

# **Projeto topológico de uma rede rodoviária**

**António Francisco Martins Ribas**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Informática, Área de Especialização em  
Sistemas Gráficos e Multimédia**

**Orientador: Doutor João Paulo Pereira**

**Coorientador: Doutor Miguel Leitão**

**Coorientador: Doutor Carlos Campos**

**Júri:**

Presidente:

Doutora Maria De Fátima Coutinho Rodrigues

Vogais:

Doutora Ana Maria Dias Madureira Pereira

Doutor João Paulo Jorge Pereira

Doutor João Miguel Queirós Magno Leitão

Doutor Carlos José Ribeiro Campos

Porto, Outubro de 2014



# Resumo

Uma determinada área geográfica pode ser descrita pela localização e características dos seus aglomerados populacionais, sendo normalmente interligados através de uma rede rodoviária que pode ser estruturada em três camadas: rede de autoestradas, rede de itinerários principais e rede de estradas secundárias.

A geração de uma rede rodoviária virtual para simular o mundo real é uma tarefa demorada e dispendiosa se não se fizer uso de técnicas de modelação automáticas.

Este projeto tem como objetivo conceber metodologias de geração automatizada de protótipos de ambiente geográficos compostos por aglomerados populacionais e respetivas interligações.

O trabalho aqui apresentado pretende permitir a criação de mapas topológicos de estradas em duas dimensões, de uma região ou país, que possam servir como definição de entrada para aplicações de modelação de ambientes virtuais.

O protótipo implementado recebe coordenadas de localização de cidades e o respetivo número de habitantes, guardadas em ficheiro e gera uma rede rodoviária ligando os locais entre si. Os parâmetros de configuração são reduzidos e o algoritmo gera a rede de forma autónoma.

O utilizador poderá optar por um dos quatro métodos de ordenação implementados, para gerar uma rede rodoviária: ordem crescente de população, ordem crescente de trânsito, ordem decrescente de população ou ordem decrescente de trânsito. No final, é calculado o custo da rede rodoviária, que depende do método de ordenação bem como dos dados e parâmetros de cálculo usados. Este custo auxilia o utilizador a validar ou a rejeitar a rede gerada, sendo que essa rede poderá ser exportada para ficheiro.

O utilizador poderá assim gerar várias redes alterando parâmetros de entrada de forma a ser criada uma rede que vá de encontro às suas expectativas, poupando assim tempo, dado que não necessita de a simular virtualmente.

**Palavras-chave:** Área Geográfica, Aglomerados Populacionais, Rede Rodoviária, Geração Automática de Redes



# Abstract

A geographic area can be described by the location and characteristics of their settlements, being normally interconnected through a road network that can be structured in three layers: motorway network, network of main roads and secondary roads network.

The generation of a virtual road network to simulate the real world, is a time consuming and expensive task if aren't used automatic modelling techniques.

This project aims to develop methodologies for a automated generation of a prototype of geographic environment composed by population clusters and their respective interconnections.

The work presented here is intended to allow the creation of topological maps of roads, in two dimensions, of a region or country, that can serve as input for modelling definition in virtual environments applications.

The implemented prototype receives location coordinates of cities and the respective number of population, stored on file, and generates a road network linking the sites together. The configuration parameters are reduced and the algorithm generates the network autonomously.

The user may choose one of four methods implemented, to generate a road network: ascending order of population, ascending order of traffic, descending order of population or descending order of traffic. In the end is estimated the cost of the road network, which depends on the sorting method as well as the data and parameters calculation used. This cost helps the user to validate or reject the generated network, and this network can be exported to a file.

The user can generate several networks by changing the input parameters to form a network that will meet his expectations, saving time since it does not need to simulate it virtually.

**Keywords:** Geographical Area, Settlements, Road Network, Automatic Road



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	1
1.2	Motivação .....	1
1.3	Estrutura do relatório .....	2
<b>2</b>	<b>Estado da arte</b> .....	<b>3</b>
2.1	Evolução do Plano Rodoviário Nacional (PRN).....	3
2.2	Teoria dos grafos .....	5
2.3	Algoritmo de Kruskal.....	6
2.4	Algoritmo de Dijkstra .....	8
2.5	OpenGL.....	9
2.6	Geração automática de estradas .....	9
2.7	Sumário .....	11
<b>3</b>	<b>Protótipo desenvolvido</b> .....	<b>13</b>
3.1	Nós reais .....	13
3.2	Trânsito .....	14
3.3	Distância entre nós.....	15
3.4	Nós de interligação.....	16
3.5	Implementação preliminar.....	17
3.6	Implementação do algoritmo.....	19
3.6.1	Algoritmo .....	21
3.6.2	Cálculo da rede de autoestradas .....	22
3.6.3	Cálculo da rede de itinerários principais .....	30
3.6.4	Cálculo da rede de estradas secundárias .....	34
3.6.5	Avaliação da rede obtida .....	38
3.7	Sumário .....	38
<b>4</b>	<b>Interface com o utilizador</b> .....	<b>39</b>
4.1	Coordenadas geográficas para cartesianas .....	39
4.2	Interface .....	39
4.3	Sumário .....	47
<b>5</b>	<b>Análise dos resultados obtidos</b> .....	<b>49</b>
5.1	Parâmetros .....	49
5.2	Comparação dos resultados obtidos.....	50

5.3	Comparação de tempo de geração de uma rede .....	55
5.4	Análise da rede gerada .....	55
5.5	Sumário.....	57
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro .....</b>	<b>59</b>
6.1	Conclusões .....	59
6.2	Trabalho futuro .....	60

# Lista de Figuras

Figura 1 – Projeto de rede de estradas de 1843 .....	4
Figura 2 – Grafo antes de usar Kruskal .....	7
Figura 3 – Grafo depois de usar Kruskal.....	8
Figura 4 – Coordenadas geográficas da Câmara Municipal do Porto .....	15
Figura 5 – Coordenadas geográficas da Câmara Municipal de Lisboa .....	16
Figura 6 – Nó de interligação .....	17
Figura 7 – Solução inicial usando o algoritmo de Kruskal .....	18
Figura 8 – Parâmetros de cálculo .....	20
Figura 9 – Fluxograma da "rede de autoestradas" .....	23
Figura 10 – Capitais de distrito de Portugal Continental .....	24
Figura 11 – Nós "cidade" .....	25
Figura 12 – Nós "cidade" ligados a todos os nós "cidade" .....	26
Figura 13 – Rede de autoestradas (sem nós de interligação) .....	27
Figura 14 – Rede de autoestradas (com nós de interligação).....	28
Figura 15 – Resultado final da rede de autoestradas .....	29
Figura 16 – Exemplo de uma possível ocorrência durante a "rede de itinerários principais" ...	30
Figura 17 – Fluxograma da rede de itinerários principais.....	31
Figura 18 – Rede de autoestradas com nós "vila" .....	32
Figura 19 – Rede de autoestradas e de itinerários principais.....	33
Figura 20 – Fluxograma da rede de estradas secundárias .....	35
Figura 21 – Rede de autoestradas e de itinerários principais com nós "aldeia" .....	36
Figura 22 – Resultado de final da análise da rede rodoviária .....	37
Figura 23 – Interface gráfica do protótipo .....	40
Figura 24 – Interface gráfica do protótipo com as "Opções avançadas" visíveis .....	41
Figura 25 – Rede autoestradas.....	43
Figura 26 – Rede itinerários principais.....	44
Figura 27 – Rede estradas secundárias.....	45
Figura 28 – Excerto do ficheiro xml de uma rede gerada .....	46
Figura 29 – Ordem crescente população .....	51
Figura 30 – Ordem decrescente população .....	52
Figura 31 – Ordem crescente trânsito .....	53
Figura 32 – Ordem decrescente trânsito .....	54



# Lista de Tabelas

Tabela 1 – População do distrito do Porto.....	14
Tabela 2 – Tempos médios obtidos .....	55
Tabela 3 – Distâncias da rede de autoestradas gerada versus existente .....	56



# Acrónimos

## Lista de Acrónimos

<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i>
<b>ARB</b>	<i>Architecture Review Board</i>
<b>CopKm</b>	Custo de operação por quilómetro
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estatística
<b>L-system</b>	<i>Lindenmayer system</i>
<b>PRN</b>	Plano Rodoviário Nacional
<b>URL</b>	<i>Uniform Resource Locator</i>
<b>XML</b>	<i>eXtensible Markup Language</i>



# 1 Introdução

O presente trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito da dissertação de Mestrado em Engenharia Informática em Sistemas Gráficos e Multimédia do Instituto Superior de Engenharia do Porto, enquadrando-se no "Projeto topológico de uma rede rodoviária", que visa gerar mapas rodoviários para serem usados em outras aplicações.

Uma rede rodoviária, no mundo real, serve para ligar vários locais entre si, de forma a permitir a mobilidade de pessoas e de bens. No mundo virtual, poderá ser usada tanto para jogos de lazer, assim como para simuladores de condução.

## 1.1 Objetivos

Esta tese tem como objetivo conceber uma metodologia e implementar um protótipo que gere uma rede rodoviária, em que os parâmetros de configuração são reduzidos e o algoritmo gera a rede de forma autónoma.

A rede resultante poderá ser exportada sob a forma de um ficheiro, para posteriormente servir como dados de entrada em aplicações de simulação virtual.

## 1.2 Motivação

Esta dissertação, bem como o protótipo desenvolvido, propõe contribuir para a área de desenvolvimento de geração automática de redes rodoviárias, com o intuito de ser um pré-processamento de como diversos locais se ligam entre si.

### **1.3 Estrutura do relatório**

No capítulo 2 é analisado o conceito do que é uma rede e os métodos já existentes para uma geração automática da mesma.

No capítulo 3 é analisada a forma como foi implementado o algoritmo do protótipo desenvolvido.

No capítulo 4 é analisada a forma como o utilizador interage com a interface do programa.

No capítulo 5 são analisados os resultados obtidos.

No capítulo 6 são expostas as conclusões e o trabalho futuro do protótipo desenvolvido.

## **2 Estado da arte**

Neste capítulo é descrito a evolução da rede rodoviária de Portugal Continental, bem como métodos existentes para a geração de redes. São também descritos, sucintamente, vários métodos da teoria dos grafos usados no cálculo de redes.

### **2.1 Evolução do Plano Rodoviário Nacional (PRN)**

As primeiras referências à classificação da rede de estradas datam do século XVII, surgindo, quando foram criadas, um conjunto de ações para melhorar a rede existente.

Em 1843, foi publicado um Decreto-lei com o objetivo de construir uma rede de estradas de Lisboa para as capitais de distrito (Figura 1). A rede rodoviária era classificada em estradas reais e caminhos.

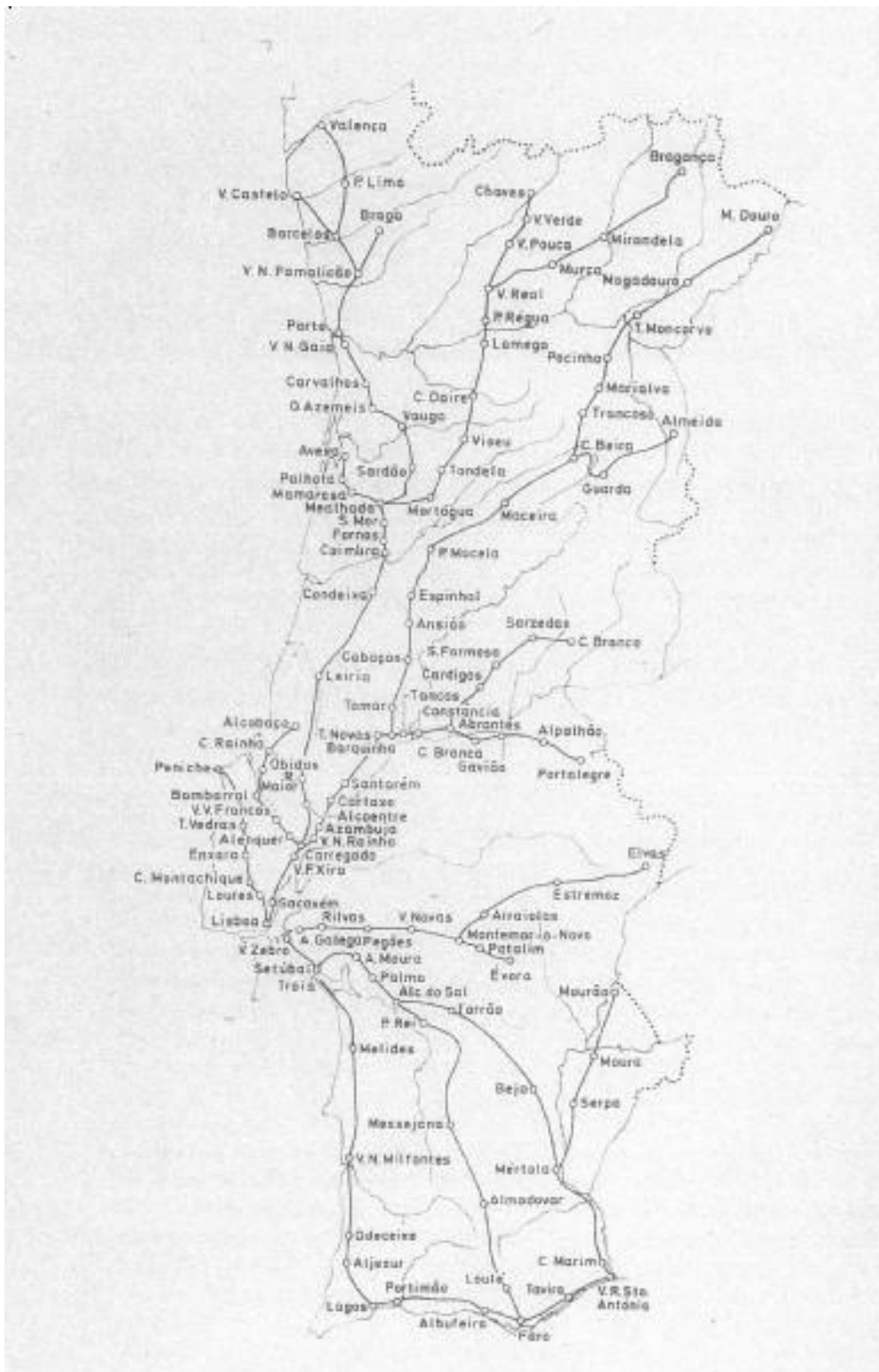


Figura 1 – Projeto de rede de estradas de 1843

Em 1850, a rede viária foi classificada em estradas reais e caminhos, tendo sido criados impostos para a manutenção e ampliação da rede existente.

Em 1862, foi publicado um decreto de lei que criava três grupos de estradas (reais, distritais e municipais) que definia as características e manutenção dessas mesmas estradas.

Em 1910, com a implantação da república, as estradas reais passaram a denominar-se de estradas nacionais.

Em 1928, as estradas nacionais foram classificadas como de 1ª e 2ª classe, ficavam sob a tutela do Estado, enquanto as estradas municipais e caminhos públicos ficavam sob a alçada dos municípios.

Em 1933, a classificação das estradas foi alterada para estradas nacionais de 1ª e 2ª classe, estradas municipais e caminhos vicinais.

Em 1944, foi criada a primeira autoestrada de Portugal, que ligava Lisboa ao Estádio Nacional.

Em 1945, foi publicado o primeiro PRN, que foi o primeiro diploma normativo que estabeleceu regras para a classificação das estradas (1ª, 2ª e 3ª classe), estradas municipais e caminhos públicos, juntamente com as suas características técnicas.

Em 1978, foram iniciados estudos para a revisão do PRN de 1945, cuja conclusão ocorreu em 1985.

O PRN de 1985 criou o conceito de Itinerário principal (IP) e de itinerário complementar (IC), e desclassificou várias estradas nacionais para integrarem a rede municipal.

Em 1998, foi publicado o PRN 2000, que sofreu alterações em 2003 e que ainda hoje se encontra em vigor. [IMTT, 2010].

## **2.2 Teoria dos grafos**

A teoria dos grafos teve início em 1735 com Euler, que provou não ser possível atravessar as sete pontes da cidade de Königsberg sem repetir nenhuma delas.

A teoria dos grafos tem muitas aplicações em diversas áreas nos dias de hoje, dado que um grafo constitui um modelo matemático ideal para o estudo de uma rede (por exemplo uma rede rodoviária).

Um grafo é composto por um conjunto de nós (ou vértices) que se encontram ligados por arestas (ou arcos). [Jean Metz et al., 2007].

É possível verificar um exemplo de um grafo na Figura 2, com cinco nós (A, B, C, D e E) e com pesos associados às ligações (arestas) desses nós.

## 2.3 Algoritmo de Kruskal

O algoritmo de Kruskal é um algoritmo da teoria dos grafos e que foi concebido por Joseph Kruskal, em 1956.

Este algoritmo permite gerar uma árvore geradora mínima, ou seja, ligar todos os nós de um grafo com o valor mínimo de peso das arestas.

O algoritmo de Kruskal consiste no seguinte:

- Não é escolhido uma aresta inicial;
- São selecionados as arestas com menor valor, sucessivamente, até que uma árvore geradora seja obtida.

O algoritmo de Kruskal funciona da seguinte forma:

- Ordena as arestas de forma crescente de peso;
- Seleciona a aresta de menor peso, desde que não se forme um ciclo. Chama-se de ciclo quando um arco começa e termina no mesmo nó;
- Termina quando todos os nós estiverem ligados.

Ao aplicar-se o algoritmo de Kruskal a um grafo obtém-se  $N-1$  ligações, onde "N" é o número de nós existentes no grafo. [Vânia Campos, 1997].

Tomemos o exemplo do grafo representado na Figura 2, com cinco nós (A, B, C, D e E) e com pesos associados às ligações desses nós:

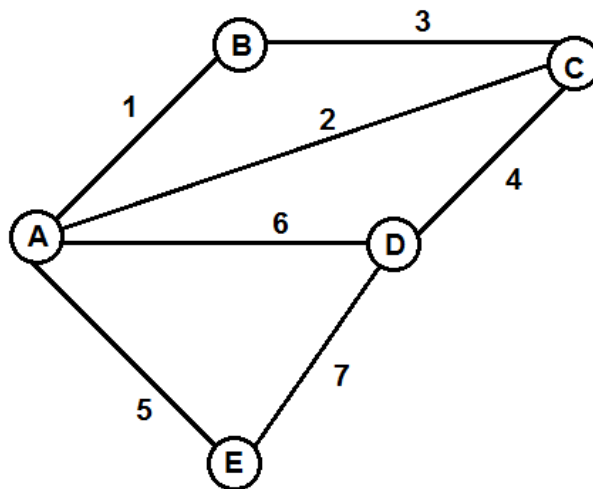


Figura 2 – Grafo antes de usar Kruskal

Aplicando o algoritmo de Kruskal ao grafo da Figura 2, vem:

- Ordenação das arestas de forma crescente de peso nas arestas: A-B, A-C, B-C, C-D, A-E, A-D, D-E;
- Seleciona a aresta de menor peso (desde que não se forme um ciclo):
  - é seleciona a aresta A-B;
  - de seguida é seleciona a aresta A-C;
  - a aresta B-C é rejeitada porque iria formar um ciclo;
  - é selecionada a aresta C-D;
  - é seleciona a aresta A-E e neste momento já temos N-1 ligações com os nós todos ligados.

A Figura 3 é o resultado após se ter aplicado o algoritmo de Kruskal ao grafo da Figura 2.

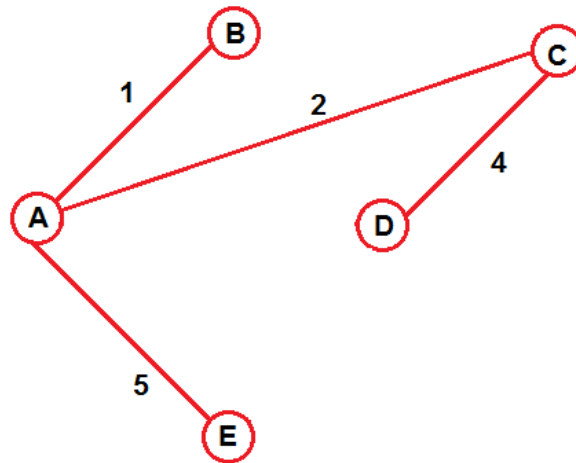


Figura 3 – Grafo depois de usar Kruskal

## 2.4 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra foi concebido por Edsger Dijkstra, em 1956 e publicado em 1959. Este algoritmo é usado para determinar o caminho de custo mínimo entre um nó de origem e um nó de destino de um grafo, com arestas de peso não negativo. Um vértice é considerado fechado quando já se tiver obtido um caminho de custo mínimo do vértice inicial até ele, caso contrário é considerado aberto. [Vânia Campos, 1997].

As regras de implementação deste algoritmo são:

- Seja "S" o conjunto do menor caminho;
- Inicialmente, o conjunto "S" contém apenas o nó de origem;
- A cada passo, é selecionado a partir do conjunto de nós que sobraram, qual o nó mais perto da origem;
- É atualizada, para cada nó que sobrou, a sua distância em relação ao nó de origem;
- Se passando pelo novo nó acrescentado, a distância fica menor, é essa a nova distância que será memorizada.

## 2.5 OpenGL

O OpenGL é uma *Application Programming Interface* (API), ou seja, uma biblioteca de funções que contém código que permite criar imagens, objetos e as operações necessárias para a criação de aplicações gráficas em duas e três dimensões. Usa diversas primitivas de desenho para a construção dos objetos e, embora não tenha nenhuma para desenhar curvas, tal é possível usando linhas ou triângulos.

O *Architecture Review Board* (ARB) foi o conselho formado em 1992 que rege o futuro do OpenGL e que propõe e aprova alterações à sua especificação. Em 2006, o ARB tornou-se o Grupo de Trabalho OpenGL sob a alçada do *Khronos Group*. [URL2].

O OpenGL é independente da plataforma e pode ser implementado em diferentes tipos de *hardware* ou inteiramente em *software*. Além disso, é independente tanto do sistema operativo do computador bem como do ambiente gráfico. [Dave Shreiner et al., 2013].

## 2.6 Geração automática de estradas

O método *Lindenmayer system* (*L-system*) foi desenvolvido em 1968 para descrever o comportamento das células de plantas e do seu crescimento. É possível verificar alguns exemplos do *L-system* em [URL3]. Uma versão, baseada neste método consiste em modelar cidades tendo como dados de entrada imagens de uma dada área. Este algoritmo tem em conta o relevo e os recursos hídricos de forma a dividir o mapa em lotes, para assim criar as estradas bem como os edifícios desse mapa. [Yoav Parish, Pascal Müller, 2001].

Um outro método existente consiste em, dado um ponto inicial e um final, o algoritmo gerar o caminho menos dispendioso, em termos de custo de construção, entre esses dois pontos. Este método tem em conta o relevo do terreno em questão e gera pontes e túneis apenas quando necessário de forma a minimizar os custos de construção dessa estrada. [Eric Galin et al., 2010].

Outro método, implementado por [Eric Galin et al., 2011], consiste em criar uma rede rodoviária de modo hierárquico de forma a ligar várias cidades e vilas entre si. Essa rede é analisada pela seguinte ordem: rede de autoestradas, rede primária e rede secundária. Cada nova rede é ligada à rede anteriormente gerada, tendo também em atenção o relevo do terreno de forma a minimizar os custos de construção.

A geração automática de estradas é também usada em simuladores de condução. O método implementado por [Sarah Ostadabbas et al., 2011] gera estradas com características similares, mas sem que seja possível memorizá-las por parte do utilizador, de forma a avaliá-lo. Esta abordagem cria diferentes tipos de estradas (autoestradas, estradas sinuosas e locais) com diferente número de faixas em cada sentido, mas tendo em conta que as estradas de

montanha têm maior inclinação, são mais acentuadas e têm curvas mais apertadas que as restantes estradas.

Para gerar estradas é também possível fazer uso de agentes (inteligência artificial). De acordo com a empresa IBM, um agente é um *software* que realiza um conjunto de operações por um utilizador ou programa, com algum grau de independência, de forma a fazer recomendações para o utilizador. [URL5]. O método, implementado por [Tobias Haubrich et al., 2014], faz uso de agentes para recolha de informação de várias entidades que povoam um ambiente virtual. A lógica da rede encontra-se em cenas virtuais existentes, que não são visíveis para o utilizador e onde os agentes obtêm informação de forma a ser gerada a rede rodoviária.

Outra abordagem para gerar estradas virtuais, consiste em ter vários veículos a circular nas estradas reais enquanto se recolhe as suas coordenadas geográficas, para posteriormente serem reproduzidas virtualmente. O facto de serem necessárias várias leituras da mesma estrada deve-se à necessidade de reduzir o erro existente nas leituras. Usando este método, a rede gerada é muito similar ao mundo real. [Chen Chen, Yinhang Cheng, 2008].

O método criado por [Guoning Chen et al., 2008] utiliza quatro mapas (hídrico, florestal, relevo e densidade populacional), carregados como imagens, para que seja gerada uma rede rodoviária de uma área urbana, em três dimensões. É também possível o utilizador alterar partes da rede de forma a satisfazer as suas expectativas, sem ter de a gerar novamente.

O algoritmo implementado por [Soon Tee Teoh, 2002] gera uma rede urbana com estradas e edifícios. A rede é subdividida em várias camadas, começando a serem ligados os locais mais importantes da cidade (áreas comerciais, aeroporto, etc.) até se chegar à rede local. Além de ter em atenção a área que um edifício ocupa (no centro da cidade um prédio é maior que na periferia), tem também em atenção a largura da estrada em questão (uma autoestrada é mais larga que uma estrada local).

A abordagem de [Basil Weber et al., 2009], permite simular (em três dimensões) o crescimento de uma determinada rede rodoviária urbana ao longo do tempo. Para tal utiliza:

- um mapa topográfico de uma cidade;
- uma configuração inicial da rede urbana que pode variar desde uma única estrada até uma rede urbana complexa, com um ou mais centros urbanos;
- a percentagem de crescimento da rede rodoviária ao longo do tempo, bem como o seu trânsito;
- dados sobre o terreno (preço e área de construção).

Durante a geração da rede o utilizador tem a possibilidade de alterar os parâmetros de cálculo de forma a poder controlar a simulação de modo interativo.

## 2.7 Sumário

Neste capítulo foi abordado a evolução do PRN português tanto em termos de estradas como das suas classificações.

Foram também expostos dois algoritmos matemáticos pertencentes à teoria dos grafos, um para criar árvores geradoras mínimas e outro para descobrir o caminho mais curto entre dois nós de um grafo.

Abordou-se a API de desenho OpenGL e as suas principais características.

Por último, foram descritos outros algoritmos existentes para a geração automática de estradas. As principais diferenças destes algoritmos para com o método implementado nesta tese consistem no seguinte:

- esta tese faz uma abordagem menos complexa na geração de uma rede rodoviária, dado que só utiliza duas dimensões (planta);
- esta tese é capaz de gerar uma rede rodoviária para uma área extensa, usando poucos parâmetros de entrada.



## 3 Protótipo desenvolvido

Neste capítulo descreve-se a abordagem usada pelo algoritmo para gerar uma rede rodoviária. Expõem-se também as várias fases de cálculo que o algoritmo utiliza para se obter a rede final com a qualidade exigida.

### 3.1 Nós reais

Os nós reais usados foram cidades, vilas ou aldeias de Portugal Continental em que os dados referentes às populações foram obtidos a partir do Censos de 2011 do Instituto Nacional de Estatística (INE).

De salientar que os dados relativos à população de uma cidade capital de distrito, foram apenas os dessa capital e não do distrito em geral. Como é possível verificar na Tabela 1, para a cidade do Porto usaram-se 237 591 habitantes. [INE, 2011].

Além da população, cada nó real é também caracterizado pelas suas coordenadas geográficas, sendo que para a obtenção dessas coordenadas usou-se a aplicação *online Google Maps*. No caso de cidades ou vilas as coordenadas usadas são as da sua Câmara Municipal, enquanto para as aldeias são as da sua Junta de Freguesia.

Tabela 1 – População do distrito do Porto

Zona Geográfica Municípios de residência habitual em 21/03/2011	População residente em 2011	
	Homens e Mulheres	Homens
Grande Porto	1 287 282	610 455
Espinho	31 786	15 112
Gondomar	168 027	81 007
Maia	135 306	64 855
Matosinhos	175 478	83 444
Porto	237 591	108 104
Póvoa de Varzim	63 408	29 958
Valongo	93 858	45 016
Vila do Conde	79 533	38 469
Vila Nova de Gaia	302 295	144 490

O valor da população é usado para calcular o trânsito de uma estrada e para ordenar os nós pela sua população.

### 3.2 Trânsito

Para simular a circulação de pessoas entre nós, foi criada a variável "trânsito" de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{trânsito} = \frac{\text{população nó 0} * \text{população nó 1} * \text{período de análise}}{(\text{distância entre nó 0 e 1})^2}$$

Optou-se por uma estimativa de "trânsito" proporcional à população de cada um dos extremos e inversamente proporcional ao quadrado da distância. O trânsito total é escalado pelo período de análise considerado. O "período de análise" é o período em que se analisa o trânsito da estrada. Esta fórmula surgiu através de um estudo empírico.

Esta variável "trânsito" tem assim um significado diferente do usado no dia-a-dia.

### 3.3 Distância entre nós

Para calcular a distância entre coordenadas geográficas, usou-se a seguinte fórmula, [URL1]:

$$\text{distância (Km)} = \text{ACOS}(\text{SIN}(\text{lat1}) * \text{SIN}(\text{lat2}) + \text{COS}(\text{lat1}) * \text{COS}(\text{lat2}) * \text{COS}(\text{lon2} - \text{lon1})) * 6371$$

onde:

- lat1 e lat2 são as latitudes do nó um e dois em radianos, respetivamente;
- lon1 e lon2 são as longitudes do nó um e dois em radianos, respetivamente;
- 6371 é o raio do planeta Terra em quilómetros.

Dado que esta fórmula tem em conta a curvatura do planeta Terra, é assim possível calcular a distância real entre dois pontos no globo terrestre.

A latitude é a distância de um ponto ao equador e a longitude é a distância de um ponto ao meridiano de Greenwich. [URL6].

Tomemos como exemplo o cálculo da distância, em linha reta, entre a Câmara do Porto, Figura 4, e da Câmara de Lisboa, Figura 5:

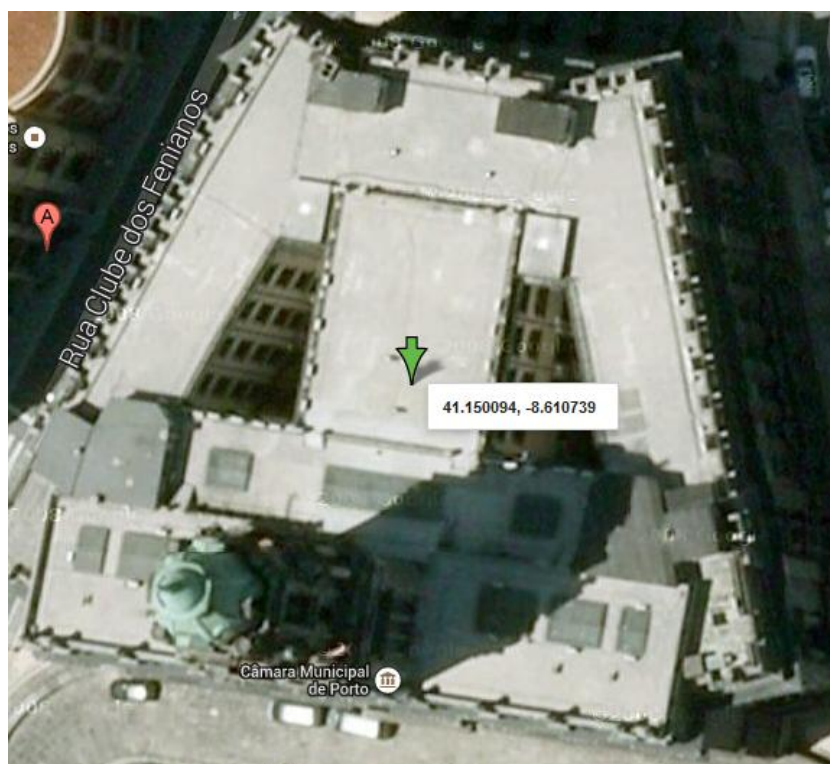


Figura 4 – Coordenadas geográficas da Câmara Municipal do Porto

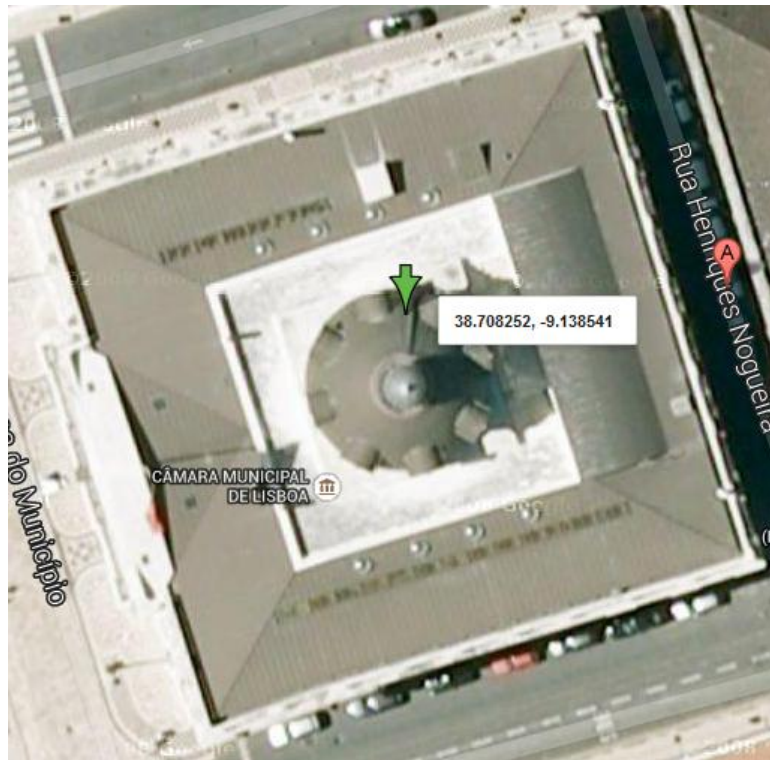


Figura 5 – Coordenadas geográficas da Câmara Municipal de Lisboa

Coordenadas geográficas Câmara do Porto: 41.150094, -8.610739

Coordenadas geográficas Câmara de Lisboa: 38.708252, -9.138541

De salientar que o *Google Maps* mostra as coordenadas na forma "Latitude, Longitude".

Usando a fórmula acima descrita obtém-se a distância em linha reta de, aproximadamente, 275 quilómetros entre a Câmara do Porto e a Câmara de Lisboa.

### 3.4 Nós de interligação

Sempre que se verifica a interceção de estradas são calculados os nós de interligação. Estes nós têm coordenadas geográficas tal como os nós reais, mas a sua população é de zero habitantes. O trânsito nos segmentos que ligam estes nós é igual ao trânsito dos segmentos que lhe deram origem. Tomemos o exemplo da Figura 6, onde os nós "A, B, C, D" são nós reais e o nó "E" é um nó de interligação.

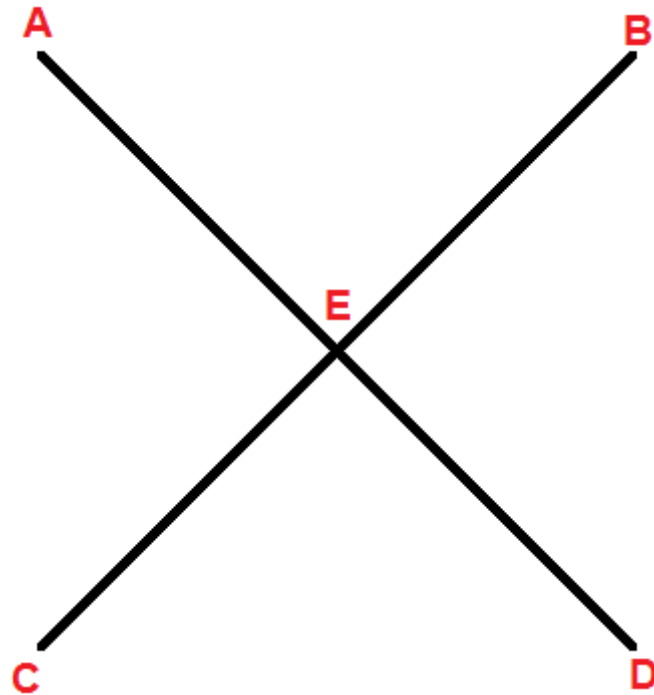


Figura 6 – Nó de interligação

Suponhamos que:

- Trânsito no segmento AD = Trânsito DA = 200;
- Trânsito no segmento BC = Trânsito CB = 300.

O trânsito nos novos segmentos que contêm o nó "E" é definido a partir do trânsito do segmento que lhe deu origem:

- Trânsito no segmento AE = Trânsito EA = Trânsito ED = Trânsito DE = 200;
- Trânsito no segmento BE = Trânsito EB = Trânsito CE = Trânsito EC = 300.

### 3.5 Implementação preliminar

Após análise de como se iria proceder à ligação de vários nós, foi realizada uma pesquisa dos vários métodos existentes, sendo escolhido o algoritmo de Kruskal como uma solução inicial para o problema. Nesta solução inicial foram usados nós fictícios e coordenadas cartesianas. As populações destes nós também eram fictícias.

Inicialmente, foram ligados todos os nós a todos os nós e o peso das arestas ficou associado à distância entre esses nós. Posteriormente, foi aplicado o algoritmo de Kruskal descrito anteriormente na secção 2.3.

Cada nó foi classificado de acordo com a sua população:

- maior ou igual a 20 mil habitantes seria considerado cidade;
- maior ou igual a 3 mil e menor que 20 mil habitantes seria considerado vila;
- menor que 3 mil habitantes seria considerado aldeia.

A Figura 7 exemplifica a solução obtida para um dado conjunto de nós, representados por círculos. Os círculos a preto são cidades, a vermelho vilas, a roxo aldeias e as linhas a azul as estradas.

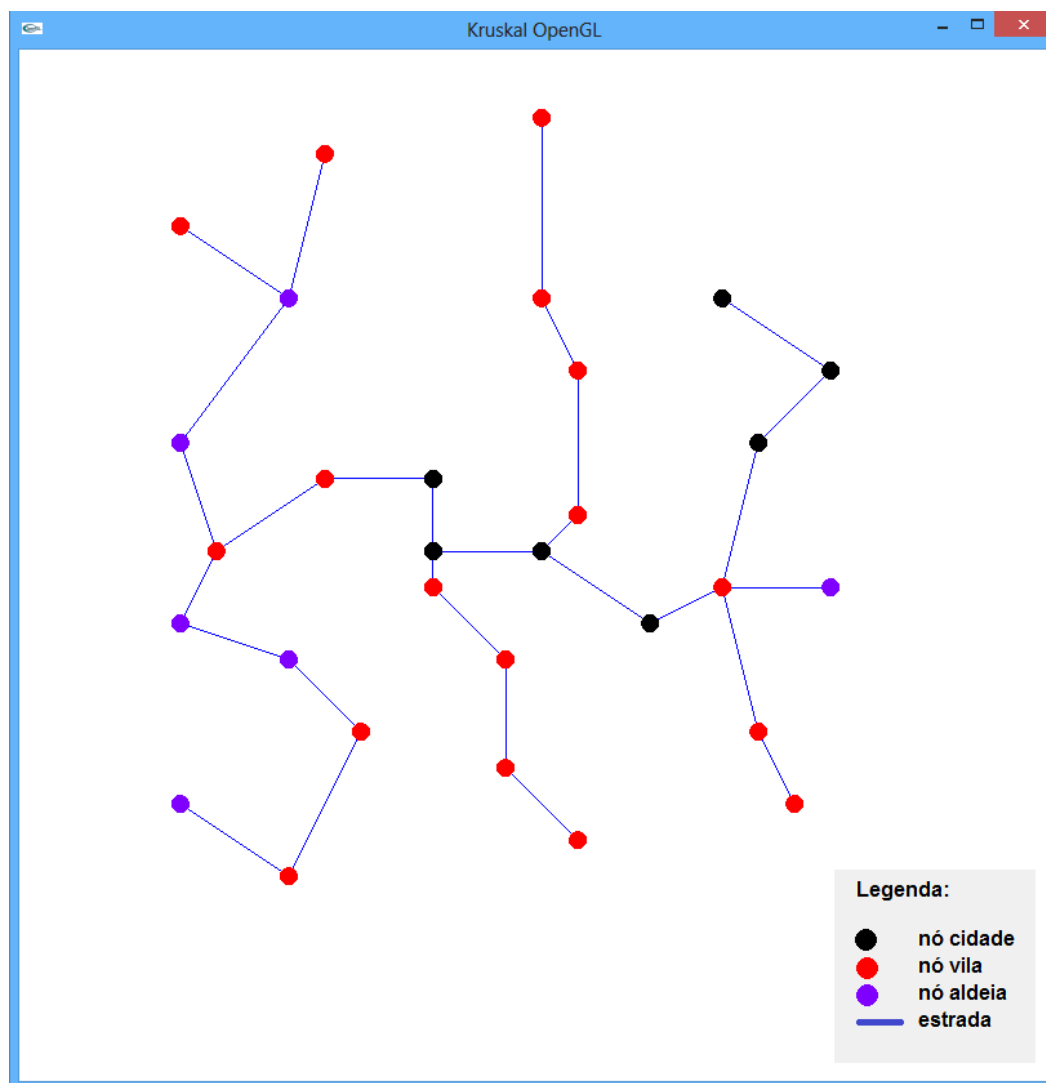


Figura 7 – Solução inicial usando o algoritmo de Kruskal

Após análise do resultado obtido optou-se por desenvolver outra solução, dado que o algoritmo de Kruskal não permite haver ciclos, ou seja, não existe redundância de ligações.

Outro fator que levou à rejeição deste método, reside no facto de que embora o custo de construção seja baixo (dado que se trata de uma árvore geradora mínima), o custo de ir de um nó para outro é muito elevado (não existe redundância de ligações e só existe um caminho de um nó para outro).

### 3.6 Implementação do algoritmo

O algoritmo foi implementado para receber um ficheiro de texto como entrada de dados, que contém as coordenadas geográficas e a população de cada nó.

Após o carregamento do ficheiro, o utilizador poderá definir os seguintes parâmetros de cálculo, Figura 8:

- Definir o número mínimo de habitantes para um nó ser considerado "cidade" e "vila". Os nós "aldeia" são todos cujo número de habitantes é inferior ao valor de "vila" e os nós de interligação têm sempre população de zero, tal como descrito anteriormente;
- Custo de construção por quilómetro de autoestrada, itinerário principal e estrada secundária. Estes valores são usados para calcular se a estrada é mantida ou descartada no processo de otimização da rede, bem como para o custo total da rede;
- Métodos de análise implementados:
  - Ordem crescente de população;
  - Ordem decrescente de população;
  - Ordem crescente de trânsito no segmento;
  - Ordem decrescente de trânsito no segmento;
- Período de análise, é o período temporal em que é contabilizado o trânsito que circula na estrada;
- O número de iterações (uma ou duas);
- Qual o período de análise na segunda iteração (no caso de o utilizador desejar realizar mais que uma iteração);
- O custo de operação por quilómetro, é o custo de cada viajante circular um quilómetro na estrada em questão.

De salientar que o utilizador não é obrigado a definir nenhum dos parâmetros acima descritos, podendo usar os valores por omissão.

No final de a rede ser gerada, é calculado o custo total dessa mesma rede.

Parâmetros de cálculo

População mínima para ser:

Cidade: 20 000

Vila: 3 000

Custo por quilómetro de:

Autoestrada: 5 000 000

Itinerário principal: 2 500 000

Estrada secundária: 250 000

Método de ordenação:

Método a usar:

Trânsito

População

Ordenação:

Crescente

Decrescente

Período de análise: 600

Número de iterações: 2

2º Período de análise: 300

Custo Op Km: 0,2

Figura 8 – Parâmetros de cálculo

### 3.6.1 Algoritmo

Os nós encontram-se ligados entre si, sendo posteriormente analisada se essa ligação é descartada ou mantida. Essa análise é efetuada da seguinte forma:

- Guarda-se a distância, em linha reta, entre os dois nós em questão;
- Remove-se a ligação direta entre os dois nós;
- Usando o algoritmo de Dijkstra, calcula-se a distância entre esses dois nós usando outra estrada;
- Calcula-se o benefício de a estrada em linha reta existir através da seguinte fórmula:  
$$\text{benefício} = \text{trânsito} * (\text{distância usando outra estrada} - \text{distância linha reta}) * \text{CopKm}$$
onde CopKm é o custo de operação por quilómetro;
- Calcula-se o custo de construção da estrada em linha reta:  
$$\text{custo construção} = \text{ligação direta} * \text{preço de construção por quilómetro dessa estrada}$$
- Compara-se o valor do benefício com o valor do custo de construção. Se o benefício for maior que o custo de construção a ligação direta é reposta, caso contrário a remoção torna-se definitiva.

Tal como é possível verificar analisando a fórmula de cálculo do "trânsito" (secção 3.2) e do "benefício", quanto maior o "período de análise" maior o "trânsito" e maior o "benefício" (diretamente proporcionais), o que faz com que mais estradas sejam mantidas. Por este motivo, o utilizador poderá desejar remover algumas das estradas obtidas na primeira iteração, bastando para isso usar uma segunda iteração, com um "período de análise" inferior, fazendo assim com que o custo total da rede também seja menor.

O algoritmo apenas "vê" ligações, pelo que o tipo de estrada só é possível perceber mediante análise dos nós em questão. As ligações "cidade-cidade" são autoestradas, as ligações "vila-cidade" e "vila-vila" são itinerários principais e as ligações "aldeia-cidade", "aldeia-vila" e "aldeia-aldeia" são estradas secundárias. A análise é realizada pela seguinte ordem:

1. Rede de autoestradas, onde são analisadas as ligações "cidade-cidade";
2. Rede de itinerário principal, onde são analisadas as ligações "vila-cidade" e "vila-vila";
3. Rede de estradas secundárias, onde são analisadas as ligações "aldeia-cidade", "aldeia-vila" e "aldeia-aldeia".

Enquanto os nós reais são caracterizados pela população que possuem (se são cidades, vilas ou aldeias), os nós de interligação são caracterizados pela rede em que foram obtidos, dado que a sua população é sempre de zero. Se foram criados na análise da rede de autoestradas ficam como "cidade", se na análise da rede de itinerário principal como "vila" e se na análise da rede de estradas secundárias como "aldeia".

### **3.6.2 Cálculo da rede de autoestradas**

Quando é iniciada a análise da rede de autoestradas, os nós "cidade" são ligados entre si (Figura 12) e posteriormente são ordenados mediante o método de ordenação escolhido, sendo aplicado o algoritmo anteriormente descrito. Após a remoção das ligações que não compensam são calculados os nós de interligação que são caracterizados de acordo com a análise em causa, neste caso "cidade".

No caso de o utilizador ter optado por uma segunda iteração, o "período de análise" é atualizado para o novo valor, e são reanalisadas apenas as ligações da primeira iteração para serem mantidas ou rejeitadas.

No final do cálculo da rede de autoestradas é reposto o valor original do "período de análise" antes de se iniciar a análise da "rede de itinerário principal".

A Figura 9 representa o fluxograma do algoritmo desenvolvido para obter a "rede de autoestradas".

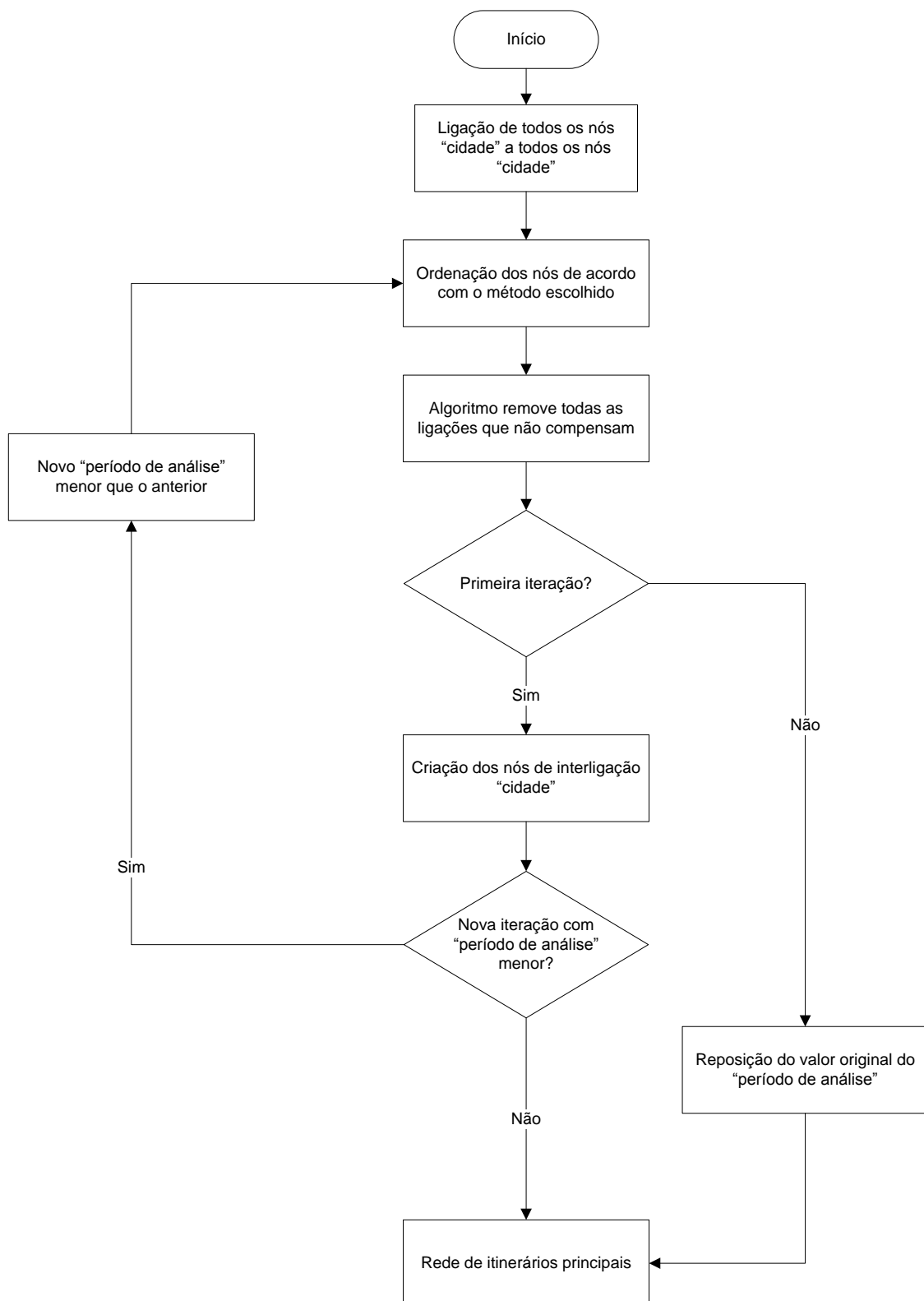


Figura 9 – Fluxograma da "rede de autoestradas"

De seguida, serão exemplificados os vários passos da execução do algoritmo, com os parâmetros da Figura 8.

Neste exemplo, são usadas as 18 capitais de distrito de Portugal Continental (Figura 10), 10 vilas e 5 cidades escolhidas arbitrariamente, de forma a exemplificar-se as várias fases que o algoritmo passa de forma a gerar-se a rede rodoviária.



Figura 10 – Capitais de distrito de Portugal Continental

A Figura 11 representa os nós "cidade", capitais de distrito, que vão ser analisados (círculos a preto).

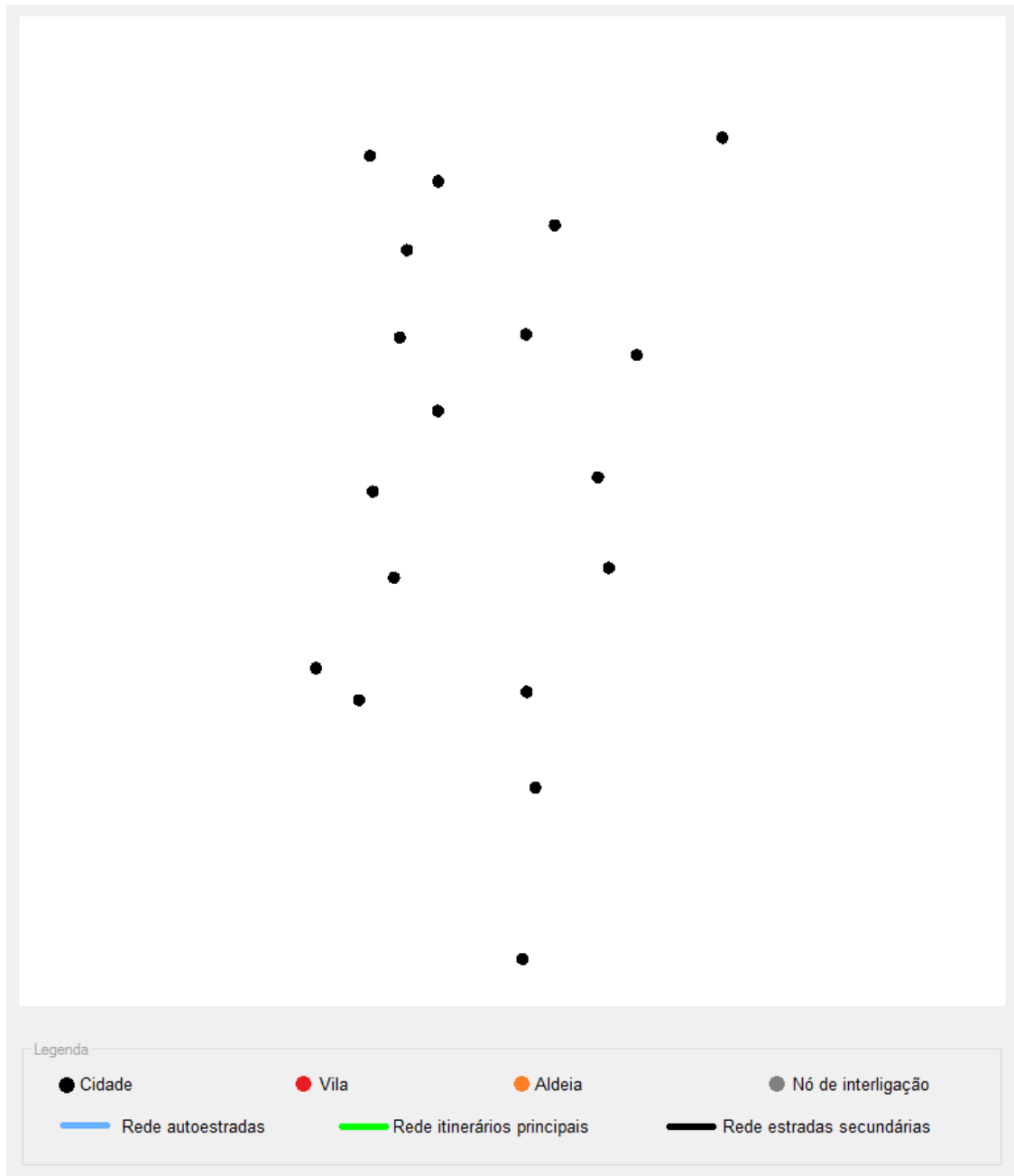


Figura 11 – Nós "cidade"

Tal como anteriormente descrito, o primeiro passo é ligar todos os nós "cidade" a todos os nós "cidade", tal como é possível verificar na Figura 12. Os círculos a preto representam os nós cidade e as linhas a azul representam as autoestradas.

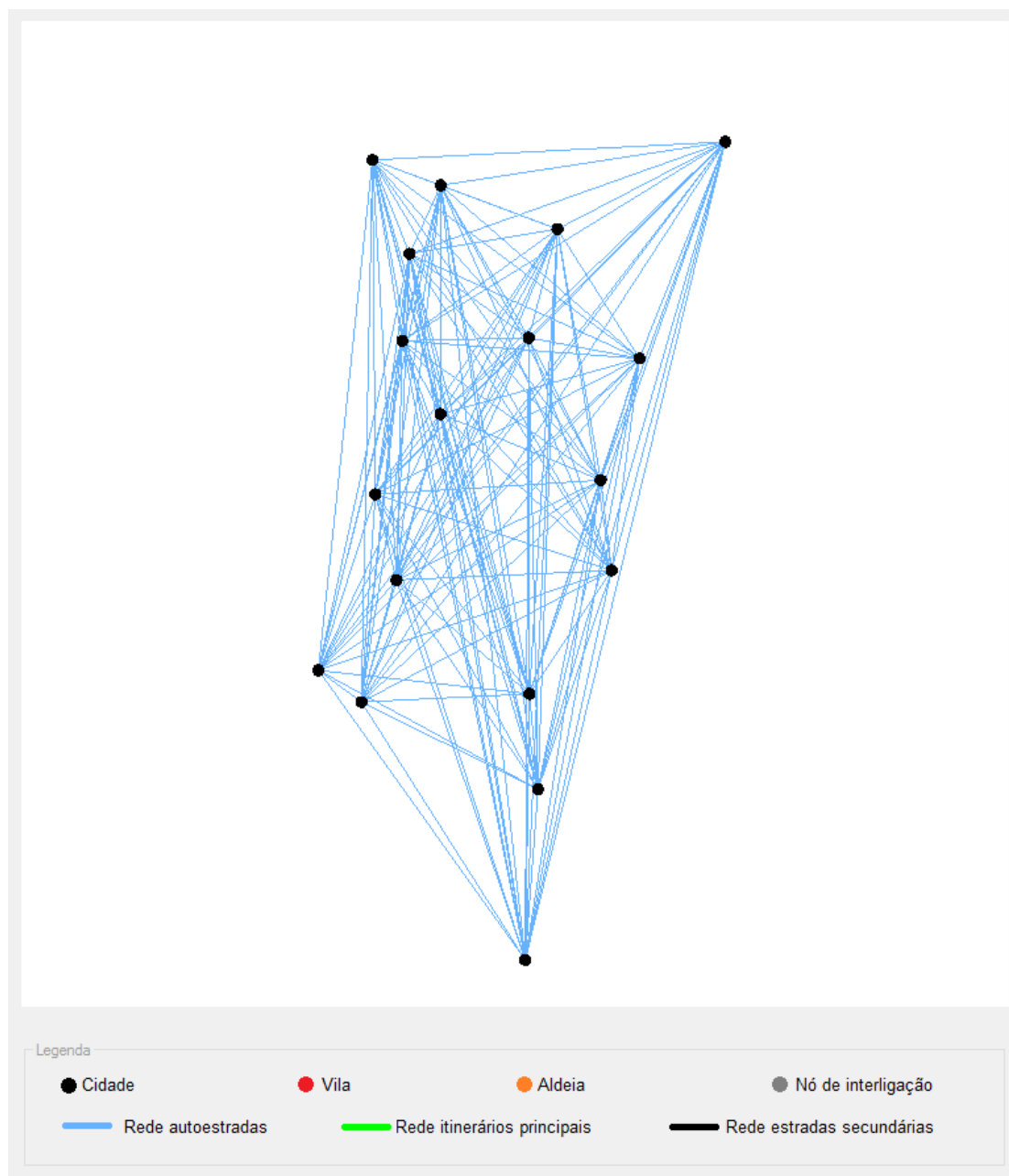


Figura 12 – Nós "cidade" ligados a todos os nós "cidade"

A Figura 13 é o resultado obtido para a rede de autoestradas, usando os parâmetros descritos na Figura 8 antes de calcular os nós de interligação (secção 3.4). Os círculos a preto representam os nós cidade e as linhas a azul representam as autoestradas.

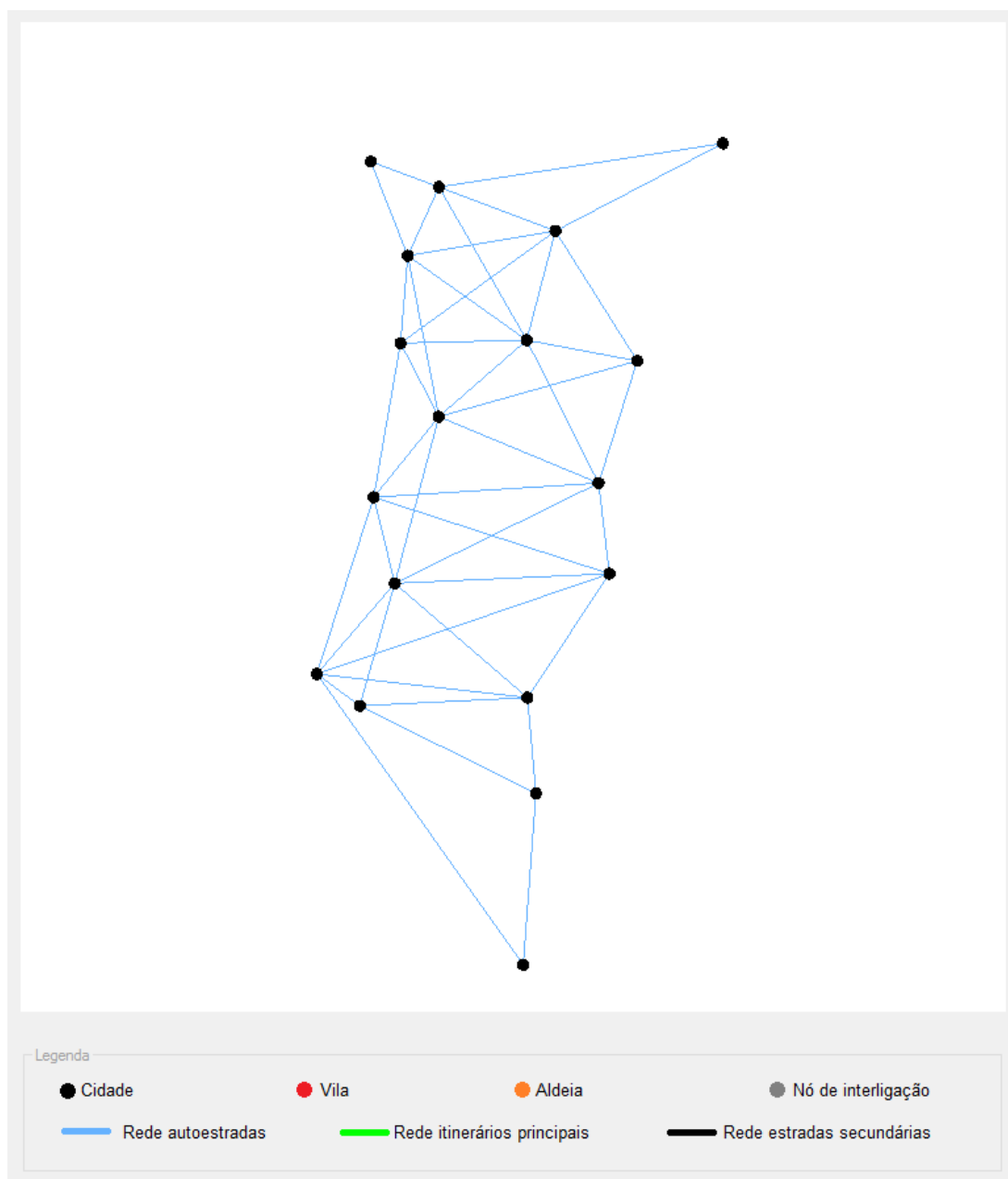


Figura 13 – Rede de autoestradas (sem nós de interligação)

A Figura 14 é o resultado obtido após a criação dos nós de interligação (secção 3.4). Os círculos a preto representam os nós cidade, a cinza os nós de interligação e as linhas a azul representam as autoestradas.

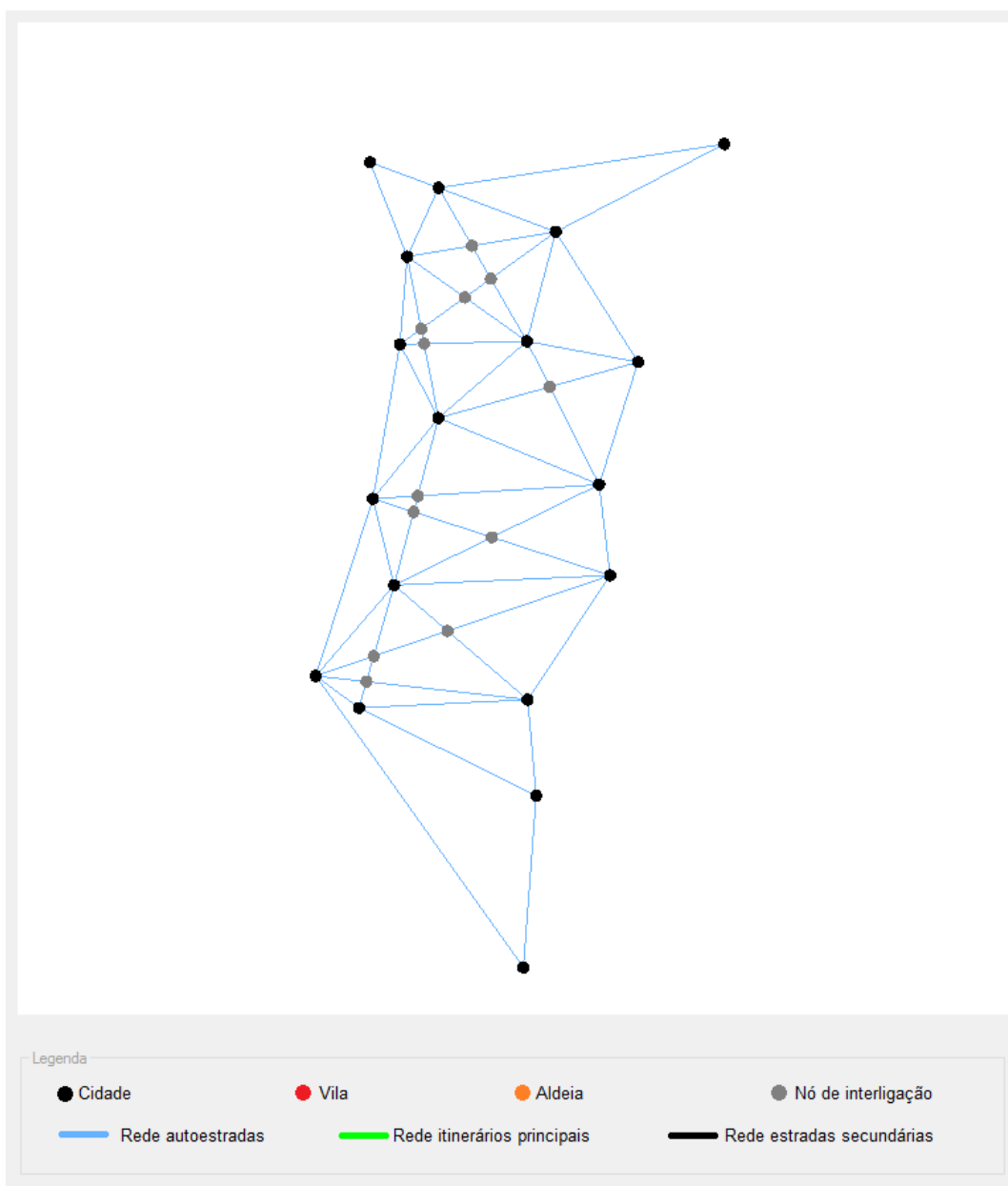


Figura 14 – Rede de autoestradas (com nós de interligação)

Dado que o utilizador optou por uma nova análise, Figura 8, a rede obtida será reanalisada para um período de análise menor. Como é possível verificar na Figura 15, os círculos a preto representam os nós cidade, a cinza os nós de interligação e as linhas a azul representam as autoestradas.

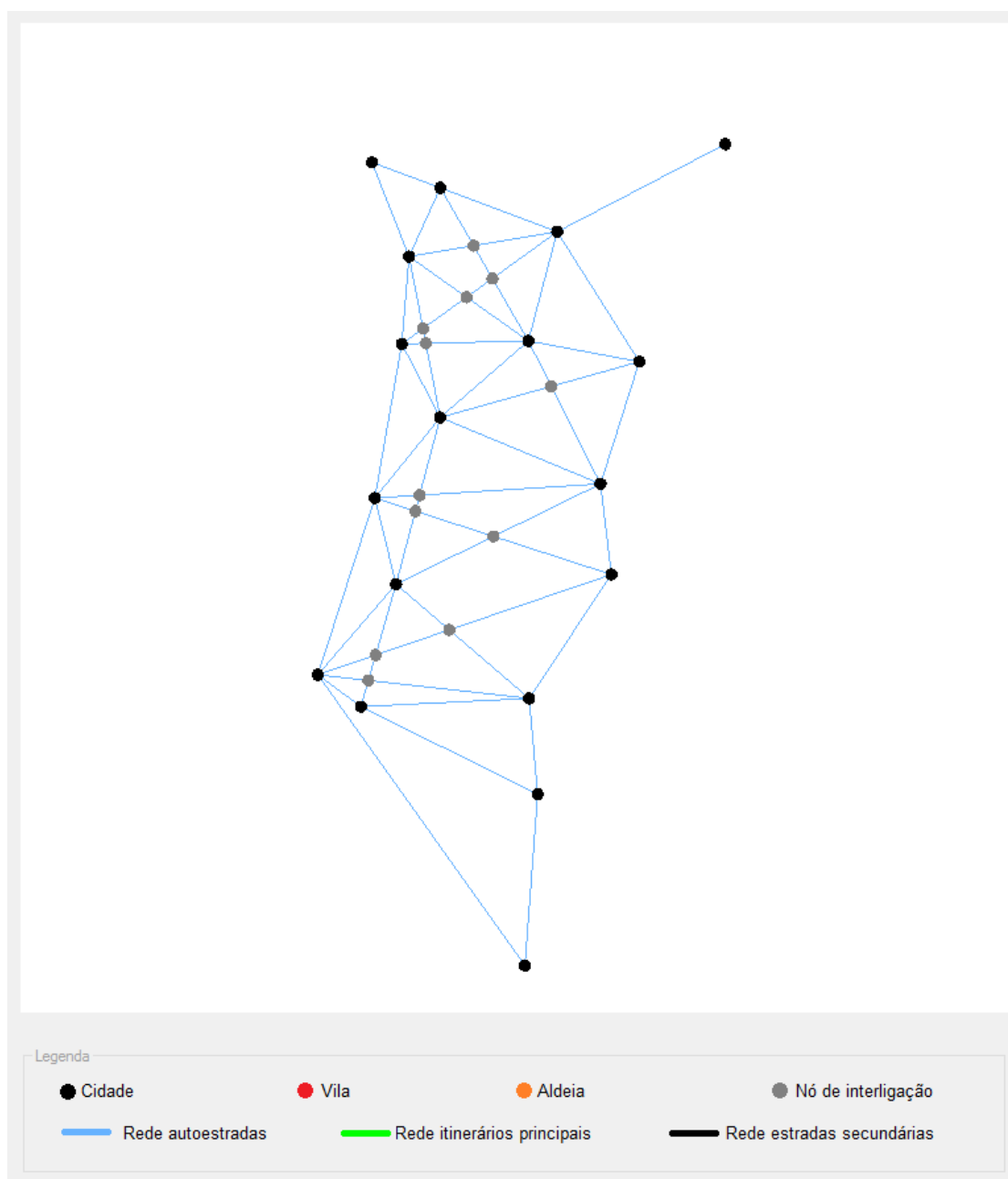


Figura 15 – Resultado final da rede de autoestradas

### 3.6.3 Cálculo da rede de itinerários principais

Quando se inicia a análise da rede de itinerários principais, começa-se por ligar todos os nós "vila" a todos os nós "cidade" e "vila".

Estas novas ligações são analisadas para serem mantidas ou descartadas, mas as ligações resultantes da rede de autoestradas (ligações "cidade-cidade") não são reanalisadas. Os nós de interligação criados nesta análise são caracterizados como "vila".

Durante a "rede de itinerários principais" poderá ocorrer a eliminação temporária de ligações "cidade-cidade" obtidas anteriormente, mas posteriormente essa situação é corrigida. Tomemos o exemplo da Figura 16, onde:

- C1 e C2 são cidades reais;
- V1, V2 e V3 são vilas reais;
- V4 e V5 são vilas de interligação.

Na "rede de autoestradas" existia uma ligação direta entre C1 e C2 (1º passo). Na "rede de itinerários principais" foram criados os nós de interligação V4 e V5 (2º passo). Como a "rede de itinerários principais" não deve remover as ligações obtidas na "rede de autoestradas", é reposta a ligação direta entre C1 e C2 (3º passo).

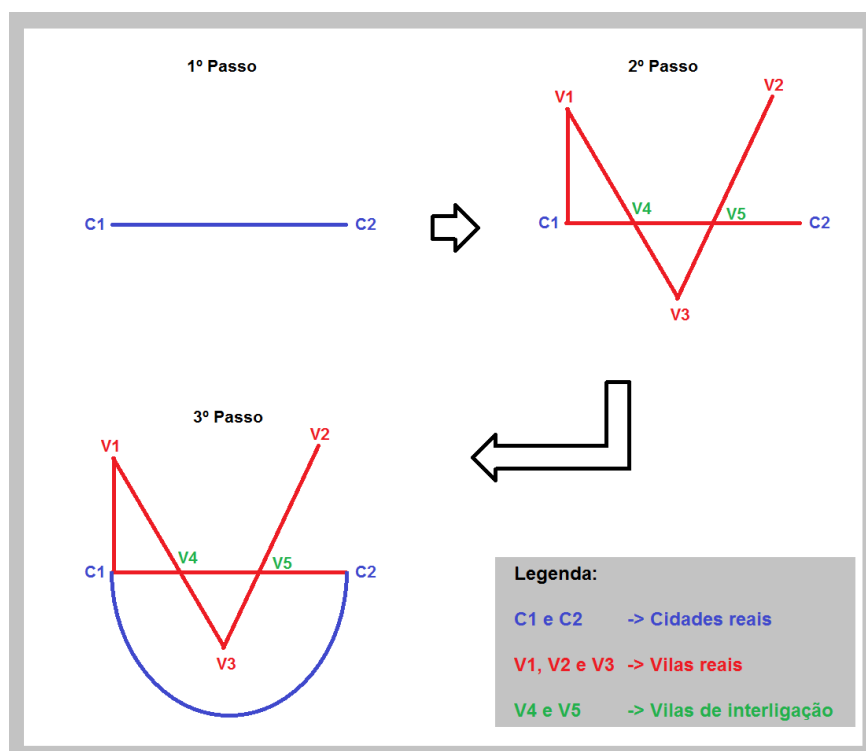


Figura 16 – Exemplo de uma possível ocorrência durante a "rede de itinerários principais"

Desta forma, além de ser reposta uma ligação que poderia ter sido removida, é também introduzida redundância na ligação entre os nós, tal como acontece no mundo real.

A Figura 17 representa o fluxograma do algoritmo da "rede de itinerários principais".

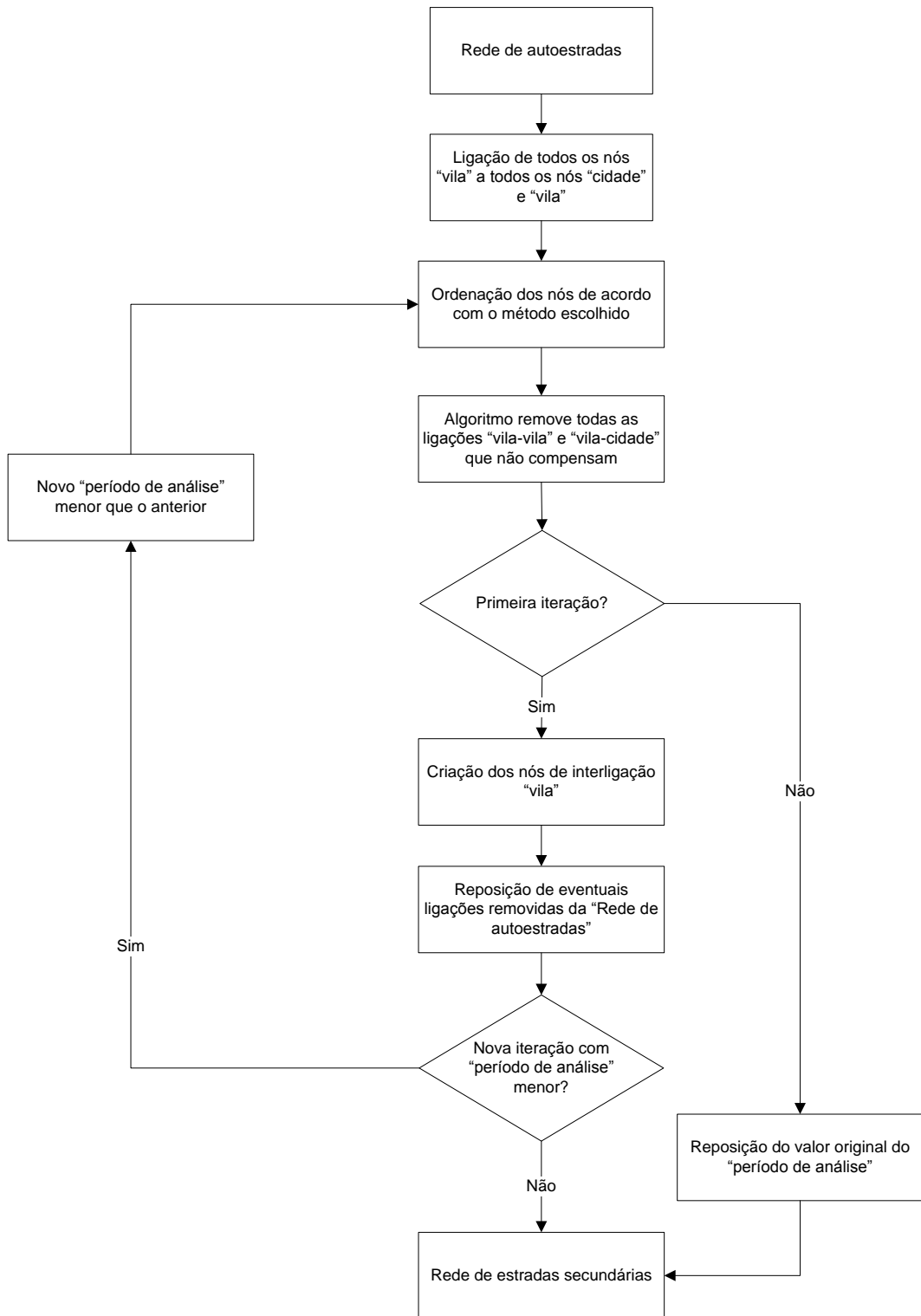


Figura 17 – Fluxograma da rede de itinerários principais

A Figura 18 é o resultado da análise da rede de autoestradas, em que se acrescenta os nós "vila" (círculos a vermelho) para se criar a rede de itinerários principais. Os círculos a preto representam os nós cidade, a cinza os nós de interligação e as linhas a azul representam as autoestradas.

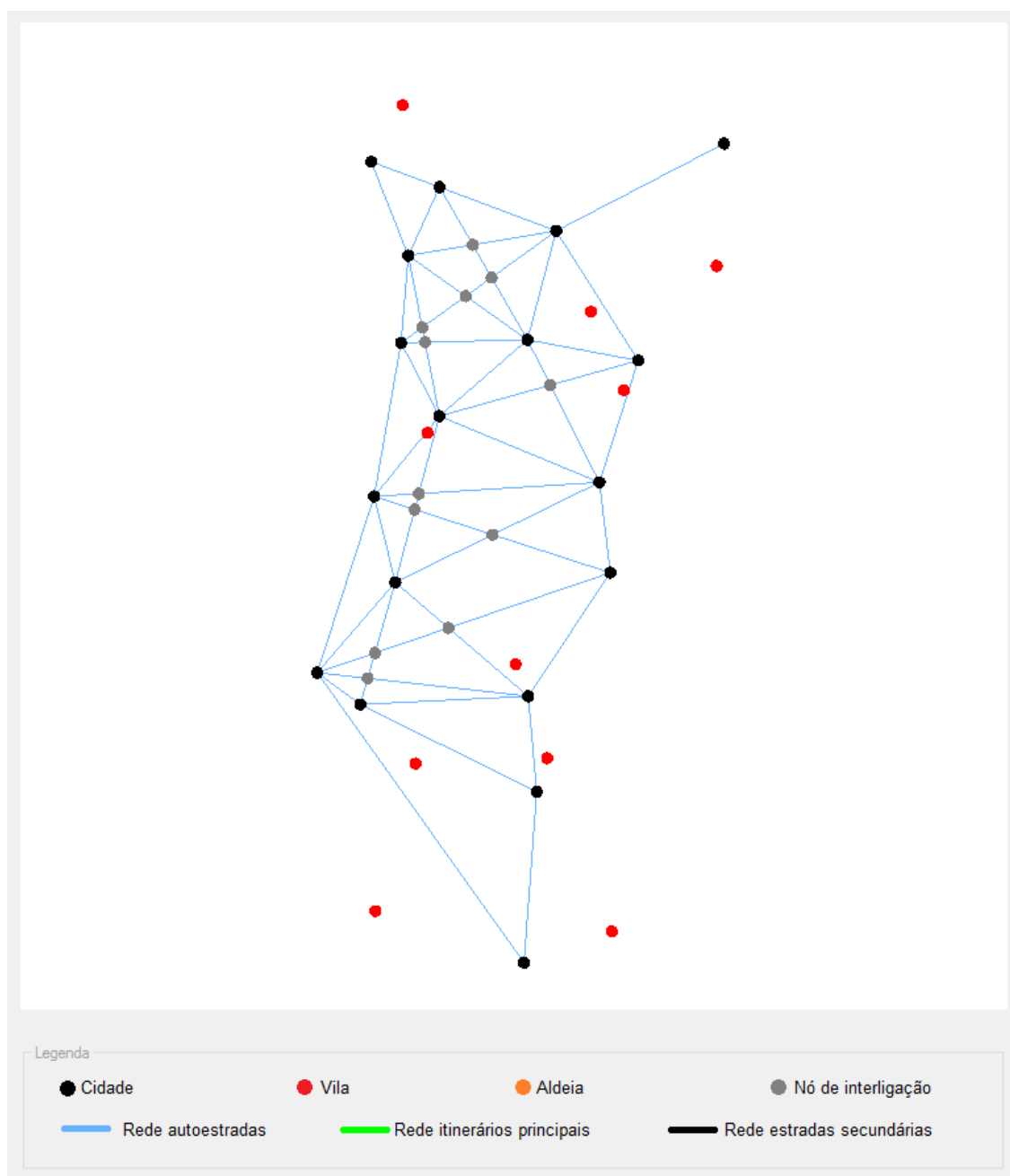


Figura 18 – Rede de autoestradas com nós "vila"

A Figura 19 é o resultado obtido após a análise da rede de autoestradas (linhas a azul) e da rede de itinerários principais (linhas a verde). Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila e a cinza os nós de interligação.

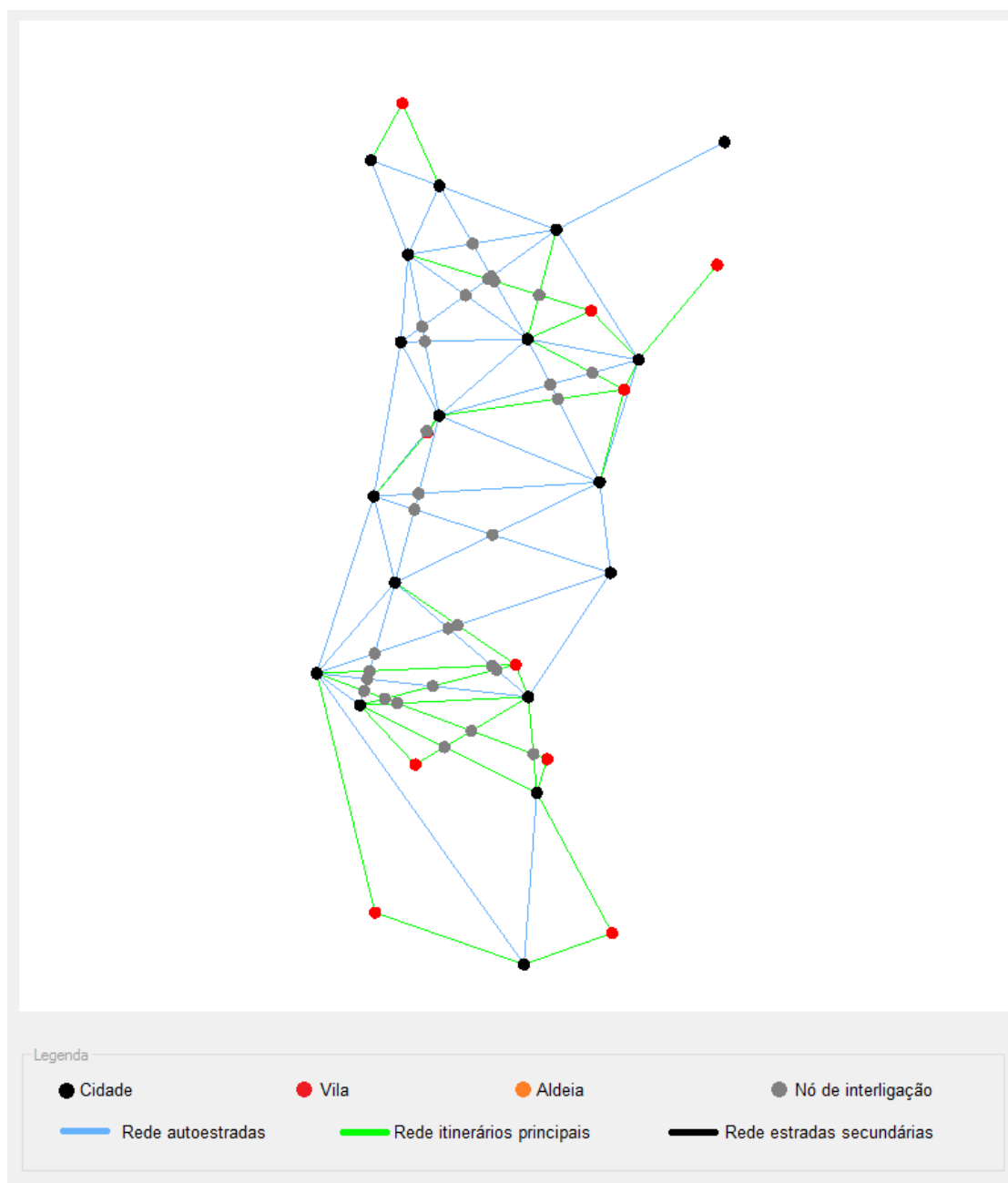


Figura 19 – Rede de autoestradas e de itinerários principais

Dado que poderá ocorrer a situação da Figura 16, algumas estradas poderão ficar ocultas por outras estradas. No capítulo 4 será exemplificado como o utilizador poderá visualizar cada uma das redes individualmente.

#### **3.6.4 Cálculo da rede de estradas secundárias**

Quando se inicia a análise da rede de estradas secundárias, começa-se por ligar todos os nós "aldeia" a todos os nós.

O funcionamento desta análise é análogo à "rede de itinerários principais". No final desta análise é avaliada a rede obtida, e é exportado o resultado obtido.

A Figura 20 representa o fluxograma do algoritmo da "rede de estradas secundárias".

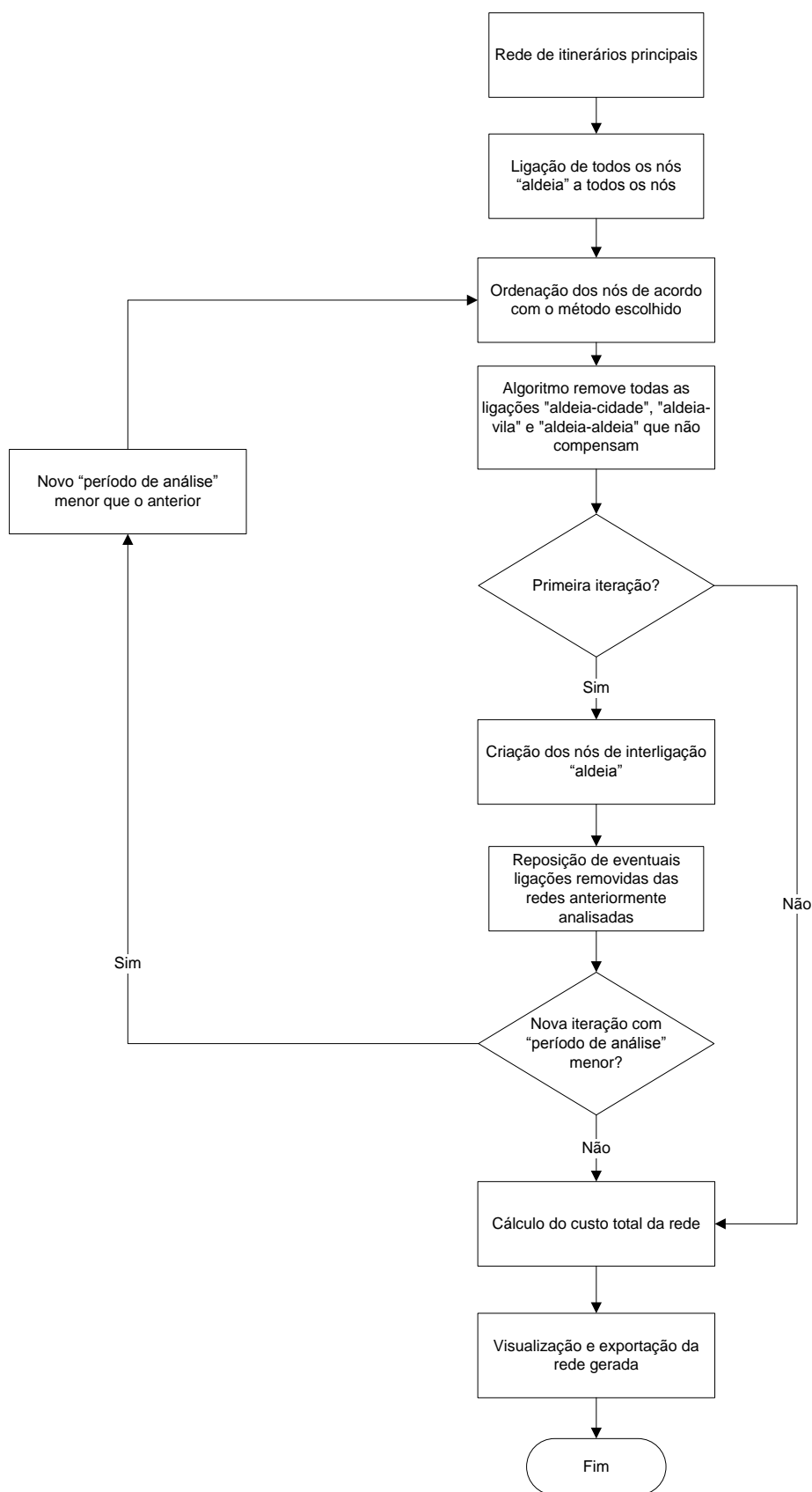


Figura 20 – Fluxograma da rede de estradas secundárias

A Figura 21 é o resultado da análise da rede de autoestradas e de itinerários principais, em que se acrescenta os nós "aldeia" (círculos a laranja) para se criar a rede de estradas secundárias. Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila e a cinza os nós de interligação. As linhas a azul representam as autoestradas e a verde os itinerários principais.

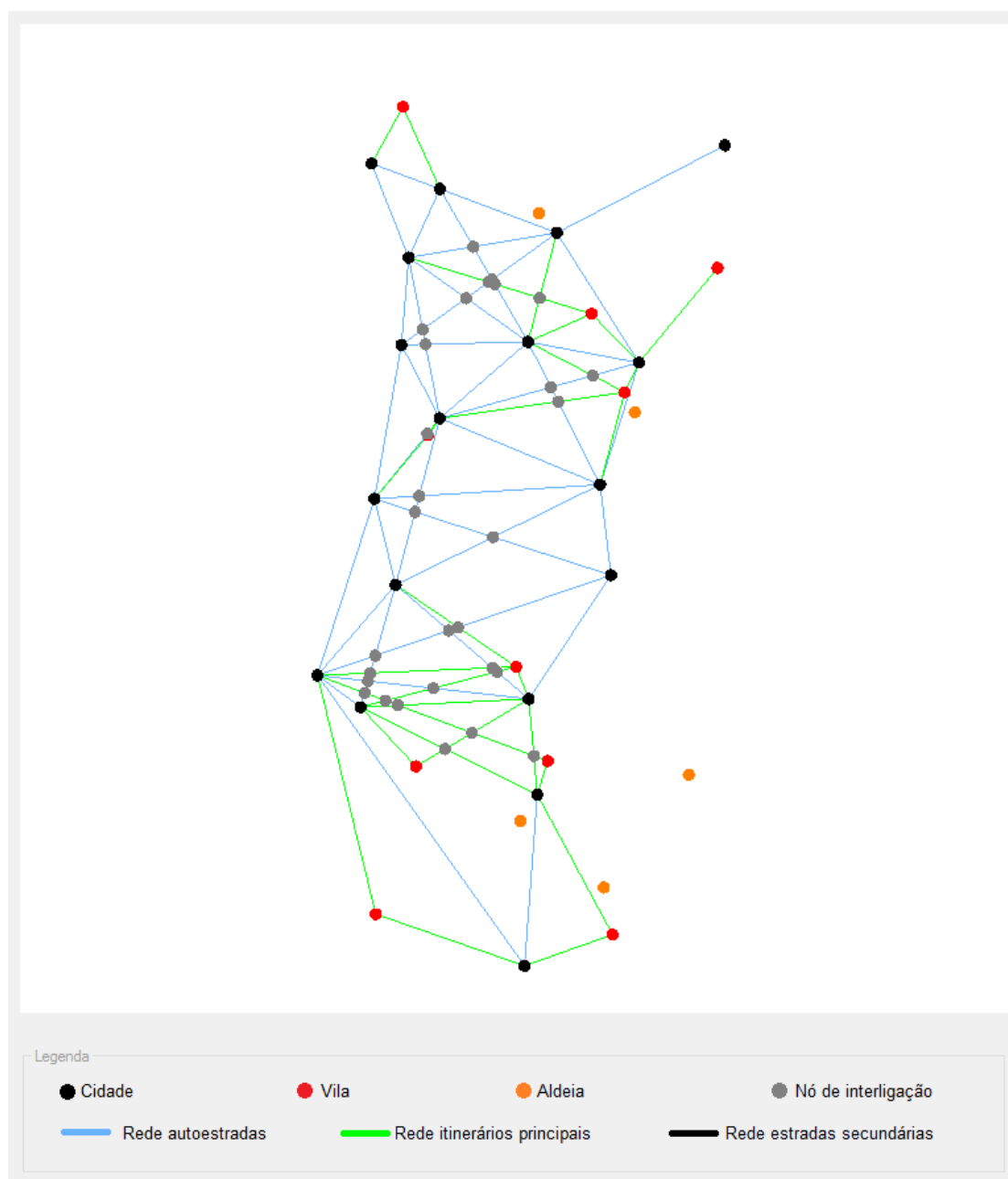


Figura 21 – Rede de autoestradas e de itinerários principais com nós "aldeia"

A Figura 22 é a rede rodoviária obtida após a análise da rede de autoestradas (linhas a azul), itinerários principais (linhas a verde) e das estradas secundárias (linhas a preto). Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação.

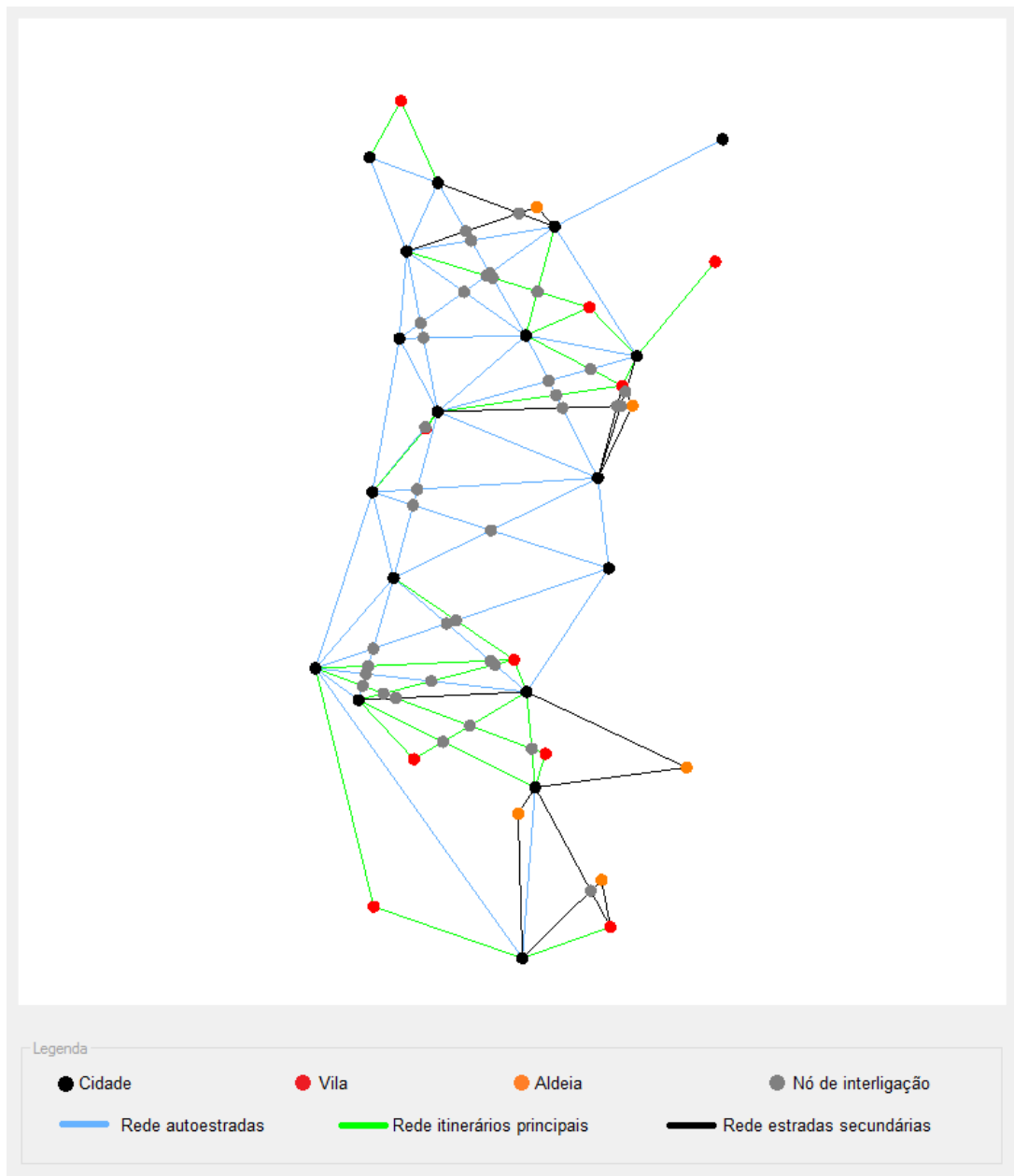


Figura 22 – Resultado de final da análise da rede rodoviária

### 3.6.5 Avaliação da rede obtida

Após a obtenção do resultado final é calculado o custo total da rede rodoviária.

$$\text{Custo total da rede} = ( \sum \text{custo de construção} ) + ( \sum \text{custo de exploração} )$$

em que:

- custo de construção = distância \* preço de construção da estrada em questão;
- custo de exploração = distância de cada estrada \* trânsito da estrada em questão.

O "preço de construção da estrada em questão" depende dos nós da ligação em questão:

- cidade-cidade é usado o custo por quilómetro de construção de autoestrada;
- vila-vila ou vila-cidade é usado o custo por quilómetro de construção de itinerário principal;
- aldeia-aldeia, aldeia-vila e aldeia-cidade é usado o custo por quilómetro de construção de estrada secundária.

O custo de construção usado na fórmula engloba o custo de cada tipo de rede, e neste trabalho usou-se os valores de referência, por omissão, para cada quilómetro de construção são de 5 milhões para as autoestradas, 2.5 milhões para os itinerários principais e de 250 mil para as estradas secundárias, embora o utilizador os possa alterar.

## 3.7 Sumário

Neste capítulo abordou-se o modo como foram obtidos os nós, e como os parâmetros de cálculo afetam o facto de uma ligação entre dois nós ser mantida ou rejeitada.

Foi também referido o motivo de a versão preliminar que usava Kruskal ter sido rejeitada e se ter realizado uma nova abordagem para se obter uma rede rodoviária de melhor qualidade.

Foram, também, abordadas as várias etapas que o algoritmo passa até ser obtida a rede final.

Por fim foi exposto a forma como é calculado o custo total da rede.

## 4 Interface com o utilizador

Neste capítulo é exposto o modo como foi implementada a interface gráfica do protótipo e de como o utilizador poderá interagir com a mesma. É também descrito como é exportada a rede resultante de modo a ser utilizada em ambientes virtuais.

### 4.1 Coordenadas geográficas para cartesianas

Para calcular a distância entre coordenadas geográficas usou-se a fórmula descrita anteriormente na secção 3.3. Embora seja possível converter coordenadas geográficas em cartesianas, [CEUB/ICPD, 2004], trata-se de um cálculo complexo, pelo que optou-se por uma conversão linear das coordenadas geográficas para coordenadas cartesianas.

As coordenadas geográficas obtidas usando *Google Maps* são sob a forma "Latitude, Longitude" que correspondem aos eixos "y, x" no sistema cartesiano.

Coordenadas geográficas Câmara do Porto: (41.150094, -8.610739).

O nó que representa a Câmara do Porto será visualizado nas coordenadas cartesianas: (-8.610739, 41.150094).

### 4.2 Interface

O protótipo, a pedido dos orientadores, foi desenvolvido na linguagem C++ usando *Windows Forms*. Para a visualização da rede gerada foi usada a API OpenGL.

O programa recebe as coordenadas geográficas e a população de cada local, mediante um ficheiro de texto (".txt") .

O utilizador ao iniciar o programa, Figura 23, tem apenas o botão "Carregar ficheiro" ativo, que, quando clicado, é aberta uma caixa de diálogo para o utilizador carregar um ficheiro para o programa. Dado que o programa apenas aceita ficheiros de texto, a caixa de diálogo filtra os ficheiros de forma a mostrar apenas os de extensão ".txt".

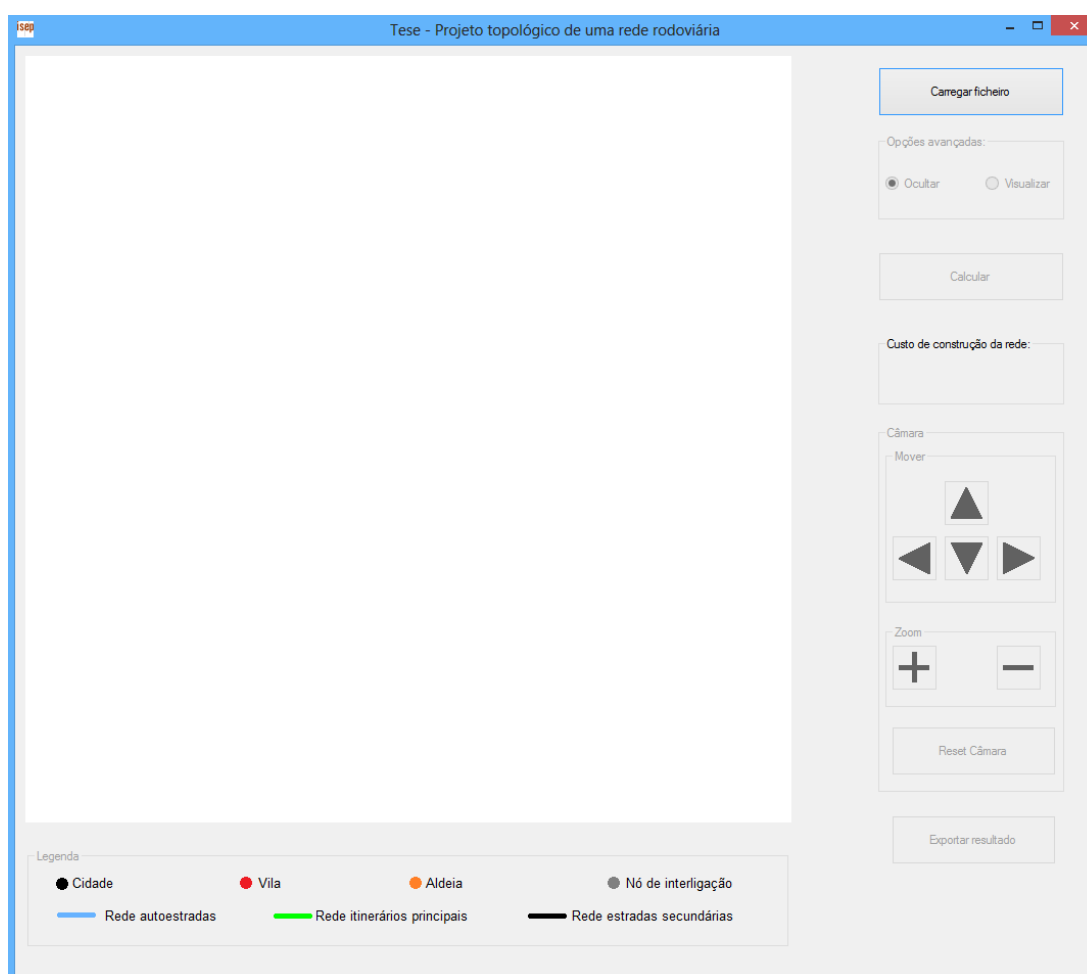


Figura 23 – Interface gráfica do protótipo

Assim que é carregado um ficheiro válido, os nós são representados por círculos com diferentes cores, dependendo da sua população. Os círculos a preto representam cidades, a vermelho representam vilas e a laranja representam aldeias tal como é possível verificar na "Legenda" da interface. Ao título da janela é acrescentado o caminho e o nome do ficheiro carregado, passando também a ser possível visualizar os "Parâmetros de cálculo" que se encontravam ocultos (Figura 24). É possível ver em maior pormenor os "Parâmetros de

cálculo" na Figura 8 (secção 3.6). A média das coordenadas dos nós carregados define o ponto em que a câmara fica centrada.

Os valores existentes por omissão nos "Parâmetros de cálculo" podem ser alterados pelo utilizador. Ao alterar-se a população mínima para um nó ser cidade ou vila é alterada a cor dos nós representados, no caso de isso provocar alterações à caracterização do nó. Todos os campos existentes na interface têm uma pequena descrição do campo (*tooltip*), bastando para isso o utilizador parar o rato sobre o campo em questão.

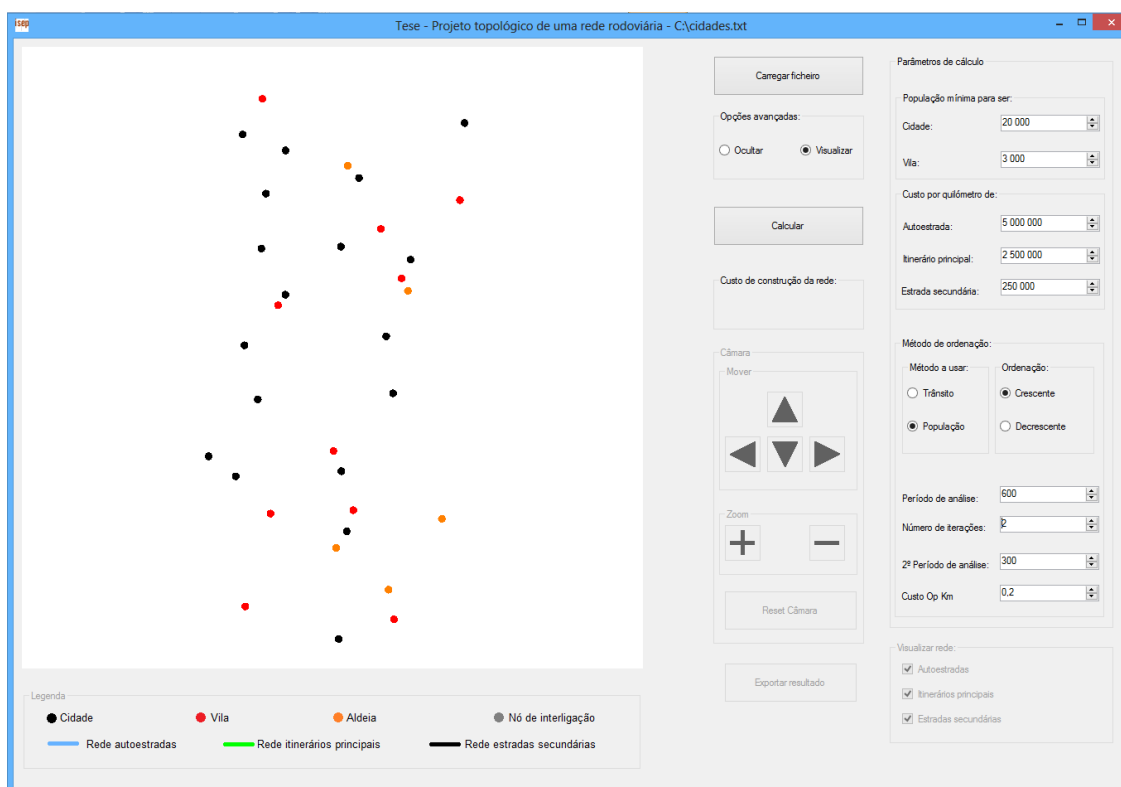


Figura 24 – Interface gráfica do protótipo com as "Opções avançadas" visíveis

O utilizador poderá alterar todos os valores dos "Parâmetros de cálculo" carregados por omissão, tendo em atenção que os campos se encontram validados de forma a aceitar apenas o seguinte:

- apenas são permitidos números inteiros;
- o campo "Vila" fica sempre com uma população inferior ao do campo "Cidade";
- o campo "Itinerário principal" fica sempre com um valor inferior ao do campo "Autoestrada";

- o campo "Estradas secundárias" fica sempre com um valor inferior ao do campo "Itinerário principal";
- só é possível interagir com o campo "2º Período de análise" se o campo "Número de iterações" for colocado a "2".

Quando o utilizador clica no botão "Calcular", já não é possível alterar mais os "Parâmetros de cálculo" que vão ser usados pelo algoritmo.

Assim que o algoritmo termina, a rede gerada é visualizada e é possível interagir com a câmara através dos botões existentes, ou das teclas aceleradoras:

- mover a câmara para cima, esquerda, baixo e direita (teclas "w", "a", "s", "d" respetivamente);
- realizar zoom *in* e *out* (teclas "+" e "-" respetivamente);
- voltar aos valores por omissão da câmara clicando no botão "Reset câmara" (tecla "barra de espaços").

De forma a impedir que o utilizador acidentalmente clique no botão "Calcular", assim que a rede é gerada, este fica desativado. Para o voltar a habilitar terá de carregar novamente um ficheiro ou mudar algum dos valores existentes em "Parâmetros de cálculo".

Por omissão as três redes existentes encontram-se visíveis, mas dado que uma estrada de uma determinada rede poderá ocultar a de outra rede (situação da Figura 16), foi implementada a possibilidade de as redes serem visualizadas individualmente. De seguida serão apresentadas cada uma das redes obtidas na Figura 22.

A rede de autoestradas obtida é possível visualizar na Figura 25 (linhas a azul). Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação.

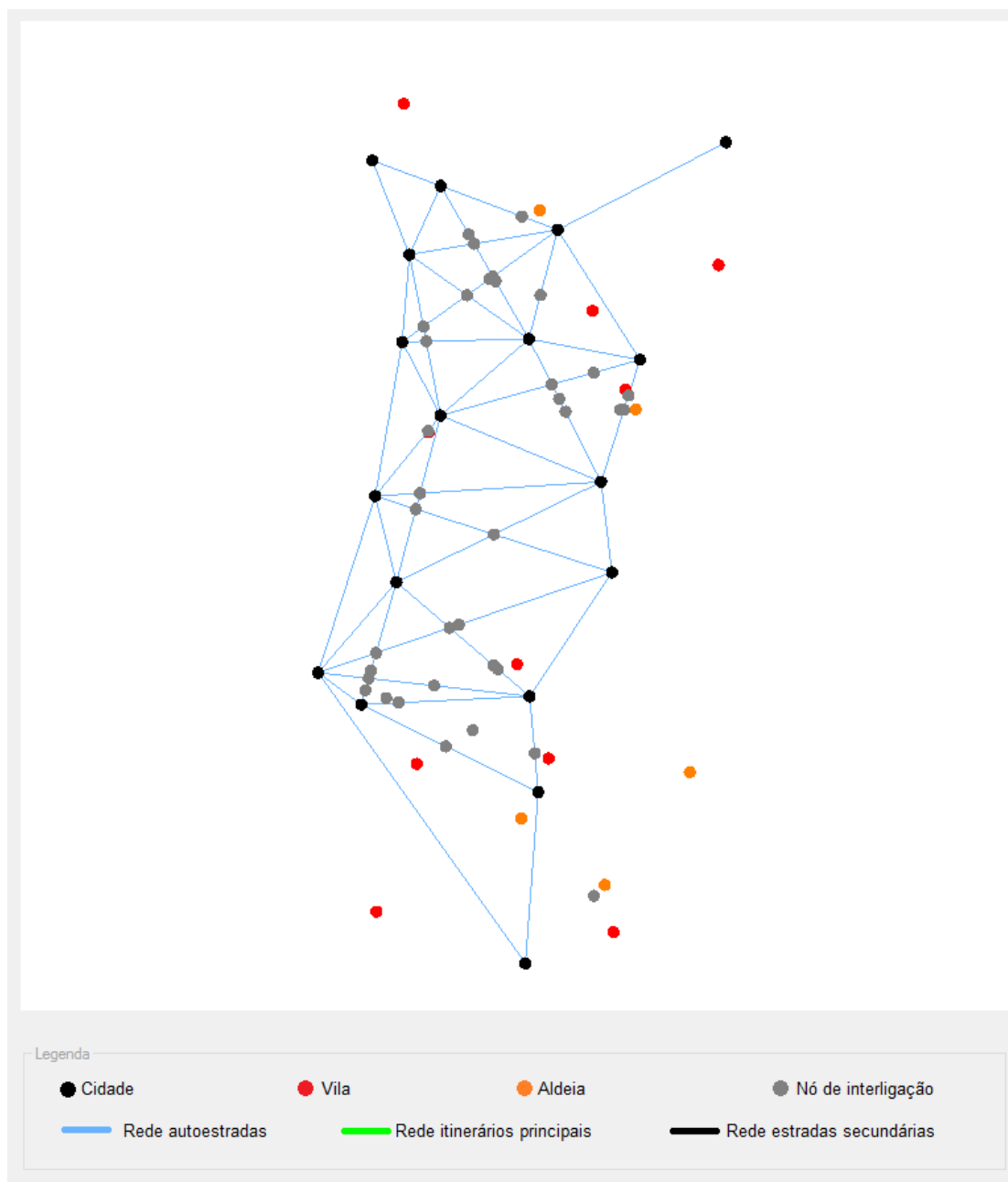


Figura 25 – Rede autoestradas

A Figura 26 é a rede de itinerários principais resultante (linhas a verde). Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação.

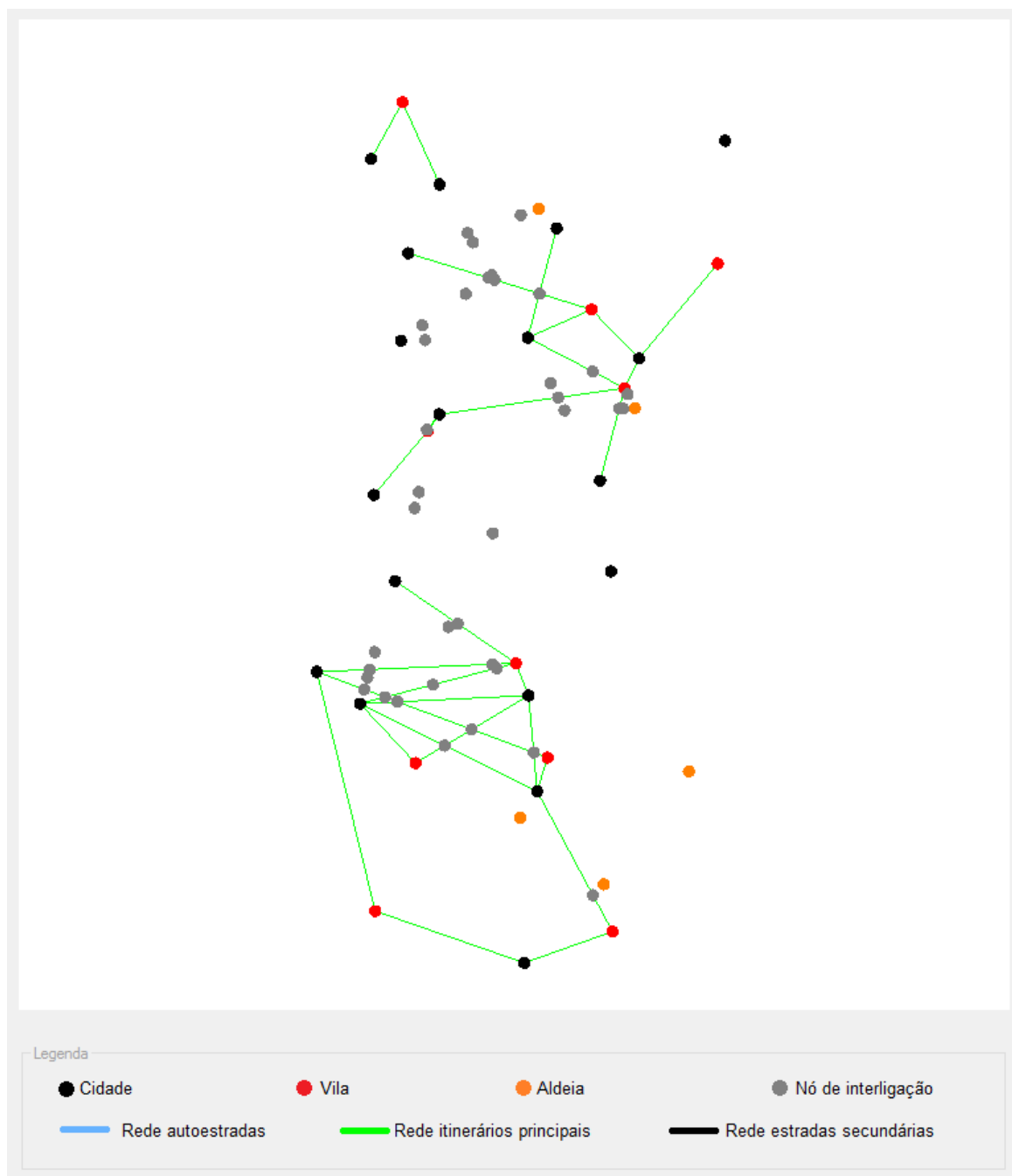


Figura 26 – Rede itinerários principais

A Figura 27 é a rede de estradas secundárias existente (linhas a preto). Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação.

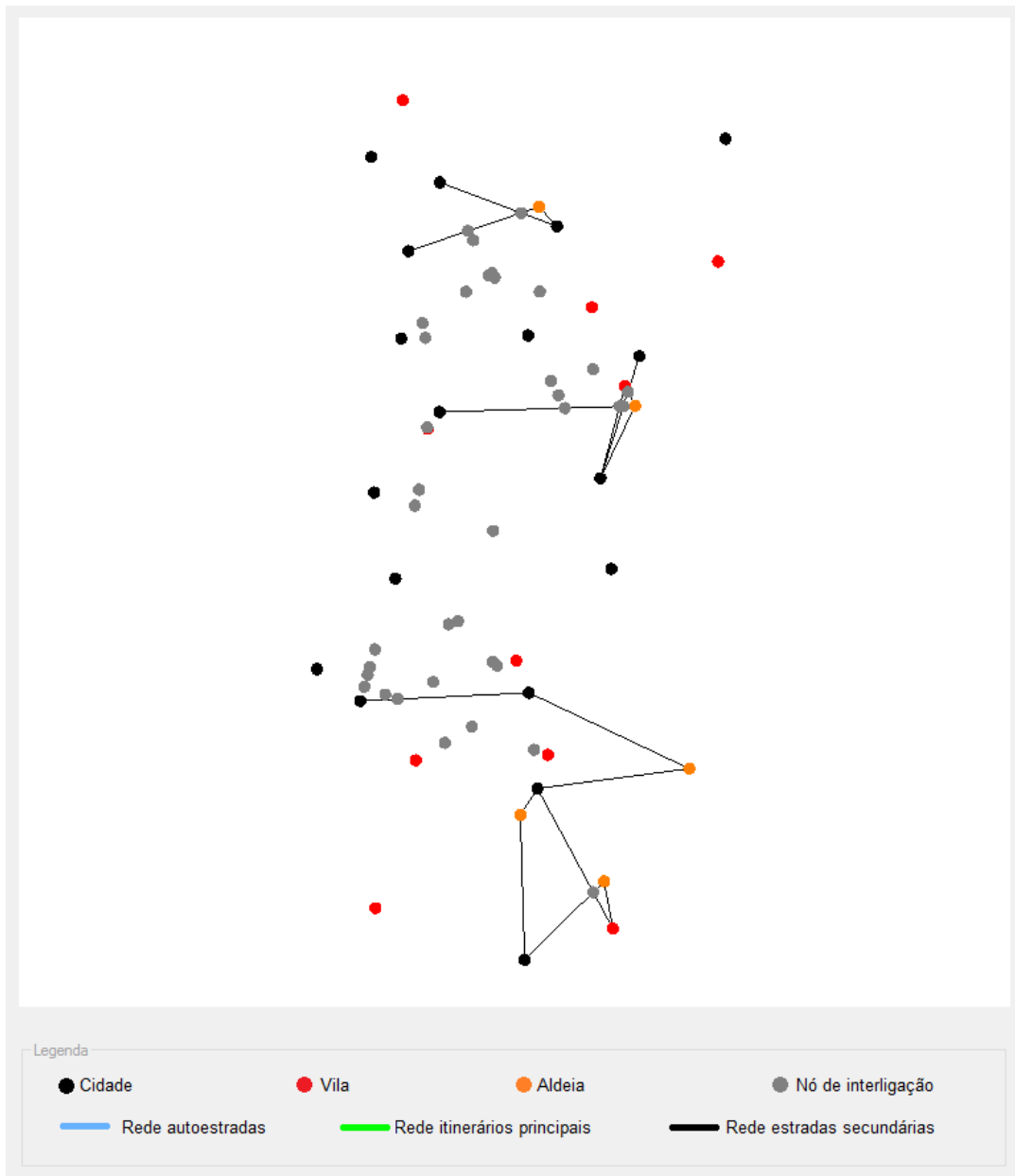


Figura 27 – Rede estradas secundárias

Depois de terminado o algoritmo o utilizador pode exportar o resultado da rede obtida sob a forma de um ficheiro xml. Este ficheiro contém:

- os "Parâmetros de cálculo" usados;
- os nós existentes na rede: número do nó, as suas coordenadas geográficas, população e sua caracterização (cidade, vila ou aldeia);
- as redes existentes bem como as suas estradas: o número da estrada e os dois nós que a compõem.

A Figura 28 é um excerto de um ficheiro xml resultante de uma rede gerada, em que se encontram todos os dados que permitiram obter essa rede rodoviária.

```

<?xml version="1.0"?>
- <Analise>
  - <Parametros>
    - <Populacao_minima>
      <Cidade>20000</Cidade>
      <Vila>3000</Vila>
    </Populacao_minima>
    - <Custo_construcao_KM>
      <Autoestrada>5000000</Autoestrada>
      <Itinerario_principal>2500000</Itinerario_principal>
      <Estrada_secundaria>250000</Estrada_secundaria>
    </Custo_construcao_KM>
    - <Metodo_escolhido>
      <Ordenacao>crescente</Ordenacao>
      <Metodo>populacao</Metodo>
    </Metodo_escolhido>
    - <Periodo_Analise>
      <Periodo>600</Periodo>
      <Iteracoes>2</Iteracoes>
      <Novo_periodo_analise>300</Novo_periodo_analise>
      <Custo_Op_KM>0,2</Custo_Op_KM>
    </Periodo_Analise>
  </Parametros>
- <Resultado>
  - <Nos>
    - <No Id="0">
      <longitude>-8,653683</longitude>
      <latitude>40,640433</latitude>
      <populacao>78450</populacao>
      <caraterizacao>cidade</caraterizacao>
    </No>
    . . .
  </Nos>
- <Rede>
  - <AutoEstrada>
    - <Estrada Id="0">
      <No>0</No>
      <No>5</No>
    </Estrada>
    . . .
  </AutoEstrada>
  - <Itinerario_principal>
    - <Estrada Id="0">
      <No>0</No>
      <No>45</No>
    </Estrada>
    . . .
  </Itinerario_principal>
  - <Estrada_secundaria>
    - <Estrada Id="0">
      <No>1</No>
      <No>28</No>
    </Estrada>
    . . .
  </Estrada_secundaria>
</Rede>
</Resultado>
</Analise>

```

Figura 28 – Excerto do ficheiro xml de uma rede gerada

### **4.3 Sumário**

Neste capítulo foi exposto a forma como foi implementada a interface e a interação que o utilizador poderá realizar com a mesma.

Abordou-se, também, as validações existentes na interface e o modo como a rede gerada poderá ser exportada de forma a ser possível usar esse resultado em ambientes virtuais.



## 5 Análise dos resultados obtidos

Neste capítulo são comparados os resultados obtidos usando os mesmos parâmetros de cálculo, mudando apenas o método de ordenação. A comparação é feita tanto a nível de custo de rede, do número de nós e estradas resultantes, bem como do tempo que levam a serem geradas.

Será também realizada uma comparação da rede gerada com a rede de autoestradas existentes em Portugal Continental.

### 5.1 Parâmetros

O protótipo contém quatro métodos de ordenação que o utilizador poderá usar para gerar uma rede rodoviária:

- Ordenação crescente de população;
- Ordenação decrescente de população;
- Ordenação crescente de trânsito;
- Ordenação decrescente de trânsito.

Na comparação dos vários resultados obtidos foram usados os mesmos valores para os cálculos mudando apenas o método de ordenação:

- um nó com população maior ou igual a 20 mil habitantes foi considerado "cidade";

- um nó com população maior ou igual a 3 mil e menor que 20 mil habitantes foi considerado "vila";
- um nó com população menor que 3 mil habitantes foi considerado "aldeia";
- 5 milhões de unidades de custo de construção por quilómetro de autoestrada;
- 2.5 milhões de unidades de custo de construção por quilómetro de itinerário principal;
- 250 mil de unidades de custo de construção por quilómetro de estrada secundária;
- a primeira iteração com "Período de análise" igual a 600;
- a segunda iteração com "Período de análise" igual a 300;
- o "Custo de operação por quilómetro" de 0.2.

Para esta comparação foram usados 56 nós escolhidos arbitrariamente, sendo 25 cidades (das quais 18 são as capitais de distrito), 16 vilas e 15 aldeias de Portugal Continental. Tal como anteriormente referido, o número de habitantes usados são os que constam no Censos 2011 do INE e as coordenadas geográficas usadas são as da junta de Freguesia para as aldeias e da Câmara Municipal para as cidades e vilas.

## 5.2 Comparação dos resultados obtidos

A Figura 29 é o resultado obtido usando o método "Ordem crescente de população". Esta rede é constituída por:

- 342 nós (56 reais e 286 de interligação);
- 570 estradas (153 da rede de autoestradas, 184 da rede de itinerários principais e 233 da rede de estradas secundárias);
- o custo total da rede, descrito em 3.6.5, é de, aproximadamente, 3.4 biliões.

Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação. As linhas a azul representam as autoestradas, a verde os itinerários principais e a preto as estradas secundárias.

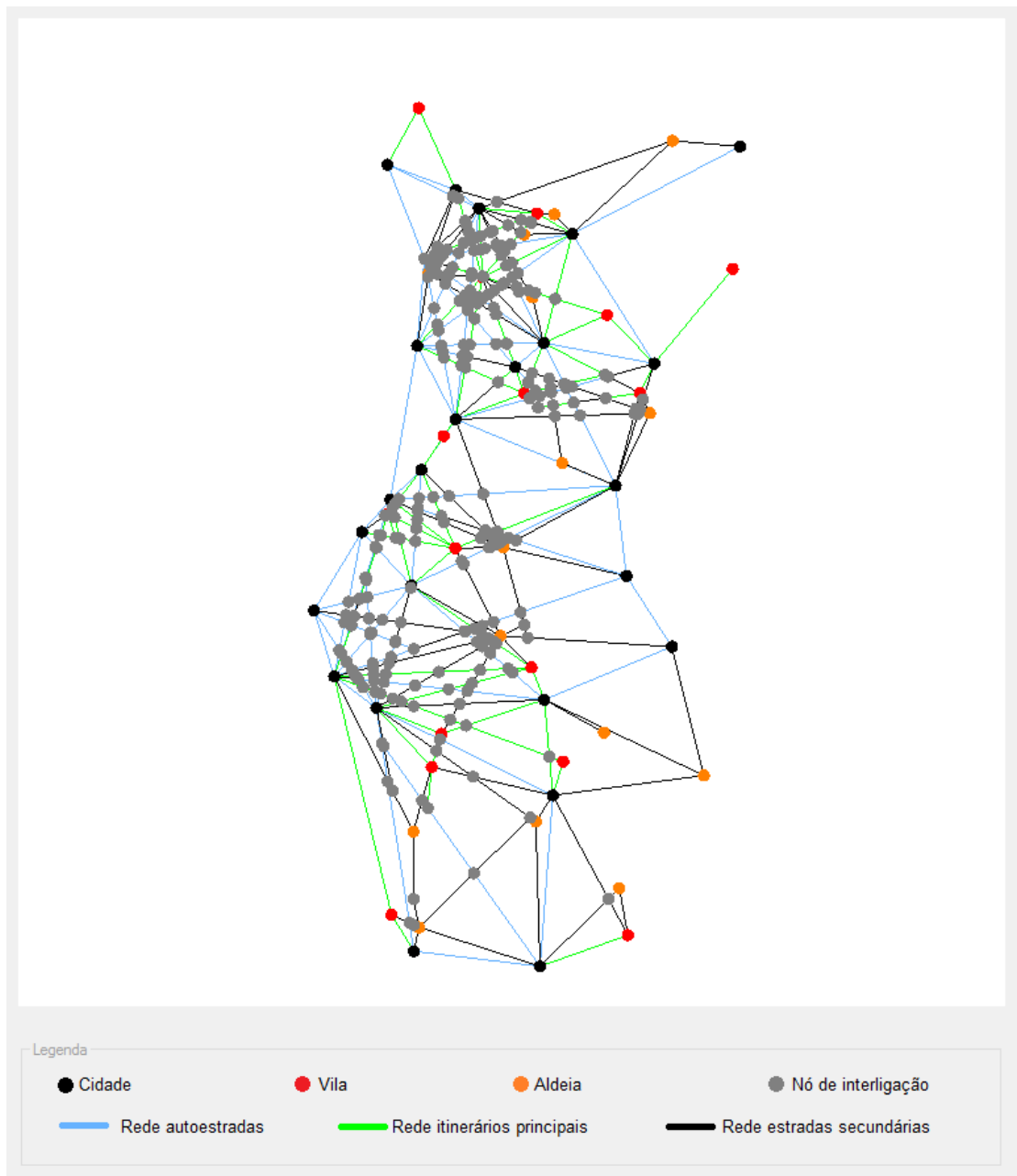


Figura 29 – Ordem crescente população

A Figura 30 é o resultado obtido usando o método "Ordem decrescente de população". Esta rede é constituída por:

- 142 nós (56 reais e 86 de interligação);
- 269 estradas (145 da rede de autoestradas, 60 da rede de itinerários principais e 64 da rede de estradas secundárias);
- o custo total da rede, descrito em 3.6.5, é de, aproximadamente, 3.1 biliões.

Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação. As linhas a azul representam as autoestradas, a verde os itinerários principais e a preto as estradas secundárias.

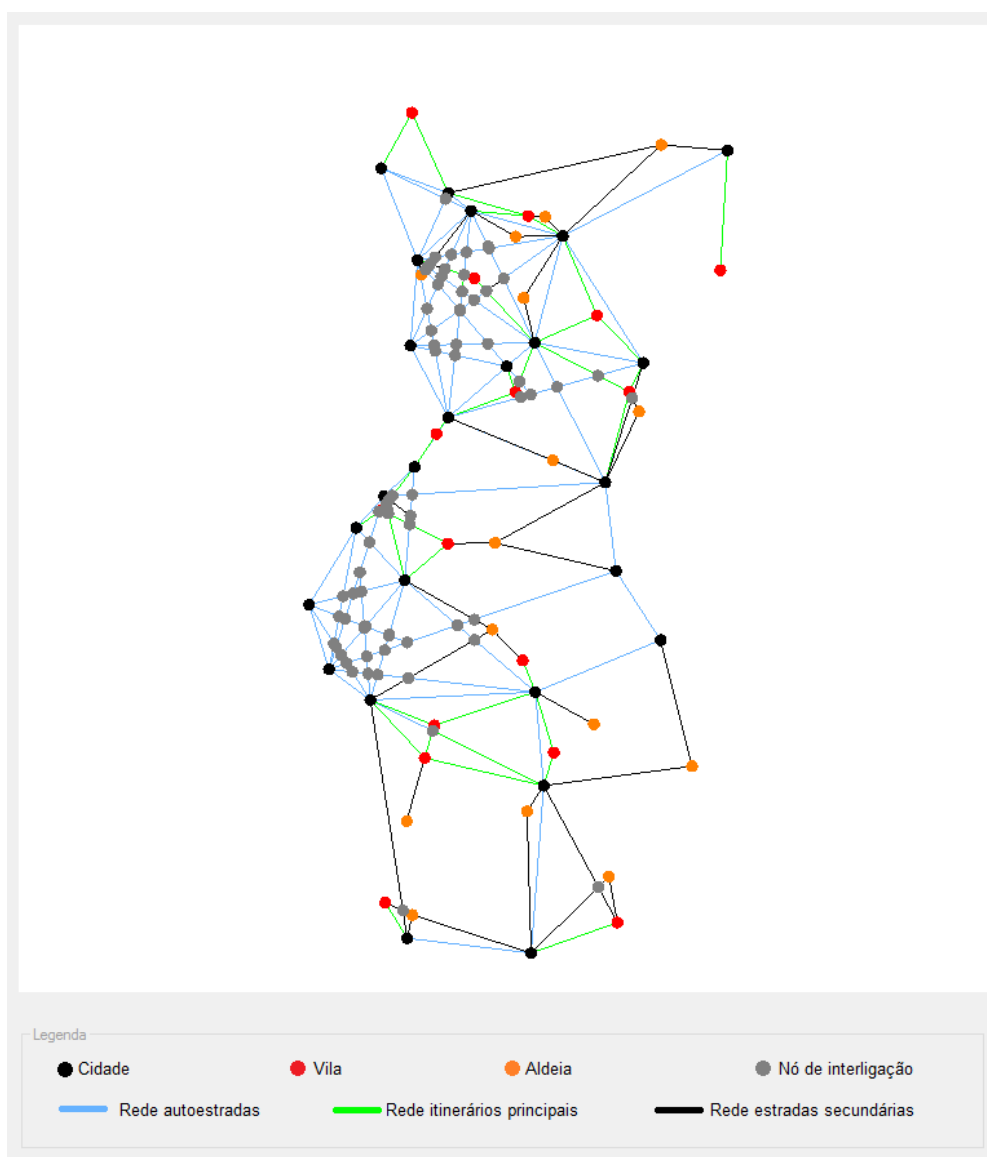


Figura 30 – Ordem decrescente população

A Figura 31 é o resultado obtido usando "Ordem crescente trânsito". Esta rede é constituída por:

- 348 nós (56 reais e 292 de interligação);
- 584 estradas (153 da rede de autoestradas, 189 da rede de itinerários principais e 242 da rede de estradas secundárias);
- o custo total da rede, descrito em 3.6.5, é de, aproximadamente, 3.5 biliões.

Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação. As linhas a azul representam as autoestradas, a verde os itinerários principais e a preto as estradas secundárias.

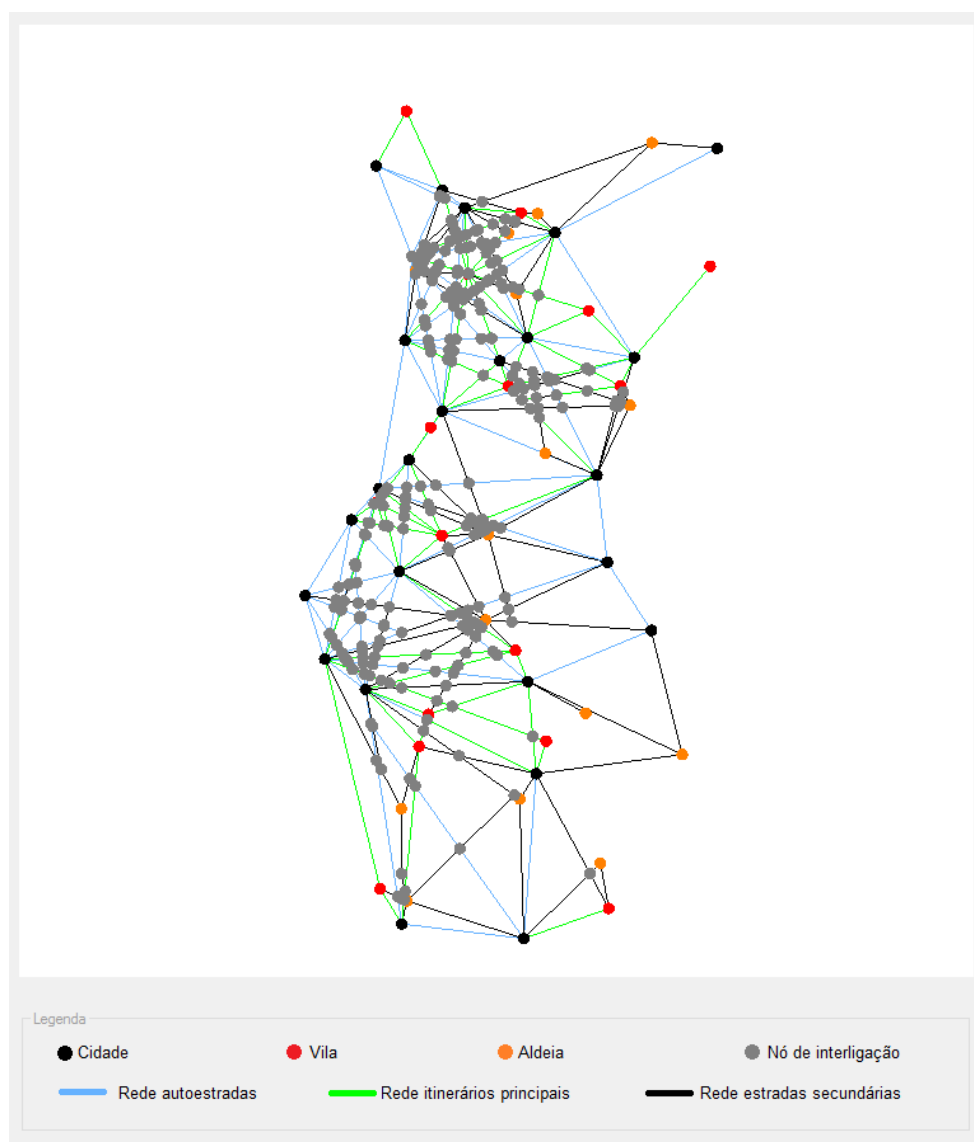


Figura 31 – Ordem crescente trânsito

A Figura 32 é o resultado obtido usando "Ordem decrescente de trânsito". Esta rede é constituída por:

- 142 nós (56 reais e 86 de interligação);
- 268 estradas (145 da rede de autoestradas, 59 da rede de itinerários principais e 64 da rede de estradas secundárias);
- o custo total da rede, descrito em 3.6.5, é de, aproximadamente, 3.1 biliões.

Os círculos a preto representam os nós cidade, a vermelho os nós vila, a laranja os nós aldeia e a cinza os nós de interligação. As linhas a azul representam as autoestradas, a verde os itinerários principais e a preto as estradas secundárias.

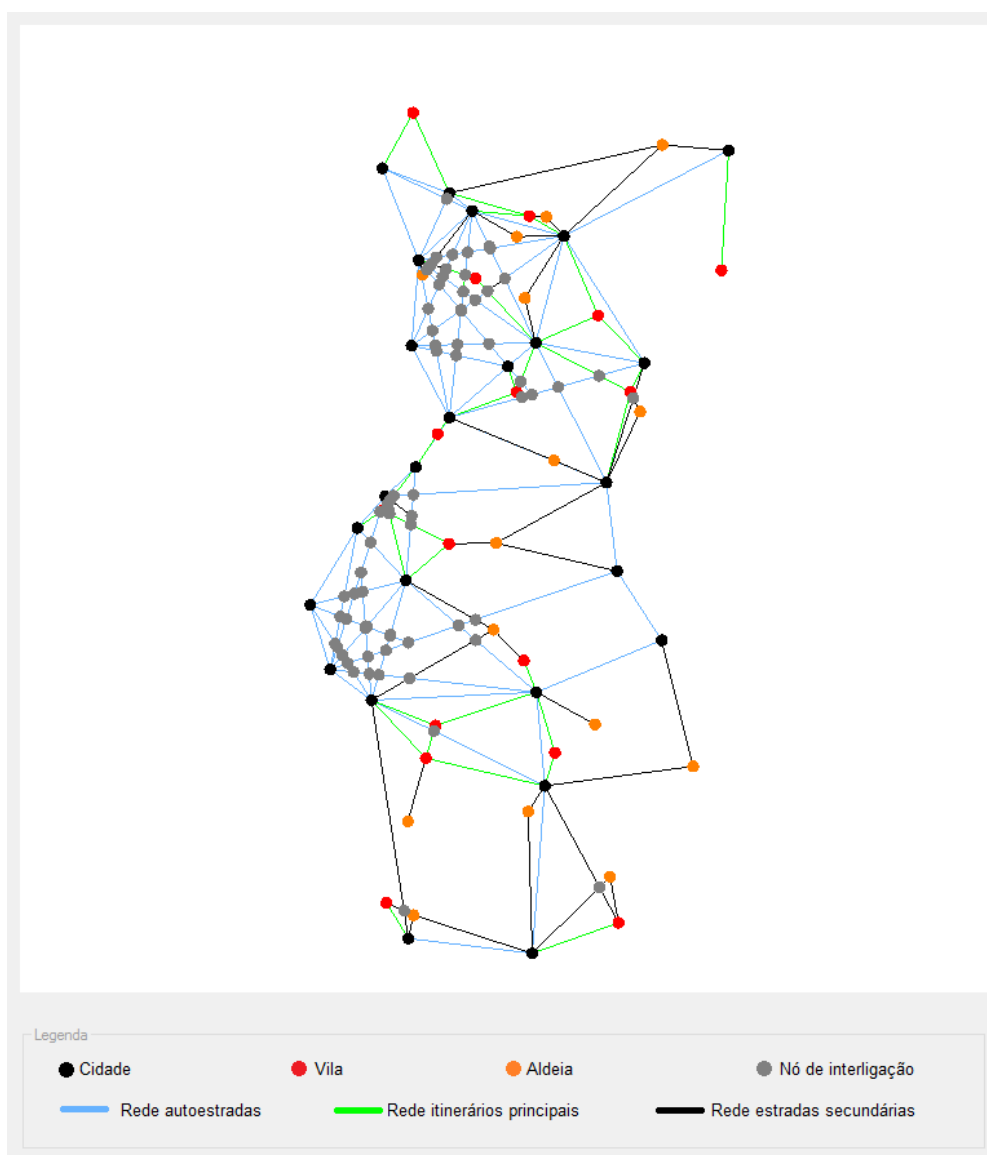


Figura 32 – Ordem decrescente trânsito

### 5.3 Comparação de tempo de geração de uma rede

A comparação de tempos, entre os diferentes métodos implementados, foram realizados usando um processador Intel i7 a 2.4 GHz e 6 Gb de memória.

Na Tabela 2 encontram-se o tempo médio (em segundos) para se obter as redes descritas na secção 5.2 (25 cidades, 16 vilas e 15 aldeias). Os parâmetros de cálculo usados foram os mesmo da Figura 8 (secção 3.6).

Tabela 2 – Tempos médios obtidos

Método	Número de nós obtidos	Número de estradas obtidas	Tempo médio (segundos)
Ordem crescente população	342	570	76
Ordem decrescente população	142	269	11
Ordem crescente trânsito	348	584	98
Ordem decrescente trânsito	142	268	18

Analisando a Tabela 2, pode-se concluir que usando ordenação crescente de população e de trânsito os resultados obtidos tanto em termos de rede como de tempo são similares. Conclui-se também que, os métodos de ordenação decrescente geram redes com menos nós, menos estradas e em menos tempo que os métodos de ordenação crescente.

### 5.4 Análise da rede gerada

A Tabela 3 compara a rede de autoestradas gerada na Figura 15 com a rede de autoestradas existente em Portugal Continental. As distâncias reais entre as Câmaras Municipais foram obtidas usando a aplicação *online Google Maps*.

Para esta comparação será tida em conta apenas as ligações entre as 18 capitais de distrito (Figura 10), sendo considerado que se interligam unicamente por autoestradas.

Tabela 3 – Distâncias da rede de autoestradas gerada versus existente

<b>Ligação gerada</b>	<b>Distância em linha reta (Km)</b>	<b>Distância Real (Km)</b>
Viana do Castelo - Braga	37.0	62.2
Viana do Castelo - Porto	63.6	75.9
Braga - Vila Real	63.8	107
Braga - Porto	47.1	53.3
Braga - Viseu	108.2	179
Porto - Vila Real	74.2	95.7
Vila Real - Bragança	99.6	121
Porto - Viseu	80.2	126
Porto - Coimbra	105.4	117
Porto - Aveiro	56.7	73.4
Aveiro - Vila Real	105.4	161
Vila Real - Viseu	72.2	94.0
Vila Real - Guarda	93.3	170
Aveiro - Viseu	62.6	87.5
Viseu - Guarda	56.5	75.5
Aveiro - Coimbra	51.4	59.0
Aveiro - Leiria	100.7	118
Coimbra - Viseu	66.1	88.8
Viseu - Castelo Branco	99.3	168
Castelo Branco - Guarda	56.5	97.8
Coimbra - Guarda	105.1	164
Coimbra - Leiria	61.5	73.6
Coimbra - Santarém	110.2	137
Coimbra - Castelo Branco	121.5	141
Leiria - Castelo Branco	113.3	167
Leiria - Portalegre	128.7	172
Castelo Branco - Portalegre	58.9	94.6
Leiria - Santarém	56.8	79.5
Santarém - Castelo Branco	121.5	157
Leiria - Lisboa	118.2	147
Lisboa - Santarém	70.8	83.0
Santarém - Setúbal	81.3	118
Santarém - Évora	100.2	162
Lisboa - Portalegre	161.7	232
Portalegre - Évora	90.4	102
Lisboa - Évora	108.1	135
Lisboa - Setúbal	29.6	49.5
Setúbal - Évora	85.8	100
Setúbal - Beja	106.7	144
Beja - Évora	62.2	81.2
Beja - Faro	111.1	148
Lisboa - Faro	215.8	279
<b>Total Km autoestradas:</b>	<b>3719.2</b>	<b>5096.5</b>

Dado que a rede gerada apenas faz ligações em linha reta, conseqüentemente, o número de quilómetros de rede gerada (3719 Km) é inferior aos existentes na realidade (5096 Km).

Por outro lado, os quilómetros reais de autoestrada, em alguns casos, encontram-se contabilizados mais que uma vez, exemplo: a ligação "Porto - Aveiro" e "Porto - Coimbra" foi contabilizado como sendo duas ligações separadas, quando na realidade a ligação "Porto - Aveiro" usa parte da ligação "Porto - Coimbra" (autoestrada A1).

## **5.5 Sumário**

Neste capítulo foram comparados os quatro métodos de ordenação implementados, sendo possível constatar que, usando ordenação decrescente, independentemente se de população ou de trânsito, os resultados obtidos geram um número menor de estradas e de nós de interligação. Por outro lado, a ordenação crescente gera mais redundância de ligações entre os nós e conseqüentemente o seu custo total de rede é superior.

Foi também comparada uma rede de autoestradas obtida usando o algoritmo implementado com a rede de autoestradas existentes em Portugal Continental.



## 6 Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo são abordadas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste projeto, bem como das melhorias a implementar de forma a melhorar o protótipo.

### 6.1 Conclusões

O objetivo inicial do projeto era o de criar e implementar um protótipo que mediante a introdução de coordenadas geográficas de cidades, vilas e aldeias gerasse uma rede rodoviária.

Durante o desenvolvimento do protótipo foram implementados quatro métodos de ordenação, analisados no capítulo 5. O motivo de não terem sido removidos os métodos que geram custos de rede mais elevados, reside no facto de que o utilizador pode ter interesse em uma solução que crie mais ligações entre os nós, mesmo que isso implique um aumento do custo da rede gerada (ordenação crescente de trânsito ou população).

Dado que a existência de uma estrada depende da existência, ou não, das estradas analisadas antes de si, nesta fase não foi possível implementar paralelismo (*threads*) no algoritmo.

Na análise da "rede de autoestradas", "rede de itinerários principais" e "rede de estradas secundárias" poderão ser gerados nós de interligação, pelo que ter-se-á de analisar se compensa a ligação de cada nó da análise em questão com todos os nós da sua rede bem como da rede anterior. Tal é possível constatar no capítulo 5 usando a "ordenação crescente de trânsito", donde dos 56 nós iniciais foram obtidos 348 nós na solução final. Este facto, juntamente com o facto de não haver paralelismo no algoritmo, leva a que a análise se torne um pouco mais lenta no caso de existir uma diversidade de nós muito grande, tal como demonstrado na Tabela 2.

No capítulo 5, os mesmos nós foram analisados usando os mesmos parâmetros, mudando apenas o método de ordenação. É possível concluir que a ordem pela qual a análise é realizada influencia o resultado final da rede rodoviária e que os métodos que usam ordenação "decrecente" geram redes com um menor número de estradas e com custo total de rede menor.

Os objetivos para esta tese foram atingidos e são satisfatórios, cumprindo os requisitos iniciais:

- produz o custo da rede;
- a rede gerada assemelha-se ao que se encontra no mundo real;
- a rede gerada é adequada para ser usada em simuladores virtuais.

## 6.2 Trabalho futuro

Embora o protótipo satisfaça o objetivo inicial do projeto, é ainda possível melhorá-lo, nomeadamente nos seguintes aspetos:

- ser mais acessível de utilizar por utilizadores daltónicos, por exemplo usar uma forma geométrica diferente para cada tipo de nó;
- haver a possibilidade de criar ou remover uma ligação entre nós manualmente;
- ser possível interagir com a janela OpenGL usando o rato, por exemplo para mostrar informação sobre o nó ao clicar sobre o mesmo;
- implementar *threads* no algoritmo;
- unir nós de interligação que se encontrem a uma determinada distância, de forma a assim reduzir o número de estradas existentes, e consequentemente reduzir o custo de construção da rede.

# Referências

## Referências bibliográfica

- [IMTT, 2010] Relatório de Monitorização da Rede Rodoviária Nacional, 2010. <http://www.imtt.pt> [ultimo acesso: Set 2014]
- [INE, 2011] Censos 2011 - Resultados definitivos. <http://censos.ine.pt/> [ultimo acesso: Nov 2013]
- [Jean Metz et al., 2007] Jean Metz, Rodrigo Calvo, Eloize Seno, Roseli Romero, Zhao Liang. Redes Complexas: conceitos e aplicações, 2007.
- [Vânia Campos, 1997] Vânia Campos. Algoritmos para resolução de problemas em redes, 1997.
- [Eric Galin et al., 2010] Eric Galin, A. Peytavie, N. Maréchal, E. Guérin. Procedural generation of roads, 2010.
- [Dave Shreiner et al., 2013] Dave Shreiner, Graham Sellers, John Kessenich, Bill Licea-Kane. OpenGL Programming Guide, Eighth Edition (the "Red Book"), 2013.
- [OpenGL, 1992] David Rogelberg, Joanne Clapp Fullagar. OpenGL Reference Manual (the "Blue book"), 1992.
- [FCA, 2005] Pimenta Rodrigues, Pedro Pereira, Manuela Sousa. Programação em C++ - Conceitos Básicos e Algoritmos, 7ª edição. Editora: FCA, 2005.
- [Wenhuan Shi et al., 2009] Wenhuan Shi, Shuhan Shen, Yuncai Liu. Automatic Generation of Road Network Map from Massive GPS Vehicle Trajectories, 2009.
- [Eric Bruneton, Fabrice Neyret, 2008] Eric Bruneton, Fabrice Neyret. Real-time rendering and editing of vector-based terrains, 2008.
- [Guoning Chen et al., 2008] Guoning Chen, Gregory Esch, Peter Wonka, Pascal Müller, Eugene Zhang. Interactive Procedural Street Modeling, 2008.
- [Chen Chen, Yinhang Cheng, 2008] Chen Chen, Yinhang Cheng. Roads Digital Map Generation with Multi-track GPS Data, 2008.
- [Li Gang, Shi Guangshun, 2010] Li Gang, Shi Guangshun. Procedural Modeling of Urban Road Network, 2010.
- [Yoav Parish, Pascal Müller, 2001] Yoav Parish, Pascal Müller. Procedural Modeling of Cities, 2001.

[Sarah Ostadabbas et al., 2011]	Sarah Ostadabbas, Masoud Farshbaf, Mehrdad Nourani, Sateesh Addepalli. Layered Semi-Markov Road Generation for Driving Simulations, 2011.
[Yongwei Mao, Yanjun Li, 2011]	Yongwei Mao, Yanjun Li. An efficient method of 3D road automatic generating, 2011.
[Tobias Haubrich et al., 2014]	Tobias Haubrich, Sven Seele, Rainer Herpers, Peter Becker. Integration of Road Network Logics into Virtual Environments, 2014.
[Tao Guo et al., 2007]	Tao Guo, Kazuaki Iwamura, Masashi Koga. Towards High Accuracy Road Maps Generation from Massive GPS Traces Data, 2007.
[Soon Tee Teoh, 2002]	Soon Tee Teoh. Algorithms for the Automatic Generation of Urban Streets and Buildings, 2002.
[Basil Weber et al., 2009]	Basil Weber, Pascal Müller, Peter Wonka, Markus Gross. Interactive Geometric Simulation of 4D Cities, 2009.
[Eric Galin et al., 2011]	Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Bedřich Beneš. Authoring Hierarchical Road Networks, 2011.
[CEUB/ICPD, 2004]	CEUB/ICPD - Instituto CEUB de pesquisa e desenvolvimento. Curso de GPS e cartografia básica, 2004.

## Webgrafia

[URL1]	<a href="http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html">http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html</a> [ultimo acesso: Nov 2013]
[URL2]	<a href="http://www.opengl.org/about/">http://www.opengl.org/about/</a> [ultimo acesso: Nov 2013]
[URL3]	<a href="http://www.kevs3d.co.uk/dev/lsystems/">http://www.kevs3d.co.uk/dev/lsystems/</a> [ultimo acesso: Jun 2014]
[URL4]	<a href="http://msdn.microsoft.com/pt-BR/library">http://msdn.microsoft.com/pt-BR/library</a> [ultimo acesso: Jul 2014]
[URL5]	<a href="http://groups.engin.umd.umich.edu/CIS/course.des/cis479/projects/agent/Intelligent_agent.html">http://groups.engin.umd.umich.edu/CIS/course.des/cis479/projects/agent/Intelligent_agent.html</a> [ultimo acesso: Jul 2014]
[URL6]	<a href="http://www.priberam.pt/DLPO/">http://www.priberam.pt/DLPO/</a> [ultimo acesso: Set 2014]