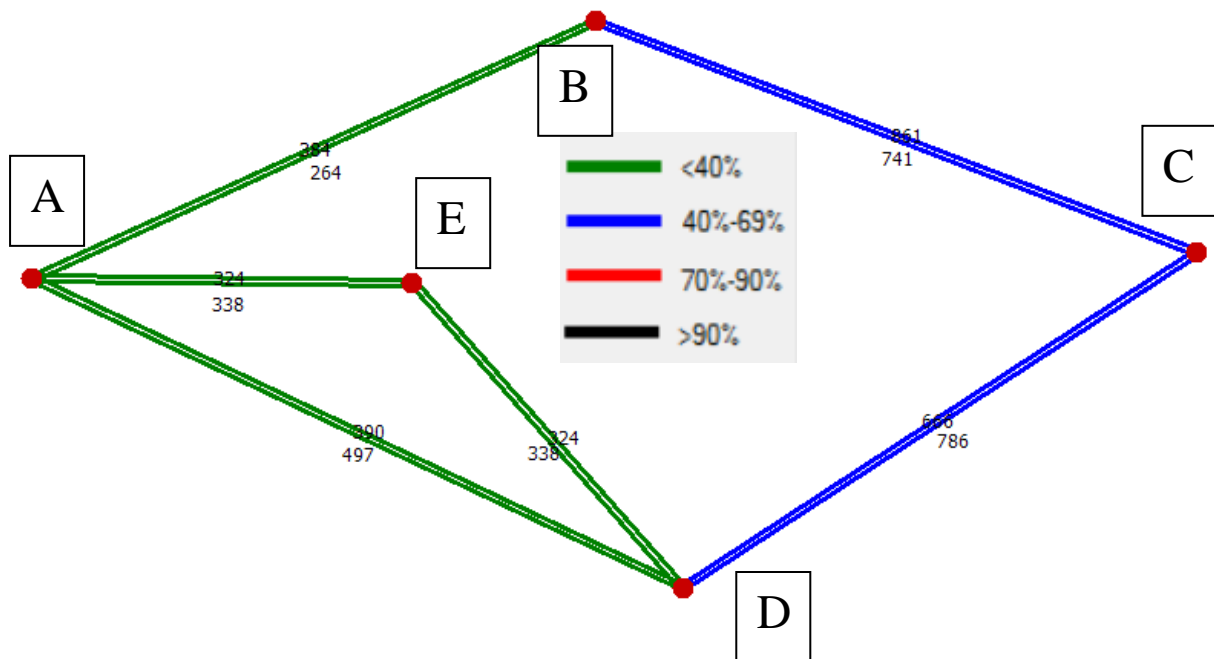


Figura 3.6 – Método estocástico aplicado na rede exemplo com 25% de intervalo

Como se pode visualizar tanto na Figura 3.6 como na Figura 3.7, este é o método que apresenta uma maior distribuição do tráfego por toda a rede, sendo que apenas nesta simulação os eixos AE e ED apresentam algum volume de tráfego. É importante referir que nesta simulação estocástica, ao contrário das previamente apresentadas, os valores de tráfego em cada eixo variam consoante o seu sentido, ou seja, o volume de tráfego a circular, por exemplo, no sentido de A para B é diferente do tráfego a circular no sentido de B para A. Tendo em conta este facto, apenas o sentido mais desfavorável de cada eixo irá ser apresentado. Na simulação onde se usou um intervalo de 25% (Figura 3.6) tem-se os mesmos valores para os eixos AE e ED, sendo que neles circulam 338 veículos a uma velocidade média de 50 km/h com um tempo média de viagem de 8.4 e 7.2 minutos, respetivamente. Tanto um eixo como o outro apresentam uma capacidade de ocupação da via de 22.5%. Nos eixos AB e AD circulam cerca de 384 e 497 veículos, respetivamente. Estes apresentam uma velocidade média de 49.9 km/h demorando cerca de 12 minutos a completar todo o comprimento do eixo AB e 14.5 minutos no caso do AD. Estes apresentam-se com uma ocupação que ronda os 30%. Os eixos BC e CD são claramente os que apresentam maior volume de tráfego, com uma capacidade de ocupação da via de aproximadamente 55%. O tempo médio de viagem total é de 11 minutos e a velocidade média total é de 49.3 km/h.

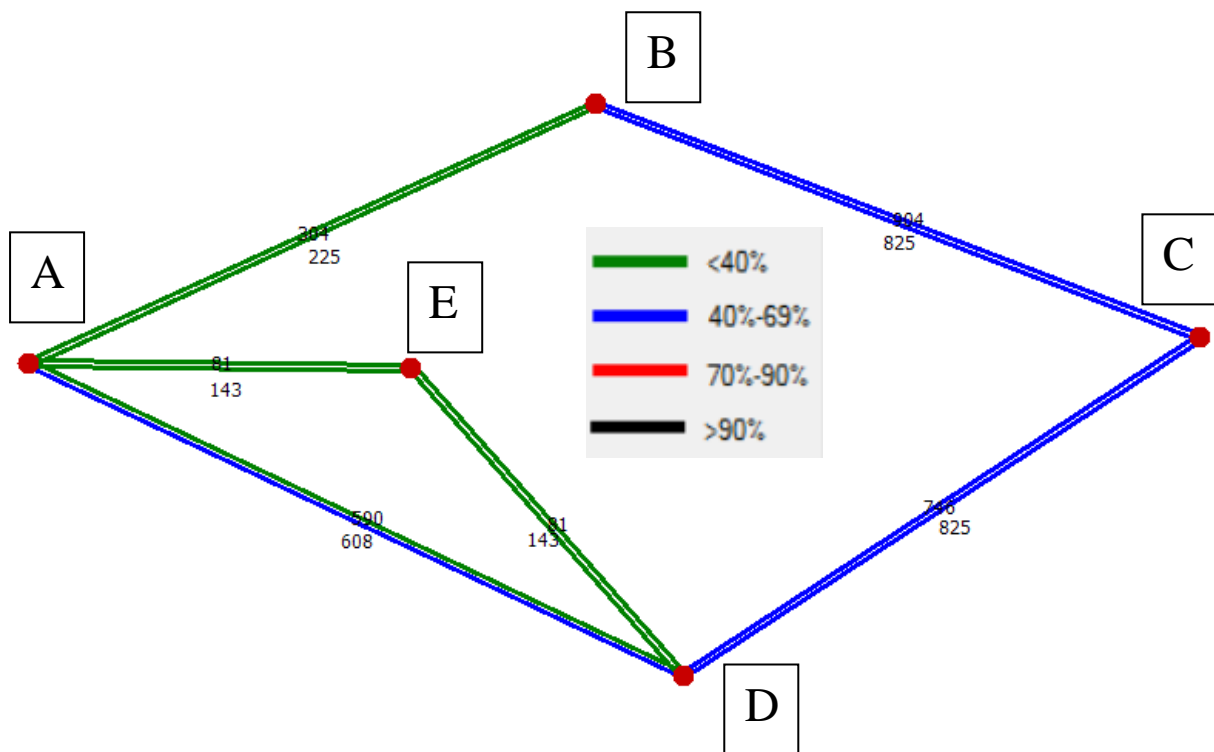


Figura 3.7 – Método estocástico aplicado na rede exemplo com 10% de intervalo

Alterando o intervalo de 25% para 10%, como seria de esperar, os resultados ilustrados na Figura 3.7 são diferentes comparativamente com os representados na Figura 3.6. Neste caso, o que importa mais salientar é a grande diferença que existe a nível de utentes entre os dois sentidos do mesmo eixo. Os casos mais significativos encontram-se nos eixos AE e ED, em que nos sentidos de A para E e de E para D circulam 143 veículos, enquanto no sentido oposto apenas se encontram 81 veículos. No eixo AD também se pode visualizar que este apresenta duas cores diferentes. A cor azul no sentido de A para D e a cor verde no sentido de D para A. Em termos globais de desempenho da rede tem-se uma velocidade média de circulação de 49 km/h e um tempo médio de viagem de 11.7 minutos.

### 3.5 Atribuição de Transportes Públicos

A escolha do modo de transporte é provavelmente um dos passos mais importantes no planeamento de transportes. Isto deve-se ao facto de cada vez mais existir um variado número de transportes públicos, sendo que estes têm bastante influência numa rede rodoviária. Sabe-se que os transportes públicos são o meio de transporte que ocupa as redes de estradas de uma

forma mais eficiente possível, visto que a relação entre o espaço que ocupa na via e o número de utentes que consegue transportar é muito maior que um veículo privado.

Como já foi mencionado, a repartição modal corresponde ao terceiro passo do modelo dos quatro passos, e esta atribui o número de utentes de cada eixo a cada meio de transporte distinto. Neste caso tem-se dois tipos diferentes de transportes, os automóveis particulares e os autocarros. Sendo assim, em praticamente todos os eixos constituintes da rede encontram-se autocarros a circular, fazendo assim com que a capacidade de cada eixo aumente, visto que um autocarro corresponde aproximadamente a quatro automóveis.

Tendo em conta estas considerações iniciais, passa-se agora para a aplicação prática destes conceitos. Assim, irá ser possível observar-se como a repartição modal tem efeito na atribuição de tráfego. No entanto, apenas o método iterativo irá ser usado para exemplificar o efeito da repartição modal, visto que se todos os métodos fossem usados iria-se tornar repetitivo. A matriz OD mantém-se igual, alterando-se apenas a matriz com a informação dos eixos (Quadro3.3) com o acréscimo de mais uma coluna (número de autocarros).

Quadro 3.3 – Informação dos eixos com autocarros

Eixo	De:	Para:	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Capacidade	Sentido	Faixas	Autocarros
AB	1	2	10	50	1500	2	1	1
BC	2	3	10	50	1500	2	1	3
CD	3	4	8	50	1500	2	1	2
AD	1	4	12	50	1500	2	1	4
AE	1	5	7	50	1500	2	1	0
ED	5	4	6	50	1500	2	1	0

Posto isto, resta agora aplicar o método iterativo na rede exemplo já com a presença de autocarros e comparar os resultados obtidos (Figura 3.8).

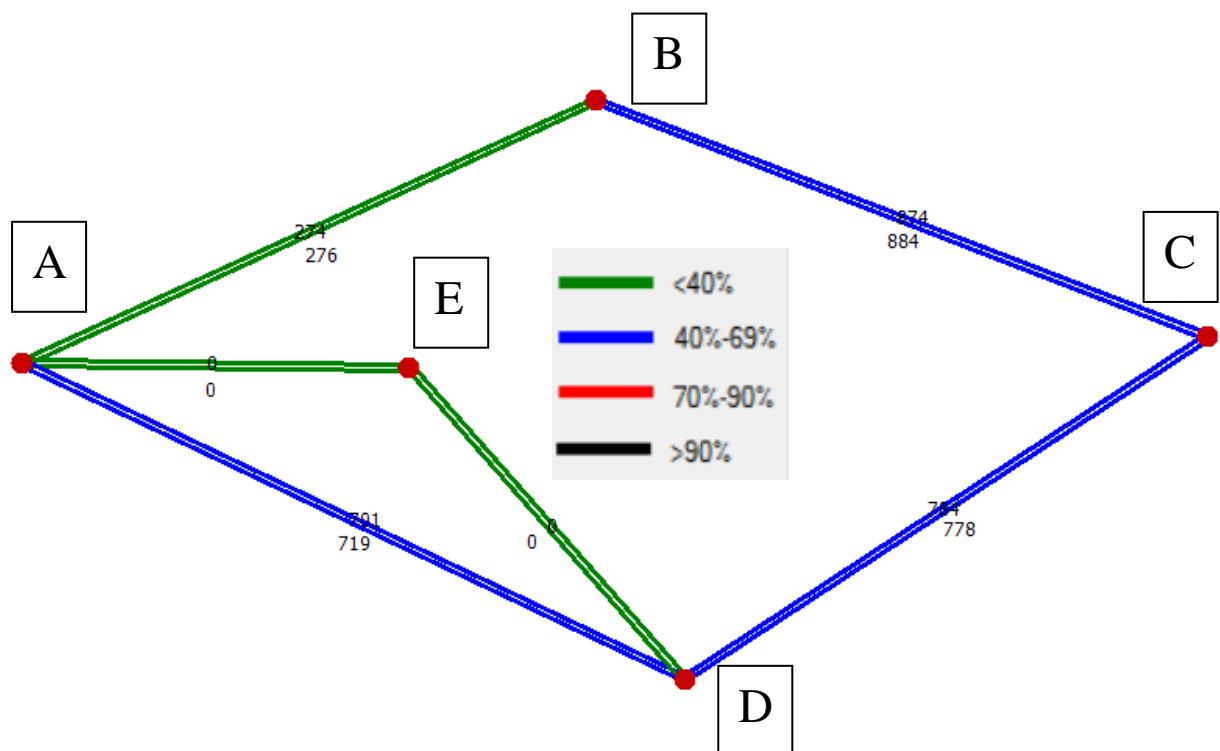


Figura 3.8 – Atribuição de transporte público aplicado na rede exemplo

Nesta simulação, uma vez mais, os eixos AE e ED não apresentam qualquer volume de tráfego. O eixo AB é o único que apresenta uma capacidade abaixo dos 40%, enquanto os restantes eixos apresentam entre 40% e 69%. Neste caso também são diferentes os números dos utentes que circulam em cada sentido de cada eixo. No eixo AB, circulando 276 veículos a uma velocidade média de 50 km/h e demorando 12 minutos de tempo médio, existe uma ocupação da via de 18.4%. Nos eixos AC, CD e AD circulam mais de 700 veículos a uma velocidade média de 48 km/h. Tendo em consideração toda a rede, o tempo médio de viagem é de 12.2 minutos e a velocidade média é de 48.8 km/h. É de notar que com a introdução do transporte público, sem que ocorresse uma diminuição da matriz OD, a rede rodoviária ajustou-se de acordo com o número de viagens que foram acrescentadas em cada eixo.

## 4 ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia é apresentado, nesta secção, um estudo de caso baseado numa rede rodoviária real. A rede rodoviária de Coimbra foi escolhida para ser tratada nesta dissertação, visto que já existiam informações recolhidas pelo Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, e existiam também outros trabalhos anteriores com detalhes da mesma. Sendo assim, na subsecção seguinte irá ser feita uma pequena introdução sobre a cidade de Coimbra e a sua rede rodoviária.

### 4.1 Rede rodoviária de Coimbra

Coimbra é uma cidade portuguesa capital de distrito e está situada na Região Centro (Figura 4.1). Esta cidade é atravessada pelo Rio Mondego e tem cerca de 144 mil habitantes. No entanto, Coimbra é conhecida como uma cidade universitária, querendo isto dizer que durante grande parte do ano civil existe um elevado acréscimo de habitantes. Claro que este fator tem uma grande influência na sua rede rodoviária, visto que o aumento do número de habitantes influencia o trânsito que circula dentro da cidade.

A rede rodoviária de Coimbra é constituída por duas vias circulares, circular interna e circular externa, diversas estradas de acesso e de ligação e por diferentes vias de entrada e saída da cidade. Como qualquer rede rodoviária de uma cidade de média e grande dimensão, esta apresenta grande complexidade para ser representada num modelo e assim simular os diferentes resultados pretendidos. Sendo assim, foi necessário realizar uma simplificação da mesma criando um modelo de rede com os principais eixos. Na Figura 4.2 é possível visualizar a rede simplificada da cidade de Coimbra utilizada neste estudo de caso.



Figura 4.1 – Enquadramento da cidade de Coimbra

## 4.2 Dados

Nesta subsecção serão apresentados os dados que já existiam no Departamento de Engenharia Civil e aqueles que foram recolhidos e alterados para o presente trabalho. Como já existia uma rede rodoviária mais antiga da cidade de Coimbra e um dos dados desse estudo era a respetiva matriz origem-destino, partiu-se desse ponto para desenhar a nova. Esta foi realizada com a ajuda do sistema de informação geográfica *QGIS* e teve de sofrer algumas alterações devido ao facto de se encontrar desatualizada. Na figura 4.2 é possível visualizar-se a rede atualizada.



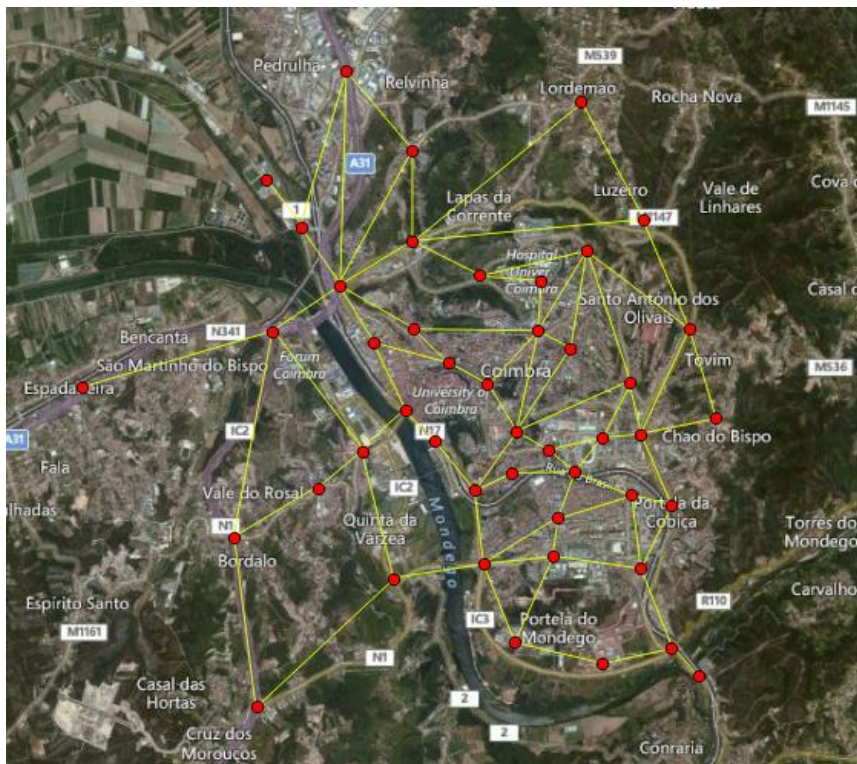


Figura 4.2 – Rede rodoviária do caso em estudo

Os nós já existentes nessa rede mantiveram-se, apenas foram acrescentados mais alguns e outros sofreram algumas alterações, sendo que três desses nós foram os que representam o Pólo 2 da Universidade de Coimbra, os Hospitais da Universidade de Coimbra e o Fórum de Coimbra. Para o cálculo dos valores a serem representados na matriz OD para estes locais consultou-se o Trip Generation Manual (2012), sendo que este fornece os dados necessários para achar o total de origens e destinos desses locais, tendo por base o número de alunos do Pólo 2, o número de camas existentes nos Hospitais e a área do Fórum.

Com a rede já concluída e através do *software QGIS* é possível obter-se as coordenadas de cada ponto e as distâncias dos eixos. Assim, tem-se a matriz OD e um ficheiro com as informações de cada eixo concluídas, que se encontram em anexo.

Na Figura 4.3 é possível ver-se a quantidade de viagens com destino a cada nó e na Figura 4.4 observa-se a quantidade de viagens com origem em cada nó da rede rodoviária da cidade de Coimbra para a hora de ponta da manhã.

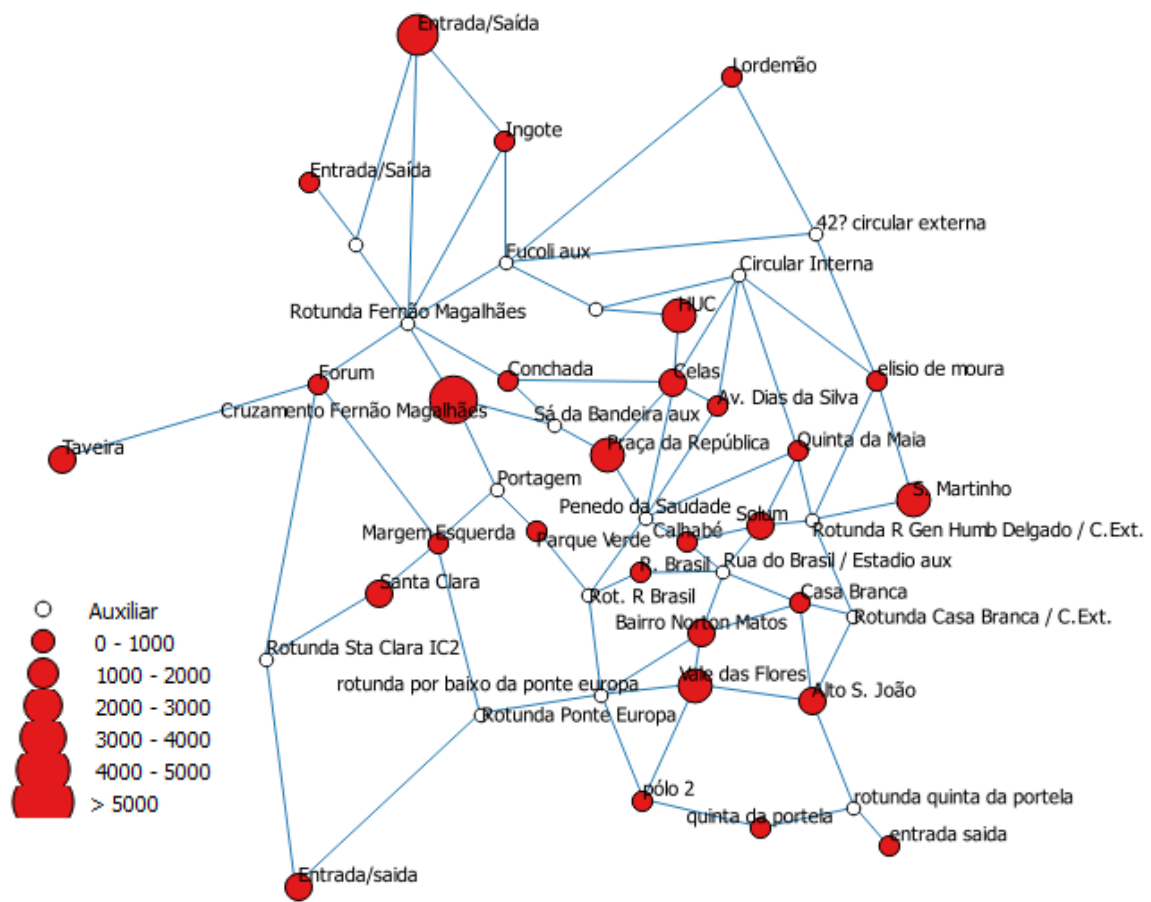


Figura 4.3 – Quantidade de viagens com destino a cada nó

Como se pode ver através da Figura 4.3, o nó que mais viagens recebe é o nó que representa a zona da rua Fernão Magalhães. Esta zona de Coimbra para além de ter residências, e com isto ser um lugar de origem de viagens, é essencialmente um destino. Isto acontece devido ao elevado número de estabelecimentos comerciais, postos de trabalho e à central de autocarros que lá existem. O nó que representa a entrada e saída para a região Norte do país também se apresenta com um elevado número de destinos. Para além destes dois nós, todos os restantes com a exceção dos auxiliares recebem um número semelhante de viagens. Na Figura 4.4 o nó que mais se destaca na origem de viagens é o de entrada e saída da região Norte. Isto quer dizer que grande parte das viagens que ocorrem dentro da cidade são provenientes de fora.

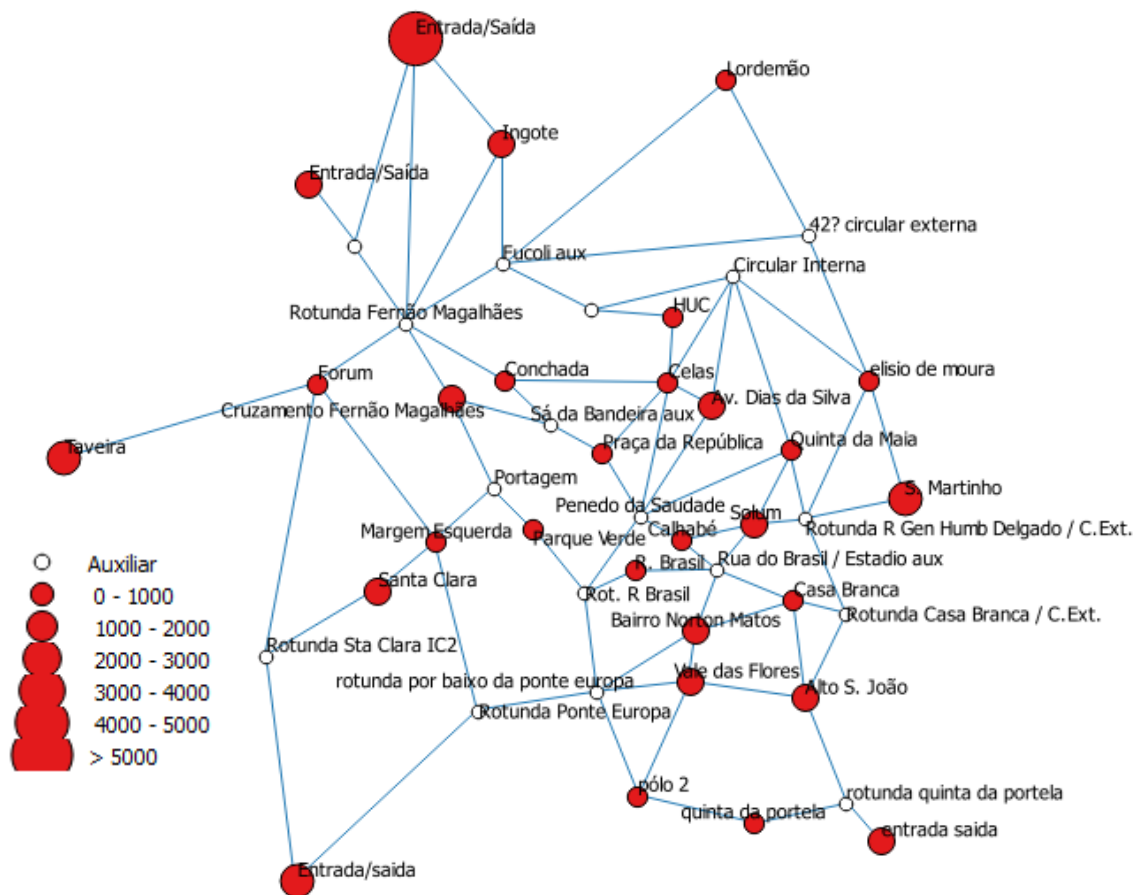


Figura 4.4 – Quantidade de viagens com origem a cada nó

No caso em estudo admitiram-se apenas duas velocidades (50km/h ou 90km/h) e apenas eixos com uma ou duas vias. Sendo assim, é possível ver nas duas figuras seguintes essas duas características representadas. Na Figura 4.5 tem-se representadas as diferentes velocidades, sendo que os eixos com a cor vermelha representam a velocidade de 50km/h e os eixos de cor azul representam a velocidade de 90km/h.

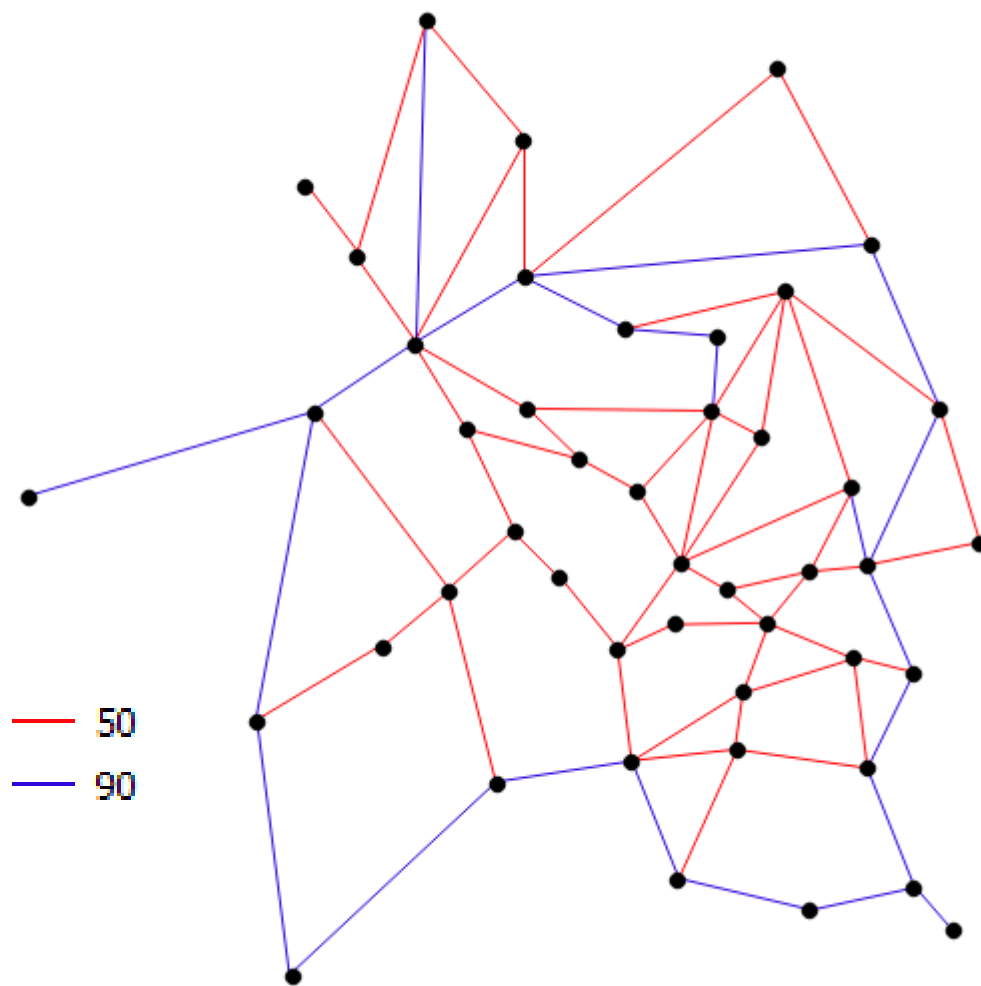


Figura 4.5 – Diferentes velocidades existentes na rede

Na Figura 4.6 os eixos representados com a cor vermelha correspondem a estradas com apenas uma via e os eixos com a cor azul correspondem às estradas com 2 vias.

Posto isto, estavam reunidas as condições para aplicar o *software Transplan+* e observar os resultados.

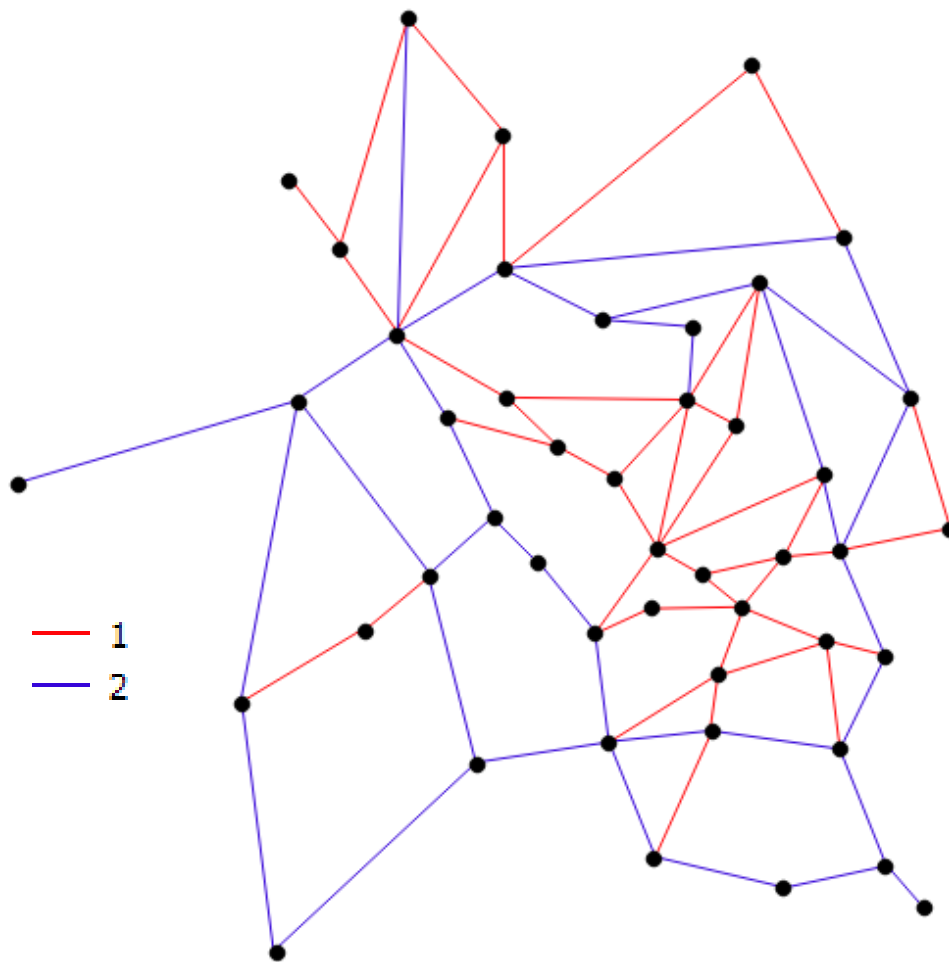


Figura 4.6 – Número de vias da rede

### 4.3 Resultados

Tal como foi feito na Metodologia (Capítulo 3), nesta subsecção tem-se uma atribuição de tráfego em que se considerou o transporte público e outra em que não se considerou. Primeiramente, começou-se por fazer uma atribuição sem se considerar a presença de autocarros na rede rodoviária, aplicando-se três métodos diferentes: tudo ou nada, iterativo e estocástico. De seguida, fez-se a atribuição com a consideração de transporte público. Para se ter em conta o número de autocarros que circulavam em cada eixo, consultou-se a rede rodoviária dos SMTUC e verificou-se quantos autocarros se deslocavam em cada eixo entre as 8h e as 9h da manhã.

### 4.3.1 Sem Transporte Público

#### 4.3.1.1 Método do Tudo ou Nada

Como já foi referido anteriormente, o método do tudo ou nada é aplicado numa rede rodoviária sem ter em consideração o tráfego existente nessa mesma rede. Esta atribuição procura o melhor trajeto possível para todos os utilizadores da rede, independentemente das características a que se encontra o percurso a ser percorrido. Aplicando agora o método do tudo ou nada na rede rodoviária de Coimbra chega-se aos resultados apresentados na Figura 4.7.

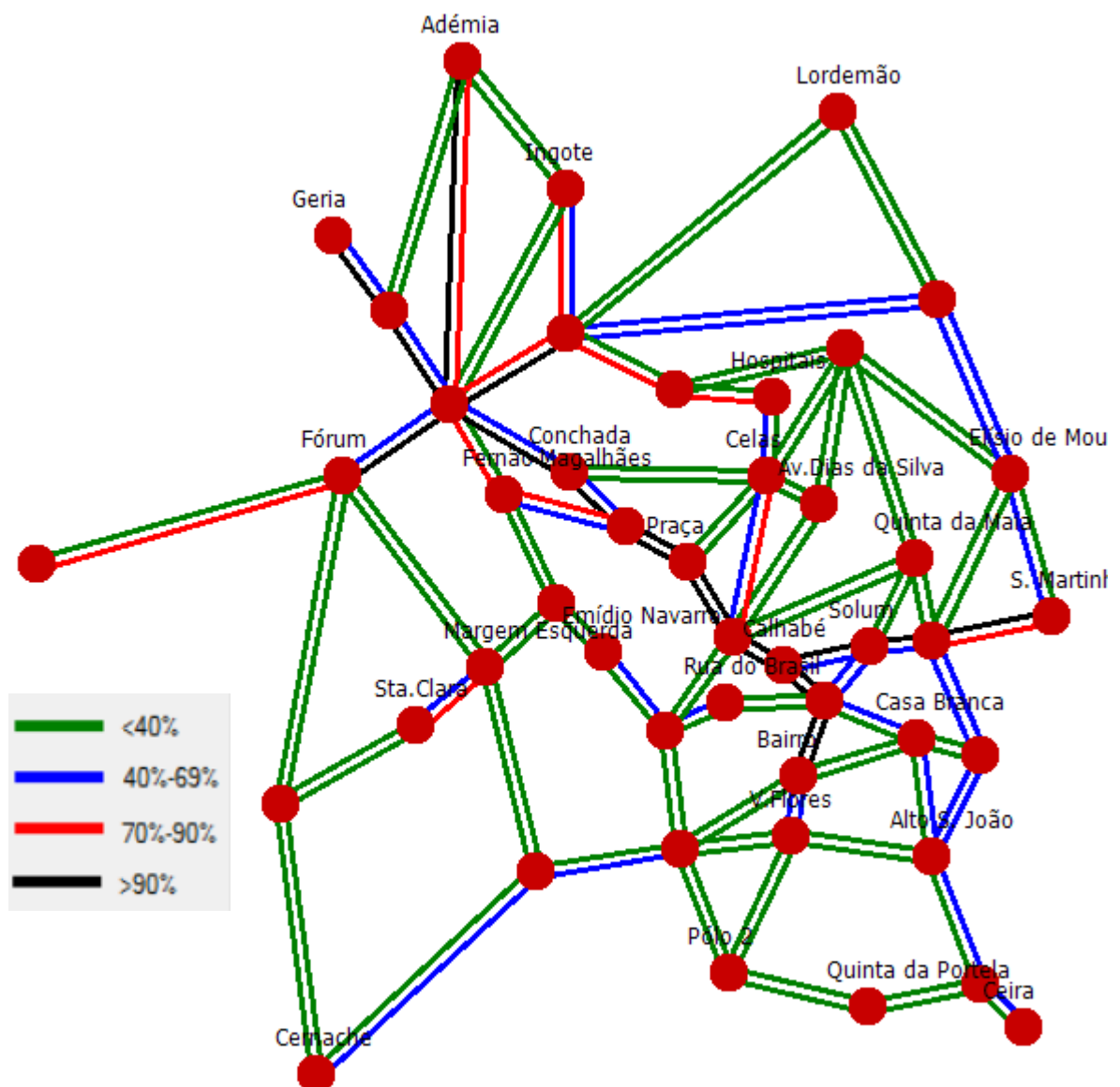


Figura 4.7 – Método do tudo ou nada aplicado na rede de Coimbra

Como é possível ver na Figura 4.7 existem cerca de vinte eixos que se apresentam congestionados, ou seja, com mais de 90% de utilização da capacidade desse troço e bastantes que se encontram com uma utilização de 70% a 90%. Através do *software Transplan+*, sabe-se também que o tempo médio de viagem é de um minuto e que a velocidade média é de 58 km/h.

Tendo em conta todos estes aspetos pode-se concluir que a atribuição feita através deste método não corresponde inteiramente à realidade, visto que, apesar da cidade de Coimbra ter alguns problemas de circulação de tráfego em hora de ponta, na maior parte dos eixos que se encontram congestionados na Figura 4.7, isso acaba por não acontecer.

#### 4.3.1.2 Método Iterativo

No capítulo anterior foram apresentados dois métodos de equilíbrio determinístico – método incremental e método iterativo. Como estes dois fornecem resultados similares, optou-se por se utilizar apenas uma atribuição feita pelo método iterativo, visto que este é mais exato. Sendo assim, na Figura 4.8 é possível verificar os resultados achados através de uma atribuição feita pelo método iterativo na rede rodoviária de Coimbra.

Neste caso, como se pode observar, tem-se uma rede com muita mais fluidez de tráfego, apresentando-se com apenas dez eixos congestionados, 1 minuto de tempo médio de viagem e uma velocidade média de 64 km/h. Como já era de se esperar, esta atribuição de tráfego apresentou resultados mais próximos da realidade comparativamente com o método do tudo ou nada, visto que esta atribuição tem em consideração o tráfego já existente e procura o equilíbrio da rede diminuindo assim o tempo de viagem de cada utente. O número de eixos congestionados passou para metade (10) e a velocidade média de viagem passou de 58 km/h para 64 km/h, querendo isto dizer que é possível circular de uma forma mais rápida dentro da rede rodoviária de Coimbra.

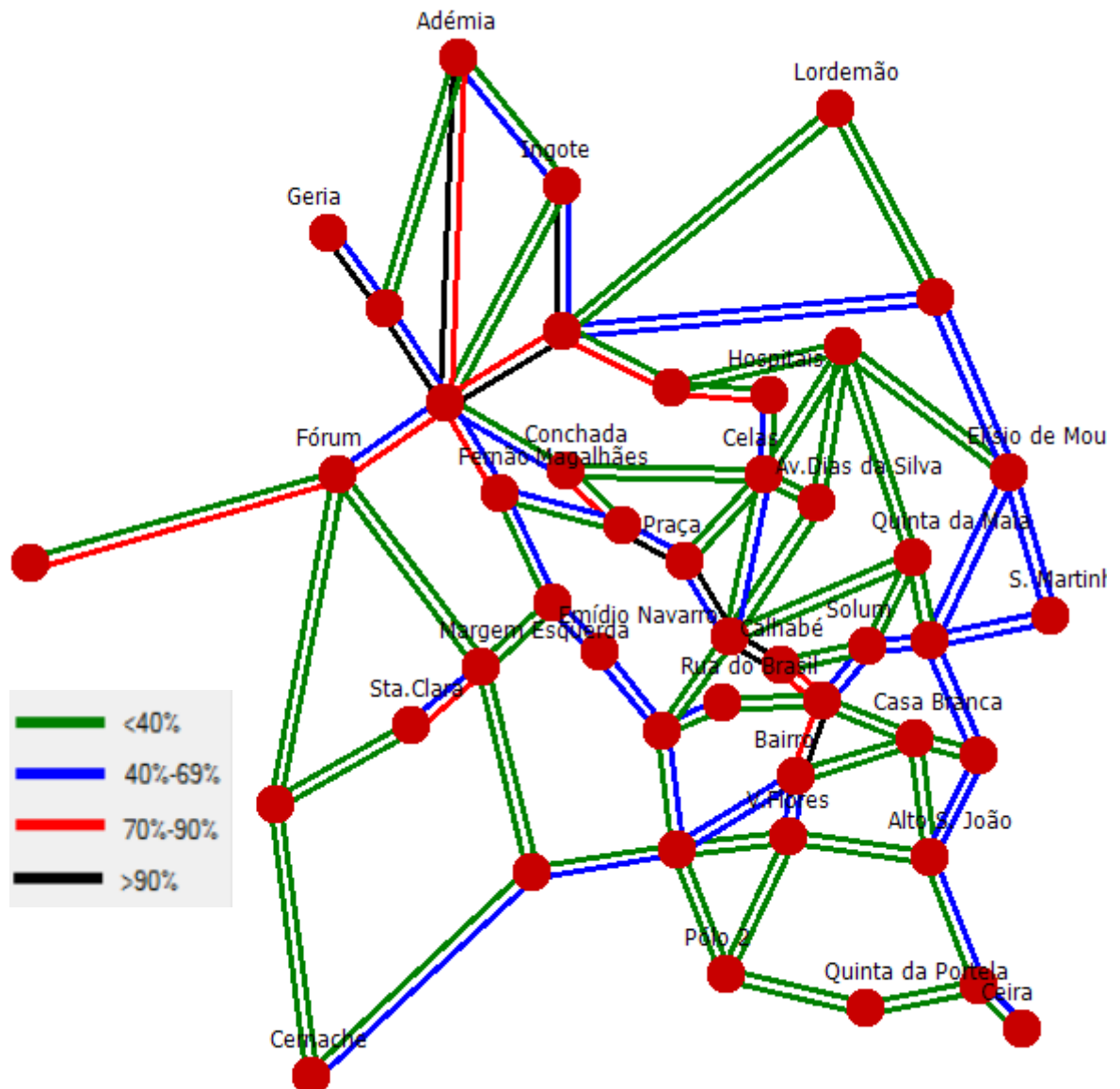


Figura 4.8 – Método iterativo aplicado na rede de Coimbra

#### 4.3.1.3 Método de Equilíbrio Estocástico

Por último, resta fazer-se uma atribuição estocástica considerando que não existe transporte público a circular dentro da rede rodoviária da cidade de Coimbra. É importante reforçar que este método tem em conta a imprevisibilidade dos condutores. Posto isto, tem-se na figura 4.9 os resultados obtidos através da aplicação do método estocástico no *software Transplan+*. Como já foi se referido no capítulo anterior, numa simulação estocástica é necessário obter-se vários resultados, uma vez que estes variam sempre que o software fornece uma solução, e achar-se a média dos mesmos. Neste caso foi utilizado um intervalo de 25%.



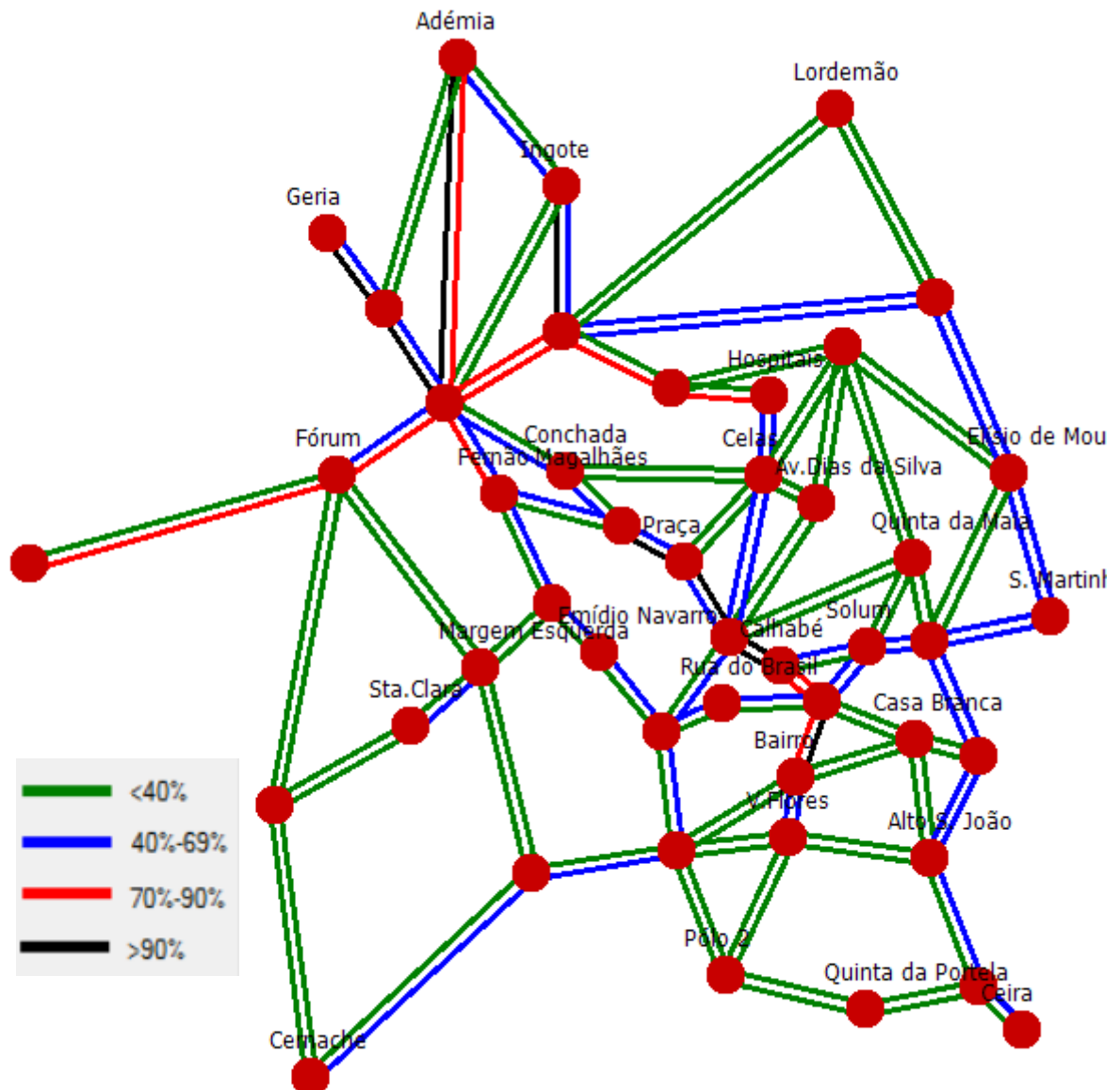


Figura 4.9 – Método estocástico aplicado na rede de Coimbra

Através da aplicação deste método sabe-se que existem apenas nove eixos congestionados, que o tempo médio de viagem é de um minuto e que a velocidade média é de 64 km/h. Não é necessário comparar este método com o método do tudo ou nada, visto que o método iterativo apresentou resultados mais próximos da realidade que o primeiro. Os resultados obtidos através desta atribuição são bastante semelhantes com os do método iterativo, com a exceção de que neste caso apenas existem nove eixos congestionados em vez de dez. Isto acontece, pois, estes dois métodos são semelhantes no aspeto em que ambos procuram o equilíbrio da rede, tendo apenas uma diferença nos seus algoritmos. Como foi dito anteriormente, no

algoritmo do método iterativo, num dos passos tem-se uma atribuição através do método do tudo ou nada enquanto no método estocástico existe uma atribuição estocástica à partida.

#### **4.3.2 Com Transporte Público**

Com a introdução do transporte público neste caso de estudo, foi necessário alterar as matrizes OD e o ficheiro com informação dos eixos. A matriz OD foi reduzida em 25% e no ficheiro foi feita uma alteração na coluna dos transportes públicos. Como já foi mencionado antes, houve a contabilização dos autocarros que circulavam em cada eixo e assim é possível introduzir estes dados no *Transplan+*. Neste caso, onde se considera a existência de transporte público, apenas dois métodos foram aplicados – método iterativo e método estocástico.

##### **4.3.2.1 Método Iterativo**

O primeiro método a ser aplicado foi o iterativo e este facultou os resultados apresentados na figura 4.10. Como se pode ver, nesta atribuição existem apenas três eixos congestionados, o tempo médio de viagem é de um minuto e a velocidade média de circulação é de 65 km/h. Até ao momento, este é sem dúvida o caso em que mais se enquadra a cidade de Coimbra, isto porque cada autocarro corresponde a cerca de quatro automóveis ligeiros, o que reduz em bastante o tráfego existente em cada eixo.

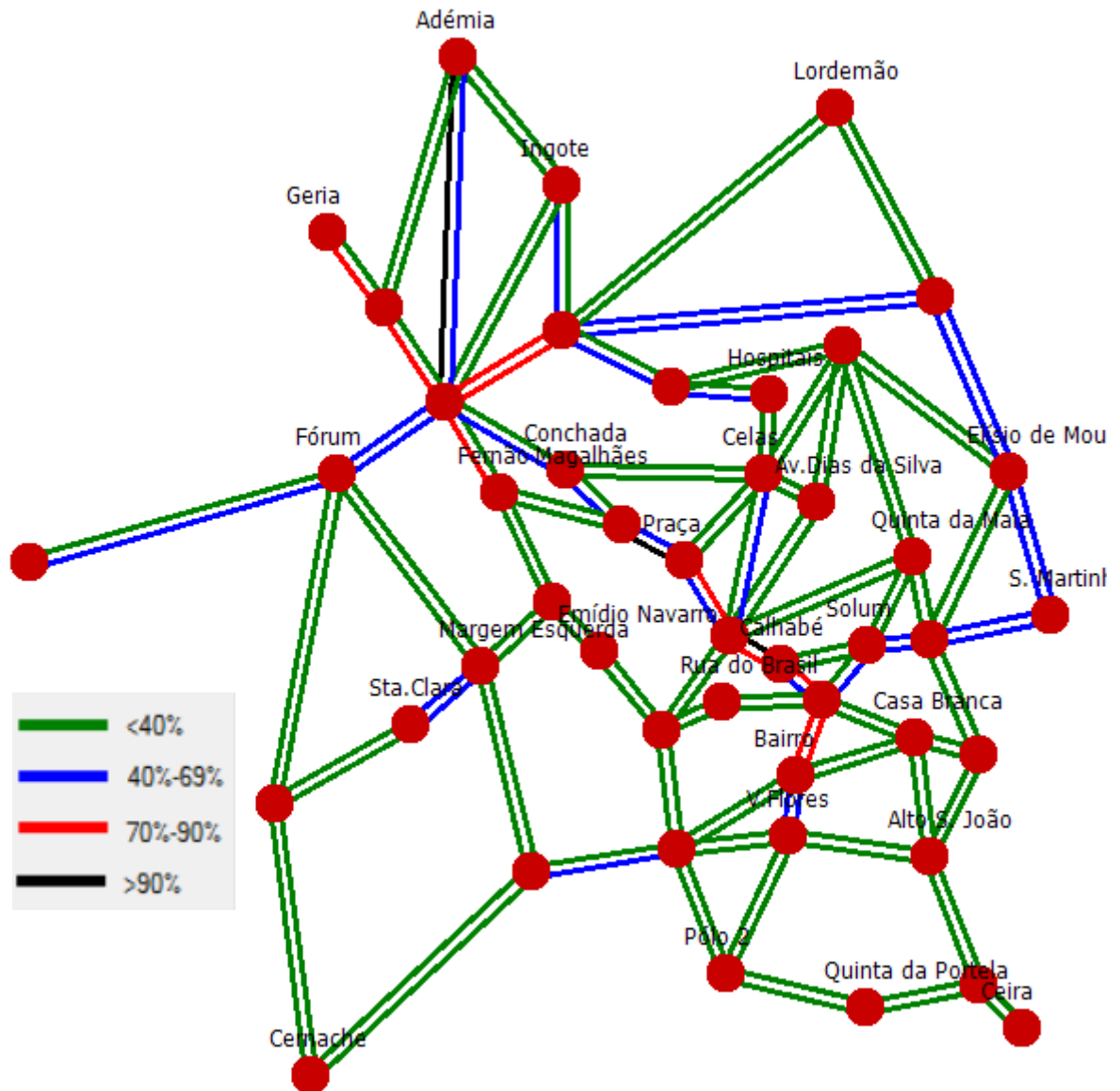


Figura 4.10 – Método iterativo aplicado na rede de Coimbra com transporte público

#### 4.3.2.2 Método de Equilíbrio Estocástico

Os resultados do método estocástico aplicado na rede rodoviária da cidade de Coimbra, com a existência de transportes públicos, apresentam-se na figura 4.11. Nesta atribuição de tráfego tem-se apenas dois eixos congestionados, a velocidade média é de um minuto e o tempo médio de viagem é de 66 km/h. Este método apresenta resultados bastante semelhantes aos achados através do método iterativo.

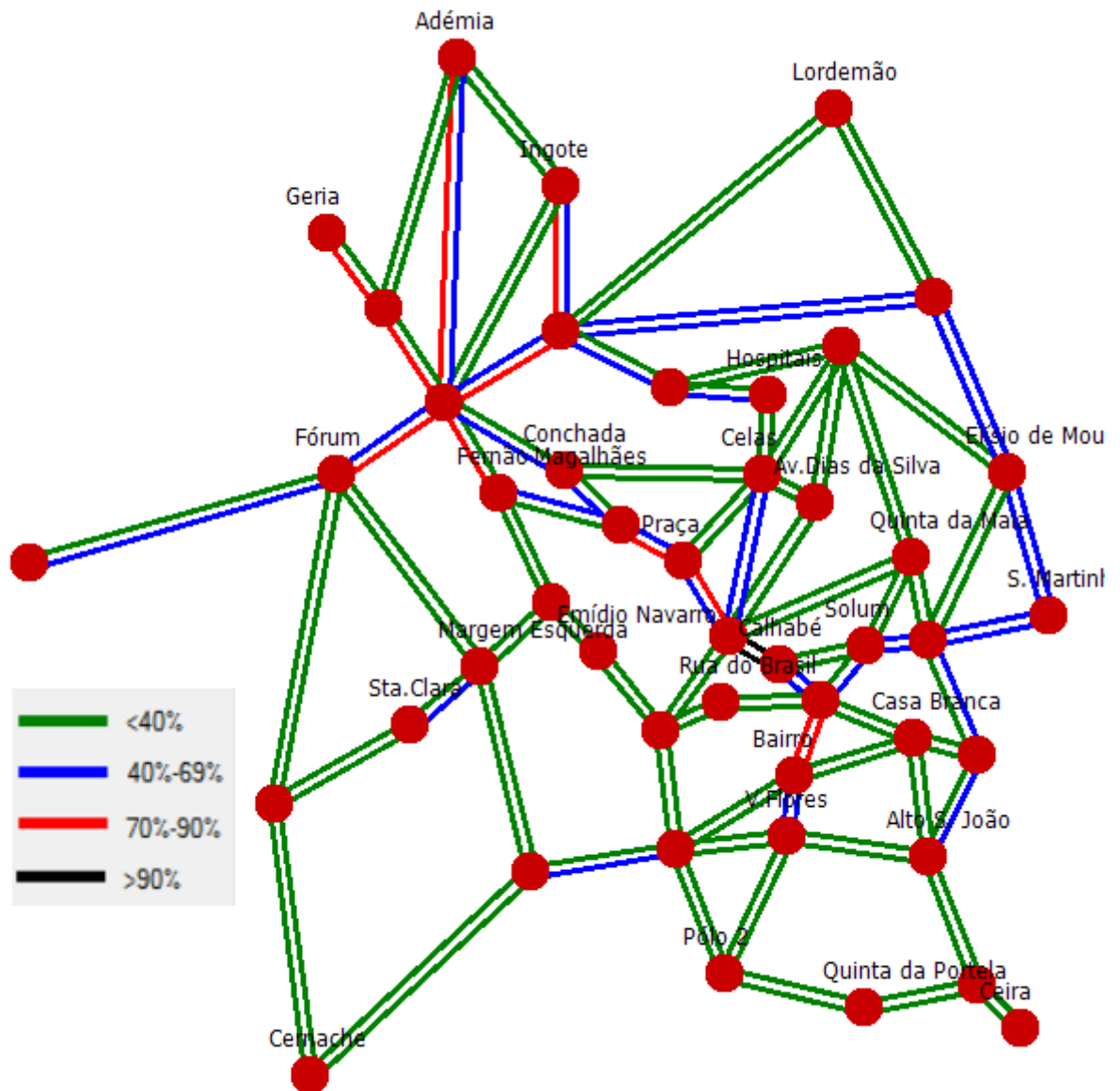


Figura 4.11 – Método estocástico aplicado na rede de Coimbra com transporte público

### 4.3.3 Resumo dos Resultados

Nesta subsecção é possível observarem-se todos os resultados obtidos através dos diferentes métodos resumidos em dois quadros. No Quadro 4.1 têm-se os valores num determinado sentido dos eixos (Sentido A) e no Quadro 4.2 tem-se no sentido oposto (Sentido B). Estes quadros foram criados uma vez que existem demasiados eixos para serem comentados isoladamente. Servem também para facilitar a observação dos resultados e comparar cada método de uma forma mais simples. Na Figura 4.12 pode-se ver os eixos da rede rodoviária de Coimbra numerados de forma a facilitar a observação do Quadro 4.1 e do Quadro 4.2.

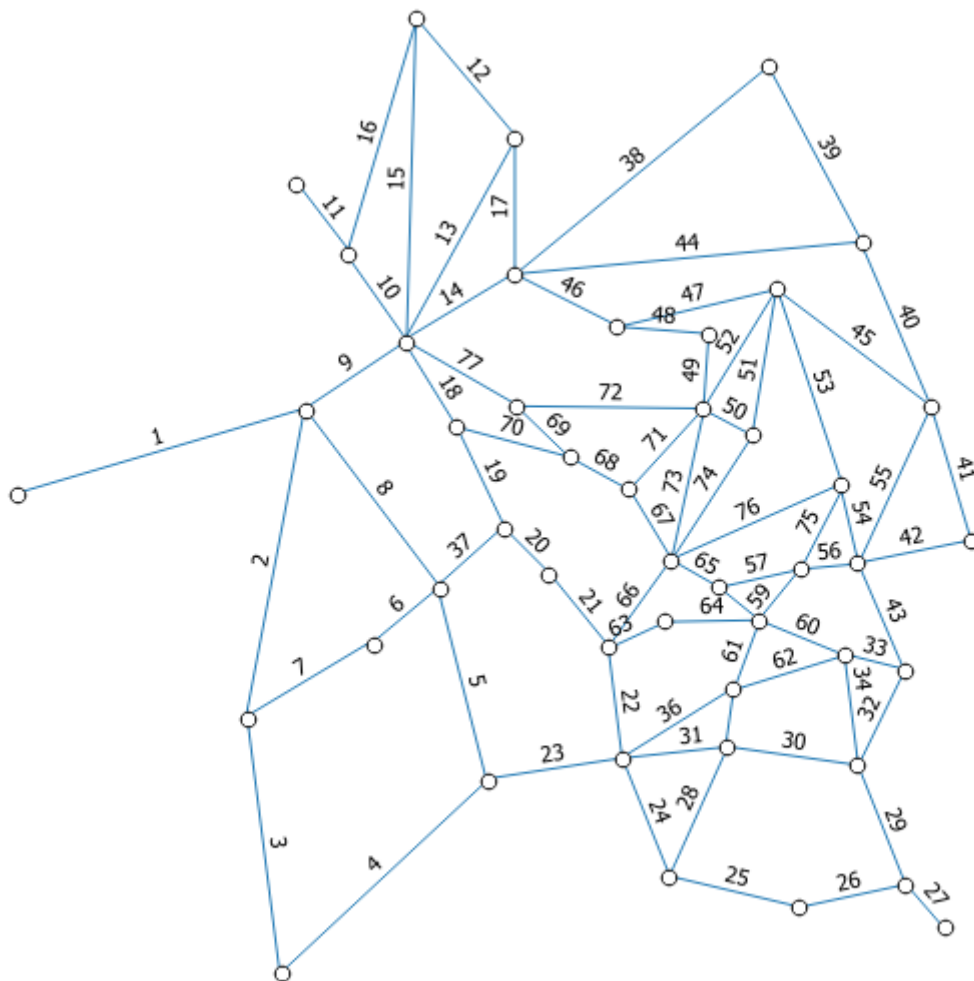


Figura 4.12 – Rede rodoviária com os eixos numerados

Quadro 4.1 – Resumo dos resultados (Sentido A)

Sentido A										
Nome	Sem Transporte Público						Com Transporte Público			
	Tudo ou Nada		Iterativo		Estocástico		Iterativo		Estocástico	
	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)
1	73,4	1,5	73,4	1,5	73,4	1,5	56,2	1,4	56,2	1,4
2	8,2	1,4	8,2	1,4	17,8	1,4	6,2	1,4	12,4	1,4
3	9,3	1,2	9,3	1,2	12,8	1,2	7,0	1,2	8,6	1,2
4	42,1	1,3	42,1	1,3	46,5	1,3	31,9	1,3	33,0	1,3
5	17,2	1,6	19,7	1,6	21,5	1,6	14,8	1,6	15,5	1,6
6	51,0	0,8	51,0	0,8	38,7	0,7	40,7	0,7	31,5	0,7
7	2,2	1,2	3,5	1,2	13,3	1,2	4,2	1,2	13,0	1,2
8	19,8	1,9	12,4	1,9	16,0	1,9	18,4	1,9	14,7	1,9
9	93,9	0,7	81,5	0,6	89,9	0,7	69,2	0,6	73,0	0,6
10	43,2	0,9	43,2	0,9	43,2	0,9	36,0	0,9	36,0	0,9
11	45,7	0,7	45,7	0,7	45,7	0,7	37,9	0,7	37,9	0,7
12	2,3	1,3	61,4	1,3	62,4	1,3	18,5	1,3	37,5	1,3
13	0,0	1,9	26,5	1,9	21,4	1,9	1,6	1,9	7,0	1,9
14	112,4	1,1	94,8	0,8	89,2	0,7	84,1	0,7	74,7	0,6
15	89,1	1,8	89,0	1,7	77,7	1,6	66,9	1,5	61,6	1,5
16	2,5	2,0	2,6	2,0	2,8	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0
17	49,5	1,1	49,5	1,1	57,4	1,1	37,1	1,1	40,1	1,1
18	80,6	0,9	89,2	1,0	89,8	1,0	70,7	0,8	73,4	0,9
19	32,0	0,9	34,2	0,9	33,4	0,9	28,4	0,9	29,2	0,9
20	32,8	0,5	44,9	0,5	43,2	0,5	31,3	0,5	30,6	0,5
21	37,2	0,8	41,6	0,8	38,2	0,8	30,8	0,8	30,2	0,8
22	30,3	0,9	32,9	0,9	31,5	0,9	23,7	0,9	23,8	0,9
23	34,5	0,6	36,9	0,6	35,7	0,6	27,8	0,6	27,3	0,6
24	22,8	0,6	22,8	0,6	24,7	0,6	18,2	0,6	19,4	0,6
25	15,6	0,6	15,6	0,6	16,6	0,6	11,9	0,6	12,4	0,6
26	13,1	0,5	13,1	0,5	14,6	0,5	9,8	0,5	10,7	0,5
27	23,2	0,3	23,2	0,3	23,2	0,3	17,6	0,3	17,6	0,3
28	5,7	1,2	5,7	1,2	5,5	1,2	5,5	1,2	5,4	1,2
29	44,4	0,6	44,4	0,6	40,7	0,6	33,7	0,6	31,0	0,6
30	19,7	1,1	22,1	1,1	18,1	1,1	17,0	1,1	13,3	1,1
31	24,7	0,9	26,5	0,9	28,1	0,9	22,0	0,9	21,4	0,9
32	44,2	0,5	50,1	0,5	58,5	0,5	34,0	0,5	43,7	0,5
33	2,1	0,5	7,5	0,5	16,5	0,5	3,9	0,5	13,6	0,5
34	17,0	0,9	13,5	0,9	8,1	0,9	15,3	0,9	10,7	0,9
35	53,1	0,5	51,7	0,5	58,9	0,5	44,2	0,5	51,6	0,5
36	37,9	1,1	46,1	1,1	33,8	1,1	35,2	1,1	25,8	1,1
37	20,9	0,7	30,1	0,7	25,3	0,7	17,2	0,7	18,2	0,7
38	6,5	2,7	6,5	2,7	5,2	2,7	6,8	2,7	5,8	2,7
39	10,3	1,6	10,3	1,6	10,5	1,6	8,4	1,6	8,4	1,6
40	55,8	0,8	66,0	0,8	62,2	0,8	49,4	0,8	45,6	0,8
41	45,1	1,2	62,8	1,2	59,6	1,2	46,1	1,2	44,8	1,2
42	99,0	1,3	59,9	1,0	67,0	1,0	42,9	1,0	51,4	1,0
43	41,9	0,5	45,3	0,5	46,9	0,5	32,7	0,5	34,3	0,5
44	50,7	1,6	60,8	1,6	57,6	1,6	45,2	1,6	41,9	1,6
45	1,2	1,6	7,6	1,6	5,5	1,6	5,2	1,6	4,9	1,6
46	74,8	0,6	76,5	0,6	82,5	0,6	57,4	0,5	65,6	0,5
47	0,0	1,4	2,1	1,4	3,8	1,4	2,4	1,4	4,0	1,4
48	74,8	0,4	74,4	0,4	80,5	0,5	57,5	0,4	65,2	0,4
49	42,9	0,3	42,5	0,3	45,9	0,3	33,6	0,3	39,5	0,3
50	20,8	0,5	20,8	0,5	20,8	0,5	17,5	0,5	17,8	0,5
51	0,1	1,2	4,9	1,2	4,3	1,2	1,3	1,2	3,1	1,2
52	0,5	1,2	24,2	1,2	20,6	1,2	16,8	1,2	15,8	1,2
53	0,0	1,7	2,1	1,7	5,2	1,7	1,5	1,7	3,1	1,7
54	4,2	0,4	3,1	0,4	10,5	0,4	2,5	0,4	6,9	0,4
55	34,2	0,8	40,4	0,8	35,0	0,8	30,9	0,8	27,4	0,8
56	69,0	0,5	62,7	0,5	56,3	0,5	51,1	0,5	47,0	0,5
57	94,7	0,9	28,4	0,7	43,5	0,7	31,2	0,7	39,5	0,7
58	90,3	0,5	74,3	0,5	71,6	0,5	64,9	0,5	65,4	0,5
59	55,5	0,6	54,4	0,6	49,6	0,6	43,8	0,6	41,1	0,6
60	27,1	0,8	18,3	0,8	16,2	0,8	22,6	0,8	18,5	0,8
61	99,1	0,8	89,5	0,7	89,9	0,7	72,8	0,7	76,1	0,7
62	5,1	1,0	5,1	1,0	7,9	1,0	5,9	1,0	7,3	1,0
63	41,4	0,5	40,2	0,5	52,6	0,5	32,6	0,5	36,8	0,5
64	27,2	0,8	26,1	0,8	28,8	0,8	22,9	0,8	23,2	0,8
65	148,2	1,2	100,1	0,6	102,4	0,6	85,3	0,5	91,7	0,6
66	34,8	0,9	39,2	0,9	46,3	0,9	27,7	0,9	32,9	0,9
67	153,6	2,0	92,3	0,8	95,2	0,9	80,2	0,8	85,3	0,8
68	118,7	0,9	57,4	0,6	56,7	0,6	59,0	0,6	59,5	0,6
69	54,7	0,6	24,4	0,6	22,0	0,6	27,8	0,6	22,9	0,6
70	43,8	1,0	30,6	1,0	37,1	1,0	32,1	1,0	35,2	1,0
71	13,5	0,9	9,2	0,9	10,2	0,9	12,3	0,9	9,8	0,9
72	0,3	1,5	0,3	1,5	0,6	1,5	0,8	1,5	1,0	1,5
73	79,8	1,5	60,0	1,3	52,0	1,3	48,1	1,3	43,9	1,3
74	29,6	1,2	26,7	1,2	38,2	1,2	22,5	1,2	30,7	1,2
75	5,1	0,7	4,0	0,7	3,3	0,7	4,3	0,7	3,8	0,7
76	7,9	1,5	30,0	1,5	26,6	1,5	9,9	1,5	22,2	1,5
77	56,8	1,1	26,6	1,1	25,4	1,1	28,0	1,1	23,8	1,1

Quadro 4.2 – Resumo dos resultados (Sentido B)

Nome	Sentido B									
	Sem Transporte Público						Com Transporte Público			
	Tudo ou Nada		Iterativo		Estocástico		Iterativo		Estocástico	
Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	Capacidade (%)	Tempo (min)	
1	38,4	1,4	38,4	1,4	38,4	1,4	30,0	1,4	30,0	1,4
2	22,0	1,4	22,7	1,4	25,9	1,4	16,5	1,4	20,9	1,4
3	23,5	1,2	23,5	1,2	22,2	1,2	17,6	1,2	17,9	1,2
4	19,2	1,3	19,2	1,3	18,8	1,3	14,7	1,3	14,4	1,3
5	20,2	1,6	23,5	1,6	20,7	1,6	17,7	1,6	14,9	1,6
6	71,7	0,8	70,4	0,8	61,4	0,8	56,3	0,8	48,1	0,8
7	3,0	1,2	3,0	1,2	16,1	1,2	4,8	1,2	14,6	1,2
8	29,6	1,9	32,9	1,9	23,3	1,9	26,4	1,9	18,2	1,9
9	58,3	0,6	55,8	0,6	57,3	0,6	43,0	0,6	44,2	0,6
10	92,8	1,1	92,9	1,1	93,0	1,1	73,2	0,9	73,6	0,9
11	95,6	0,9	95,6	0,9	95,6	0,9	75,3	0,8	75,3	0,8
12	2,9	1,3	3,0	1,3	26,0	1,3	3,2	1,3	14,5	1,3
13	0,0	1,9	0,1	1,9	15,0	1,9	1,5	1,9	9,5	1,9
14	75,7	0,6	78,8	0,6	74,0	0,6	70,3	0,6	63,4	0,6
15	131,8	4,7	102,2	2,1	101,7	2,1	91,1	1,8	81,7	1,6
16	2,8	2,0	2,8	2,0	2,8	2,0	2,3	2,0	1,9	2,0
17	72,6	1,2	105,2	1,6	111,0	1,7	70,0	1,2	83,4	1,3
18	33,2	0,8	49,8	0,8	41,9	0,8	30,0	0,8	32,5	0,8
19	34,8	0,9	53,9	0,9	47,6	0,9	34,3	0,9	34,3	0,9
20	37,4	0,5	41,8	0,5	38,4	0,5	30,9	0,5	30,4	0,5
21	40,5	0,8	52,6	0,8	50,9	0,8	37,1	0,8	36,4	0,8
22	32,6	0,9	45,3	0,9	42,6	0,9	29,8	0,9	29,7	0,9
23	60,4	0,6	63,7	0,6	62,6	0,6	47,9	0,6	45,3	0,6
24	19,0	0,6	19,0	0,6	23,8	0,6	15,3	0,6	18,9	0,6
25	23,2	0,6	23,2	0,6	28,0	0,6	17,6	0,6	21,1	0,6
26	18,1	0,5	18,1	0,5	23,4	0,5	13,6	0,5	17,4	0,5
27	49,0	0,3	49,0	0,3	49,0	0,3	36,9	0,3	36,9	0,3
28	7,9	1,2	7,9	1,2	6,0	1,2	7,2	1,2	5,8	1,2
29	23,6	0,6	23,6	0,6	23,7	0,6	18,1	0,6	18,4	0,6
30	14,4	1,1	16,7	1,1	17,0	1,1	12,2	1,1	12,6	1,1
31	33,6	0,9	35,4	0,9	38,5	0,9	27,3	0,9	29,7	0,9
32	40,9	0,5	41,6	0,5	43,5	0,5	31,1	0,5	31,6	0,5
33	1,7	0,5	6,1	0,5	10,2	0,5	6,5	0,5	8,6	0,5
34	43,1	0,9	28,9	0,9	11,3	0,9	32,1	0,9	11,3	0,9
35	51,2	0,5	50,0	0,5	53,5	0,5	41,9	0,5	48,3	0,5
36	16,1	1,1	42,8	1,1	24,9	1,1	23,7	1,1	19,1	1,1
37	13,6	0,7	13,6	0,7	15,8	0,7	11,8	0,7	13,3	0,7
38	15,4	2,7	15,4	2,7	15,2	2,7	13,4	2,7	13,4	2,7
39	7,0	1,6	7,0	1,6	8,3	1,6	5,9	1,6	6,8	1,6
40	50,0	0,8	64,6	0,8	59,1	0,8	50,7	0,8	46,0	0,8
41	27,4	1,1	66,5	1,2	59,5	1,2	53,8	1,2	45,3	1,2
42	79,0	1,1	61,3	1,0	64,5	1,0	48,8	1,0	50,2	1,0
43	45,0	0,5	53,2	0,5	58,8	0,5	37,0	0,5	43,9	0,5
44	46,5	1,6	61,1	1,6	55,6	1,6	47,8	1,6	43,1	1,6
45	0,5	1,6	11,6	1,6	8,8	1,6	9,9	1,6	7,4	1,6
46	26,4	0,5	27,9	0,5	37,6	0,5	21,2	0,5	27,7	0,5
47	0,0	1,4	1,8	1,4	6,6	1,4	2,6	1,4	4,0	1,4
48	26,4	0,4	26,2	0,4	32,8	0,4	21,2	0,4	27,3	0,4
49	39,1	0,3	38,9	0,3	42,8	0,3	30,7	0,3	35,0	0,3
50	22,7	0,5	22,7	0,5	36,5	0,5	18,9	0,5	29,0	0,5
51	0,4	1,2	3,3	1,2	2,5	1,2	3,7	1,2	2,4	1,2
52	2,3	1,2	10,4	1,2	9,5	1,2	9,6	1,2	7,5	1,2
53	0,0	1,7	3,9	1,7	9,3	1,7	1,7	1,7	4,4	1,7
54	4,2	0,4	15,9	0,4	21,8	0,4	4,0	0,4	14,2	0,4
55	36,1	0,8	43,9	0,8	39,0	0,8	31,8	0,8	27,9	0,8
56	99,0	0,6	58,5	0,5	67,9	0,5	52,4	0,5	53,9	0,5
57	57,3	0,7	25,2	0,7	29,8	0,7	24,4	0,7	30,0	0,7
58	128,8	0,8	84,6	0,5	74,4	0,5	84,3	0,5	69,1	0,5
59	48,7	0,6	47,4	0,6	49,3	0,6	39,5	0,6	39,9	0,6
60	55,1	0,8	36,5	0,8	25,6	0,8	38,0	0,8	22,7	0,8
61	120,8	1,1	92,9	0,8	96,9	0,8	83,3	0,7	83,3	0,7
62	4,8	1,0	4,8	1,0	9,4	1,0	5,7	1,0	9,5	1,0
63	35,4	0,5	34,3	0,5	37,8	0,5	29,1	0,5	29,1	0,5
64	31,5	0,8	30,3	0,8	42,0	0,8	25,2	0,8	29,7	0,8
65	224,8	4,3	114,3	0,7	119,7	0,8	112,0	0,7	105,5	0,6
66	30,9	0,9	30,6	0,9	34,7	0,9	24,7	0,9	25,7	0,9
67	98,8	0,9	64,2	0,7	66,6	0,7	57,2	0,7	61,0	0,7
68	137,9	1,2	99,0	0,7	96,7	0,7	91,6	0,7	89,6	0,7
69	103,1	0,8	77,4	0,7	67,1	0,6	64,3	0,6	58,0	0,6
70	72,9	1,1	41,9	1,0	42,3	1,0	36,0	1,0	40,3	1,0
71	25,2	0,9	25,2	0,9	27,5	0,9	21,1	0,9	19,7	0,9
72	0,6	1,5	0,6	1,5	9,4	1,5	1,1	1,5	2,0	1,5
73	48,0	1,3	39,0	1,3	48,3	1,3	32,8	1,3	42,3	1,3
74	32,0	1,2	27,2	1,2	24,7	1,2	26,5	1,2	21,9	1,2
75	4,2	0,7	2,8	0,7	3,5	0,7	4,4	0,7	4,1	0,7
76	4,2	1,5	4,2	1,5	9,7	1,5	5,2	1,5	8,5	1,5
77	95,0	1,4	69,3	1,1	68,8	1,1	56,8	1,1	52,2	1,1

## 5 CONCLUSÃO

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida com o objetivo de se estudar, através de diferentes métodos de atribuição de tráfego, o tráfego rodoviário presente na rede rodoviária da cidade de Coimbra. Como já foi referido anteriormente, o método que maior destaque apresenta é o método de equilíbrio estocástico, visto que é um método mais recente e que considera a variabilidade de comportamentos dos utentes que circulam na rede.

Primeiramente fez-se uma introdução do tema onde se apresentou de uma forma bastante simples os conceitos base que iriam ser discutidos e desenvolvidos ao longo do presente trabalho, juntamente com a estrutura do mesmo.

De seguida foi feita a revisão de literatura, sendo que esta se baseou de uma forma geral na escolha de percursos, no modelo clássico de transportes e posteriormente, de uma forma mais detalhada, nos diferentes métodos de atribuição de tráfego. Neste capítulo foram apresentados os principais métodos de atribuição de tráfego, uns com maior destaque que outros. Estes métodos foram apresentados com o auxílio de estudos realizados no passado, onde é exposto o ano em que foram descobertos, exemplos de aplicação e a evolução dos mesmos ao longo dos anos.

Após a realização do estado de arte pode-se dizer que este tema tem vindo a ser estudado há bastante tempo, visto que existem inúmeros estudos e trabalhos acerca da atribuição de tráfego e também tem vindo a evoluir e a apresentar cada vez melhores resultados. Isto acontece devido ao facto de o tráfego em redes rodoviárias ter vindo a aumentar e ser cada vez mais necessário um estudo prévio de forma a maximizar o potencial da rede e evitar assim o congestionamento das vias.

Posteriormente, no terceiro capítulo tem-se a metodologia onde se aplicaram alguns dos métodos de atribuição de tráfego apresentados na revisão da bibliografia. Primeiramente foi criada uma rede rodoviária bastante simples de forma a ser possível observarem-se os resultados obtidos através dos diferentes métodos e ser assim possível compará-los facilmente. Os métodos utilizados foram o método do tudo ou nada, o método incremental, o método iterativo e o método de equilíbrio estocástico. Neste terceiro capítulo estes foram desenvolvidos de uma forma mais pormenorizada, visto que estes foram os selecionados para serem aplicados na rede rodoviária criada.



Ainda na metodologia fez-se uma simulação onde se introduziram transportes públicos na rede exemplo, mais propriamente autocarros. Nesta última simulação, com a introdução de autocarros, apenas o método iterativo foi aplicado.

É importante referir que na rede rodoviária apresentada na metodologia existe um nó auxiliar que não possui origens nem destinos. Tendo isto em consideração, apenas o método de equilíbrio estocástico apresentou tráfego a circular nos eixos que ligam esse mesmo ponto auxiliar, ou seja, com a introdução da imprevisibilidade dos condutores, esses passaram a circular por essas vias sendo esse o melhor percurso ou não.

No quarto capítulo – Estudo de Caso – foram aplicados apenas três métodos de atribuição de tráfego: método do tudo ou nada, método iterativo e método de equilíbrio estocástico. Aqui as simulações já são feitas tem em conta uma rede real, sendo esta a rede rodoviária da cidade de Coimbra. No início deste capítulo fez-se uma breve introdução da cidade de Coimbra com a apresentação de alguns detalhes importantes para o presente trabalho. Foram também apresentados os dados utilizados para esta fase, tais como a matriz OD e um ficheiro onde se podiam visualizar todos os detalhes acerca dos eixos da rede rodoviária de Coimbra.

Aplicados os três métodos distintos e observando-se os resultados achados através de cada um deles é possível compará-los. Ainda neste capítulo foi realizada uma simulação, à semelhança da que foi feita na metodologia, onde os transportes públicos foram introduzidos na rede.

No final do quarto capítulo tem-se dois quadros que resumem muito bem e de uma forma bastante simples de se analisar todos os métodos de atribuição de tráfego utilizadas em todos os eixos da rede rodoviária de Coimbra.

Todos os estudos e trabalhos existentes mostram uma variedade bastante diversificada das metodologias adotadas no que diz respeito à escolha de percursos e à atribuição de tráfego. No entanto, existe ainda muita falta de consenso e muito trabalho para se continuar a fazer e desenvolver, tanto na teoria como na prática. Nos dias de hoje é importante elevar esta temática do comportamento dos utentes, de forma a que mais estudos e trabalhos sejam apresentados e assim se possa evoluir neste campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akgün, V., Erkut, E., & Batta, R. (2000). "On finding dissimilar paths." *European Journal of Operational Research*, 121(2), 232-246.
- Ben-Akiva, M., Bergman, M. J., Daly, A. J., & Ramaswamy, R. (1984). "Modeling inter-urban route choice behaviour." In *Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (pp. 299-330). Utrecht, The Netherlands: VNU Science Press.
- Bovy, P. H. (2009). "On modelling route choice sets in transportation networks: a synthesis". *Transport reviews*, 29(1), 43-68.
- Cascetta, E., & Nguyen, S. (1988). "A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts." *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(6), 437-455.
- Daganzo, C. F., & Sheffi, Y. (1977). "On stochastic models of traffic assignment." *Transportation science*, 11(3), 253-274.
- Deng, Y., Chen, Y., Zhang, Y., & Mahadevan, S. (2012). "Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment." *Applied Soft Computing*, 12(3), 1231-1237.
- Ferland, J. A., Florian, M., & Achim, C. (1975). "On incremental methods for traffic assignment." *Transportation Research*, 9(4), 237-239.
- Gupta, S., I. (2010). "Stochastic User Equilibrium."
- Hazelton, M. L. (1998). "Some remarks on stochastic user equilibrium". *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(2), 101-108.
- Liu, H. X., He, X., & He, B. (2009). "Method of successive weighted averages (MSWA) and self-regulated averaging schemes for solving stochastic user equilibrium problem." *Networks and Spatial Economics*, 9(4), 485-503.

Trip Generation Manual (2012). “Bureau of public roads.” *US Department of Commerce*.

Ortúzar, J. & L. Willumsen (2011), “*Modelling Transport*”, Wiley, Chichester, 2011

Outram, V. E., & Thompson, E. (1978). “Driver's perceived cost in route choice.” In *Proceedings-PTRC Annual Meeting, London* (pp. 226-257).

Patriksson, M. (2015). “*The traffic assignment problem: models and methods*.” Courier Dover Publications.

Prato, C. G. (2009). “Route choice modeling: past, present and future research directions.” *Journal of choice modelling*, 2(1), 65-100.

Rasouli, S., & Timmermans, H. (2012). “Uncertainty in travel demand forecasting models: literature review and research agenda.” *Transportation letters*, 4(1), 55-73.

Sharma, H. K., Swami, M., & Swami, B. L. (2012). “Speed-flow analysis for interrupted oversaturated traffic flow with heterogeneous structure for urban roads.” *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2(2), 142-152.

Sheffi, Y. (1985). “Urban transportation network.” *Pretince Hall*, 4.

Vrtic, M., & Axhausen, K. W. (2002). “A route choice model of regional-and long distance public transport trips.” In *Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Wardrop, J. G. (1952). “ROAD PAPER. SOME THEORETICAL ASPECTS OF ROAD TRAFFIC RESEARCH.” *Proceedings of the institution of civil engineers*, 1(3), 325-362.

Ying, L., Shakkottai, S., Reddy, A., & Liu, S. (2011). “On combining shortest-path and back-pressure routing over multihop wireless networks.” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 19(3), 841-854.

Zeferino, J. (2016) “Apontamentos de Planeamento de Transportes”, Departamento de Engenharia Civil, FCTUC, Coimbra, Portugal

ANEXO A

Quadro A.1 – Matriz origem - destino da cidade de Coimbra

ID	Nome	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	Total
1	Alta / Praça da República	5	97	16	25	2	4	10	3	11	43	12	17	13	60	87	30	66	46	14	23	31	51	17	102	5	23	1	1	4	814
2	Fernão Magalhães	87	17	1	12	36	67	51	18	12	49	13	19	14	68	93	41	173	91	12	38	49	111	76	341	10	22	19	17	67	1623
3	Emídio Navarro	18	10	0	7	2	14	18	12	4	16	4	6	5	21	31	2	34	34	0	6	14	15	18	88	10	0	4	3	14	407
4	Margem Esquerda	15	4	3	4	3	21	2	6	2	8	2	3	2	11	17	22	93	2	11	7	9	57	22	55	15	25	6	5	25	457
5	Conchada	9	80	10	10	0	0	4	8	8	32	9	12	9	44	35	12	35	51	11	9	22	17	20	78	10	26	27	31	8	622
6	Celas (Cruz)	8	97	21	19	0	0	2	4	11	46	13	18	14	64	85	26	88	21	5	40	41	44	33	122	10	27	33	42	9	939
7	Hospitais	4	39	8	2	0	6	2	16	4	17	5	7	5	23	32	45	65	37	8	31	37	28	27	157	0	32	2	1	5	644
8	Av.Dias da Silva	24	137	31	31	5	8	18	0	15	60	16	23	18	83	107	19	95	15	13	33	36	55	26	127	5	31	2	2	8	1041
9	Quinta da Maia	40	31	11	4	3	14	22	16	3	13	4	5	4	18	25	8	19	7	2	8	14	15	9	31	5	41	4	3	13	392
10	Solum (centro)	153	122	43	15	14	53	84	63	12	50	14	20	15	69	98	31	72	27	10	31	55	56	34	122	5	23	15	13	49	1368
11	Calhabé	42	33	12	4	4	15	23	17	3	14	4	5	4	19	27	9	20	7	3	8	15	15	9	33	5	22	4	4	15	394
12	Rua do Brasil	60	47	17	6	5	21	33	24	5	20	5	8	6	27	38	12	28	11	4	12	21	22	13	47	10	27	6	5	21	560
13	Casa Branca	45	36	13	4	4	16	25	18	4	15	4	6	4	20	29	9	21	8	3	9	16	16	10	36	15	26	4	4	16	435
14	Bairro N.Matos/Arregaça	211	168	60	21	19	74	116	87	17	69	19	27	20	96	136	43	99	37	13	42	76	78	47	168	15	32	21	18	74	1904
15	V.Flores / Boavista	138	155	81	24	13	58	86	63	22	89	24	35	26	123	6	50	93	24	14	46	128	94	29	160	15	10	17	14	53	1689
16	Sta.Clara / Esp.º Santo	92	186	23	74	19	76	59	28	12	50	14	19	15	69	85	14	76	33	11	24	42	41	30	167	15	32	22	19	76	1417
17	S. Martinho	198	389	43	99	32	126	243	55	17	69	19	27	20	96	121	48	50	74	10	57	35	22	25	339	20	12	36	32	140	2452
18	Estação / M.Formoso / Ingote	138	192	20	22	50	111	94	44	9	37	10	14	11	51	69	62	93	12	2	18	18	70	48	55	15	12	32	28	111	1446
19	Lordemão / R.Nova	28	77	11	14	13	28	31	18	5	20	6	8	6	28	19	22	17	6	0	18	2	9	9	11	15	26	8	7	28	488
20	Encosta Malheiros/ Dianteiro	179	153	39	18	29	98	167	93	22	91	25	36	27	126	128	35	82	28	22	57	56	37	39	132	10	42	28	24	98	1918
21	Ceira / C.Viegas / Almalaguês	172	298	50	64	15	95	200	63	38	155	42	60	45	214	265	57	122	45	7	47	13	38	41	189	5	22	27	24	95	2507
22	Antanhol / Cernache	240	393	33	108	18	124	253	72	21	86	23	33	25	118	201	43	67	74	14	71	40	7	29	473	15	23	36	31	124	2796
23	Geria / Anobrinha	143	330	34	73	30	117	186	66	12	47	13	18	14	65	86	65	74	62	9	22	39	41	3	54	15	23	34	29	117	1819
24	Adémia / Souselas / Botão	379	856	90	118	81	301	597	144	34	138	38	54	40	190	285	172	529	44	1	79	105	290	48	75	4	22	86	75	301	5174
25	Fórum	4	7	7	9	4	7	0	5	5	3	3	7	12	6	6	11	14	13	9	7	3	9	5	4	2	7	11	9	7	196
26	Pólo 2	7	8	0	5	5	4	5	6	8	9	11	6	4	11	9	10	10	2	0	5	9	6	7	2	9	10	6	9	5	187
27	Quinta da Portela	2	26	15	19	4	5	3	4	6	24	7	10	8	37	26	38	70	26	5	51	48	38	26	25	25	34	8	16	49	652
28	Elísio de Moura	2	31	4	6	7	7	2	8	4	20	9	6	11	34	24	28	64	50	19	42	31	63	54	76	15	13	12	15	27	683
29	Alto S. João	4	67	14	20	8	9	5	8	13	49	15	21	16	74	53	76	140	111	28	98	95	124	117	301	20	18	45	40	14	1598
		2443	4083	706	834	421	1477	2338	965	340	1338	381	530	412	1865	2223	1039	2408	995	257	938	1096	1466	872	3569	320	663	555	523	1568	36623

Quadro A.2 – Informações sobre os eixos da rede rodoviária da cidade de Coimbra

ID	Nome	De	Para	Distância	Velocidade	Capacidade	Sentidos	Vias	Autocarros
1	Entrada Taveiro	22	25	2,072	90	1900	2	2	11
2	IC2	25	31	2,161	90	1900	2	2	0
3	IC2	31	21	1,751	90	1900	2	2	0
4	Entrada IC2	21	36	1,925	90	1900	2	2	3
5	P. Europa-Recinto	36	4	1,352	50	1900	2	2	1
6	Santa clara-pt.pequenitos	4	16	0,618	50	1900	2	1	12
7	Santa clara-ic2	16	31	1,015	50	1900	2	1	12
8	fórum-pt.pequenitos	4	25	1,546	50	1900	2	2	16
9	P. açude	25	34	0,856	90	1900	2	2	11
10	P. açude-coimbra b	34	43	0,715	50	1900	2	1	17
11	Coimbra b-geria	43	23	0,597	50	1900	2	1	17
12	Ingote-IC2 N	24	18	1,061	50	1900	2	1	5
13	Ingote-Coimbra b	18	34	1,569	50	1900	2	1	7
14	Coimbra b-fucoli	34	44	0,888	90	1900	2	2	1
15	IC2 Norte	34	24	2,21	90	1900	2	2	1
16	saída norte	24	43	1,663	50	1900	2	1	1
17	Ingote-fucoli	44	18	0,915	50	1900	2	1	0
18	fernão magalhães	34	2	0,677	50	1900	2	2	24
19	fernão magalhães	2	37	0,77	50	1900	2	2	42
20	portagem-parque verde	3	37	0,436	50	1900	2	2	27
21	parque verde-rua brasil	3	41	0,652	50	1900	2	2	27
22	rua brasil-ponte europa	41	35	0,764	50	1900	2	2	9
23	ponte europa	35	36	0,938	90	1900	2	2	1
24	ponte europa-pólo 2	35	26	0,868	90	1900	2	2	10
25	pólo 2-quinta da portela	26	27	0,928	90	1900	2	2	2
26	quinta portela-saída sul	27	45	0,754	90	1900	2	2	0
27	entrada Sul	45	20	0,387	90	1900	2	2	2
28	pólo2-vale das flores	26	15	0,979	50	1900	2	1	6
29	quinta da portela-alto s.joão	45	29	0,876	90	1900	2	2	4
30	vale das flores-alto s.joão	29	15	0,904	50	1900	2	2	9
31	ponte europa-vale flores	15	35	0,741	50	1900	2	2	20
32	alto s.joão-rot. casa branca	29	33	0,721	90	1900	2	2	4
33	rot.casa branca-casa branca	33	13	0,425	50	1900	2	1	9
34	casa branca-alto s.joão	13	29	0,764	50	1900	2	1	12
35	vale flores-bairro	14	15	0,391	50	1900	2	1	21
36	bairro-ponte europa	35	14	0,896	50	1900	2	1	9
37	ponte santa clara	4	37	0,616	50	1900	2	2	15
38	fucoli-lordemão	44	19	2,258	50	1900	2	1	9
39	lordemão-circular ext	19	42	1,373	50	1900	2	1	3
40	CExt E.M.	42	28	1,203	90	1900	2	2	9
41	28-17	28	17	0,955	50	1900	2	1	6
42	s.martinho-circular ext	17	32	0,8	50	1900	2	1	3
43	Circ. Externa	32	33	0,799	90	1900	2	2	10
44	CExt Fuc-E.M.	44	42	2,394	90	1900	2	2	6
45	Cint elisio moura	30	28	1,338	50	1900	2	2	12
46	HUC	44	46	0,789	90	1900	2	2	3
47	HUC	46	30	1,129	50	1900	2	2	12
48	HUC-circular ext	46	7	0,628	90	1900	2	2	15
49	HUC-celas	7	6	0,522	90	1900	2	2	15
50	celas-dias da silva	6	8	0,381	50	1900	2	1	9
51	av. Dias da silva	8	30	1,02	50	1900	2	1	6
52	celas-circ. int	30	6	0,968	50	1900	2	1	9
53	Cint quinta da maia	30	9	1,402	50	1900	2	2	3
55	CExt quinta da maia	9	32	0,549	90	1900	2	2	6
54	CExt elisio moura	32	28	1,196	90	1900	2	2	6
56	solum-circular ext	10	32	0,394	50	1900	2	1	9
57	solum-calhabé	10	11	0,584	50	1900	2	1	12
58	calhabé-rua brasil	11	40	0,357	50	1900	2	1	12
59	rua brasil-solum	40	10	0,464	50	1900	2	1	14
60	rua brasil-casa branca	40	13	0,637	50	1900	2	1	13
61	rua brasil-bairro	40	14	0,51	50	1900	2	1	16
62	bairro-casa branca	14	13	0,8	50	1900	2	1	10
63	rua brasil	12	41	0,423	50	1900	2	1	12
64	rua brasil	12	40	0,642	50	1900	2	1	12
65	Calhabé-p.saudade	39	11	0,374	50	1900	2	1	3
66	p.saudade-rua brasil	41	39	0,739	50	1900	2	1	7
67	p.saudade-praça	39	1	0,567	50	1900	2	1	15
68	praça-sá da bandeira	1	38	0,461	50	1900	2	1	39
69	sá da bandeira-conchada	38	5	0,5	50	1900	2	1	10
70	f.magalhães-sá da bandeira	2	38	0,803	50	1900	2	1	20
71	praça-celas	1	6	0,75	50	1900	2	1	10
72	celas-conchada	6	5	1,272	50	1900	2	1	3
74	p.saudade-celas	39	6	1,062	50	1900	2	1	15
73	p.saudade-dias da silva	39	8	1,022	50	1900	2	1	12
76	quinta da maia-solum	10	9	0,624	50	1900	2	1	6
75	quinta da maia-p.saudade	9	39	1,259	50	1900	2	1	10
77	conchada-coimbra b	5	34	0,886	50	1900	2	1	3

## ANEXO B

Figura B.1 – Número de autocarros em cada eixo da rede rodoviária de Coimbra

