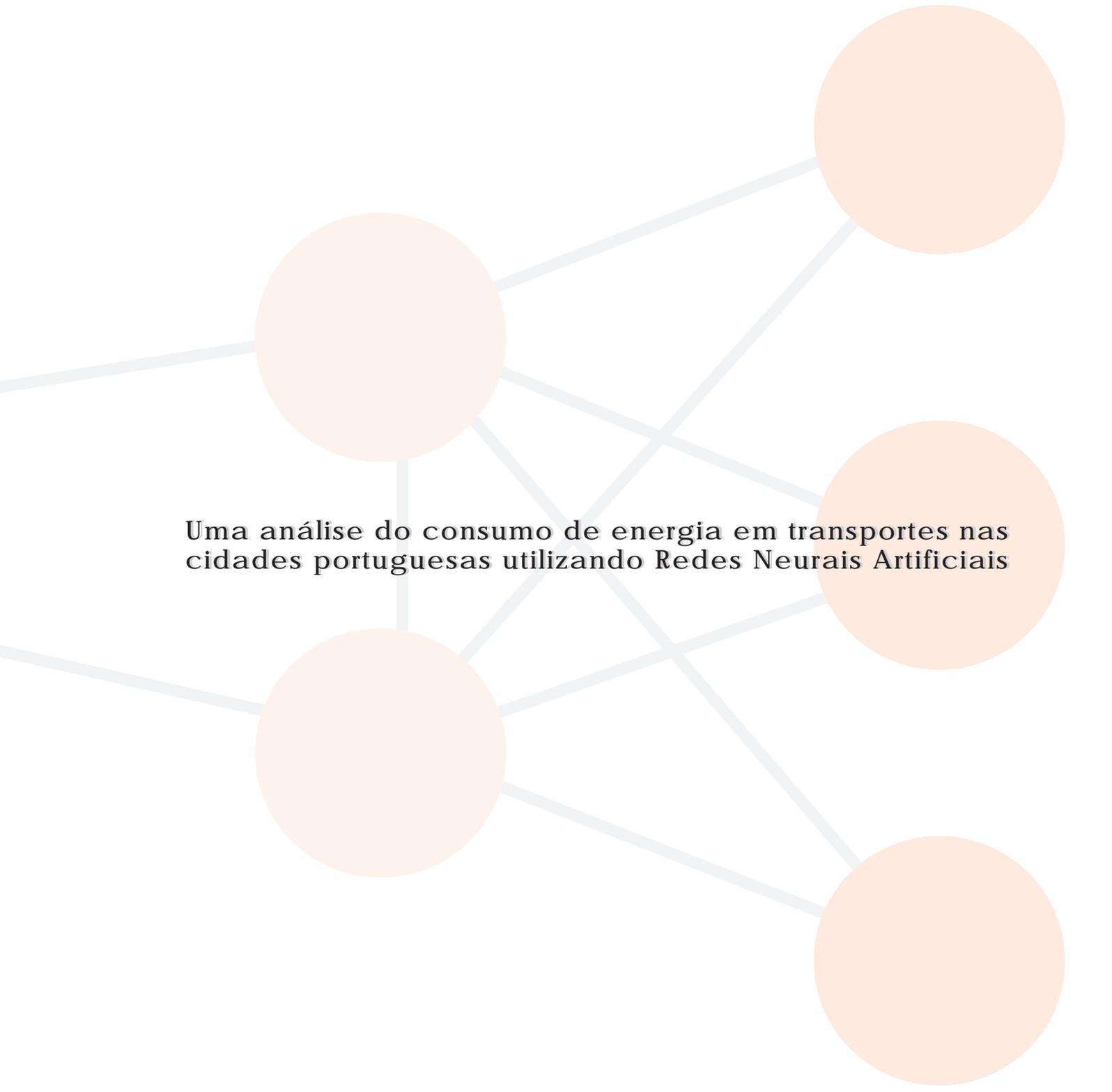




Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia
Universidade do Minho



Uma análise do consumo de energia em transportes nas
cidades portuguesas utilizando Redes Neurais Artificiais

Paula Teixeira da Costa

Braga, Janeiro de 2003

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Municipal

Orientador científico:
Professor José Fernando Gomes Mendes
Universidade do Minho

Co-Orientador científico:
Professor António Nelson Rodrigues da Silva
Universidade de São Paulo, Brasil

AGRADECIMENTOS

O exercício da investigação leva-nos por um labirinto de caminhos, ao mesmo tempo espectaculares e assustadores. Espectacular, porque se trata de uma ‘viagem’ com toda a emoção e vontade de ver tudo aquilo que jamais havia sido visto. Assustador, porque os caminhos são por vezes tortuosos e dificilmente se conhece o fim. Alguém já comparou o caminho da investigação com o escalar de montanhas, que só depois de escalada a primeira montanha, se tem conhecimento que existe outra logo em seguida. Também no presente trabalho houve altos e baixos, momentos de confiança e momentos de dúvida. No ano que passou, muitas pessoas estiveram a meu lado acompanhando esta ‘escalada’ e cada uma delas contribuiu, de alguma forma, para a chegada ao final da minha caminhada. É a todas elas que eu quero prestar aqui meu agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter colocado no meu caminho duas pessoas tão nobres como os meus orientadores científicos. Ao Professor José Fernando Gomes Mendes, na pessoa de orientador científico, agradeço principalmente as suas críticas que sem dúvida contribuíram para conduzir este trabalho a um nível mais elevado. Além de um excelente professor, tem sido um grande amigo, cujo apoio tem-se revelado muito importante na minha vida. Ao Professor António Nelson Rodrigues da Silva, na pessoa de co-orientador científico, quero agradecer toda a dedicação e elogiar a clareza com que transmite os seus conhecimentos. É, sem dúvida, um grande mestre e alguém com quem trabalhar é um prazer. Não quero deixar de manifestar o quanto me sinto orgulhosa de ter sido orientada por dois professores de elevada competência científica, que muito contribuíram para o meu crescimento científico e valorização pessoal.

À Universidade do Minho, na pessoa do seu Reitor, os meus maiores agradecimentos. As instalações e a qualidade do equipamento disponibilizado no Laboratório de Sistemas de Informação Geográfica permitiram atingir os objectivos propostos neste trabalho.

À Lea, agradeço a harmonia do ambiente de trabalho. A sua alegria contagiante e o seu incentivo nos momentos difíceis contribuíram de uma forma muito particular para o sucesso da minha caminhada.

Aos colegas do subgrupo de Planeamento e Arquitectura do Departamento de Engenharia Civil, agradeço a camaradagem e o incentivo. Ao Rui, Daniel e Lígia, um especial obrigado pelas pequenas ‘grandes’ ajudas que tão importantes foram para atingir os meus objectivos.

Agradeço ao Pedro Campos e ao Nuno Toriz do Instituto Nacional de Estatística, cujo empenho na procura e aquisição dos dados, necessários a este trabalho, foi louvável. Ao Professor Henrique Albergaria, da mesma instituição, que permitiu a divulgação dos mesmos.

O apoio das pessoas extra universidade foi também muito importante. Aos meus amigos, em especial à Wendy, agradeço todo o apoio. Á minha família, especialmente aos meus avós, que nunca deixaram de se preocupar. Um agradecimento muito especial aos meus pais, por tudo o que sou hoje e por terem sempre acreditado. Obrigada mãe por me apoiares e me aconselhares. As conversas contigo são sempre enriquecedoras.

Finalmente, à pessoa mais importante para mim, que sempre esteve do meu lado, me apoiou, encorajou e partilhou comigo todos os momentos. O teu apoio, paciência e por vezes a dureza das tuas críticas fizeram de mim uma pessoa melhor.

RESUMO

Estudos empíricos realizados em várias partes do mundo demonstraram a existência de uma forte relação entre o planeamento físico das cidades e o consumo de energia em transportes, de tal modo que, nas cidades mais dispersas o consumo de energia para este fim é expressamente mais elevado do que nas cidades mais compactas. Nos países industrializados o consumo de energia tem-se mantido em níveis elevados e crescentes. Mais grave, é a constatação de que, apesar dos custos que esta situação acarreta, tanto económicos como ambientais, muitos países ainda não realizaram estudos para entender melhor o fenómeno e de alguma forma procurar monitorá-lo. O objectivo deste trabalho é dar o contributo ao país, através da análise da situação nas principais cidades portuguesas, à excepção das zonas de Lisboa e Porto, identificando algumas das variáveis que caracterizam os aspectos físicos da cidade, bem como os aspectos socioeconómicos, que interferem, de forma significativa, no consumo de energia em transportes.

A recente edição do *Atlas das Cidades de Portugal* pelo Instituto Nacional de Estatística e o acesso à sua *Base Geográfica de Referenciação da Informação*, com os limites das subsecções estatísticas em formato digital, foram importantes elementos para reduzir os problemas decorrentes do nível de agregação dos dados estatísticos encontrados durante a pesquisa. Estes elementos permitiram obter as manchas urbanas das cidades portuguesas, assim como alguns dados relativos a este nível de agregação. Uma vez recolhidos todos os dados possíveis, procedeu-se a uma análise através da utilização de Redes Neurais Artificiais, ferramenta que possibilita identificar e classificar as variáveis de acordo com suas importâncias relativas, neste caso em relação ao consumo de energia, que é a variável dependente do modelo. Os resultados obtidos reforçam a tendência internacional ao confirmar a influência das *características da forma urbana e distribuição da população* no consumo de energia em transportes. O número de pessoas empregadas nas várias *actividades económicas* revelou ser o grupo classificatório de maior importância na variação do consumo de energia, porém *as características da forma urbana e distribuição da população* manifestaram ter elevada influência, sobrepondo-se mesmo aos grupos classificatórios *rede viária e acessibilidades e frota automóvel*.

ABSTRACT

Empirical studies carried out in several parts of the world have highlighted the existence of a strong relationship between the physical planning of cities and energy use for transportation. In general, sprawled cities spend significantly more energy in transportation than compact cities. In addition to that, the levels of energy demand for transportation in developed countries, although very high, keep growing continuously. Even more critical is the fact that, despite the economic and environmental costs produced by urban sprawl, several countries have not yet started to study the phenomenon in order to better understand it and to somehow control it. Thus, this study tries to bring a contribution to the subject through an analysis of the situation found in some of the main Portuguese cities, which however do not include Lisbon and Oporto. The main objective of this work is to identify the variables related to physical aspects of the cities and socioeconomic characteristics of urbanized areas in Portugal that significantly influence energy consumption for transportation. The recent release of the *Atlas of Portuguese Cities* by the National Statistical Institute and the access to its *Geographic Base of Information Reference* that contains the limits of statistical subsections in digital format were important elements for coping with the problems caused by improper levels of data aggregation found during the research. They were used for the delimitation of the urbanized areas selected for the study and thereafter for adjusting the variables to the same level of aggregation. After the spatial and socioeconomic data were combined in a single database, they were analyzed using Artificial Neural Network models, in order to identify variables that are relevant to energy consumption for transportation, along with their relative weights. The results found in the current study confirmed the trend observed in several countries worldwide, in which the *characteristics of urban form and population distribution* played an important role influencing energy use for transportation. The number of people working in several *economic activities* was the most important group influencing energy use for transportation, but the *characteristics of urban form and population distribution* have also shown a high relative importance, even higher than the values found for the groups *road network and accessibility* and *automobile fleet*.

ÍNDICE

| | |
|--|-------------|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | iv |
| ÍNDICE | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE TABELAS | x |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 <i>CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA</i> | <i>1</i> |
| 1.2 <i>JUSTIFICAÇÃO DO TRABALHO</i> | <i>3</i> |
| 1.3 <i>OBJETIVO</i> | <i>4</i> |
| 1.4 <i>ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO</i> | <i>4</i> |
| 2 FORMA URBANA E CONSUMO DE ENERGIA EM TRANSPORTES | 6 |
| 2.1 <i>INTRODUÇÃO</i> | <i>6</i> |
| 2.2 <i>A FORMA URBANA E O PLANEAMENTO FÍSICO COMO FACTORES RELEVANTES NO CONSUMO DE ENERGIA EM TRANSPORTES</i> | <i>7</i> |
| 2.2.1 <i>A Cidade Compacta</i> | <i>8</i> |
| 2.2.2 <i>Planeamento e Uso do Solo</i> | <i>13</i> |
| 2.2.3 <i>Modelos de Transportes nas Cidades</i> | <i>15</i> |
| 2.3 <i>A INFLUÊNCIA DOS FACTORES SOCIOECONÓMICOS NO CONSUMO DE ENERGIA EM TRANSPORTES</i> | <i>19</i> |
| 2.3.1 <i>Nível Económico dos Consumidores</i> | <i>21</i> |
| 2.3.2 <i>Desenvolvimento Económico das Regiões</i> | <i>22</i> |
| 2.3.3 <i>Custo de Posse e Utilização do Automóvel</i> | <i>23</i> |

| | |
|--|-----------|
| 3 REDES NEURAS ARTIFICIAIS | 25 |
| 3.1 AS REDES NEURAS ARTIFICIAIS E A ANALOGIA BIOLÓGICA..... | 26 |
| 3.2 BREVE HISTÓRIA DAS REDES NEURAS | 28 |
| 3.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DAS REDES NEURAS | 30 |
| 3.3.1 Elementos de Processamento | 30 |
| 3.3.2 Estado de Activação | 31 |
| 3.3.3 Função de Saída de Cada Elemento de Processamento | 32 |
| 3.3.4 Ligação entre Elementos de Processamento | 32 |
| 3.3.5 Propagação e Função de Combinação..... | 33 |
| 3.3.6 A Aprendizagem | 33 |
| 3.3.6.1 Aprendizagem Supervisionada..... | 34 |
| 3.3.6.2 Aprendizagem por Reforço | 34 |
| 3.3.6.3 Aprendizagem não Supervisionada..... | 35 |
| 3.3.6.4 Aprendizagem por Competição..... | 35 |
| 3.4 AS REDES PERCEPTRON MULTI-CAMADAS | 36 |
| 3.4.1 O Perceptron..... | 36 |
| 3.4.2 As Redes Multilayer Perceptron | 37 |
| 3.4.3 Topologia | 38 |
| 3.5 REGRA DELTA GENERALIZADA E ALGORITMO BACKPROPAGATION.... | 39 |
| 3.6 FUNÇÕES DE ACTIVAÇÃO: A FUNÇÃO SIGMÓIDE..... | 41 |
| 3.6.1 Função Sigmóide..... | 43 |
| 3.6.2 Comportamento da Função Sigmóide numa Rede Simples | 44 |
| 3.7 EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO DE UMA RNA NUMA FOLHA DE CÁLCULO..... | 45 |
| 3.8 UTILIZAÇÃO DE RNAS | 47 |
| 3.8.1 Características que Deve Possuir o Problema..... | 48 |
| 3.8.2 Características do Problema que Tornam Desaconselhável a Utilização de RNAs..... | 48 |
| 3.8.3 Inconvenientes das Redes Neurais | 49 |
| 4 METODOLOGIA | 50 |
| 4.1 SELECÇÃO DAS VARIÁVEIS | 50 |
| 4.1.1 Variáveis Socioeconómicas | 52 |
| 4.1.2 Variáveis de Natureza Espacial Destinadas a Caracterizar a Distribuição da População no Território..... | 54 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.2.1 | Relação Entre a Área do Aglomerado Urbano e a Área do Menor Círculo que o Envolve..... | 56 |
| 4.1.2.2 | Factor Forma | 58 |
| 4.1.3 | Variáveis Relativas à Energia Consumida | 60 |
| 4.2 | <i>PROCESSAMENTO DAS VARIÁVEIS COM REDES NEURAS ARTIFICIAIS</i> | 61 |
| 4.2.1 | Cálculo das Importâncias Relativas das Variáveis de Entrada | 62 |
| 4.3 | <i>FERRAMENTA UTILIZADA PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS: EASYNN-PLUS</i> | 63 |
| 4.4 | <i>ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS</i> | 64 |
| 5 | SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE PRÉVIA DOS DADOS RECOLHIDOS | 67 |
| 5.1 | <i>EXCLUSÃO DAS ZONAS DE LISBOA E PORTO</i> | 68 |
| 5.2 | <i>AGLOMERAÇÃO DE CIDADES</i> | 70 |
| 5.3 | <i>EXCLUSÃO DAS CIDADES PERTENCENTES A CONCELHOS COM MAIS DE UM NÚCLEO URBANO</i> | 70 |
| 5.4 | <i>EXCLUSÃO DAS CIDADES COM CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS PARTICULARES</i> | 71 |
| 5.5 | <i>CONJUNTO DAS CIDADES ANALISADAS</i> | 71 |
| 6 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 76 |
| 6.1 | <i>RESULTADOS PRELIMINARES</i> | 76 |
| 6.2 | <i>EXCLUSÃO DE VARIÁVEIS DE BAIXA RELEVÂNCIA</i> | 82 |
| 6.3 | <i>TRANSFORMAÇÃO DE VARIÁVEIS</i> | 85 |
| 6.4 | <i>ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIÁVEIS</i> | 87 |
| 6.5 | <i>INSERÇÃO DE UMA VARIÁVEL CLASSIFICATÓRIA</i> | 91 |
| 6.5 | <i>SÍNTESE DOS RESULTADOS</i> | 99 |
| 7 | CONCLUSÃO | 102 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |
| | ANEXOS | 112 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Uso de energia <i>per capita</i> anual <i>versus</i> densidade urbana. <i>Fonte:</i> Adaptado de Newman & Kenworthy (1989b)..... | 11 |
| Figura 2.2 - Princípios desejáveis e não-desejáveis da forma urbana. <i>Fonte:</i> Adaptado de Verroen, 1995, <i>apud</i> Snellen, 2002..... | 20 |
| Figura 2.3 - Relação entre riqueza (<i>Gross Regional Product</i> - GRP) <i>per capita</i> e o uso automóvel em 37 cidades (1990). <i>Fonte:</i> Kenworthy <i>et al.</i> , 1997..... | 23 |
| Figura 3.1 - Representação de um neurónio biológico. | 28 |
| Figura 3.2 - Rede Neural com os neurónios organizados por camadas. | 31 |
| Figura 3.3 - Modelo não linear de um neurónio. <i>Fonte:</i> Haykin (1994)..... | 33 |
| Figura 3.4 - Camadas de um <i>Perceptron</i> . <i>Fonte:</i> Smith (1996)..... | 36 |
| Figura 3.5 - Funções de activação mais utilizadas nas RNAs..... | 42 |
| Figura 3.6 - Esquema da RNA utilizada na folha de cálculo. | 45 |
| Figura 3.7 - Funcionamento de uma RNA apresentada numa folha de cálculo..... | 46 |
| Fonte: Marktest, 2002 e INE, 2002 (1). | 53 |
| Figura 4.1 - Área da mancha urbanizada de Braga, definida a partir da agregação de subsecções estatísticas, e círculo envolvente à mesma. | 57 |
| Figura 5.1 - Cidades pertencentes à região Norte seleccionadas para o estudo..... | 73 |
| Figura 5.2 - Cidades pertencentes à região Centro seleccionadas para o estudo. | 73 |
| Figura 5.3 - Cidades pertencentes à região de Lisboa e Vale do Tejo seleccionadas para o estudo. | 74 |
| Figura 5.4 - Cidades pertencentes à região do Alentejo seleccionadas para o estudo. ... | 74 |
| Figura 5.5 - Cidades pertencentes à região do Algarve seleccionadas para o estudo. | 75 |
| Figura 6.1 - Erro Relativo Médio da variável de saída energia total, para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho. | 78 |
| Figura 6.2 - Erro Relativo Médio da variável de saída energia <i>per capita</i> , para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho. | 80 |
| Figura 6.3 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia total..... | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.4 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia <i>per capita</i> | 81 |
| Figura 6.5 - Relação entre valores normalizados (reais e estimados) de energia total, para os valores de validação, após a exclusão do <i>Factor Forma</i> | 83 |
| Figura 6.6 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia total depois de excluída a variável <i>Factor Forma</i> | 84 |
| Figura 6.7 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia <i>per capita</i> depois de excluídas as variáveis <i>Factor Forma</i> , <i>Prop_Pop</i> e <i>Dens_conc</i> ... | 85 |
| Figura 6.8 - Valores reais e estimados para os grupos de validação e teste dos modelos de energia total, obtidos após transformação logarítmica das variáveis. | 86 |
| Figura 6.9 - Variação da energia total com a variação de <i>Prop_pop</i> , mantendo as restantes variáveis com valores constantes (máximos, médios e mínimos)..... | 88 |
| Figura 6.10 - Variação da energia total com a variação de <i>Area_cid/Area_circ</i> , mantendo as restantes variáveis com valores constantes (máximos, médios e mínimos). | 88 |
| Figura 6.11 - Variação da energia total com a variação do <i>Factor Forma</i> , mantendo as restantes variáveis com valores constantes (máximos, médios e mínimos)..... | 89 |
| Figura 6.12 - Erros relativos do modelo de energia total, para os dados de validação (conjuntos 1, 2 e 3)..... | 92 |
| Figura 6.13 - Erros relativos do modelo de energia total, para os dados de teste (conjuntos 1, 2 e 3)..... | 93 |
| Figura 6.14 - Relação entre valores reais e estimados de energia total (em MJ), para os valores de validação e teste, após ter sido introduzida a variável classificatória (Conjunto 1). | 95 |
| Figura 6.15 - Relação entre valores reais e estimados de energia total (em MJ), para os valores de validação e teste, após ter sido introduzida a variável classificatória (Conjunto 2). | 95 |
| Figura 6.16 - Relação entre valores reais e estimados de energia total (em MJ), para os valores de validação e teste, após ter sido introduzida a variável classificatória (Conjunto 3). | 96 |
| Figura 6.17 - Importância relativa das variáveis de entrada obtidas no modelo após a introdução da variável classificatória..... | 97 |
| Figura 6.18 - Importância dos grupos classificatórios no consumo de energia em transportes por conjunto estudado..... | 98 |
| Figura 6.19 - Influência relativa dos grupos de factores urbanos e económicos no consumo de energia em transportes. | 99 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Conjunto de variáveis que podem influenciar o consumo de energia em transportes. | 51 |
| Tabela 4.2 - Variáveis socioeconómicas agregadas ao nível do concelho..... | 53 |
| Tabela 4.3 - Variáveis socioeconómicas agregadas ao nível da cidade. | 54 |
| Tabela 4.4 - Variáveis de natureza espacial destinadas a caracterizar a distribuição da população no território. | 59 |
| Tabela 4.5 - Factores de conversão da energia calorífica dos combustíveis..... | 60 |
| Tabela 4.6 - Variável de energia agregada ao nível do concelho..... | 61 |
| Tabela 5.1 - Cidades adjacentes à cidade de Lisboa excluídas do estudo..... | 69 |
| Tabela 5.2 - Cidades adjacentes à cidade do Porto excluídas do estudo..... | 69 |
| Tabela 5.3 - Cidades agregadas num único aglomerado urbano..... | 70 |
| Tabela 5.4 - Cidades excluídas por constituírem aglomerados fisicamente separados dentro do mesmo concelho..... | 71 |
| Tabela 5.5 – Lista total das 74 cidades seleccionadas para o estudo. | 72 |
| Tabela 6.1 - Selecção da RNA com melhor desempenho para a energia total. | 77 |
| Tabela 6.2 - Valores do Erro Relativo da variável de saída energia total, para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho. | 78 |
| Tabela 6.3 - Selecção da RNA com melhor desempenho para a energia <i>per capita</i> | 79 |
| Tabela 6.4 - Valores do Erro Relativo da variável de saída energia <i>per capita</i> , para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho. | 80 |
| Tabela 6.5 - Valores de desempenho dos modelos de energia total para os valores de validação, obtidos para os três conjuntos após a exclusão da variável <i>Factor Forma</i> | 83 |
| Tabela 6.6 - Valores de desempenho dos modelos de energia <i>per capita</i> para os valores de validação, obtidos para os três conjuntos após a exclusão das variáveis <i>Factor Forma, Prop_Pop e Dens_conc</i> | 83 |
| Tabela 6.7 - Valores de desempenho para os grupos de validação e teste dos modelos de energia total, obtidos após transformação logarítmica das variáveis. | 87 |

| | |
|---|----|
| Tabela 6.8 - Valores de desempenho para os grupos de validação e teste dos modelos de energia <i>per capita</i> , obtidos após transformação logarítmica das variáveis..... | 87 |
| Tabela 6.9 - Comparação de duas situações distintas em que o <i>Factor Forma</i> toma o mesmo valor para graus de compactação geométrica diferentes. | 90 |
| Tabela 6.10 - Valores de desempenho do modelo de energia total, obtidos para os dados de validação após a inserção da variável classificatória. | 94 |
| Tabela 6.11 - Valores de desempenho do modelo de energia total, obtidos para os dados de teste após a inserção da variável classificatória. | 94 |
| Tabela 6.12 - Valores da importância relativa de cada variável e respectivos grupos classificatórios..... | 98 |

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo destaca os pontos mais importantes da pesquisa efectuada. Dividiu-se o mesmo em três partes principais: uma primeira onde se faz uma breve caracterização do problema investigado, referindo os principais factores que de alguma forma influenciam o consumo de energia em transportes, uma segunda parte onde se justifica o tema proposto, e uma terceira onde se apresenta o principal objectivo da pesquisa. Além destas três partes principais, o capítulo contém ainda uma apresentação da forma como o presente documento se encontra organizado.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A partir da década de 90, e principalmente após a primeira Cimeira da Terra ("*Earth Summit*") realizada no Rio de Janeiro em 1992 sobre a problemática da sustentabilidade em geral, e da sustentabilidade urbana em particular, tem crescido o interesse pelo conceito de *cidade compacta*, isto é, uma cidade com alta densidade e forma urbana adequada a um uso misto do solo. As vantagens da cidade compacta seriam várias: conservação dos terrenos rurais, menor necessidade de utilização do automóvel, diminuição da emissão de poluentes, maior conservação de energia, etc. Estas vantagens são vistas como contributos ao objectivo de desenvolvimento sustentável, tanto ao nível económico e social como ao nível ambiental.

A *ideia* da cidade compacta - no que diz respeito a altas densidades, uso misto do solo, reutilização de terrenos urbanos abandonados e à reorganização dos sistemas de transportes - está a ser alvo de estratégias nas políticas de planeamento de muitos países. Este facto deve-se, em grande medida, à constatação de que existe, em cidades de várias partes do mundo, um grau de espalhamento urbano muito elevado. Uma das principais consequências deste espalhamento parece ser o excessivo consumo de combustíveis,

que essencialmente, se deve à elevada quantidade e extensão das viagens efectuadas, todos os dias, por biliões de pessoas. Cidades mundialmente conhecidas, como Houston, Phoenix, Los Angeles, Perth, Adelaide e Sydney são exemplos de cidades espalhadas cujos sistemas de transporte são direccionados ao uso de automóvel.

Em termos de eficácia económica, se fossem contabilizados os custos derivados dos problemas de trânsito e da ineficácia dos modelos de transportes de cidades de muitos países, certamente se chegaria a valores preocupantes. Para ter uma vaga ideia, bastaria contabilizar o tempo que cada indivíduo despende diariamente no trânsito para chegar ao local de trabalho e deste para regressar a casa, ao final do dia. Adoptando-se o valor médio de trinta minutos diários no total, obtido em alguns estudos já efectuados (Manning, 1978; Pederson, 1980; Zahavi & Ryan, 1980), e considerando, que se esse tempo fosse despendido a produzir o país teria um ganho médio por pessoa de 0,5 euros por hora, isto representaria, num país como Portugal, com uma população activa de 5 252 000 pessoas (DETEFP, 2002), um custo de 1 313 000 euros diários. O que demonstra que esta situação também não é sustentável em termos económicos.

Por este motivo alguns autores, como Newman & Kenworthy (1989a e 1989b) e Næss (1995), por exemplo, defendem o conceito de cidade compacta, para eles, as cidades espalhadas não podem ser consideradas económicas no que se refere ao consumo de energia em transportes. Segundo estes autores, com uma vasta experiência em trabalhos efectuados sobre o tema, factores como o planeamento urbano direccionado a um uso misto do solo e associado a uma organização e gestão eficaz dos sistemas de transportes, que incentive o transporte coletivo e não-motorizado, podem amenizar o problema do consumo excessivo de energia em transportes.

No entanto, existe uma certa resistência por parte de outros investigadores (Gordon & Richardson, 1989, podem ser citados como exemplos) relativamente a estas soluções. Esta rejeição foca-se no facto de que o planeamento físico das cidades não é a 'receita' para o problema, sustentando esta opinião no argumento de que medidas económicas, como a variação do preço do combustível, e custo de posse e uso automóvel seriam suficientes e adequadas para economizar a energia em transportes. O que a experiência de muitas cidades parece demonstrar, no entanto, é que o desprezo por questões relacionadas com o planeamento físico destas tem resultado em cidades cada vez mais espalhadas (com baixas densidades), desordenadas e anti-económicas no que se refere ao consumo de energia em transportes.

O que se apreende da leitura e análise de estudos empíricos já realizados em várias partes do mundo, é que de facto existe uma forte relação de variáveis relativas à forma urbana com o consumo de energia em transportes. De tal modo que, nas cidades mais espalhadas o consumo de energia para este fim é expressivamente mais elevado do que nas cidades compactas. A situação torna-se preocupante ao constatar-se que estes factores não são tidos em conta no planeamento das cidades dos países em desenvolvimento. É que o processo de espalhamento urbano está a atingir as cidades destes países, o que leva a que o consumo de energia em transportes tenha crescido consideravelmente e que as mesmas apresentem, hoje, patamares de consumo elevados (Silva *et al.*, 1999; Costa *et al.*, 2001). Nos países industrializados o consumo de energia tem-se mantido em níveis elevados e, pior do que isto, crescentes. Mais grave é a constatação de que, apesar dos custos que isto produz, tanto económicos como ambientais, muitos destes países ainda não realizaram estudos para entender melhor o fenómeno e de alguma forma procurar monitorá-lo.

1.2 JUSTIFICAÇÃO DO TRABALHO

Nos diversos estudos que relacionam forma urbana com consumo de energia em transportes foram analisadas cidades de diversos países, tais como: Estados Unidos, Canadá, Austrália, alguns países da Europa e Ásia (Newman & Kenworthy, 1989a e 1989b; Næss, 1995; Kenworthy & Laube, 1999a e 1999b); Snellen, 2002) e, mais recentemente, Brasil (Pampolha, 1999; Costa, 2001). Algumas destas pesquisas consistem em comparações dos modelos de consumo de energia entre cidades de diferentes países, como é o caso dos trabalhos de Newman & Kenworthy (1989a e 1989b) e Kenworthy & Laube (1999a 1999b), que comparam cidades dos Estados Unidos, Canadá, Austrália, e de países da Europa e da Ásia. Outros estudos consideram cidades dentro de uma mesma região ou país, como é o caso de Næss (1995), para os países nórdicos, e Pampolha (1999), para o Brasil. Costa (2001) restringe mesmo a pesquisa a um único estado do Brasil, São Paulo, analisando os municípios com população superior a 50 mil habitantes.

No que se refere ao caso português são poucas as pesquisas nesta área (por exemplo, Costa *et al.*, 2002), apesar da extrema relevância deste tipo de estudos. Tendo como justificação a escassez de estudos sobre o tema no país, pretende-se com este trabalho

realizar uma análise semelhante às já desenvolvidas, considerando as principais cidades portuguesas, à excepção das zonas de Lisboa e Porto (por representarem casos particulares no universo das cidades do país). Pretende-se então contribuir para o tema, através de um estudo que permite inclusive identificar os principais factores relacionados com o planeamento urbano das cidades que, no caso específico de Portugal, resultam num maior ou menor consumo de energia em transportes.

1.3 OBJETIVO

O objectivo deste trabalho consiste em identificar algumas das variáveis, que caracterizam tanto aspectos físicos como aspectos socioeconómicos, que interferem de forma significativa no consumo de energia em transportes, nas principais cidades portuguesas, valendo-se de Redes Neurais Artificiais como ferramenta de modelação matemática. Além de identificar quais as variáveis mais importantes neste contexto, este trabalho visa, também, determinar as suas importâncias relativas no consumo de energia em transportes.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O texto que compõe este estudo está dividido em sete capítulos. No capítulo que se segue é apresentado o estado de conhecimento sobre o tema, através de uma revisão bibliográfica e de alguns casos de estudos, efectuados por outros autores e julgados importantes para a presente pesquisa. Nele são apresentados, também, alguns conceitos que ajudam o leitor a compreender melhor a problemática do tema aqui colocado. Para tal, o capítulo foi dividido em duas partes distintas, uma primeira que aborda o planeamento físico e a forma urbana como factores relevantes no consumo de energia em transportes; e uma segunda parte que refere outros factores, como o nível económico dos consumidores, custos de posse e uso automóvel e desenvolvimento económico das regiões, que podem contribuir para um maior ou menor consumo de energia.

O capítulo três apresenta alguns conceitos básicos sobre a ferramenta de análise aqui utilizada, as Redes Neurais Artificiais, abordando os principais conceitos e permitindo, assim, melhor entender esta ferramenta. No quarto capítulo apresenta-se o método

adoptado nesta pesquisa, e um esquema do procedimento utilizado para apoio a futuros estudos. Neste capítulo são descritos detalhadamente o procedimento de selecção de variáveis e suas fontes, sendo também efectuada uma breve introdução ao *software* de Redes Neurais utilizado. O quinto capítulo é destinado à descrição do procedimento específico deste estudo adoptado na selecção do conjunto de cidades. No sexto capítulo são expostos os resultados encontrados, desde as análises preliminares até os modelos finais. São apresentadas as melhores topologias de redes obtidas, assim como medidas de desempenho dos modelos. Finalmente, são apresentadas as importâncias relativas das variáveis envolvidas. O capítulo sete contém as conclusões mais importantes do estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros. Por fim, apresenta-se a listagem das referências bibliográficas citadas no texto do presente documento.

2 FORMA URBANA E CONSUMO DE ENERGIA EM TRANSPORTES

O presente capítulo tem como objectivo apresentar conceitos relevantes sobre a relação entre o planeamento físico da cidade e o consumo de energia em transportes, tendo como base alguns estudos elaborados a nível internacional sobre o tema. Após uma breve introdução, este capítulo divide-se em duas partes. A primeira descreve os principais factores relativos ao planeamento físico e à forma urbana que influenciam a eficiência energética ao nível dos transportes (densidade populacional, forma urbana, usos do solo e modelo de transportes). Na segunda parte faz-se uma breve referência à influência de alguns factores socioeconómicos, como o preço de posse e uso automóvel, desenvolvimento económico das regiões e nível económico dos consumidores.

2.1 INTRODUÇÃO

Pode afirmar-se que só muito tarde se começou a relacionar a organização das várias actividades da sociedade com o consumo dos sistemas energéticos por forma a rentabilizar a eficiência destes últimos. Segundo Shipper (1994, *apud* Næss, 1995) este interesse surgiu apenas durante os anos 70 do século XX. Até então o mercado do petróleo era estável e as principais preocupações eram relativas à economia e à estabilidade de fornecimento deste. Mas, em 1973 deu-se o embargo árabe do petróleo, o que teve como consequência um aumento considerável no preço dos combustíveis. Ainda no final da mesma década, devido à Revolução Iraniana e à guerra entre o Irão e Iraque, os preços voltaram a subir e a atingir valores exorbitantes.

Na década de 80 dois acontecimentos vieram dar nova ênfase ao estudo da rentabilização dos sistemas energéticos: o acidente nuclear de Chernobil, em 1986, e a publicação do relatório da Comissão Mundial em Ambiente e Desenvolvimento, datada

de 1987 (Næss, 1995). Desde essa altura, as preocupações com a economia das fontes não-renováveis de combustível intensificaram-se e novas pesquisas foram surgindo no mundo académico com o objectivo de reduzir o consumo de energia. Em 1989, Newman e Kenworthy trazem a público uma pesquisa elaborada sobre o tema. Este trabalho, que compara regiões metropolitanas da Europa, Ásia, Austrália e América, teve um grande impacto internacional e foi, provavelmente, um dos mais criticados a este nível. Neste estudo concluiu-se, entre outras coisas, que o consumo de combustível diminuiu com o aumento da densidade populacional das cidades.

No entanto, segundo Snellen (2002), Newman e Kenworthy foram bastante criticados por não terem tido em conta o rendimento e o preço da gasolina e por questões que diziam respeito à ‘fiabilidade’ dos seus dados. Mesmo assim, este estudo tem sido um ponto de partida e uma referência para muitos que se seguiram e levou muitos planeadores a considerarem o facto de que os aspectos físicos das cidades pudessem ter um papel tão ou mais importante que os aspectos socioeconómicos no consumo de energia em transportes, como discutido neste capítulo.

2.2 A FORMA URBANA E O PLANEAMENTO FÍSICO COMO FACTORES RELEVANTES NO CONSUMO DE ENERGIA EM TRANSPORTES

O processo de urbanização caracteriza-se não só pelo crescimento da população urbana, mas também por uma redução da população rural (Silva, 1990). Isto leva a que se verifiquem significativas alterações na forma dos centros urbanos. A dispersão é uma das características mais comuns de uma urbanização desregrada e ausente de planeamento físico. A distribuição e ordenamento das actividades urbanas mais comuns (serviços, comércio, escolas, residências, etc.), juntamente com um planeamento eficaz dos meios de transporte poderiam contribuir para um crescimento mais sustentável das cidades, principalmente no que diz respeito à economia e meio-ambiente. Segundo Silva (1993), a dispersão urbana pode ocorrer como consequência de dois processos: *i*) baixas densidades em zonas residenciais, resultantes de grandes lotes individuais, ou *ii*) descontinuidade na ocupação do solo urbano. Os dois aspectos geram densidades urbanas globais baixas, conduzindo a cidades aparentemente ineficientes no que diz respeito ao consumo de energia em transportes.

A partir dos anos 90, e principalmente após a primeira Cimeira da Terra ("*Earth Summit*") realizada no Rio de Janeiro em 1992 sobre a problemática da sustentabilidade e, mais especificamente, da cidade sustentável, tem crescido o interesse pelo conceito de *cidade compacta* - isto é alta densidade e forma urbana adequada a um uso misto do solo. Segundo seus defensores, as vantagens da cidade compacta seriam várias:

- Conservação das zonas rurais;
- Revitalização das zonas urbanas;
- Menor necessidade de utilização do automóvel;
- Diminuição da emissão de poluentes;
- Maior conservação de energia;
- Redes de infra-estruturas de menor dimensão e conseqüentemente custos mais reduzidos;
- Rede de transportes públicos mais eficiente;
- Maior propensão para caminhadas e utilização da bicicleta;
- Melhores acessos aos serviços e comércio.

Estas vantagens são vistas como contributos ao objectivo de desenvolvimento sustentável, tanto ao nível económico e social como ao nível ambiental. Por este motivo, a *ideia* da cidade compacta - no que diz respeito a altas densidades, uso misto do solo e reutilização de terrenos urbanos abandonados, assim como novos modelos de transportes - está a ser alvo de estratégias na política de planeamento de muitos países.

2.2.1 A Cidade Compacta

A ideia de *cidade compacta* não é nova. De facto, esta parece retornar à cidade medieval, onde o rebuliço das actividades diárias era confinado às muralhas da cidade (Thomas & Cousins, 1996). O corrente interesse na *cidade compacta* deriva da procura pelo desenvolvimento sustentável e a conseqüente passagem das estratégias políticas à prática, tanto ao nível local, como nacional e internacional. As interpretações sobre a *cidade compacta* diferem com a natureza dos argumentos. Por exemplo, alguns autores defendem que esta compactação pode ser apenas percebida, obtida como resultado da eficiência das rotas dos sistemas de transporte que ligam núcleos urbanos espacialmente dispersos (Thomas & Cousins, 1996), enquanto outros defendem que esta se baseia na ideia de cidade autónoma, auto-suficiente e independente de forças exteriores (Scoffham & Vale, 1996). Segundo Burton (2002), a *cidade compacta* é usualmente

descrita como um dos seguintes tipos de cidade, duas das quais relativas ao ‘produto’ (i e ii) e uma relativa ao ‘processo’ (iii):

- i) Cidade de alta densidade;
- ii) Cidade com uso misto do solo;
- iii) Cidade mais ‘intensa’.

No seu trabalho, Burton (2002) identifica os diferentes aspectos, patentes na literatura existente, sobre estas três categorias de cidade que influenciam a sustentabilidade. Para cada aspecto, densidade ou uso misto do solo, corresponde um processo de ‘intensificação’ da cidade. Basicamente, ‘intensificação’ é um termo genérico para o processo de tornar as cidades mais compactas, e pode ser considerado em termos dos seguintes fenómenos: aumento da população, das urbanizações e do uso misto do solo dentro dos ‘limites’ da cidade (Burton, 2002). O processo de ‘intensificação’ implica a utilização de políticas de contenção do crescimento da área urbana e consolidação desta. O crescimento da cidade é acomodado dentro dos limites já existentes, ao invés de se instalar nas zonas rurais envolventes. Os cinturões verdes são exemplos desse tipo de política.

A densidade urbana vem sendo objecto de estudo devido ao facto de ser considerada um factor determinante para atingir a sustentabilidade. No entanto, não existe unanimidade relativamente aos valores de densidade mais adequados. A Cidade Jardim de Ebenezer Howard, por exemplo, propunha 45 habitações por hectare, o equivalente a 180 indivíduos por hectare (Howard, 1989). Segundo a associação *Friends of the Earth* (apud Burton, 2002), densidades líquidas de 225 a 300 pessoas por hectare são necessárias para atingir os objectivos de desenvolvimento sustentável. No entanto, de acordo com Bibby & Shepherd (1990), muitas urbanizações correntes na Inglaterra têm apenas entre 47 a 97 pessoas por hectare. Por outro lado, a densidade residencial em Kowloon, Hong Kong, é actualmente de 500 pessoas por hectare (Burton, 2002).

A cidade de alta densidade é provavelmente a mais comum interpretação da *cidade compacta*. As altas densidades são vistas como fundamentais para a vitalidade urbana e tidas como componentes essenciais para promover a ‘Cidade da Caminhada’ e evitar a dependência automóvel (Haughton & Hunter, 1994; Calthorpe, 1993; Duany & Plater-Zyberk, 1991). Embora a densidade seja usualmente considerada em termos de população, existem situações em que esta se refere à *densidade construtiva* ou número

de habitações por unidade de espaço (geralmente hectare). Na Inglaterra, o governo relaciona as densidades construtivas das urbanizações com a promoção de habitação mais barata e a diminuição do consumo de energia.

No tocante à eficiência energética ao nível dos transportes, há fortes evidências empíricas que apontam que, no que se refere às cidades mais espalhadas, o consumo de energia em transportes é expressivamente mais elevado do que nas cidades mais compactas. No estudo já citado na introdução deste capítulo (Newman e Kenworthy, 1989b), por exemplo, que abrangeu uma amostra onde constavam 32 cidades da Europa, Austrália, Ásia e América, observou-se que quanto mais densa fosse a cidade, menor seria o gasto de energia *per capita* em transporte. Hong Kong, por exemplo, apresentou um dos menores consumos de gasolina *per capita* e possuía a maior densidade urbana observada (cerca de 300 habitantes/hectare, em média). Segundo os mesmos autores, as cidades asiáticas possuem as mais altas densidades do mundo e parecem ser um desafio ao futuro, mostrando que é possível viver numa cidade densa utilizando praticamente só transporte público e transporte não motorizado. Na Figura 2.1 pode-se comparar o uso de gasolina *per capita* anual com a densidade nas 32 cidades pesquisadas por Newman & Kenworthy (1989b), a cujos dados foi ajustada uma função potência que apresentou um valor para o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,74.

Referências e comentários acerca de alguns dos estudos empíricos mais importantes em todo o mundo podem ser encontrados em Silva *et al.* (1999), Costa (2001) e Costa *et al.* (2001), que afirmam que o processo de espalhamento urbano está a atingir também as cidades dos países em desenvolvimento. Isto leva a que o seu consumo de energia em transportes tenha crescido consideravelmente e que as mesmas apresentem, hoje, patamares de consumo energético elevados.

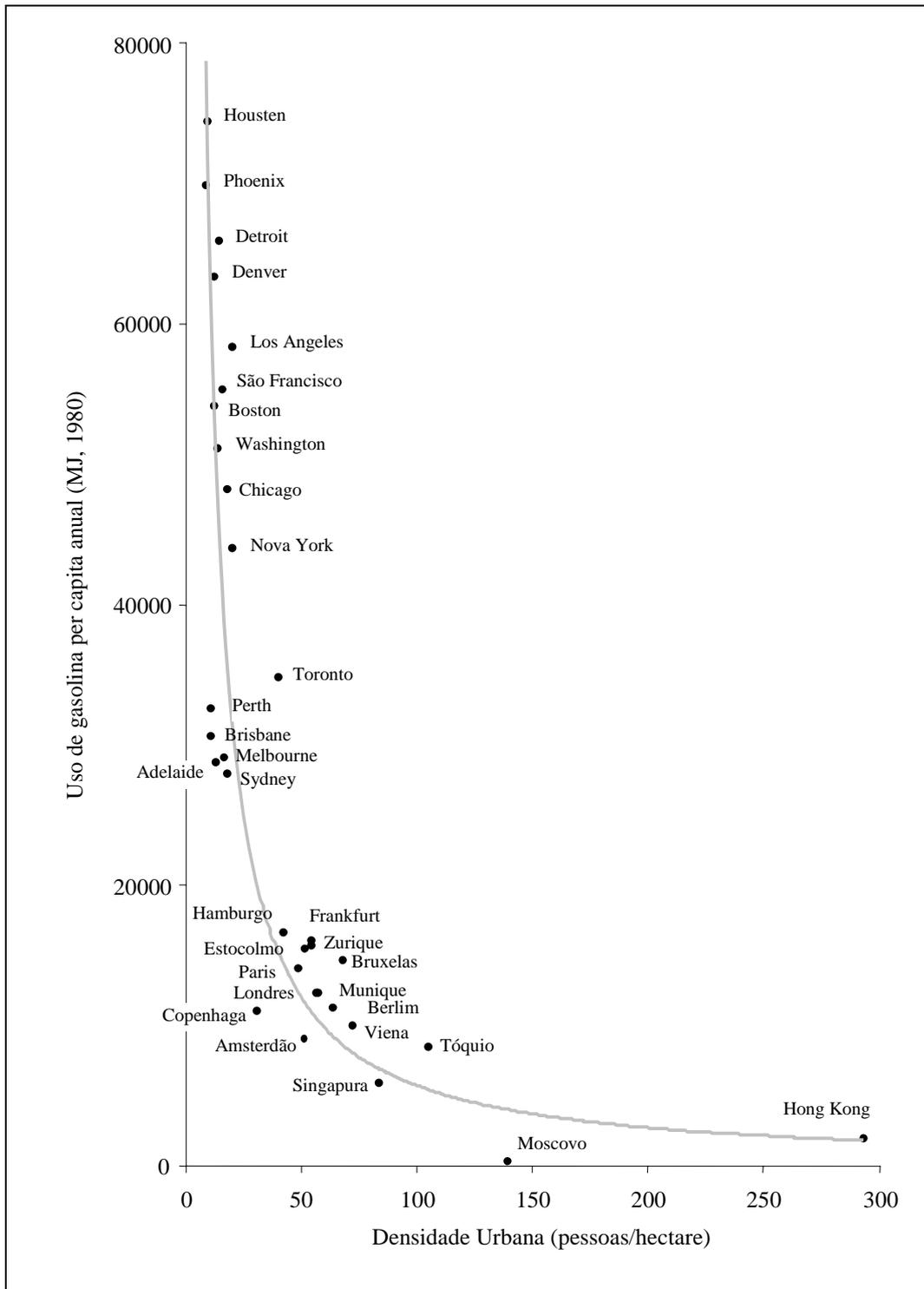


Figura 2.1 - Uso de energia *per capita* anual *versus* densidade urbana.

Fonte: Adaptado de Newman & Kenworthy (1989b).

Em muitos dos trabalhos publicados, há especialistas em planeamento urbano que defendem um aumento da densidade urbana. No entanto, algumas pesquisas mostram que a maioria da população prefere morar em áreas residenciais de baixa densidade

afastadas do centro (Newman & Hogan, 1981). O facto de existir uma ideia de que as cidades com alta densidade levam a problemas nervosos, *stress* e falta de saúde tem contribuído para a diminuição da densidade urbana em vários países, particularmente nos Estados Unidos e Austrália. A existência de áreas residenciais espalhadas, como urbanizações de baixas densidades nos arredores da cidade, é um facto na vida dos americanos, por exemplo, que muitos urbanistas e políticos gostariam de alterar, porém há uma preferência pelo estilo de vida suburbano que persiste em contrariar esta ideia.

Hoje em dia, porém, coloca-se a questão: serão preferíveis cidades de baixas densidades com grandes áreas de solo por habitante e, ao mesmo tempo, a população estar sujeita a horas intermináveis de filas no trânsito, todos os dias, para chegar ao local de trabalho, poluição, e as consequências advindas do consumo excessivo de combustíveis; ou serão preferíveis cidades mais compactas, planeadas e organizadas ao ínfimo pormenor com as quantidades de equipamentos e espaços verdes necessárias ao equilíbrio salutar dos habitantes, e um sistema de transporte público eficaz que permita o transporte da maioria dos habitantes para as principais zonas de destino, incluindo locais de trabalho?

Numa pesquisa recentemente divulgada (Talen, 2001), realizada através de questionários a 185 famílias americanas residentes numa área suburbana localizada a 40 quilómetros de Dallas, Twin Creeks, onde existe uma grande dependência automóvel, foram averiguadas as preferências dos residentes relativamente ao seu estilo de vida. Esta pesquisa tinha o objectivo de verificar quais seriam os possíveis pontos fracos na vida suburbana que pudessem reverter a preferência por um perfil de vida direccionado à cidade compacta e todas as vantagens que lhe estão intrínsecas. Os resultados obtidos sobre as preferências dos americanos são interessantes. Segundo este estudo, há uma evidência de que grande número dos residentes estariam receptivos a conceitos de urbanismo tradicional sob circunstâncias específicas, principalmente aquelas que lhes poderiam proporcionar menor tempo despendido em viagens. Isto mostrou-se especialmente importante para aqueles que gastam mais de uma hora diária em viagens ao desempenhar qualquer actividade. Especificamente, os dois principais resultados que fortalecem a viabilização dos princípios de urbanismo tradicional foram: i) a insatisfação relativa a aspectos do planeamento físico do desenvolvimento suburbano, definidos pelas críticas ao espalhamento; ii) a predisposição dos moradores de regiões suburbanas para aceitarem os conceitos de urbanismo tradicional, como menor dependência automóvel e uso misto do solo.

De facto, para melhorar a eficiência energética das cidades parece ser necessário apostar em políticas adequadas de planeamento físico destas, particularmente a re-urbanização e re-orientação das prioridades nos sistemas de transporte, como meios de reduzir o consumo de gasolina e a dependência do automóvel (Newman & Kenworthy, 1989a). A re-urbanização consistiria numa intensificação das actividades urbanas dentro da área existente, em vez de uma urbanização nas áreas rurais na periferia das cidades. A re-orientação dos sistemas de transportes seria feita através de um aperfeiçoamento e extensão da rede de transporte público e de um incentivo às viagens a pé ou de bicicleta. Estes dois investigadores propuseram-se, ainda, a traçar o perfil de uma cidade hipotética de baixo consumo de gasolina. Esta cidade deveria ser compacta, com um forte centro, intensivamente ocupado por pessoas e empregos, que viabilizasse mais viagens com transporte público, a pé e de bicicleta. Políticas relacionadas com os preços de automóveis, rendimento e eficiência dos veículos também foram destacadas como importantes, mas deveriam ser aplicadas juntamente às relacionadas ao planeamento físico.

2.2.2 Planeamento e Uso do Solo

O uso misto do solo pode ser interpretado segundo os conceitos de uso misto horizontal e uso misto vertical, que basicamente, pretendem atingir o mesmo fim: a organização dos diferentes usos do solo de forma tal que o número e dimensão de deslocamentos dos habitantes, para fazerem face às suas necessidades diárias, seja o menor possível.

O uso misto do solo horizontal refere-se à mistura de usos e funções no interior dos bairros (DETR & CABE, 2000, *apud* Burton, 2002). Elkin *et al.* (1991), por exemplo, defendem que, ao contrário de urbanizações de larga escala na periferia da cidade com comércio, serviços e equipamentos de lazer, a disponibilidade de serviços e equipamentos dentro dos bairros reduz a necessidade de utilização do carro. O uso misto vertical refere-se a edifícios individuais, com diferentes usos muitas vezes em andares separados. Politicamente é caracterizado por iniciativas “*living over the shop*” (Burton, 2002) e suportado por urbanizações mistas de comércio e habitação (Goodchild, 1994).

Na política de planeamento da Inglaterra, o uso misto do solo dentro da cidade é reconhecido como um importante componente para atingir a sustentabilidade (DETR, 1998; DETR e CABE, 2000, todos *apud* Burton, 2002). No que diz respeito à redução

das viagens com automóvel, o governo determinou um retorno não só à ideia de alta densidade, mas também ao uso misto do solo na cidade (Breheny & Rokwood, 1993; Owens, 1986, 1992; Sherlock, 1991). O argumento é de que serviços e equipamentos locais aumentam o gosto pela caminhada aquando da procura pelos mesmos. Mas, a realidade mostra que a proximidade das escolas, serviços e comércios diminui cada vez mais para a maioria da população (Elkin *et al.*, 1991), o que se reflecte no aumento do número e comprimento das viagens de automóvel, reveladas pelas estatísticas do *National Travel Survey* (Department of Transport, 1993, *apud* Burton, 2002). Neste sentido, o governo de Inglaterra definiu, como um dos princípios da política de planeamento, que as autoridades responsáveis pelo planeamento do solo deveriam incluir nos seus planos de desenvolvimento a promoção do uso misto do solo, particularmente no centro da cidade e nas áreas de novas urbanizações. Deveriam ainda, nas restantes áreas, garantir elevados níveis de acessibilidade através de meios de transportes alternativos que não o transporte privado. Num outro documento (DoE, 1995) o governo refere que este tipo de ‘urbanização mista’ pode aumentar a sua própria vitalidade através das diferentes actividades e diversidade de usos, ajudando a tornar essas áreas mais seguras e reduzindo as viagens.

Os princípios da cidade compacta, altas densidades e uso misto do solo, associados a um planeamento físico eficiente, definem uma cidade bem servida em termos de serviços, conseguindo um equilíbrio entre o uso residencial e não residencial. Em termos de sustentabilidade económica, as empresas e companhias que se instalam numa cidade compacta têm a possibilidade de assegurar os seus funcionários, atraindo-os pelo ambiente onde residem, pela quantidade de serviços de qualidade existentes (escolas, hospitais, teatros, etc.) e pela acessibilidade às suas residências. Por outro lado, para a própria empresa, a proximidade aos estabelecimentos de ensino e pesquisa impulsiona a performance económica através do acesso às últimas inovações e avanços tecnológicos. Segundo Gottlieb (1995), estes factores são determinantes na tomada de decisão quanto à localização de certo tipo de empresas, especialmente empresas de engenharia, ciência e alta tecnologia.

2.2.3 Modelos de Transportes nas Cidades

A - Padrão histórico e desenvolvimento das cidades

Newman (1992) analisou o padrão histórico de desenvolvimento das cidades, em função do transporte utilizado, através da divisão em três períodos, a saber:

- i) A Cidade da Caminhada,
- ii) A Cidade do Transporte Público,
- iii) A Cidade do Automóvel.

A *Cidade da Caminhada* desenvolveu-se há cerca de 10.000 anos e ainda existe em algumas localidades. Era um tipo de cidade que se caracterizava pelas altas densidades e uso misto do solo. Todos os destinos podiam ser atingidos a pé em cerca de meia hora. Muito raramente, estas cidades possuíam mais de cinco quilómetros de um lado a outro. Muitas cidades ainda hoje mantêm estas características, como são exemplo alguns centros das cidades europeias (por exemplo, Frankfurt). Segundo Newman & Kenworthy (1999), os centros das cidades americanas e australianas já possuíram também estas características, no entanto estas desapareceram quase totalmente, com excepção de algumas regiões históricas que mantiveram as suas formas antigas.

A *Cidade do Transporte Público* nasceu nos finais do século XIX. Os eléctricos e comboios permitiram que as cidades se expandissem cada vez mais em direcção à periferia. Junto às estações de comboios foram surgindo pequenos sub-centros que rapidamente se tornaram em pequenas cidades com características da *Cidade da Caminhada*. Os eléctricos, por sua vez, originavam novas expansões ao longo do seu percurso. Em ambos os casos formavam-se densidades médias e áreas com uso misto do solo. Com o avanço da tecnologia, as cidades alcançaram até 20 a 30 quilómetros de um extremo ao outro. Nos locais onde o comboio atingia o centro da cidade, havia um alvoroço e intensa movimentação, tornando este local o principal pólo de atracção da cidade.

Antes mesmo da Segunda Guerra Mundial, o automóvel surgia como um novo meio de transporte. Rapidamente começou a modelar as cidades e, juntamente com os autocarros, possibilitou o desenvolvimento em qualquer direcção, atingindo distâncias de até 50 quilómetros. As áreas residenciais de baixas densidades tornaram-se mais praticáveis e como reacção à cidade industrial, o planeamento das cidades começou por

separar funções, dando origem ao zonamento do solo. Este facto aumentou ainda mais as distâncias de viagens e as cidades passaram a descentralizar-se e dispersar-se cada vez mais.

Algumas cidades americanas e australianas cresceram principalmente na era do automóvel. Cidades como Camberra e Phoenix desenvolveram-se quase exclusivamente como *Cidade do Automóvel*; outras como Denver, Houston e Perth também apresentam fortes traços deste tipo de cidade. Agora, após mais de cinquenta anos de crescimento baseado no uso do automóvel, estas cidades espalharam-se até ao limite de conforto das viagens. Muitos dos residentes de áreas suburbanas não conhecem outro estilo de cidade. Os novos subúrbios, além de estarem situados até quarenta ou cinquenta quilómetros do centro, estão cada vez mais isolados das amenidades urbanas básicas, sendo que o nível de problemas associados à dependência do automóvel em tais localidades está a crescer rapidamente.

B - Malefícios vinculados à dependência automóvel

De facto, o automóvel proporciona mais mobilidade do que qualquer outro meio de transporte, no entanto, existem sérios e graves efeitos vinculados a esta mobilidade. Fouchier (1997) defende que a utilização do automóvel é muito mais perigosa para o ambiente e para a saúde, por pessoa transportada, que o transporte público. Esta constatação pode ser feita em vários aspectos (ruído, energia, espaço viário necessário, etc.) e, quanto maior a utilização do carro, maiores serão esses efeitos nocivos. Fouchier afirma ainda que, quanto maior a densidade populacional, menor a poluição ambiental e consumo de energia em viagens. Segundo este investigador, existem duas alternativas para o planeamento urbano:

- Estender as áreas urbanas, com o risco de romper as ligações físicas de proximidade, através de um aumento da mobilidade (com automóvel), telefone, Internet, etc.;
- Aumentar a densidade populacional e de emprego e o uso misto do solo nas cidades, para tirar proveito da centralização e proximidades, por meio de um incentivo ao transporte público.

Estes dois objectivos traçam dois cenários diferentes e levam a políticas opostas, gerando dois tipos diferentes de cidades. Para os defensores do primeiro cenário, o consumo natural de espaço pelas novas urbanizações é absolutamente trivial. Além

disso, defendem que a tecnologia será capaz de resolver todos os incómodos causados pelo automóvel. Os defensores do desenvolvimento sustentável acreditam que este tipo de cenário possa ter um impacto significativo no uso automóvel, no consumo de energia e na emissão de poluentes, suficientemente importante que justifique a alta densidade.

C - Níveis de utilização do automóvel e transportes públicos

Kenworthy & Laube (1999b), examinaram no seu estudo internacional, os modelos de posse e uso automóvel, nível de serviço e utilização dos transportes públicos, importância do transporte motorizado, e alguns factores importantes relativos às viagens para o trabalho, tais como divisão modal, distância e tempo de viagem. No que respeita à posse de automóvel, o estudo revela que as cidades americanas possuem 1,5 vezes mais carros que as cidades europeias e quase 5 vezes mais que as cidades asiáticas mais ricas. Já em termos de uso do automóvel, as cidades americanas ultrapassam qualquer expectativa, com um valor de utilização 70% superior às cidades australianas, suas concorrentes mais próximas, 2,5 vezes mais que as cidades mais ricas da Europa e 7,5 vezes mais que as cidades desenvolvidas da Ásia.

As cidades asiáticas em desenvolvimento, com baixos níveis de riqueza (12% do Produto Interno *per capita* das cidades asiáticas desenvolvidas), têm maiores níveis de utilização do automóvel que as suas vizinhas mais ricas. Isto deve-se a uma ausência de restrições económicas na posse e uso de carro, fracas e poucas alternativas de transporte público (não há sistema de transportes ferroviários) e à grande ênfase dada à construção de estradas para resolver problemas de congestão de tráfego (Kenworthy & Laube, 1999a).

Os dados do mesmo estudo mostram que as cidades americanas têm uma compulsiva utilização do carro, principalmente devido às longas distâncias e ao facto das actividades não estarem suficientemente concentradas para viabilizarem a utilização de transportes públicos e modos não motorizados. A insegurança que se vive em muitos locais públicos das cidades americanas desencoraja também as pessoas a utilizarem certos modos de transporte que as expõem a situações de risco (Kenworthy & Laube, 1999a).

Além disso, estas cidades têm um escasso serviço de transporte público e o nível mais baixo de utilização deste, segundo o estudo efectuado. Os seus residentes viajam, em média apenas 1 vez em cada 6 dias nos transportes públicos. Nas cidades australianas

viam 1 vez em cada 4 dias. As canadianas têm uma utilização um pouco mais razoável e os transportes públicos são utilizados 1 vez em cada 2 dias. As cidades ricas da Ásia têm maior utilização a este nível, com 1,4 viagens por dia nos transportes públicos, facto que se deve, principalmente, ao bom serviço de transportes públicos destas cidades.

Segundo o mesmo estudo, o nível de serviço dos transportes urbanos ferroviários está sistematicamente relacionado com a utilização de transporte público. As cidades com baixa utilização de transportes públicos têm, geralmente, um pobre serviço e cobertura de transportes ferroviários. Zurique, a segunda cidade com maior nível de utilização de transporte público, após Hong Kong, possui uma excepcional e densa rede ferroviária (Kenworthy & Laube, 1999b). Outra situação que induz certamente à diminuição da utilização do transporte público é a construção desenfreada de novas vias urbanas. De acordo com Newman & Kenworthy (1999a), as grandes vias rápidas, como as de Chicago, são construídas com o intuito de reduzir o tempo de viagem, contudo, na realidade, as distâncias percorridas é que acabam por aumentar.

Os padrões descritos por Newman (1992) reflectem as etapas de desenvolvimento de muitas cidades que culminaram no modelo descrito como a *Cidade do Automóvel*, que ganhou cada vez mais espaço nas últimas décadas do século XX. Como consequência, geraram-se prejuízos relativos a congestionamento de tráfego, diminuição das velocidades operacionais, aumento dos tempos de viagem, poluição, maior consumo de energia em transportes, entre outros.

D - Comportamento das viagens

No que concerne à duração das viagens para o trabalho, seria de esperar que fosse consideravelmente diferente num conjunto tão variado de cidades como aquelas estudadas por Kenworthy & Laube (1999b). No entanto, os dados do estudo revelam que a duração destas é de aproximadamente 30 minutos. Este fenómeno é melhor entendido quando são observados estudos históricos que mostram que pessoas de todo o mundo escolhem constantemente despendar meia hora em viagens para o trabalho (Manning, 1978; Pederson, 1980; Zahavi & Ryan, 1980). Em Inglaterra, um relatório emitido pelo SACTRA (*Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment*) refere que “a medida de tempo despendido nas viagens para o trabalho têm-se mantido estável desde há seis séculos” (SACTRA, 1994).

Um dos problemas em tentar reduzir o tempo de viagem, com o objectivo de reduzir o consumo de combustíveis e emissão de poluentes, através da expansão da capacidade da rede viária, é o fenómeno denominado ‘tráfego induzido’. Embora o tema ainda seja objecto de amplo debate, recentes investigações mostram que a extensão e criação de novas vias geram tráfego extra, em vez de aliviar o congestionamento como se pretendia (Godwin, 1997; Hansen & Huang, 1997). As distâncias para o trabalho aumentam com a dependência automóvel, assim como o tempo de viagem. As velocidades das viagens para o trabalho aumentam quando as cidades se tornam mais densas, menos orientadas ao uso automóvel e mais orientadas ao transporte público e modos não motorizados. Segundo Kenworthy & Laube (1999a), os americanos viajam a uma velocidade média de 35 km/h, os australianos a 30 km/h, os europeus a 22 km/h, em Singapura, Tokyo e Hong Kong a 10 km/h e na Ásia pobre a 14 km/h. A conclusão inevitável é que o aumento da velocidade não é utilizado para diminuir o tempo de viagem, mas sim para viajar ainda mais longe e o tempo médio de viagem é mantido nos 30 minutos.

Concluindo este ponto, pode afirmar-se que, no que concerne a políticas urbanas cujo objectivo é rentabilizar o consumo de energia em transportes, estas devem basear-se em estratégias de planeamento físico direccionadas à ideia de cidade compacta, optando por densidades populacionais mais elevadas, uso misto do solo e um investimento na rede de transportes públicos, ao invés da expansão ‘em flecha’ da rede viária. O crescimento urbano deve ser contido dentro dos limites da cidade em vez de alargado às zonas rurais adjacentes. No que se refere aos transportes, as urbanizações de alta densidade devem acontecer ao longo dos corredores destes e junto das suas conexões, concentrando um fluxo de tráfego suficientemente forte que encoraje o transporte público. A Figura 2.2 resume os conceitos discutidos até aqui, ao apresentar as várias situações desejáveis e não desejáveis (muitas vezes usuais) no que concerne à evolução da forma urbana.

2.3 A INFLUÊNCIA DOS FACTORES SOCIOECONÓMICOS NO CONSUMO DE ENERGIA EM TRANSPORTES

Segundo Newman *et al.* (1995) o facto de por vezes se rejeitar o planeamento físico da cidade como forma de reduzir o consumo de energia em transportes deve-se a três argumentos principais, cujos desdobramentos são discutidos na sequência:

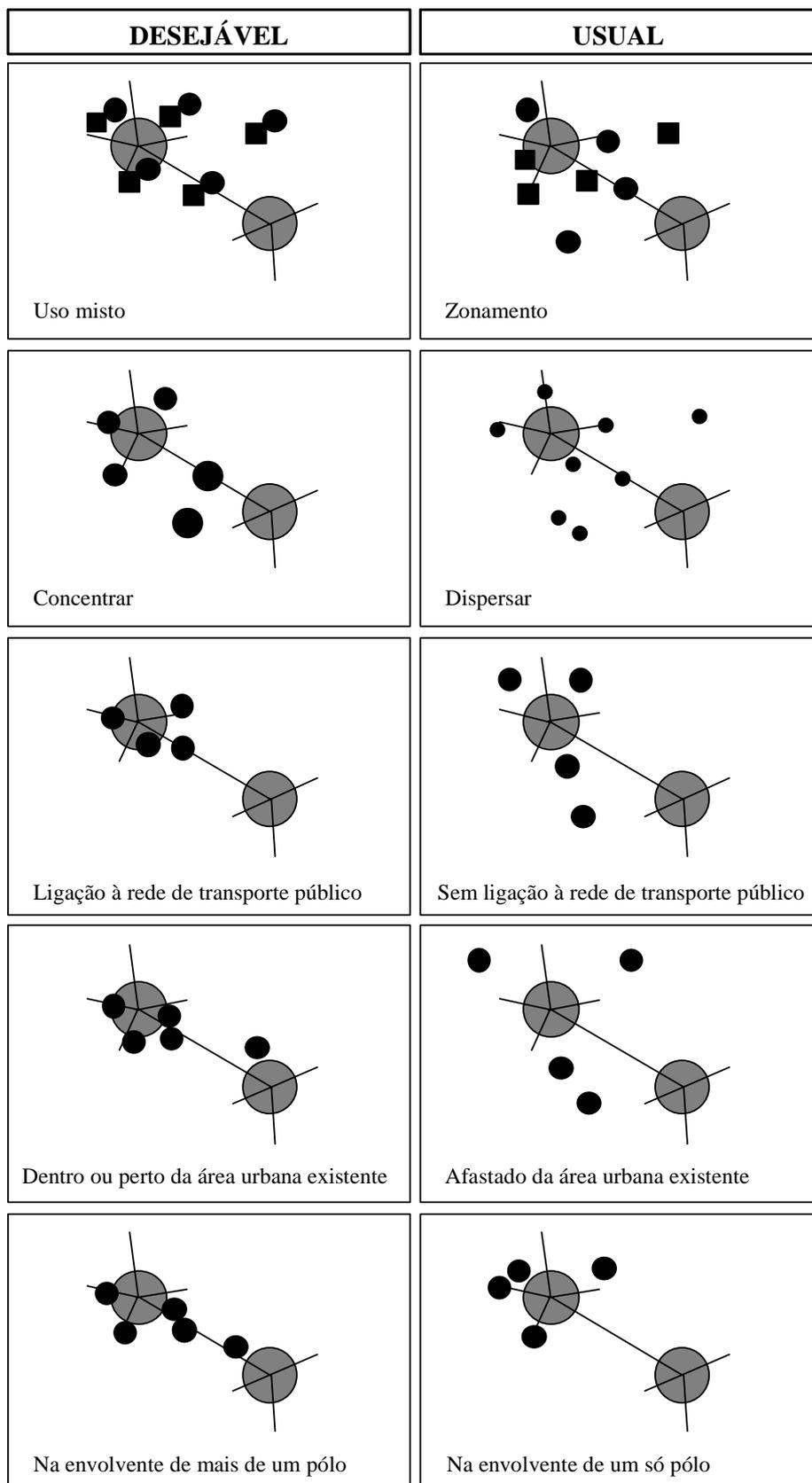


Figura 2.2 - Princípios desejáveis e não-desejáveis da forma urbana.

Fonte: Adaptado de Verroen, 1995, *apud* Snellen, 2002.

- A subida do nível de vida induz ao aumento da procura de um espaço próprio e viatura própria (Troy, 1992; Gomez-Ibanez, 1991; Hall, 1991; e Stretton, 1989; todos citados por Newman *et al.*, 1995).
- O preço do combustível é a variável mais importante na determinação da forma das cidades e dos seus padrões de transporte (Gomez-Ibanez, 1991; e Kirwan, 1992; todos citados por Newman *et al.*, 1995).
- A resolução de problemas relativos a baixas densidades e respectivos custos de transporte tem ocorrido a partir de mudanças estruturais dentro da economia das cidades, ou seja, as oportunidades de emprego seguem as residências em direcção à periferia. Dessa maneira, a cidade tem capacidade de se auto-ajustar, eliminando-se a necessidade de planeamento físico (Brotchie, 1992; e Gordon *et al.*, 1989, todos citados por Newman *et al.*, 1995).

2.3.1 Nível Económico dos Consumidores

Muitas análises sugerem que é simplesmente inevitável que a dependência automóvel cresça nas cidades, quando as pessoas se tornam mais ricas e os automóveis se tornam mais facilmente adquiríveis. As pessoas atingem uma capacidade financeira que lhes permite adquirir viatura própria e deste modo o transporte público é visto como um transporte de menor comodidade e pouco atractivo. Segundo Lave (1992), numa situação de crescimento económico, é criada uma força ‘irreversível’ que gera um processo de declínio do transporte público, dando preferência ao automóvel. É que, além do facto do poder de compra dos consumidores aumentar, o crescimento económico também proporciona a criação e construção de novas estradas e reformulação de infra-estruturas de transporte.

No estudo desenvolvido em cidades dos Países Baixos já citado anteriormente, Snellen (2002) apurou que tanto o número de quilómetros como o número de viagens aumenta com o rendimento. As viagens em veículos não motorizados são efectuadas por pessoas que não possuem educação ou possuem níveis de educação muito baixos e o uso dos modos não motorizados decresce intensamente com o aumento da renda pessoal.

Kenworthy & Laube (1999a) refutam a ideia de que a dependência automóvel é simplesmente ‘inevitável’. Numa comparação do nível de riqueza com o uso e posse de automóvel e nível de utilização do transporte público nas cidades desenvolvidas,

chegaram à conclusão que existe uma fraca correlação entre estas variáveis. Além disso, algumas cidades desenvolvidas, particularmente na Ásia e na Europa, têm uma utilização do automóvel muito mais contida e controlada e conseguem bons resultados nos transportes públicos por estes serem competitivos em relação ao automóvel.

Muitas regiões ricas possuem um equilibrado sistema de transportes, enquanto que algumas regiões mais pobres são muito mais dependentes do automóvel (Green, 1995; Kenworthy & Laube, 1999a). No entanto, a riqueza das cidades por si só não demonstra evidências consistentes para explicar o grau de dependência automóvel destas (Kenworthy & Laube, 1999a).

2.3.2 Desenvolvimento Económico das Regiões

Hoje em dia, grande parte das políticas de transporte adoptadas partem do princípio que o aumento do uso automóvel traz benefícios económicos. No entanto, existem estudos que sugerem que uma excessiva dependência automóvel reduz o desenvolvimento económico e, pelo contrário, as alternativas políticas que encorajam a um sistema de transportes mais equilibrado podem aumentar o desenvolvimento económico (Litman & Laube, 2002).

Aparentemente, os ganhos económicos não serão maiores por se desenvolver a dependência do automóvel nas cidades, particularmente pelo que é manifestado nas cidades dos Estados Unidos e Austrália (Kenworthy & Laube, 1999A). Os custos da rede de transportes em geral assumem um valor bastante mais elevado e não há ganho económico no Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, quando as cidades possuem uma maior dependência do automóvel. Além disso, os custos do sistema de trânsito em geral e os gastos na construção e manutenção de estradas *per capita* são muito mais elevados.

Enquanto a utilização do automóvel aumenta com o desenvolvimento económico, este não aumenta necessariamente com o aumento da utilização daquele. Muitos países experimentam o seu maior crescimento económico quando a utilização de automóvel *per capita* se torna significativamente baixa. E, ao contrário do que se poderia esperar, quando o nível de riqueza dos chefes de família se eleva a um determinado patamar que os permite consumir determinados bens como o automóvel privado, o crescimento económico diminuiu (Talukadar, 1997). Aliás, no estudo internacional elaborado por Kenworthy *et al.* (1999) em 37 cidades, concluiu-se que a dependência automóvel reduz o desenvolvimento económico local. Num outro estudo elaborado por Kenworthy

et al. (1997) verificou-se que, a partir de um certo valor dos quilómetros efectuados *per capita*, o PIB *per capita* começa a diminuir (Figura 2.3).

Os altos níveis de uso automóvel *per capita* relacionam-se apenas com a proporção de riqueza regional relativa à construção de estradas. A indústria automóvel é um grande sector económico. Por isso, muitas vezes se assume que a posse e uso de carro estimula o desenvolvimento económico (Lave, 1992). No entanto, a exportação e produção de bens é que suportam o desenvolvimento económico e não o consumo. As despesas em automóvel e gasolina levam a um menor crescimento económico e do nível de emprego que as despesas na maioria dos restantes bens (Litman & Laube, 2002).

Quilómetros percorridos em automóvel *per capita*

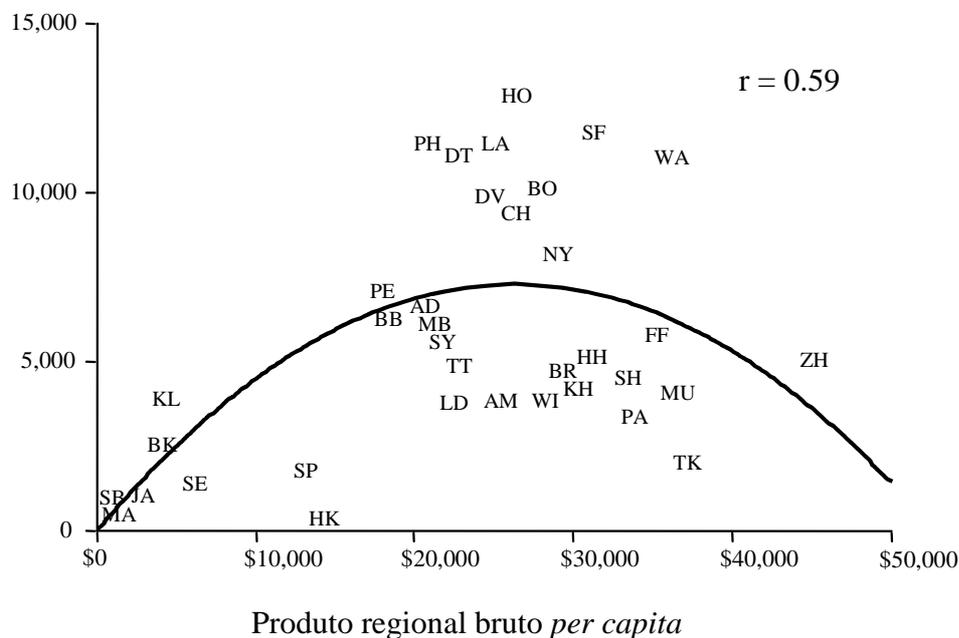


Figura 2.3 - Relação entre riqueza (*Gross Regional Product - GRP per capita*) e o uso automóvel em 37 cidades (1990).

Fonte: Kenworthy *et al.*, 1997.

2.3.3 Custo de Posse e Utilização do Automóvel

Os sistemas de transportes das cidades asiáticas em desenvolvimento são menos sustentáveis e mais direccionados ao uso automóvel, quando comparados com as suas cidades vizinhas mais ricas, ao contrário do que seria de esperar tendo em conta os seus níveis económicos. Segundo Kenworthy & Laube (1999a), as razões para isto acontecer estão associadas a uma combinação de factores:

- i) Um sistema de transportes baseado no autocarro que é altamente sujeito a congestões de trânsito, muito mais que os sistemas baseados em transportes ferroviários das cidades de Singapura, Tóquio e Hong Kong;
- ii) Um programa de infra-estruturas de transporte que incentiva a construção de estradas;
- iii) A rápida deterioração da situação do sistema de transportes não motorizado;
- iv) A não existência de ‘desincentivos’ económicos relativos ao uso de carro, como existe nas cidades asiáticas mais ricas (Ang, 1996; Phang, 1993; Kenworthy *et al.*, 1994 e 1995; todos citados por Kenworthy & Laube (1999a)).

Pelo contrário, as cidades desenvolvidas da Ásia, continuam a ter uma maior orientação para os sistemas de transporte público e uma forma urbana com fortes corredores de desenvolvimento que são ideais para transportes públicos de altas capacidades. Singapura, assim como Hong Kong e Tokyo, são bons exemplos de cidades onde os custos de uso e posse de automóvel são mantidos altos há anos e as estratégias de planeamento físico tem dado origem ao desenvolvimento de estratégias de planeamento orientadas ao uso de transportes públicos, caminhadas e uso de bicicleta.

Mas o facto de por vezes se tentar conseguir estes objectivos utilizando apenas medidas económicas, pesando o custo de posse e utilização automóvel, é uma ilusão na maioria dos casos. Trata-se de um problema comum, tentar aumentar o custo de posse e utilização automóvel através de mecanismos de regulação dos preços por si só. Alguns analistas alegam, baseados em fundamentos predominantemente teóricos, que o consumo será menor onde os preços dos combustíveis, por exemplo, forem elevados, independentemente de as cidades serem mais ou menos espalhadas. Mas, hoje em dia, sabe-se que não é assim tão simples e assim como as políticas de reorganização do uso do solo não devem ser tomadas sozinhas, com as políticas económicas acontece o mesmo.

3 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais são sistemas de equações - em geral não lineares - interligadas, em que o resultado de uma Equação é o valor de entrada para várias outras da rede. Esta estrutura foi concebida a partir de estudos sobre a fisiologia do cérebro humano e do seu componente primário: o neurónio. As Redes Neurais conseguem reproduzir o comportamento de qualquer função matemática. Devido a este facto, rapidamente se popularizaram como uma ferramenta do tipo 'caixa preta' para modelar relações entre variáveis.

A modelagem através de Redes Neurais Artificiais aparece como um substituto potencial aos modelos estatísticos convencionais, devido à fácil interface dos programas com o usuário e a não necessidade de conhecimento prévio da relação entre as variáveis envolvidas (Brondino, 1999). Prova da eficiência deste tipo de modelagem são vários estudos efectuados na engenharia de transportes (Brega, 1996; Furtado, 1998; Brondino, 1999; Wermersch & Kawamoto, 1999; Coutinho Neto *et al.*, 1999; Coutinho Neto, 2000; Raia Jr., 2000; e Bocanegra, 2001), que tem relatado o bom desempenho deste método relativamente a modelos matemáticos convencionais.

Neste capítulo descrevem-se, basicamente, os principais conceitos sobre esta ferramenta. Inicialmente faz-se uma breve introdução sobre a analogia das redes artificiais com as redes biológicas do cérebro humano, seguida de uma breve resenha histórica sobre a sua evolução. Apresentam-se os principais componentes das Redes Neurais Artificiais, onde se faz referência aos elementos de processamento ou neurónios e às ligações entre estes. A função de activação é também abordada, na medida em que é ela a responsável pelo sinal a ser transmitido pelas conexões para os neurónios das camadas adjacentes. Por fim, aborda-se a aprendizagem que, resumidamente, consiste num algoritmo específico que permite à rede aprender uma determinada função. É através destes algoritmos que ela adquire o conhecimento.

Intimamente ligada a este algoritmo está a estrutura da rede, ou seja, a sua topologia. A topologia define a forma como os neurónios estão organizados e afecta o desempenho da própria rede. Dentro das alternativas possíveis, a rede *multilayer perceptron* foi o modelo utilizado no caso de estudo, associado ao algoritmo *backpropagation*, razão pela qual se faz dentro deste item referência a este modelo e algoritmo. No seguimento do capítulo apresenta-se um exemplo do funcionamento de uma Rede Neural numa folha de cálculo, o que ajuda o leitor a entender, ainda que basicamente, o funcionamento desta.

Por último, faz-se referência às características que devem possuir os problemas para poderem ser tratados através das Redes Neurais, assim como as características que mostram à partida que estas não são a melhor ferramenta para a solução do problema. Finaliza-se com a apresentação de alguns inconvenientes que podem advir da utilização das Redes Neurais.

3.1 AS REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS E A ANALOGIA BIOLÓGICA

Com o aparecimento das novas tecnologias e, em particular, o computador, o Homem sentiu-se mais próximo de realizar um sonho antigo: construir máquinas capazes de desempenhar as suas tarefas. O objectivo de produzir uma máquina com tais requisitos fez com que surgisse um ramo da ciência da computação responsável por esta questão, denominado Inteligência Artificial (IA). As Redes Neurais Artificiais, à frente designadas por RNAs, fazem parte de um ramo da IA correspondente à classe da aprendizagem mecânica (Galvão & Valença, 1999).

As RNAs consistem numa técnica computacional que apresenta um modelo matemático inspirado nas funções das redes biológicas do cérebro humano, com o objectivo de implementar o seu comportamento básico e a sua dinâmica. Trata-se de um método de IA para solução de problemas, através de um sistema de circuitos que simulam o cérebro humano, inclusive o seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas. As RNAs apresentam como vantagem o facto de resolverem problemas complexos que envolvem o reconhecimento de padrões, assim como o cérebro humano.

As RNAs são capazes de actuar como ‘mapeadores’ universais de funções multi-variáveis, com um custo computacional que cresce apenas linearmente com o número de variáveis. Outra característica importante é a capacidade de auto-organização e de processamento temporal, que faz das RNAs uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atractiva para a solução de problemas complexos. O sistema de processamento de informação do cérebro humano possui a capacidade de organizar os neurónios de tal forma que o seu desempenho na execução de certas tarefas (reconhecimento de exemplos, percepção e controle motor) se dá de forma muito mais rápida do que o mais rápido computador, ainda que a sua velocidade de processamento seja relativamente mais baixa quando comparada com este. Composto por cerca de 10 biliões de neurónios que se interligam formando uma verdadeira rede, o cérebro humano é capaz de processar milhões de informações e realizar algo em torno de 60 triliões de ligações sinápticas, o que o qualifica como uma colecção de Redes Neurais (Galvão & Valença, 1999).

De uma maneira geral, pode definir-se uma Rede Neural Artificial como um sistema constituído por elementos de processamento interligados, também chamados de neurónios artificiais, os quais estão dispostos em camadas (uma camada de entrada, uma ou várias intermédias e uma de saída) e são responsáveis pela não-linearidade da rede, através do processamento interno de funções matemáticas. Pode dizer-se que as RNAs aprendem com exemplos. Estas possuem uma regra de aprendizagem, que é responsável pela modificação dos pesos sinápticos a cada ciclo de iteração, de acordo com os exemplos que lhes são apresentados (Costa, 2001).

Uma vez que as RNAs têm a sua base de fundamentação na neurotransmissão ocorrida nas células nervosas, é importante que se conheça o funcionamento de um neurónio biológico e o seu grau de semelhança com um neurónio artificial. Os neurónios biológicos estão conectados entre si através de sinapses, e juntos formam uma grande rede, chamada REDE NEURAL. Os principais componentes dos neurónios são:

- Os DENTRITOS, que têm por função receberem os estímulos transmitidos pelos outros neurónios;
- O corpo do neurónio, também chamado de SOMA, que é responsável pela recolha e combinação de informações vindas de outros neurónios;

- E o AXÔNIO, que é constituído de uma fibra tubular e é responsável por transmitir os estímulos para outras células.

Apesar da investigação contínua sobre o assunto, o conhecimento sobre o funcionamento das redes biológicas ainda não está totalmente adquirido. Não se conhece com rigor a forma como as funções cerebrais são realizadas. No entanto, a estrutura fisiológica básica destas redes de nós naturais é conhecida, e é exactamente nesta estrutura fisiológica que se baseiam as RNAs. A passagem de impulso nervoso entre dois neurónios dá-se na região de sinapse, geralmente formada pela união dos axónios de um neurónio e os dendritos do outro. Essa transmissão ocorre quase sempre do axónio de um neurónio para os dendritos do neurónio seguinte, e não no sentido inverso. A Figura 3.1 ilustra um esquema do neurónio biológico. Somente os estímulos com a mínima intensidade (a partir de um certo limiar, chamado limiar excitatório) são capazes de provocar impulsos nervosos. Isto significa que, se o estímulo for muito pequeno, isto é, se a sua intensidade for inferior ao limiar excitatório, não ocorrerá nenhum impulso nervoso. Por outro lado, passado este limiar, o potencial de acção do neurónio será sempre o mesmo, qualquer que seja a intensidade do estímulo.

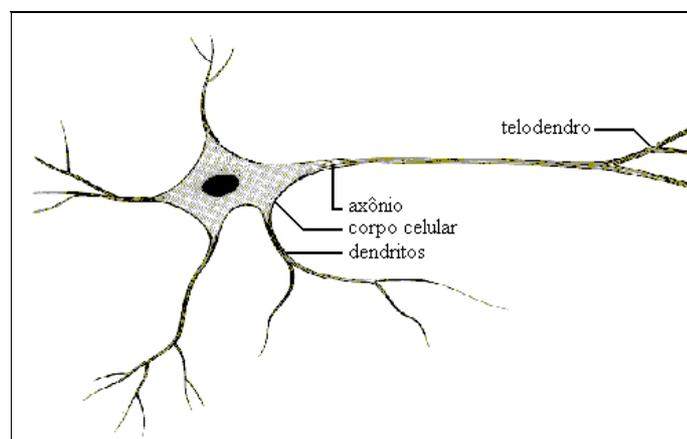


Figura 3.1 - Representação de um neurónio biológico.

3.2 BREVE HISTÓRIA DAS REDES NEURAIAS

A história resumida sobre as RNAs deve começar por três das mais importantes publicações iniciais a respeito do tema, a saber: McCulloch & Pitts (1943), Hebb (1949) e Rosenblatt (1958, *apud* Braga *et al.*, 2000). Estas publicações introduziram, respectivamente, o primeiro modelo de Redes Neurais simulando ‘máquinas’, o modelo

básico de rede de auto-organização, e o modelo *Perceptron* de aprendizagem supervisionada.

Em 1956, no "*Dartmouth College*", nasceram os dois paradigmas da Inteligência Artificial, as vertentes simbólica e conexionista. A Inteligência Artificial Simbólica tenta simular o comportamento inteligente humano desconsiderando os mecanismos responsáveis por tal. Já a Inteligência Artificial Conexionista acredita que, construindo-se um sistema que simule a estrutura do cérebro, este sistema apresentará inteligência, ou seja, será capaz de aprender, assimilar, errar e aprender com seus erros. As conexões entre os neurónios determinam o procedimento da rede e como ele pode mudar ao longo do tempo. Por essa razão, o campo conhecido hoje como Redes Neurais era originalmente chamado de *conexionismo*. Na década de 50, entretanto, o uso do computador como um modelo lógico de conexões foi representado principalmente por Frank Rosenblatt. Em 1958, Rosenblatt descreveu uma topologia de RNA, estruturas de ligação entre os nós e, o mais importante, propôs um algoritmo para treinar a rede para executar determinados tipos de funções.

Também proveniente deste período foi a construção do primeiro neuro-computador, denominado *Snark*, por Mavin Minsky, em 1951. O *Snark* operava com sucesso a partir de um ponto de partida técnico, ajustando os pesos automaticamente. Ele nunca executou qualquer função de processamento de informação interessante, mas serviu de inspiração para as ideias de estruturas que o sucederam. O primeiro neuro-computador a obter sucesso (*Mark I Perceptron*) surgiu em 1957 e 1958, criado por Frank Rosenblatt, Charles Wightman e outros. Devido à profundidade de seus estudos, às suas contribuições técnicas e à forma moderna de pensar, Frank Rosenblatt é tido como o fundador da neuro-computação na forma hoje conhecida. O interesse inicial para a criação do *Perceptron* era o reconhecimento de padrões.

Após Rosenblatt, Bernard Widrow, com a ajuda de alguns estudantes, desenvolveu um novo tipo de elemento de processamento de Redes Neurais chamado de Adaline (*Adaptive Linear Neuron*), equipado com uma poderosa lei de aprendizagem que, ao contrário do *Perceptron*, ainda permanece em uso. Em 1969, Minsky e Papert chamaram a atenção para algumas tarefas que o *Perceptron* não era capaz de executar, já que este só resolve problemas linearmente separáveis. Em grande parte devido à repercussão daquele trabalho, nos anos 70 a abordagem 'conexionista' ficou adormecida. Em 1982, John Hopfield relatou a utilização de redes simétricas para

optimização. Em 1986, Rumelhart, Hinton e Williams introduziram o método de *backpropagation*. Em decorrência disto, a partir de meados da década de 80, houve uma nova explosão de interesse pelas RNAs na comunidade internacional. Dois outros factores foram responsáveis pela retomada de interesse na área: em primeiro lugar, o avanço da tecnologia, sobretudo da microeletrônica, que tem vindo a permitir a realização física de modelos de nós e a sua interconexão de um modo antes impensável; em segundo, o facto da escola Simbolista, a despeito do seu sucesso na solução de determinados tipos de problemas, não ter conseguido avanços significativos na resolução de alguns problemas simples para um ser humano.

3.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DAS REDES NEURAIAS

De acordo com Rumelhart & McClelland (1986), os modelos de RNAs de maneira geral apresentam oito componentes principais, a saber:

- Conjunto de elementos de processamento;
- Estado de activação;
- Função de saída para cada elemento de processamento;
- Ligações entre elementos de processamento;
- Propagação e função de combinação;
- Activação;
- Aprendizagem;
- Ambiente onde o sistema opera.

Seguidamente relatam-se algumas das principais características destas componentes.

3.3.1 Elementos de Processamento

Os elementos de processamento ou neurónios artificiais (à frente designados por EPs), constituem os principais elementos de uma Rede Neural. Como tal, o primeiro passo no desenvolvimento desta consiste em especificar o número de neurónios que vai constituir a rede, ou seja, a sua topologia, que consiste em estruturar a rede organizando os neurónios por camadas. Estas camadas podem ser de três tipos:

- **Camada de entrada** – responsável pela distribuição da informação proveniente do meio externo, para as camadas intermédias escondidas;
- **Camadas escondidas** – onde ocorre o processamento, através das funções de combinação e activação;
- **Camada de saída** – responsável pela resposta da rede.

Na rede representada na Figura 3.2 a camada de entrada possui 2 EPs, as duas camadas intermédias 4 cada uma e a de saída possui um 1 EP.

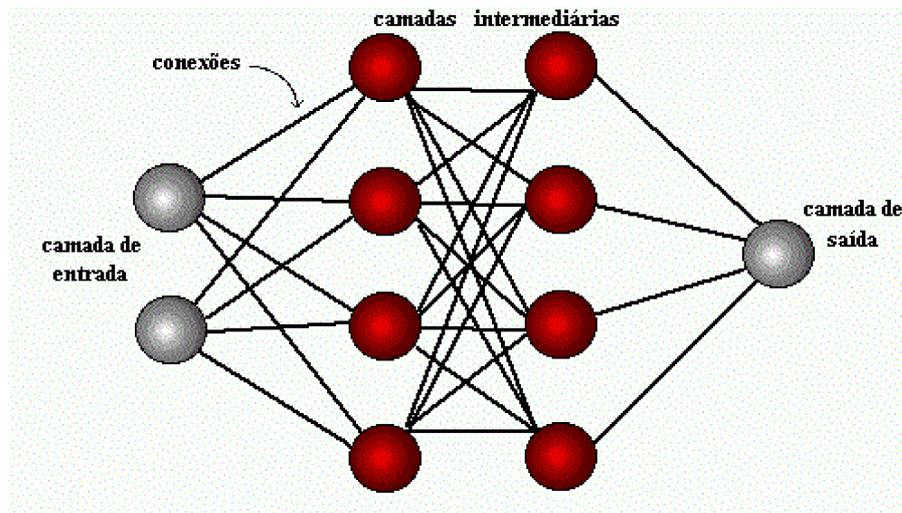


Figura 3.2 - Rede Neural com os neurónios organizados por camadas.

O neurónio artificial é constituído, basicamente, por uma função de combinação e uma função de transferência. A função de combinação é responsável por compor a informação de entrada do neurónio, que no caso de ser linear, passa a representar a soma das entradas, ponderadas pelos respectivos pesos. Estes pesos, muitas vezes chamados de pesos sinápticos, em analogia com o neurónio biológico, representam, matematicamente, a importância de cada informação em relação a um dado neurónio. No caso do sistema nervoso, quando o estímulo é fraco (por exemplo uma pancada leve), o número de neurónios estimulados é menor do que quando o estímulo é forte, além de que o tempo de duração do estímulo forte é maior, o que aumenta a frequência de impulsos enviados ao cérebro.

3.3.2 Estado de Activação

Numa RNA cada neurónio tem associado um estado de activação. A escolha do estado de activação a ser utilizado para o EP é função do que se procura representar com o

modelo. O estado de activação pode ser contínuo (limitado ou ilimitado) ou discreto (binário e/ou múltiplo).

Exemplos:

- Contínuo e limitado $(0, \dots, 1)$
- Discreto e binário $(0, 1)$
- Discreto e múltiplo $(1, 2, 3, 4, 5, 6)$

A função de activação é responsável pelo sinal a ser transmitido pelas conexões para os neurónios das camadas adjacentes. Várias funções são utilizadas com essa finalidade, sendo este o factor responsável pela não linearidade da rede, o que torna a ferramenta muito poderosa. Entre as funções mais utilizadas citam-se a sigmóide, gaussiana e rampa. As funções de activação são abordadas mais pormenorizadamente no ponto 3.6 deste capítulo.

3.3.3 Função de Saída de Cada Elemento de Processamento

Os neurónios produzem um sinal de saída que está relacionada com a sua activação através de uma função de transferência conhecida como função de saída. Esta função de saída pode ser, por exemplo, a função identidade (sinal de saída igual ao estado de activação) ou uma função do tipo *threshold* em que a emissão do sinal só ocorre quando a activação é superior a um dado limite (Figura 3.3).

3.3.4 Ligação entre Elementos de Processamento

As ligações entre neurónios são representadas por uma matriz de pesos e definem o conhecimento do sistema (Galvão e Valença, 1999). Os pesos positivos representam ligações excitatórias e geram um reforço na activação do neurónio, ao contrário dos pesos negativos, que inibem a activação do neurónio. Os pesos das ligações, denominados geralmente de pesos sinápticos, representam a importância de cada informação em relação a um determinado neurónio. O objectivo principal é, pois, determinar o melhor conjunto de pesos capazes de representar um dado problema. Existem vários métodos utilizados com este objectivo, sendo o mais popular o método de aprendizagem *backpropagation*, que será descrito mais à frente.

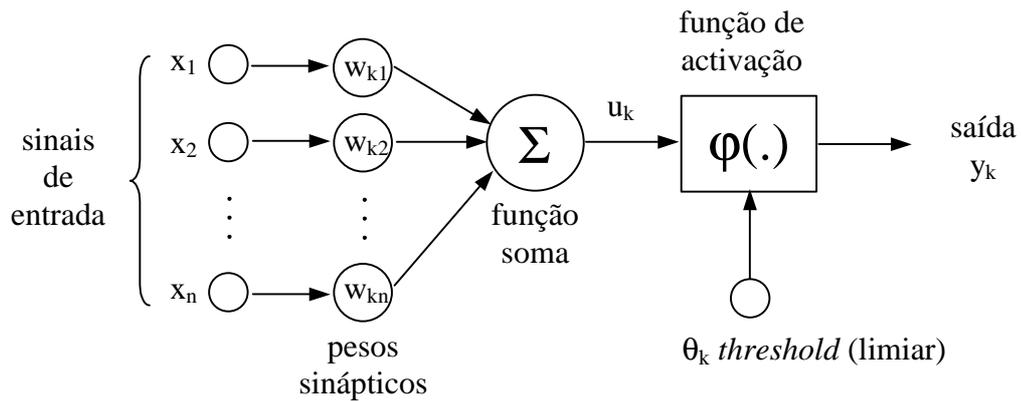


Figura 3.3 - Modelo não linear de um neurónio.

Fonte: Haykin (1994).

3.3.5 Propagação e Função de Combinação

Existem regras segundo as quais os valores de entrada de um EP são combinados com os valores da respectiva matriz de pesos para produzir a entrada líquida. Uma das regras de propagação mais simples é aquela na qual o sinal líquido é uma soma ponderada de cada entrada que chega a um dado EP pelo respectivo peso. Esta regra é representada matematicamente pela Equação (3.1), em que v_k é a entrada líquida de EP de ordem k , x_j são as entradas de EP de ordem k , e w_{kj} são os j pesos sinápticos referentes às conexões de EP k .

$$v_k = \sum_{j=0}^n w_{kj} x_j \quad (3.1)$$

3.3.6 A Aprendizagem

A utilização de uma RNA na solução de uma tarefa passa inicialmente por uma fase de aprendizagem. A rede extrai informações relevantes dos exemplos a ela apresentados, criando assim uma representação própria para o problema. Denomina-se algoritmo de aprendizagem a um conjunto de regras bem definidas para que uma rede ‘aprenda’ uma determinada função.

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, podendo estes serem agrupados em dois paradigmas principais: Aprendizagem Supervisionada e Aprendizagem Não Supervisionada. Outro paradigma bastante conhecido é de Aprendizagem por Reforço, que pode ser considerado um caso particular da

Aprendizagem Supervisionada, assim como a Aprendizagem por competição, que é considerada um caso particular da Aprendizagem Não Supervisionada. Nas próximas secções, esses quatro principais paradigmas serão mais detalhados. Note-se, porém, que existem também outros paradigmas e mecanismos de aprendizagem tais como: Correção de Erros, Aprendizagem Hebbiana, Modelo de Linsker, Regra de Oja, Regra de Yuille, Modelo de Kohonen, entre outros (Braga, 1998).

3.3.6.1 APRENDIZAGEM SUPERVISIONADA

A aprendizagem supervisionada é o método mais comum no treinamento de RNAs, tanto de neurónios com pesos como neurónios sem pesos. Como o próprio nome indica as entradas e saídas desejadas para a rede são fornecidas por um supervisor (professor) externo. O objectivo é ajustar os parâmetros da rede, de forma a minimizar o erro, que é função da diferença entre a saída desejada e a fornecida pela rede. Esta minimização ocorre através do ajuste dos pesos da rede. Um exemplo deste paradigma de aprendizagem é o método *Backpropagation*, que será aqui utilizado e, portanto, melhor discutido a seguir (ver ponto 3.5). Basicamente, a aprendizagem supervisionada pode ser implementada de duas formas: *off-line* e *on-line*. Para o treinamento *off-line*, os dados do conjunto de treinamento não mudam, e, uma vez obtida uma solução para a rede, esta deve permanecer fixa. Caso novos dados sejam adicionados ao conjunto de treinamento, um novo treinamento envolvendo os dados anteriores deve ser realizado, para se evitar a interferência no treinamento anterior. Por sua vez, na aprendizagem *on-line*, o conjunto de dados muda continuamente, e a rede deve estar em contínuo processo de adaptação.

A desvantagem da aprendizagem supervisionada é que, na ausência do professor, a rede não conseguirá aprender novas estratégias para situações não cobertas pelos exemplos do treinamento da rede. Os exemplos mais conhecidos de algoritmos para a aprendizagem supervisionada são a Regra Delta e a sua generalização para redes de múltiplas camadas, o algoritmo de *backpropagation* (Rumelhart *et al.*, 1986).

3.3.6.2 APRENDIZAGEM POR REFORÇO

Trata-se de um caso particular da aprendizagem supervisionada. A grande diferença entre esta e a aprendizagem por reforço reside na medida de desempenho utilizada em cada um dos sistemas. Na aprendizagem por reforço, a única informação de re-

alimentação fornecida à rede é se uma determinada saída está correcta ou não, isto é, não é fornecida à rede a resposta correcta para o padrão de entrada.

3.3.6.3 APRENDIZAGEM NÃO SUPERVISIONADA

Na aprendizagem não-supervisionada, não existe supervisor para acompanhar o processo de aprendizagem. A rede aprende por si só, sem mensagem de erro externa. É necessário apresentar à rede entradas parecidas, para que esta possa extrair características estatisticamente relevantes e criar classes de forma automática. Apesar da semelhança entre a aprendizagem supervisionada e a aprendizagem dos seres humanos, muitos dos sistemas biológicos ocorrem através da aprendizagem não-supervisionada, como por exemplo os estágios iniciais dos sistemas de visão e audição. Para estes algoritmos, apenas os padrões de entrada estão disponíveis para a rede, ao contrário da aprendizagem supervisionada, cujo conjunto de treinamento possui pares de entrada e saída. A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar novas classes e grupos automaticamente. Este tipo de aprendizagem só é possível quando existe superabundância nos dados de entrada. De contrário torna-se difícil apurar quaisquer padrões ou características nos dados de entrada.

3.3.6.4 APRENDIZAGEM POR COMPETIÇÃO

Pode dizer-se que a aprendizagem por competição é um caso particular da aprendizagem não-supervisionada. Dado um padrão de entrada, o objectivo é fazer com que as unidades de saída disputem entre si para serem activadas. Existe, portanto, uma competição entre as unidades de saída para decidir qual delas será a vencedora, e consequentemente terá a saída activada e os seus pesos actualizados no treinamento. As unidades de entrada são directamente ligadas às unidades de saída, e estas últimas podem também estar ligadas entre si através de conexões laterais inibitórias, ou negativas. A unidade de saída com maior activação inicial terá maior probabilidade de vencer a disputa com as outras unidades, que perderão o seu poder inibitório ao longo do tempo sobre a unidade de maior activação. A unidade mais forte fica ainda mais forte, e o seu efeito inibidor sobre as outras unidades de saída torna-se dominante. Com o tempo, todas as outras unidades de saída ficarão completamente inactivas, excepto a vencedora.

3.4 AS REDES *PERCEPTRON* MULTI-CAMADAS

De entre os vários tipos de Redes Neurais Artificiais existentes, as redes *Perceptron* multi-camadas são as redes mais utilizadas, em parte devido à sua facilidade de implementação, e por outra devido à sua simplicidade. Estas redes têm sido utilizadas por uma grande variedade de aplicações; por esses motivos, o modelo MLP foi o escolhido para implementação do modelo neste trabalho. O objetivo desta seção é descrever e explicar, basicamente, o funcionamento das Redes Neurais Artificiais do tipo *Perceptron* multi-camadas.

3.4.1 O *Perceptron*

O modelo mais simples de Rede Neural, no qual várias unidades de processamento estão conectadas unicamente a uma unidade de saída através dos pesos sinápticos, é conhecido como *Perceptron*, de Frank Rosenblatt (1960). A sua estrutura inspira-se nas primeiras etapas de processamento dos sistemas sensoriais (como por exemplo a visão), nos quais a informação vai atravessando sucessivas camadas de neurónios, que realizam o processamento de mais alto nível. Um *Perceptron*, na sua configuração mais simples, é formado por três camadas de células, como mostra a Figura 3.4.

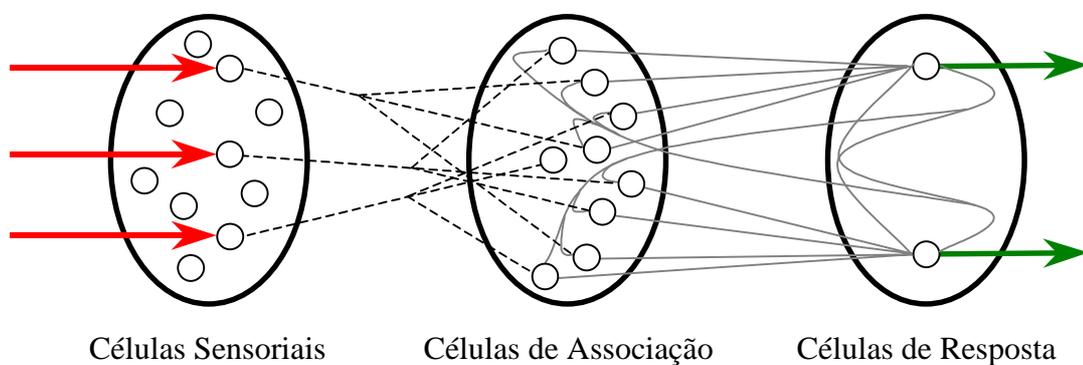


Figura 3.4 - Camadas de um *Perceptron*.

Fonte: Smith (1996).

O *Perceptron* pode utilizar-se tanto como classificador, como para a representação de funções booleanas, pois o seu neurónio de saída é do tipo binário (Brío & Molina, 2001). A importância histórica do *Perceptron* radica no facto de este ser treinável, pois o algoritmo de aprendizagem do modelo introduzido por Rosenblatt permite determinar automaticamente os pesos sinápticos que classificam um conjunto de padrões a partir de um conjunto de exemplos. Cada neurónio do *Perceptron* representa uma determinada

classe, de modo que, dado um vector de entrada, o neurónio responde com 0 se não pertence à classe que representa, e com 1 se pertence. É fácil verificar-se, no entanto, que o neurónio do tipo *Perceptron* somente permite diferenciar entre duas classes linearmente separáveis.

Segundo Braga *et al.* (2000), apesar de ter causado grande euforia na comunidade científica da época, o *Perceptron* não teve vida muito longa, já que as duras críticas de Minsky e Papert (1969) à sua capacidade computacional causaram grande impacto sobre as pesquisas em RNAs, levando a um grande desinteresse pela área durante os anos 70 e início dos anos 80. Esta visão pessimista da capacidade do *Perceptron* e das RNAs de uma maneira geral mudou com as descrições da rede de Hopfield em 1982 e do algoritmo *backpropagation* em 1986. Foi em consequência destes trabalhos que a área de RNAs ganhou novo impulso, ocorrendo, a partir do final dos anos 80, uma forte expansão no número de trabalhos de aplicação e teóricos envolvendo RNAs e técnicas correlatas.

3.4.2 As Redes Multilayer Perceptron

As redes MLP (*Multilayer Perceptron*) apresentam um poder computacional muito maior do que aquele apresentado pelas redes sem camadas intermédias. A solução de problemas não-linearmente separáveis passa pelo uso de redes com uma ou mais camadas intermédias, ou escondidas. A rede passa a conter então pelo menos três camadas: a de entrada, a camada intermédia ou escondida, e uma camada de saída. Cada nó na camada de entrada leva para dentro da rede o valor de uma variável independente. Os nós na camada escondida fazem a maioria do trabalho. A camada denomina-se de ‘escondida’ porque os nós apenas contactam com os nós das camadas de entrada e saída, ou seja, elas estão ‘escondidas’ do mundo exterior. Segundo Cybenko (1989), uma rede com uma camada intermédia pode implementar qualquer função contínua. A utilização de duas camadas intermédias permite a aproximação de qualquer função matemática. Deve ser observado que permitir a implementação (aprendizagem) da função não implica, como é o caso da rede *Perceptron*, a garantia de implementação dessa mesma função. Dependendo da distribuição dos dados a rede pode convergir para um mínimo local ou pode demorar para encontrar a solução desejada. O problema coloca-se então em como treinar estas redes.

Para o treinamento das redes com mais de uma camada foi proposto um método que se baseia no gradiente descendente (Rumelhart *et al.*, 1986). Mas para que este método possa ser utilizado é necessário que a função de activação seja contínua, diferenciável e, de preferência, não decrescente. A função de ativação deve informar os erros cometidos pela rede para as camadas anteriores com a maior precisão possível. A alternativa utilizada para superar os problemas deste tipo de rede é a utilização de funções de ativação do tipo sigmoidal. A função sigmóide é abordada detalhadamente no item 3.6 deste capítulo.

Dougherthy (1995) fez uma revisão sobre as Redes Neurais aplicadas na área de Transportes. Em seu estudo ele salienta a importância da rede *multilayer perceptron* e afirma que este tipo de rede, juntamente com o algoritmo *backpropagation*, têm sido os mais utilizados nas pesquisas em Transportes, embora outras topologias também venham sendo utilizadas. Neste trabalho em particular, foi adoptada a rede *multilayer perceptron*, por ser a mais conhecida e utilizada, além de ter apresentado bons resultados em estudos semelhantes.

3.4.3 Topologia

Uma das maiores dificuldades em se definir a estrutura de uma Rede Neural Artificial é o fiel dimensionamento da sua topologia. Normalmente, o número de camadas e o número de nós em cada camada é definido em função de uma inspecção prévia dos dados e da complexidade do problema. Uma vez definida a topologia inicial, a estrutura final mais adequada para o modelamento é normalmente obtida através de refinamentos sucessivos, que podem levar a um tempo de dimensionamento alto, já que este tem um grande componente empírico (Queiroz, 1999).

O número adequado de nós na camada intermédia, geralmente definido empiricamente, depende fortemente da distribuição dos padrões de treinamento e validação da rede. De entre os vários factores particulares que influenciam este número estão:

- Número de exemplos de treinamento;
- Quantidade de ruído presente nos exemplos;
- Complexidade da função a ser aprendida;
- Distribuição estatística dos dados de treinamento.

Alguns dos métodos para a definição deste número de nós na camada intermédia são:

- Definir o número de unidades, na camada intermédia, em função do número de entradas e saídas. Deve ser observado que este método não pode ser utilizado de forma genérica.
- Utilizar um número de conexões dez vezes menor que o número de exemplos. Este método apenas reduz a incidência de *overfitting*. Se o número de exemplos for muito maior que o número de conexões, o *overfitting* é improvável, mas pode ocorrer *undefitting* (a rede não converge durante o seu treinamento).

Existem problemas que necessitam apenas de uma unidade de entrada e uma unidade de saída, e outros que podem necessitar de milhares de unidades intermédias. O número de unidades intermédias pode também, em alguns casos, crescer exponencialmente com o número de entradas. A solução mais eficiente é aquela onde o número de unidades cresce apenas polinomialmente com o aumento do número de unidades de entrada.

Em síntese, nas etapas de ajuste deve-se sempre procurar obter uma topologia de rede que modele com precisão os dados do conjunto de treinamento, mas que também resulte numa aproximação com boa capacidade de generalização.

3.5 REGRA DELTA GENERALIZADA E ALGORITMO *BACKPROPAGATION*

A regra ‘delta generalizada’ é a regra de aprendizagem mais utilizada para treinar a rede *multilayer perceptron*. Segundo Galvão e Valença (1996), consiste na aplicação do gradiente descendente ao problema de múltiplas camadas utilizando-se o algoritmo *backpropagation*. O gradiente descendente tem como objectivo a determinação de um mínimo global, através de incrementos dos valores dos pesos por uma quantidade que é proporcional à primeira derivada (o gradiente) do erro entre o valor de saída desejada e o valor actual de saída fornecido pelo elemento de processamento em relação ao valor do peso.

Quando um padrão é apresentado à rede pela primeira vez, esta produz uma saída aleatória. A diferença entre esta saída e a desejada constitui o erro. O algoritmo *backpropagation* é responsável pelo cálculo das funções de erro. O objectivo da fase de treinamento é diminuir constantemente o valor desse erro. Para tal, o valor dos pesos deve ser ajustado a cada nova iteração. A regra *backpropagation* faz com que os pesos

da camada de saída sejam os primeiros a serem ajustados e, posteriormente, os pesos das restantes camadas, de trás para frente. Seja E_p a função erro para o padrão p , d_{pj} o valor da saída desejado (para o padrão p e o neurónio j), o_{pj} o valor da saída obtido e w_{ij} o peso do neurónio i para o neurónio j . Então, a função E_p pode ser dada pela Equação (3.2).

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (d_{pj} - o_{pj})^2 \quad (3.2)$$

O objectivo é, pois, minimizar a função erro. Se esta for simples, a rede tem garantia de encontrar a solução. Caso contrário, a rede pode cair num mínimo local e não produzir uma saída satisfatória. A actualização dos pesos ocorre com a adição de um termo de variação a eles (Δw_{ij}), ou seja, para um peso w_{ij} o seu peso actualizado será dado pela Equação (3.3):

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (3.3)$$

Onde:

$$\Delta w_{ij} = \eta x_i o_j (1 - o_j) \delta_j \quad (3.4)$$

$$\delta_j = (d_j - o_j), \text{ para a última camada} \quad (3.5)$$

$$\delta_j = \sum w_{jk} \delta_k, \text{ para camadas intermédias} \quad (3.6)$$

A variável η é denominada de taxa de aprendizagem. O seu valor vai determinar o quão suavemente será a actualização dos pesos. Se η for grande, o valor de Δw_{ij} será grande e consequentemente os pesos sofrerão uma alteração mais brusca, caso contrário a sua alteração será mais suave. Uma outra variável que pode ser incluída na actualização de pesos é o *momentum* (μ). Este novo termo pode aumentar a velocidade da aprendizagem e tem como característica acelerar o treinamento em regiões planas da superfície de erro. Com a adição do *momentum*, Δw_{ij} passa a ser dado por:

$$\Delta w_{ij}(t+1) = \eta x_i o_j (1 - o_j) \delta_j + \mu [w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)] \quad (3.7)$$

O algoritmo *backpropagation* apresenta algumas dificuldades de aprendizagem. Em superfícies muito complexas, o treinamento é muito lento e existe o risco da rede cair num mínimo local. Além disso, pode ocorrer *overfitting*, fenómeno que surge depois de

um certo tempo de treinamento, quando a rede memoriza os padrões apresentados e o processo de classificação piora sensivelmente. Para evitar estes tipos de problemas, Braga *et al.* (2000) recomendam a colocação na rede de um número de neurónios intermédios suficientes para a solução do problema de reconhecimento de padrões, tendo também atenção para não utilizar neurónios em número reduzido, o que pode levar a rede a despender tempo em excesso para encontrar uma representação óptima.

Smith (1996) defende que o risco de a rede memorizar os dados ocorre em função de um excessivo poder da mesma, sendo que este deve ser limitado para que não ocorra *overfitting*. Uma das formas de evitar tal fenómeno e reduzir o problema de ruído é aumentar o número de elementos da amostra. Na prática, porém, há diversas restrições em relação ao tamanho da amostra, pelo facto de o número de exemplos disponíveis ser geralmente mais baixo que o número estatisticamente desejável, em virtude da indisponibilidade de todas as informações desejadas. À medida que o problema se torna mais complexo ou o nível de ruído cresce, o tamanho da amostra estatisticamente desejável aumenta muito rapidamente. Desta forma, surgem outras maneiras de se ‘restringir o poder’ da Rede Neural, como limitar a quantidade de neurónios na camada intermédia e o número de ciclos de treinamento.

Em virtude dos bons resultados que as RNAs têm apresentado na solução de problemas de natureza semelhante ao aqui proposto, e mesmo sabendo os cuidados necessários para sua utilização, optou-se por trabalhar com a rede *multilayer perceptron* associada ao algoritmo *backpropagation*. As peculiaridades deste tipo de rede podem ser controladas, na medida em que se pretende encontrar iterativamente uma configuração de melhor desempenho, por exemplo através do menor valor do erro relativo, que será melhor discutido na metodologia deste trabalho.

3.6 FUNÇÕES DE ACTIVACÃO: A FUNÇÃO SIGMÓIDE

A função de activação $\varphi(v)$ é na maior parte dos modelos, crescente e contínua, como se observa habitualmente nos neurónios biológicos (Brío & Molina, 2001). Algumas das funções de activação mais empregadas nas RNAs são a função linear, a função rampa, a função degrau ou *threshold* e a função sigmoidal. Os gráficos correspondentes a cada uma destas funções apresentam-se na Figura 3.5. Quando fornecidos os pesos correctos

à rede, estas funções podem tomar diferentes formas. De facto, elas podem assumir a forma desejada, o que significa que a rede pode aproximar qualquer função com um determinado grau pretendido.

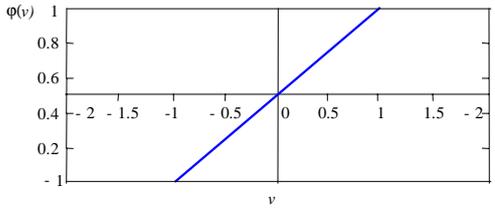
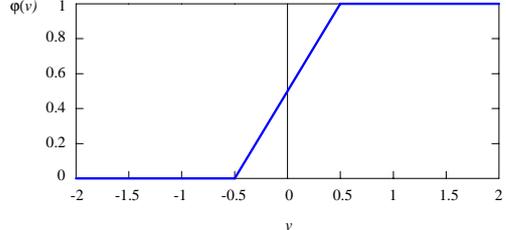
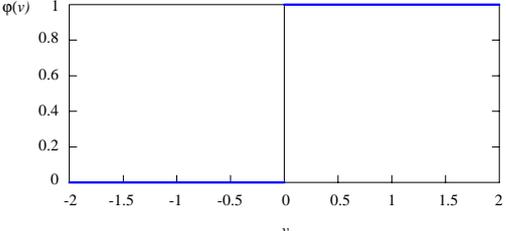
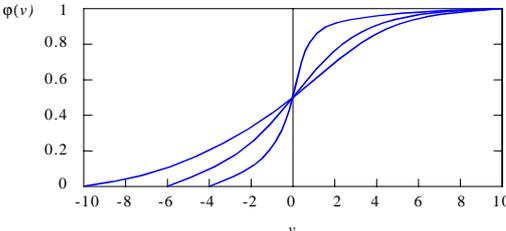
| Nome da Função | Função | Intervalo | Gráfico |
|----------------------------|---|-----------------------------------|--|
| Identidade | $\varphi(v) = v$ | $[-\infty, +\infty]$ |  |
| Rampa | $\varphi(v) = \begin{cases} +1, & \text{se } v \geq 0.5 \\ v + 0.5 & \text{se } v < 0.5 \\ 0, & \text{se } v \leq -0.5 \end{cases}$ | $\{-1, +1\}$ |  |
| Degrau ou Threshold | $\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v > 0 \\ 0, & \text{se } v \leq 0 \end{cases}$ | $\{-1, +1\}$ ou $\{0, +1\}$ |  |
| Sigmoidal logística | $\varphi(v) = \frac{1}{(1 + e^{-v})}$ | $\{0, +1\}$ ou $\{-1, +1\}$ |  |

Figura 3.5 - Funções de activação mais utilizadas nas RNAs.

A função sigmoide é a função mais utilizada pelas RNAs. Uma grande quantidade de programas de RNAs utilizam este tipo de função, inclusive o *software* utilizado no presente trabalho (*EasyNN-plus*). Por esse motivo se faz seguidamente uma breve

apresentação sobre as especificidades da função sigmóide e do seu comportamento numa rede simples.

3.6.1 Função Sigmóide

Uma dada função $s(u)$ denomina-se sigmóide quando possui certas características específicas. Em primeiro lugar, esta é limitada, o que significa que o seu valor $s(u)$ nunca excede um determinado limite superior, nem ultrapassa um determinado limite inferior. Segundo, o valor de $s(u)$ aumenta sempre com o valor de u . Estas duas características mostram que sempre que o valor de u aumenta, $s(u)$ aumenta também, mas nunca ultrapassa o seu limite superior, e sempre que o valor de u diminui $s(u)$ aproxima-se do seu limite inferior sem nunca o ultrapassar. Em terceiro lugar, uma função sigmóide é continua em toda a sua extensão sem ‘socialcos’ nem alterações bruscas, existindo um pequeno diferencial em todos os seus pontos.

Muitas funções com estas características são utilizadas nas RNAs. A mais comumente utilizada é a função sigmoidal logística (veja-se Figura 3.5). A utilização do número de *Nepper* no denominador da função não é essencial, uma vez que qualquer outra constante superior a 1 pode ser também utilizada. Quanto maior o valor da constante, mais rapidamente a função se aproxima dos seus limites, e ao contrário, quanto mais baixo for o valor, mais devagar a função se aproxima dos seus limites. Duas outras funções sigmóides são também utilizadas pelas RNAs. Ambas têm os seus limites compreendidos entre -1 e 1 . A primeira função, $h(u)$, dada pela Equação (3.8), é muito próxima da função logística. Sendo $g(u)$ a função sigmoidal logística, para qualquer valor de u , esta função alternativa toma o valor de $h(u) = 2 \times g(u) - 1$.

$$h(u) = \frac{1 - e^{-u}}{1 + e^{-u}} \quad (3.8)$$

Outra função sigmóide é a função tangente hiperbólica, dada pela Equação (3.9).

$$\tanh(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}} \quad (3.9)$$

A função tangente hiperbólica aproxima-se dos seus limites mais facilmente que a função $h(u)$. Para a implementação de uma RNA, qualquer uma destas funções é

igualmente adequada. As diferenças nos seus limites residem na preferência do intervalo de saída que se pretende (0 a 1 ou -1 a 1), uma vez que estes são os limites dentro dos quais se situam os valores de saída da rede. Os limites da função não determinam, no entanto, o intervalo dos valores de entrada da rede. Estes podem tomar qualquer valor, independentemente da função sigmóide utilizada.

3.6.2 Comportamento da Função Sigmóide numa Rede Simples

Descreve-se de seguida o comportamento de uma função sigmoidal numa rede simples, com apenas um nó de entrada e um de saída, quando se variam os valores dos pesos w_{kj} e b_k . Esta última variável, b_k , também denominada de *bias*, representa o peso no neurónio de ordem k , e w_{kj} , como já se viu anteriormente, representa o peso sináptico j referente às conexões do EP k . Esta rede pode ter um qualquer número de nós na camada intermédia. O nó da camada escondida recebe uma entrada, $x_j = x_1$. Este valor é multiplicado pelo peso sináptico com valor w_{kj} , valor fornecido pela rede. E a este produto é adicionado o valor b_k , valor também fornecido pela rede. Sendo u o resultado desta operação, tem-se:

$$u = \sum_{j=0}^n w_{kj} x_j + b_k \quad (3.10)$$

A saída ou *output* deste nó será o resultado da função s , ou seja:

$$y = s(u) \quad (3.11)$$

Ou:

$$y = s\left(\sum_{j=0}^n w_{kj} x_j + b_k\right) \quad (3.12)$$

Analisando a função sigmóide e os respectivos valores de w_{kj} e b_k verifica-se que estes são responsáveis pelas alterações na forma e direcção da função. No caso mais simples o *output* do nó, y , será o resultado da função logística de (x_1) , $y = s(x_1)$, o que acontece quando os pesos tomam os valores $b_k = 0$ e $w_{kj} = 1$. Se se mantiver o valor de b_k igual a 0 e se se alterar o valor de w_{kj} para -1, então ter-se-á $y = s(-x_1)$, ou seja, a direcção da curva é invertida. Neste caso, quando o valor de x_1 aumenta, y diminui.

Outra alteração na função verifica-se se, em vez de se alterar o sinal de w_{kj} , se alterar o seu valor, por exemplo, de 1 para 2. Nesta situação, a inclinação da curva aumenta, o

que significa que a função atinge mais rapidamente os seus limites inferior e superior. Resumindo, o sinal de w_{kj} determina a direcção da curva, enquanto que o valor de w_{kj} controla a inclinação da curva.

O valor de b_k posiciona a curva no eixo dos xx . Se o seu sinal for negativo a curva é posicionada para a frente, se for positivo esta é posicionada para trás. Mas o posicionamento da curva não depende apenas de b_k , também depende de w_{kj} . Quanto menor for o valor de w_{kj} , mais a posição da curva é influenciada pelo valor de b_k .

Isto significa que variando b_k e w_{kj} pode obter-se a função sigmóide que se deseja. Segundo Smith (1996), este processo compreende ‘três passos’. Primeiro, determinar se a curva deve ser crescente ou decrescente, fazendo w_{kj} positivo ou negativo. Segundo, dar um valor alto ou baixo a w_{kj} , conforme se pretende a inclinação da curva aumente ou diminua. Em terceiro, posicionar a curva no eixo dos x , para a frente ou para trás conforme o valor de b_k é negativo ou positivo.

3.7 EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO DE UMA RNA NUMA FOLHA DE CÁLCULO

Para tornar explícito o procedimento de cálculo do valor do neurónio de saída a partir dos valores de entrada do modelo e visando facilitar a compreensão da lógica das RNAs, acrescentou-se o exemplo de funcionamento de uma rede simples neste sub-capítulo. Trata-se de uma rede com dois neurónios na camada de entrada, dois neurónios na camada intermédia e apenas um neurónio na camada de saída, que pode ser visualizada na Figura 3.6. A Figura 3.7 ilustra numericamente este problema.

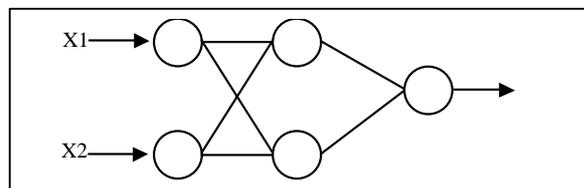


Figura 3.6 - Esquema da RNA utilizada na folha de cálculo.

A lógica para o cálculo do neurónio de saída, a partir dos valores de entrada da Rede Neural treinada, é bastante simples. Em primeiro lugar, o valor do neurónio de entrada é normalizado no intervalo entre 0 e 1, através da Equação (3.13).

$$norm = \frac{real - mín}{máx - mín} \quad (3.13)$$

Onde:

norm representa o valor normalizado entre 0 e 1;

real o valor observado;

mín o menor valor observado da variável;

máx o maior valor observado da variável.

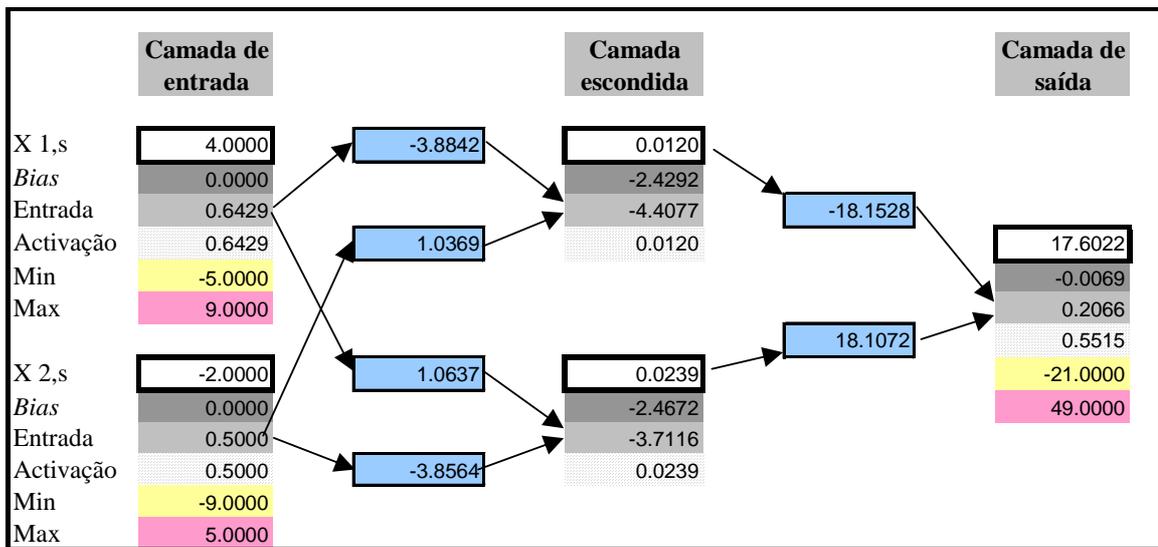


Figura 3.7 - Funcionamento de uma RNA apresentada numa folha de cálculo.

Numericamente, a situação para o primeiro neurónio de entrada é a seguinte: substituindo-se o valor *real* por “4,0000”, *mín* por “-5,0000” e *máx* por “9,0000”, tem-se *norm* igual a “0,6429”. Para o segundo neurónio de entrada o cálculo é análogo, e o valor de entrada “-2,0000” foi convertido para “0,5000”, dados os limites “-9,0000” e “5,0000”. Após terem sido normalizados, os valores de entrada são multiplicados pelos pesos das conexões entre os neurónios da camada de entrada e os da camada intermédia e somados. Nesta etapa, também são acrescentados os valores de b_k de cada neurónio da camada intermédia, conforme indica a Equação (3.14), e calculadas as funções de activação, neste caso, sigmóide logística, com a Equação (3.15).

$$u_k = b_k + \sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot x_j \quad (3.14)$$

$$\varphi_k = \frac{1}{(1 + e^{-uk})} \quad (3.15)$$

onde: u_k é a soma dos pesos

φ_k é a função de activação

Os valores dos pesos das ligações e de b_k são fornecidos directamente pelo *software* de RNA, após o treinamento da rede. No exemplo dado, no caso do primeiro neurónio da camada intermédia, o mesmo é calculado da seguinte forma:

$$u_k = -2,4292 + 0,6429 \times (-3,8842) + 0,5000 \times (1,0369) = -4,4077 \quad (3.16)$$

$$\varphi_k = \frac{1}{(1 + e^{-(-4,4077)})} = 0,0120 \quad (3.17)$$

Após aplicar a função de activação no valor obtido com a Equação (3.14), ter-se-á o valor do neurónio da camada intermédia. O procedimento de obtenção do neurónio de saída, a partir dos neurónios da camada intermédia é o mesmo para a obtenção destes últimos, a partir da camada de entrada. No entanto, o valor obtido após aplicada a função de activação pela segunda vez estará normalizado. Para obter o valor real de saída, basta aplicar a Equação (3.18), onde os valores máximo e mínimo referem-se aos dados reais de saída.

$$real = norm \times (máx - mín) + mín \quad (3.18)$$

Numericamente, tem-se:

$$real = 0,5515 \times (49,0000 + 21,0000) - 21,0000 = 17,6022 \quad (3.119)$$

3.8 UTILIZAÇÃO DE RNAS

Brío & Molina (2001) expõem, em termos gerais, as características que devem possuir os problemas para que a sua resolução com RNAs proporcione bons resultados, assim como aquelas que sugerem que o emprego desta técnica pode não resultar aconselhável ou viável.

3.8.1 Características que Deve Possuir o Problema

O método para resolução de um problema deve ter em conta o tipo de problema que este representa e a solução pretendida. Não faz sentido utilizar elaborados métodos se é perfeitamente possível resolvê-lo com um modelo estatístico simples ou um simples programa de computador. Os problemas que podem ser resolvidos com RNAs possuem características específicas que a seguir se apresentam:

- Não se dispõe de um conjunto de regras sistemáticas que descrevam completamente o problema;
- Dispõem-se de vários exemplos ou casos históricos (esta é uma condição indispensável para poder aplicar a técnica das Redes Neurais);
- Os dados provenientes do problema são imprecisos ou incluem ruído (por exemplo, no caso de um reconhecedor de caracteres, as diferentes imagens correspondentes a uma mesma letra podem aparecer com a posição alterada, ampliadas, reduzidas, incompletas, distorcidas, etc.);
- O problema é de elevada dimensão (por exemplo, a matriz de pontos que formam uma imagem pode ser um número demasiado grande para que um sistema convencional que opere em série faça uma análise da imagem em tempo real);
- Uma circunstância frequente é que os métodos de RNAs proporcionam uma alternativa muito mais rápida e simples de desenvolver do que outras técnicas convencionais;
- Se as condições de trabalho variam pode fazer-se uso da capacidade das RNAs para adaptar-se a essas mudanças, voltando a treinar o sistema com novos exemplos.

3.8.2 Características do Problema que Tornam Desaconselhável a Utilização de RNAs

Existem situações em que as características do problema tornam desaconselhável a utilização de RNAs, algumas das quais se apresentam a seguir:

- Existe um algoritmo que resolve com total eficácia o problema. É o caso dos problemas puramente algorítmicos ou numéricos (multiplicação de números, inversão de matrizes, etc.);
- Não se dispõe de um número adequado de casos (exemplos) para treinar a Rede Neural;
- Tarefas críticas ou potencialmente perigosas, cuja resolução é sempre previsível e explicável. Às vezes não é fácil interpretar a operação da Rede Neural ou prever com total fiabilidade o resultado que pode fornecer em todos os casos possíveis.

3.8.3 Inconvenientes das Redes Neurais

Obviamente as RNAs não resolvem todos os problemas. Estão, sim, mais vocacionadas para um certo tipo de tarefas. Além disso, o campo de estudos onde se inserem é muito recente, e alguns problemas continuam ainda por resolver. Como exemplo tem-se as seguintes situações:

- Dadas as especificações de um problema, desconhece-se a topologia (arquitetura) da rede mais eficiente para a resolução do problema;
- É difícil verificar porque é que as RNAs não são capazes de ajustar os dados que lhes são fornecidos. Num dado problema, em que se utilizam redes, pode tornar-se difícil verificar porque é que não funcionam correctamente;
- Os modelos de Redes Neurais necessitam elevados requisitos de cômputo. Se bem que esta afirmação seja verdadeira no modo de aprendizagem, usualmente em fase de execução são os métodos mais rápidos, inclusive podem ser simuladas num computador normal;
- Uma vez treinada uma Rede Neural, é difícil interpretar o seu funcionamento. Trata-se de um tipo de funcionamento denominado de ‘caixa preta’.

Concluído este capítulo, e tendo agora já algumas noções importantes sobre as principais características da análise de problemas através de RNAs, procede-se em seguida à descrição da metodologia utilizada no presente caso de estudo.

4 METODOLOGIA

No presente capítulo é descrita a metodologia utilizada na elaboração deste estudo. Na primeira parte do mesmo apresentam-se as variáveis de entrada (socioeconómicas e de distribuição espacial da população) e de saída do modelo (energia consumida em transportes), assim como as fontes pesquisadas para a sua aquisição. Em seguida é explicada a forma como as variáveis foram tratadas através da ferramenta de modelação matemática Redes Neurais Artificiais, fazendo também referência ao *software* utilizado (*EasyNN-plus*). O capítulo é finalizado com uma descrição resumida das várias fases realizadas para a elaboração do presente estudo, de forma a alcançar o objectivo proposto.

4.1 SELECÇÃO DAS VARIÁVEIS

O primeiro passo na elaboração deste estudo consistiu em averiguar, na literatura, quais as variáveis que podem influenciar o consumo de energia em transportes. Da análise das fontes bibliográficas disponíveis e já referidas no capítulo 2 reuniu-se um conjunto de vinte e seis variáveis, as quais se encontram listadas na Tabela 4.1.

Identificadas as variáveis que podem de alguma forma determinar o consumo de energia em transportes, iniciou-se a investigação daquelas que estariam disponíveis para a análise do caso português. Assim, muitas das variáveis citadas na literatura internacional não foram analisadas em virtude da indisponibilidade das mesmas, como são os casos de: velocidade média do tráfego, nível de serviço do transporte público e distribuição modal nas viagens para o emprego. As variáveis disponíveis em Portugal e que foram reunidas para este estudo são apresentadas na sequência deste item, divididas em três grandes grupos: variáveis socioeconómicas (nas quais se incluem variáveis relacionadas aos transportes, como é o caso da frota, por exemplo), variáveis relativas à

distribuição espacial da população e à forma urbana e variáveis relativas à energia consumida em transportes.

Tabela 4.1 - Conjunto de variáveis que podem influenciar o consumo de energia em transportes.

| Nº | VARIÁVEL |
|-----|--|
| 1. | População e área urbanizada |
| 2. | Nível de empregos e respectivas localizações geográficas |
| 3. | Oferta de estacionamento na principal zona atractiva de viagens |
| 4. | Extensão da rede viária |
| 5. | Frota de veículos automotores |
| 6. | Eficiência energética dos veículos particulares e veículos de transporte público |
| 7. | Índice de veículos x quilómetros |
| 8. | Índice de passageiros x quilómetros |
| 9. | Ocupação média dos veículos |
| 10. | Velocidade média na rede viária |
| 11. | Distribuição modal nas viagens para o emprego |
| 12. | Tempo médio das viagens para o emprego |
| 13. | Extensão média das viagens |
| 14. | Total de mortes devido a acidentes de trânsito |
| 15. | Emissões de CO ₂ pelos sistemas de transporte |
| 16. | Outras emissões pelos sistemas de transporte |
| 17. | Despesas em construção e manutenção de vias urbanas |
| 18. | Custo fixo e variável dos transportes particular e público |
| 19. | Produto Interno Bruto (PIB) <i>per capita</i> |
| 20. | Custo do tempo de viagem |
| 21. | Características das infra-estruturas viárias |
| 22. | Características da infra-estrutura ferroviária urbana |
| 23. | Grau de congestionamento das vias |
| 24. | Padrões relacionados com a forma urbana |
| 25. | Densidade média populacional urbana |
| 26. | Densidade populacional na principal zona atractiva/geradora de viagens |

4.1.1 Variáveis Socioeconómicas

A proposta inicial desta investigação consistia em reunir as variáveis socioeconómicas de interesse para as principais cidades portuguesas, relativas ao Recenseamento Geral da População de 2001. No entanto, tendo sido a colecta muito recente, nem todos os dados definitivos dos Censos 2001 se encontravam disponíveis aquando do levantamento de dados para este estudo. Procedeu-se, então, à pesquisa na base de dados *Sales Index 2002* (Marktest, 2002), que constitui uma base de dados com uma vasta gama de variáveis, e que se encontram organizados por períodos anuais e desagregados por Unidades Territoriais. Para Portugal continental dividem-se em 5 NUTs II (Nomenclatura de Unidades Territoriais) e 28 NUTs III, 275 Concelhos e 4037 Freguesias, correspondentes a divisões do território utilizadas para fins estatísticos, sendo as duas últimas também divisões administrativas do país.

Neste ponto importa referir que nem todas as variáveis se encontram disponibilizadas para o nível de desagregação espacial mais baixo daquela base (a freguesia), como é o caso das variáveis relativas a vendas de combustíveis, cujo nível de desagregação máximo é o concelho. Assim, para o ano de 1998, ano em que muitas das variáveis procuradas se encontravam disponíveis nos *Sales Index 2002*, procedeu-se à selecção das variáveis socioeconómicas que seriam mais adequadas à realidade portuguesa e de interesse para o estudo, conforme consta na Tabela 4.2. Note-se que os dados de população e densidade constantes desta tabela não foram, no entanto, retirados daquela base, mas sim de outra fonte utilizada: o Atlas das Cidades de Portugal (INE, 2002).

Um segundo conjunto de dados foi recolhido, correspondente a variáveis agregadas ao nível da cidade. Este foi apurado no Atlas das Cidades de Portugal (INE, 2002), recentemente editado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE). Deste documento foram seleccionadas, além das variáveis relativas à população do concelho referidas na Tabela 4.2, as variáveis relativas à *População da Cidade*, *Área da Cidade*, *Taxa de Desemprego* e *Dimensão Média das Sociedades*. As unidades utilizadas, assim como os anos a que se referem estes dados constam da Tabela 4.3. As variáveis *Densidade da Cidade* e *Proporção de População do Concelho que Vive na Cidade*, embora não constem do Atlas, foram calculadas com base nos dados aí existentes (inclusive a *Área da Cidade*, que acabou substituída na Tabela 4.3 pela *Densidade da Cidade*).

Tabela 4.2 - Variáveis socioeconómicas agregadas ao nível do concelho.

| VARIÁVEL | DESIGNAÇÃO | UNIDADES | ANO |
|--|--------------------|-----------------------------|------------|
| População do Concelho ⁽¹⁾ | POP_CONC | (Unidade (N ^o)) | 2001 |
| Densidade do Concelho ⁽¹⁾ | DENS_CONC | Hab./km ² | 2001 |
| Frota de Veículos Pesados de Passageiros | FROTA_PPASSG | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Frota Automóvel Total | FROTA_TOTAL | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Distância Média entre a Sede de Município e a Sede do Distrito | GERAL.DIST_SEDE | (Tempo) | 1998 |
| Extensão da Rede Viária Municipal | R_VIARIA | km | 1996 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Agricultura, Silvicultura, Caça e Pesca | ECAE1R2.PESSOAS_AB | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Indústrias Extractivas | ECAE2R2.PESSOAS_C | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Indústrias Transformadoras | ECAE3R2.PESSOAS_D | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Produção e Distribuição de Electricidade, Gás e Água | ECAE4R2.PESSOAS_E | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Construção | ECAE5R2.PESSOAS_F | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Comércio, Hotelaria e Restauração | ECAE6R2.PESSOAS_GH | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Transportes, Armazenagem e Comunicações | ECAE7R2.PESSOAS_I | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Actividades Financeiras, Imobiliárias e Serviços Prestados às Empresas | ECAE8R2.PESSOAS_JK | (Unidade (N ^o)) | 1998 |
| Total de Pessoas ao Serviço - Administração Pública, Educação, Saúde e Outros | ECAE9R2.PESS_LMNO | (Unidade (N ^o)) | 1998 |

Fonte: Markttest, 2002 e INE, 2002 (1).

Tabela 4.3 - Variáveis socioeconómicas agregadas ao nível da cidade.

| VARIÁVEL | DESIGNAÇÃO | UNIDADES | ANO |
|---|------------|------------------------------|------|
| População da Cidade | POP_CID | Número de pessoas | 2001 |
| Densidade da Cidade | DENS_CID | Hab./km ² | 2001 |
| Taxa de Desemprego | TAX_DESEMP | % | 2001 |
| Dimensão Média das Sociedades | DIM_SOC | Número de pessoas ao serviço | 1999 |
| Proporção de População do Concelho que Vive na Cidade | PROP_POP | % | 2001 |

Fonte: Atlas das Cidades de Portugal (INE, 2002).

4.1.2 Variáveis de Natureza Espacial Destinadas a Caracterizar a Distribuição da População no Território

Para a determinação de factores, como área e perímetro, relativos à forma urbana mas que permitem caracterizar a distribuição da população no território, foi necessário recorrer a informação que permitisse obter a delimitação geográfica das cidades. Esta informação, para além do facto de ser de extrema importância, pois sem ela não seria possível efectuar a análise, foi, desde logo, muito difícil de obter. Em Portugal, a legislação é omissa quanto à delimitação das povoações, isto é, não exige uma descrição específica ou cartografia que imponha a definição do perímetro urbano (INE, 2002). Por este motivo não existe um cadastro da evolução do perímetro urbano das cidades portuguesas, nem um documento de referência segundo o qual se possa proceder à sua delimitação de forma homogénea, segundo princípios previamente definidos.

Não obstante, até há bem pouco tempo, o nível de desagregação máximo da informação do INE era a freguesia, estando no entanto a maioria dos dados estatísticos agregados ao nível do concelho. Mas, para grande parte das cidades portuguesas, esta divisão não corresponde ao contorno da cidade, mas antes a uma área que pode englobar um ou mais aglomerados urbanos e uma zona envolvente, que em geral possui uma densidade inferior a estes. Só muito recentemente o INE divulgou um conjunto de Unidades Territoriais de dimensões inferiores às freguesias, a que chamou de secções e subsecções estatísticas.

Outra dificuldade que se coloca para o presente estudo é o facto de os limites definidos pelo INE para os *lugares cidade* não coincidirem com os limites que as autarquias consideram para as cidades. Em geral, os órgãos autárquicos identificam esses limites com o perímetro urbano definido nos Planos Directores Municipais (PDM). No entanto, por altura da revisão periódica destes, os limites podem ser alterados. A insuficiente articulação entre o sistema estatístico oficial e as autarquias nesta matéria introduz uma complexidade dispensável na obtenção da informação necessária à gestão e análise das áreas urbanas (Albergaria, 1999).

Como uma alternativa para enfrentar os problemas acima mencionados foi utilizado neste estudo o Atlas das Cidades de Portugal (INE, 2002), documento que além de permitir a obtenção de dados ao nível de agregação da cidade, continha esboços do perímetro urbano de várias cidades portuguesas. Dadas as dificuldades existentes no desenho do perímetro urbano, importa, então, perceber como foram delimitadas as cidades e quais os critérios utilizados para tal na sua elaboração. Segundo aquele documento, tornou-se necessário definir um conceito de ‘cidade estatística’, construído empiricamente em parceria com as Câmaras Municipais a partir dos instrumentos jurídicos de ocupação do solo: Planos Directores Municipais, Planos de Urbanização, Planos de Pormenor e Perímetros Urbanos.

A ‘cidade estatística’ vai ao encontro da definição legal (Lei 11/82 de 2 de Junho) e dá corpo a uma visão do território na qual a área assim definida constitui um espaço urbano coerente cuja centralidade e coesão advém do facto de concentrar a maior parte das actividades, dos empregos e das funções urbanas do município (INE, 2002). Mas, duas particularidades se realçam na delimitação dos perímetros urbanos. Em primeiro lugar, a variedade de critérios utilizados pelos municípios na definição dos respectivos perímetros urbanos e, em segundo, o faseamento da revisão dos PDM, que pode não permitir a sua determinação em tempo oportuno.

No entanto, ultrapassadas estas questões outra dificuldade surge: fazer coincidir as áreas urbanas definidas com a malha de subsecções estatísticas do INE. É que a Base Geográfica de Referenciação da Informação (BGRI) de 2001, apoia-se em acidentes de terreno como, por exemplo as estradas, e os PDMs por vezes apoiam-se em pontos não facilmente referenciáveis no terreno. Assim sendo, foi necessário um conjunto de procedimentos para que o INE pudesse enviar às Câmaras, sob a forma de um documento cartográfico, uma proposta de delimitação das respectivas cidades. Em

alguns casos, perante a solução apresentada, a Câmara manifestou a sua não concordância no traçado da cidade numa área em particular e, simultaneamente, o INE não pode apresentar uma alternativa satisfatória mantendo o apoio numa rede de subsecções, sob pena de subverter os critérios aplicados à generalidade das cidades do país (INE, 2002).

O tratamento e afectação da informação à cidade estatística é outro ponto que importa referir. No Atlas das Cidades, a única informação disponível ao nível da subsecção estatística provém dos Recenseamentos Gerais da População e da Habitação. A restante informação utilizada está agregada ao nível da freguesia e, como se sabe, os limites da cidade só muito excepcionalmente coincidem com os limites das freguesias. Por esse motivo, foram necessários alguns pressupostos e cálculos auxiliares para determinar os valores de algumas variáveis respeitantes à totalidade da cidade estatística.

Para além da informação contida no Atlas das Cidades, que permitia observar as cidades através de representação cartográfica ou fotografias aéreas, foi necessário obter também, para o presente estudo, a informação relativa ao contorno das cidades em formato digital, de forma a proceder ao cálculo da área e perímetro. Esta foi conseguida através da BGRI (2001) do INE, onde constava o esboço do perímetro das cidades dividido em subsecções estatísticas, apresentadas segundo uma estrutura vectorial. Com ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), *Arcview*, tornou-se então possível agregar os polígonos referentes às subsecções estatísticas pertencentes às áreas urbanas e obter assim os valores respectivos da área e perímetro destas.

Após a agregação das subsecções as manchas urbanas foram analisadas uma a uma, com o objectivo de se verificar a existência de áreas urbanas contíguas constituídas por cidades diferentes. Identificadas cidades nesta situação, cada conjunto destas seria considerado como um único aglomerado urbano. É somente a partir das definições dos contornos dos aglomerados urbanos que se torna possível obter variáveis que caracterizem a forma destes contornos, como se descreve a seguir.

4.1.2.1 RELAÇÃO ENTRE A ÁREA DO AGLOMERADO URBANO E A ÁREA DO MENOR CÍRCULO QUE O ENVOLVE

A primeira variável de natureza espacial aqui definida para caracterizar a forma das cidades foi a relação entre a área de cada aglomerado urbano e área do menor círculo que o envolve. Para isso desenhou-se, sobre os polígonos das cidades, a menor

circunferência que envolve cada contorno urbano. Na Figura 4.1 apresentam-se ilustrados o contorno da área urbana da cidade de Braga e o menor círculo que o envolve, como exemplo.

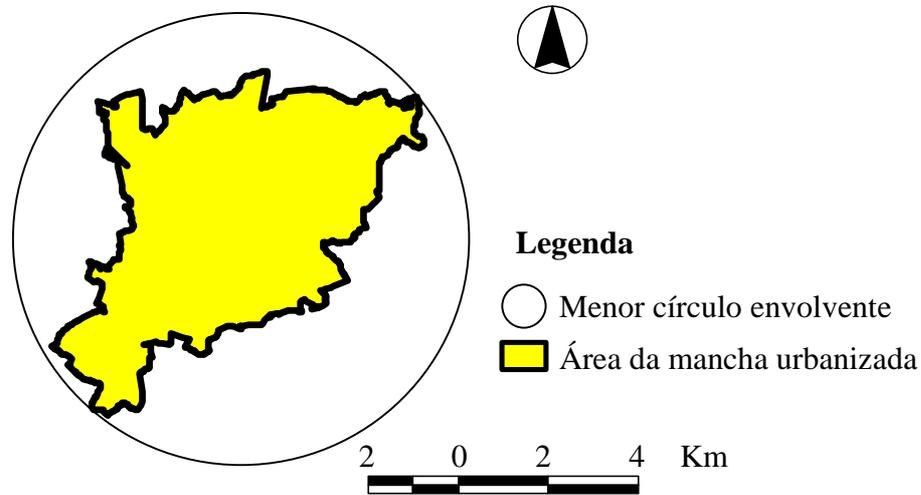


Figura 4.1 - Área da mancha urbanizada de Braga, definida a partir da agregação de subsecções estatísticas, e círculo envolvente à mesma.

Uma vez que os valores dos raios dos círculos envolventes eram informados pelo *software* automaticamente após o seu desenho, estes foram inseridos directamente na tabela de atributos, associados a cada uma das cidades. A partir destes valores pode-se calcular a área do círculo e a relação entre a área deste e a área da cidade ($AREA_CID/AREA_CIRC$), visando estabelecer um índice capaz de representar a proporção de vazios em relação ao círculo envolvente. Quanto menos vazios, mais próxima da unidade torna-se a relação. Vale a pena salientar que este índice refere-se somente aos vazios externos da área urbanizada e não aos vazios internos, facto que seria de suma importância se fosse considerado na análise, uma vez que algumas cidades portuguesas – como Cantanhede, Elvas, Fátima, Guarda, Macedo de Cavaleiros e Santa Comba Dão – possuem grandes parcelas das suas áreas urbanas desocupadas (com valores entre 40 a 50%; no que diz respeito a Santa Comba Dão a proporção de vazios chega mesmo a rondar o valor dos 80%). No entanto, em virtude da indisponibilidade de tais informações referentes a todos os municípios analisados, não foi possível analisar esse factor.

4.1.2.2 FACTOR FORMA

Outra variável aqui empregada para caracterizar a forma dos aglomerados urbanos foi o Factor Forma (Eastman, 1997). A sua determinação é possível com os dados área da cidade (AREA_CID) e perímetro urbano (PERIM_CID), através da Equação (4.1).

$$FF = \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.1)$$

Onde:

FF é o *Factor Forma*;

P é o Perímetro;

A é a Área.

O Factor Forma fornece um valor numérico que permite caracterizar a forma geométrica de uma figura quanto à sua compactidade. Analisando a Equação (4.1) pode dizer-se que o Factor Forma será tanto menor quanto maior for a área e menor o perímetro, o que significa que uma figura de forma alongada (valor alto de perímetro e valor reduzido de área) possuirá um Factor Forma de valor superior a uma figura mais próxima do círculo, figura geométrica que apresenta o menor valor possível ($FF = 3,545$, qualquer que seja o raio). Para as restantes figuras geométricas o *FF* aumenta, indicando a sua menor compactação. Desta análise concluiu-se que, se o *FF* das manchas urbanas for dividido pelo valor do *FF* de um círculo é possível caracterizar qualquer forma em relação à forma do círculo. Assim, o Factor Forma de uma área urbana será aqui dado pela Equação (4.2).

$$FF_u = \frac{PERIM_CID}{\sqrt{AREA_CID}} \times \frac{1}{3.545} \quad (4.2)$$

Onde:

FF_u é o Factor Forma da área urbana;

PERIM_CID é o Perímetro da cidade;

AREA_CID é a Área da cidade.

Note-se que, em tese, o Factor Forma próximo da unidade significa uma forma urbana mais compacta e, o inverso, se este se afastar da unidade. Apesar de muito parecidas em termos de conceito, as duas variáveis aqui empregadas para caracterizar a forma das cidades apresentam algumas diferenças. Isto confirma-se pelo valor do coeficiente de

correlação entre elas, igual a - 0,578, o que sugere uma correlação não muito forte entre as duas. O sinal desta correlação é negativo, o que significa que quando o valor da variável *FF* diminui (forma urbana menos alongada), o valor da variável *AREA_CID/AREA_CIRC* tende a aumentar (a área da cidade aproxima-se da área do círculo envolvente), como esperado. Assim ambas foram mantidas neste estudo, como se pode verificar na Tabela 4.4, onde estão listadas as variáveis de natureza espacial que, em conjunto com algumas variáveis da Tabela 4.3, permitem caracterizar a distribuição da população no território.

Tabela 4.4 - Variáveis de natureza espacial destinadas a caracterizar a distribuição da população no território.

| VARIÁVEL | DESIGNAÇÃO | UNIDADES | DATA |
|---|----------------------|-----------------|------|
| Área da cidade ⁽¹⁾ | AREA_CID | Km ² | 2001 |
| Área do concelho ⁽¹⁾ | AREA_CONC | Km ² | 2001 |
| Perímetro da cidade ⁽²⁾ | PERIM_CID | Km | 2001 |
| Relação entre a área do menor círculo que envolve o perímetro da cidade e a área da cidade ⁽³⁾ | AREA_CID / AREA_CIRC | -- | 2001 |
| Factor Forma ⁽³⁾ | FF | -- | 2001 |

Fonte: (1) Atlas das Cidades de Portugal (INE, 2002); (2) BGRI (INE, 2001); e (3) valores calculados a partir dos dados originais de (1) e (2).

É de referir que relativamente à variável área da cidade (*AREA_CID*), esta encontrava-se disponível em duas fontes: o Atlas das Cidades de Portugal e a BGRI (INE, 2002). Comparados estes valores para cada cidade detectou-se que em alguns casos (sete), o valor da área variava (entre 16 e 24%), sendo a área maior aquela que constava no Atlas. Foi, então, necessário proceder à comparação das imagens correspondentes a essas cidades no Atlas das Cidades e na BGRI 2002. Desta análise pode observar-se que algumas partes dos polígonos que constavam no Atlas das Cidades não coincidiam com os polígonos resultantes da agregação das subsecções estatísticas da BGRI. No entanto, ao se observar com pormenor cada uma delas, concluiu-se que eram partes da cidade

pouco urbanizadas, algumas mesmo vazias. Assim sendo, optou-se por considerar a área relativa aos polígonos da BGRI, pelo que foi necessário recalcular para estes casos o perímetro urbano.

4.1.3 Variáveis Relativas à Energia Consumida

A variável relativa à energia consumida em transportes foi caracterizada pela soma dos valores totais das vendas dos combustíveis no ano de 1998: gasolina sem chumbo 95, gasolina sem chumbo 98 e gasóleo. Uma vez que os três tipos de combustíveis têm diferentes níveis energéticos, antes de se efectuar o somatório destes foi preciso convertê-los para unidades de medida de energia, no caso, megajoules. Para isso foi necessário obter os valores de conversão de cada combustível. No caso do gasóleo, foram adoptados os valores relativos ao Óleo Diesel, segundo factores de conversão obtidos no Brasil (CONPET, 2000). Para a gasolina sem chumbo 98 e gasolina sem chumbo 95, adoptaram-se os valores relativos à Gasolina Automotiva (pura), uma vez que, na fonte pesquisada, eram estes os factores que mais se adequavam aqueles. Os valores de conversão utilizados apresentam-se resumidos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Factores de conversão da energia calorífica dos combustíveis.

| FONTE DE ENERGIA | MASSA ESPECÍFICA (kg/m³) | PODER CALORÍFICO (kJ/l) |
|----------------------------|--|--------------------------------|
| Óleo Diesel | 852 | 38,35×10 ³ |
| Gasolina Automotora (pura) | 742 | 34,86×10 ³ |

Fonte: Petrobras (CONPET, 2000).

Depois de convertidos os valores dos três combustíveis para unidades de energia, estes foram somados, obtendo-se, assim, os valores de energia total consumida em cada concelho (Tabela 4.6). Adquiridos os dados necessários e efectuadas as transformações nos dados de energia procedeu-se ao processamento destes utilizando RNAs, conforme descrito resumidamente no pontos seguintes.

Tabela 4.6 - Variável de energia agregada ao nível do concelho.

| VARIÁVEL | DESIGNAÇÃO | UNIDADE | DATA |
|---|------------|---------|------|
| Total de vendas dos 3 tipos de combustíveis | ENERGIA | MJ | 1998 |

4.2 PROCESSAMENTO DAS VARIÁVEIS COM REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Para uma análise eficiente através das Redes Neurais Artificiais, o conjunto de dados deve ser ordenado três vezes, de forma aleatória, gerando três conjuntos distintos. Este procedimento é necessário para que em cada fase do método (treinamento, validação e teste) sejam utilizados dados distintos em cada conjunto, uma vez que os primeiros 50% dos dados são destinados à fase de treinamento, os 25% seguintes são para validação e os últimos 25% são relativos à etapa de teste (Brondino, 1999).

Na generalidade, a escolha do número de camadas escondidas e o respectivo número de neurónios em cada uma destas que garantam o melhor desempenho da rede, dá-se por experimentação, através de testes de redes com diferentes configurações. Cada configuração é testada para cada um dos três conjuntos de dados gerados e em cada caso é calculada uma medida de desempenho do modelo, como o Erro Relativo Médio (ERM), cuja fórmula é dada pela Equação (4.3). Desta forma, são gerados três valores de erro para cada topologia (um para cada conjunto de dados), sendo, posteriormente, calculada a média destes três erros. Assim, o valor mínimo para esta média conduz à melhor topologia, ou seja, à configuração de rede que fornece estimativas mais próximas aos valores observados.

$$ERM = \frac{\sum |o - e|}{n} \quad (4.3)$$

Onde:

o representa o valor observado;

e o valor estimado pelo modelo;

n é o número de registos.

Finalmente, a relevância de cada variável pode ser determinada através do método proposto por Garson (1991). O método tem a limitação de calcular a importância das variáveis para redes com apenas uma camada escondida, o que à partida não será problema, pois como se viu anteriormente uma rede com esta estrutura pode ser suficiente para construir o modelo desejado. Em seguida faz-se uma breve apresentação dos principais conceitos do método de Garson, para que melhor se entenda como são efectivamente calculadas as importâncias relativas das variáveis de entrada através do mesmo.

4.2.1 Cálculo das Importâncias Relativas das Variáveis de Entrada

Entre os *outputs* do *software EasyNN-plus* estão precisamente os valores de importância relativa das variáveis de entrada. No entanto, como é referido no próprio *software*, o método utilizado para este cálculo é, por vezes, falível. É que este apenas se baseia no somatório dos pesos das conexões dos neurónios da camada de entrada para os neurónios da primeira camada escondida. Assim sendo, optou-se por utilizar outro método para o cálculo da importância das variáveis, aqui denominado método de Garson (1991).

Este método separa os pesos sinápticos entre a camada intermédia e a de saída em componentes associados com cada nó de entrada. Assim, o peso resultante associado com cada entrada é um reflexo de sua importância. Tal método é descrito aqui de forma resumida. Inicialmente, assume-se que w_{ij} ($i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, p$) seja o peso que liga o neurónio de entrada i com o neurónio j na camada intermédia. Da mesma forma, assume-se que w_{rs} ($r = 1, \dots, p$) seja o peso que liga o neurónio r da camada intermédia com o neurónio de saída. Então, o peso w_{rs} , independentemente do seu sinal, pode ser incorporado aos pesos w_{ij} , usando a Equação (4.4).

$$w_{ij}^* = \left\{ w_{ij} / S_j \right\} (|w_{rs}|) \quad (4.4)$$

Onde $S_j = \sum_{i=1}^k |w_{ij}|$.

A seguir, para cada nó de entrada, os pesos ajustados w_{ij}^* são somados para cada um dos nós da camada intermédia, ou seja, para todo i calcula-se $\sum_{j=1}^p w_{ij}^*$. Desta forma, o

percentual dado pela Equação (4.5) serve como uma medida de saliência da variável representada pelo nó de entrada.

$$\text{relevância da variável } i \text{ (\%)} = \frac{\sum_{j=1}^p w_{ij}^*}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p w_{ij}^*} \quad (4.5)$$

Adquiridos os valores das importâncias relativas, uma nova rede deve ser treinada, considerando-se apenas as variáveis mais relevantes como dados de entrada. O percentual de representação de uma variável que a torne irrelevante depende do autor e do assunto. Para este caso em particular, foram escolhidas as variáveis que mais se destacaram relativamente às restantes pela sua importância reduzida.

4.3 FERRAMENTA UTILIZADA PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS: *EASYN-PLUS*

O *software* utilizado para construir as Redes Neurais Artificiais foi o *EasyNN-plus v.1.0*, desenvolvido por Wolstenholme (2002). Este simulador é de fácil aplicação, sendo composto por ícones que facilitam o projeto das RNA. O número de camadas intermédias, bem como a quantidade de neurónios que as compõem, podem ser estipulados automaticamente pelo aplicativo ou manualmente pelo operador, admitindo, no máximo, a criação de três camadas intermédias, sendo que, normalmente, uma ou duas camadas já são suficientes para modelar a maioria dos problemas usuais. As redes criadas são do tipo *multilayer perceptron* e o algoritmo de aprendizagem é o *backpropagation*, com função de activação do tipo sigmóide. Os dados para a criação dos arquivos para o processo de aprendizagem podem ser gerados com base em arquivos em formato de texto ou folhas de cálculo.

O simulador *EasyNN-plus* gera os seguintes resultados: um arquivo tipo texto, com todos os resultados do conjunto de validação e teste (contendo as variáveis de entrada e saída da rede), o gráfico de erro gerado durante o processo de aprendizagem, os pesos das conexões entre neurónios, e um gráfico contendo as importâncias relativas de cada variável de entrada no modelo. Este último recurso possibilita identificar e ordenar as variáveis que mais interferem no consumo de energia com transportes, que é a principal

meta desta pesquisa, mas que foi aqui substituído pelo método de Garson (1991), pelo motivo mencionado no item anterior.

4.4 ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS

Apresenta-se, neste item, a sequência das actividades realizadas para a elaboração do presente estudo, de forma a alcançar o objectivo proposto. Além de permitir uma melhor compreensão do desenvolvimento dos procedimentos realizados nos próximos capítulos, a descrição resumida das várias fases deve auxiliar o desenvolvimento de trabalhos futuros.

1. Obtenção de variáveis que interferem no consumo de energia em transportes, e/ou obtenção de dados que permitam o seu cálculo:
 - a. Variáveis demográficas (Fontes: Markttest, 2002; INE, 2002);
 - b. Variáveis socioeconómicas (Fontes: Markttest, 2002; INE, 2002);
 - c. Desenho das manchas urbanas das cidades portuguesas (Fonte: INE, 2001, INE, 2002).
2. Cálculo da área e perímetro urbano das cidades.
3. Identificação de manchas urbanas fisicamente juntas e cálculo dos valores relativos a estas considerando-as como uma única mancha urbana.
4. Eliminação das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto e cidades sujeitas a uma forte influência por parte destas (mesmo que apenas pela proximidade).
5. Eliminação de cidades com características que possam influenciar de forma anormal o consumo de energia em transportes (como o caso de cidades com forte actividade industrial, capazes de também consumir combustível para outros fins que não só transportes).
6. Elaboração de uma tabela matriz contendo as cidades seleccionadas para o estudo e as variáveis relativas a estas.
7. Normalização de cada uma das variáveis entre os valores 0 e 1.
8. Criação de três conjuntos de dados em sequências diferentes, obtidas ordenando os dados aleatoriamente. Este ponto é necessário para que

posteriormente, após a inserção destes dados na rede, sejam gerados três conjuntos diferentes para cada um dos grupos de Validação, Treinamento e Teste.

9. Geração de RNAs com várias topologias e diferentes valores de Taxa de Aprendizagem e *Momentum* para cada conjunto.
10. Identificação da RNA com melhor desempenho. Isto pode ser verificado pelas medidas de desempenho, por exemplo, calculando-se para os três conjuntos o valor médio de erro relativo entre os valores reais e os valores gerados pela rede para os dados de Validação. A rede que possuir menor erro é considerada a mais eficiente.
11. Se após o treinamento de vários tipos de rede o desempenho encontrado para os modelos ainda não for satisfatório, pode optar-se por diferentes alternativas para melhorá-los:
 - a. Eliminar as variáveis de menor importância com base, por exemplo, no método de Garson, que permite calcular a importância destas (já que a importância relativa das variáveis fornecidas pelo *software* é por vezes falível);
 - b. Aplicar uma transformação matemática sobre os dados originais de entrada e saída da rede (sem estarem normalizados), por exemplo, através de logaritmos, como forma de reduzir a dispersão dos dados e facilitar o treinamento da rede;
 - c. Introduzir uma ou mais variáveis categóricas no modelo, de forma a ajudar a rede no processo de classificação dos dados. A variável a ser introduzida pode, em geral, ser determinada a partir da análise da distribuição espacial dos erros, representados em mapas.
12. Identificação das variáveis que interferem de forma significativa no consumo de energia em transportes, atingindo o objectivo proposto para o estudo. Isto pode ser feito de duas formas:
 - a. No caso dos itens 11(a) e 11(c), pelo cálculo da importância relativa das variáveis através do método de Garson;
 - b. No caso dos itens 11(b), pode-se também optar pelo cálculo da importância relativa das variáveis utilizando o método de

Garson, mas os resultados neste caso não são de compreensão tão directa quanto os anteriores. Assim, é mais indicado aqui o desenvolvimento de análises de sensibilidade, fazendo variar os valores para as variáveis de interesse e mantendo constantes os valores das demais variáveis de entrada. Desta forma é possível avaliar a sua influência nos valores de consumo de energia (variável de saída), ainda que de forma indirecta.

5 SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE PRÉVIA DOS DADOS RECOLHIDOS

A selecção das cidades a estudar foi condicionada essencialmente pelos dados disponíveis e pelo grau de agregação destes. O maior conjunto de dados correspondia aos 275 concelhos no ano de 1998 e foi obtido através do da base de dados *Sales Index 2002*, da Marktest. Num estudo preliminar sobre o tema que envolveu os 275 concelhos de Portugal continental, Costa *et al.* (2002) foram encontradas dificuldades na obtenção das variáveis de natureza espacial ao nível da cidade. Por esse motivo, apenas 23 concelhos foram estudados ao nível de desagregação da cidade, uma vez que estes eram os únicos onde se dispunha de dados relativos aos contornos da área urbana e, portanto, aqueles com que seria possível obter variáveis de natureza espacial capazes de caracterizar as cidades. Na altura em que aquele estudo estava a ser finalizado, o Instituto Nacional de Estatística, INE, divulgou a edição de um novo documento, que designou de *Atlas das Cidades de Portugal* (INE, 2002), o qual viria a permitir obter novos dados ao nível de agregação da cidade. Além disso, a *Base Geográfica de Referenciação de Informação* (BGRI), com as manchas urbanas correspondentes a cada cidade, foram disponibilizadas em formato digital pela mesma entidade, o que permitia calcular o perímetro e a área das cidades. Assim, foi possível dar continuidade ao trabalho já iniciado, conforme consta do presente documento.

Feito o cruzamento de informação entre as duas bases de dados, *Sales Index* e os dados extraídos do *Atlas das Cidades* (123 cidades de Portugal continental), o número de cidades reduziu-se, uma vez que só as cidades que fossem sedes de concelho no ano de 1998 poderiam à partida fazer parte da análise. Além desta restrição, outras situações particulares surgiram ao se analisarem as restantes cidades, o que motivou a criação de um capítulo neste documento destinado à sistematização e análise prévia dos dados

recolhidos. Assim, a selecção das restantes cidades teve como base os seguintes aspectos:

- i) Foram excluídas as zonas de Lisboa e Porto;
- ii) Cidades diferentes, mas espacialmente ligadas, foram consideradas como um único núcleo urbano;
- iii) Foram excluídas as cidades pertencentes a concelhos compostos por mais de um núcleo urbano, se separados fisicamente;
- iv) Foram excluídas cidades com características particulares de consumo de combustíveis.

Neste capítulo descreve-se pormenorizadamente o procedimento adoptado para as cidades abrangidas por estas quatro situações, assim como a lista final de cidades analisadas.

5.1 EXCLUSÃO DAS ZONAS DE LISBOA E PORTO

Ao se analisarem os casos particulares das cidades de Lisboa e Porto, observou-se que estas constituíam áreas urbanas de grandes dimensões, com características próprias e muito diferentes das restantes regiões urbanas de Portugal. A sua inclusão no estudo poderia de alguma forma comprometer a coerência da análise e por isso tomou-se a opção de excluí-las. Da mesma forma, outras cidades próximas a estes centros urbanos foram também excluídas, devido à forte atractividade dos centros urbanos principais. As Tabelas 5.1 e 5.2 indicam as cidades excluídas do estudo pertencentes às zonas de Lisboa e Porto, respectivamente, e ainda a área e população de cada uma dessas cidades excluídas.

Tabela 5.1 - Cidades adjacentes à cidade de Lisboa excluídas do estudo.

| CIDADE | ÁREA DA CIDADE (KM²) | POPULAÇÃO DA CIDADE EM 2001 (HABITANTES) |
|----------------|--|---|
| Aigualva-Cacém | 10,4 | 81 843 |
| Almada | 14,8 | 101 501 |
| Amadora | 23,8 | 175 872 |
| Amora | 5,5 | 44 515 |
| Barreiro | 6,7 | 40 858 |
| Lisboa | 84,6 | 564 657 |
| Odivelas | 4,6 | 50 845 |
| Queluz | 5,6 | 78 033 |
| Seixal | 7,2 | 25 609 |
| Montijo | 8,8 | 25 715 |
| Setúbal | 13,51 | 89 306 |

Tabela 5.2 - Cidades adjacentes à cidade do Porto excluídas do estudo.

| CIDADE | ÁREA DA CIDADE (KM²) | POPULAÇÃO DA CIDADE EM 2001 (HABITANTES) |
|--------------------|--|---|
| Ermesinde | 7,1 | 32 270 |
| Gondomar | 11,8 | 25 717 |
| Maia | 10,4 | 35 625 |
| Matosinhos | 12,0 | 45 703 |
| Porto | 41,5 | 263 131 |
| Rio Tinto | 9,3 | 47 695 |
| São Mamede Infesta | 4,8 | 23 542 |
| Valongo | 7,6 | 17 978 |
| Vila Nova de Gaia | 56,3 | 178 255 |
| Espinho | 6,13 | 21 589 |
| Paços de Ferreira | 5,4 | 7 452 |
| Freameunde | 4,8 | 8 118 |
| Penafiel | 6,6 | 9 343 |
| Paredes | 9,4 | 12 655 |
| Santo Tirso | 21,58 | 24 649 |
| Vila do Conde | 6,7 | 25 731 |
| Póvoa do Varzim | 10,8 | 38 642 |

5.2 AGLOMERAÇÃO DE CIDADES

Outra particularidade encontrada na análise das várias cidades foi a constatação da existência de diferentes cidades que estão fisicamente ligadas. Algumas destas cidades já haviam sido excluídas do estudo por pertencerem às zonas de Lisboa e Porto. As únicas cidades consideradas no estudo nesta situação foram as cidades de Aveiro, Ílhavo e Gafanha da Nazaré, que deram origem a um novo aglomerado urbano para o qual se adoptou o nome da cidade mais importante: Aveiro. Para este caso calculou-se a área do novo aglomerado, a população, o perímetro urbano e as restantes variáveis pertencentes às cidades originais. Na Tabela 5.3 apresenta-se a dimensão do aglomerado gerado, assim como a respectiva população.

Tabela 5.3 - Cidades agregadas num único aglomerado urbano.

| NOVO AGLOMERADO | CIDADES CONSTITUINTES | ÁREA DO AGLOMERADO (KM²) | POPULAÇÃO DO AGLOMERADO EM 2001 (HABITANTES) |
|----------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Aveiro | Aveiro Ílhavo Gafanha da Nazaré | 82,40 | 80 420 |

5.3 EXCLUSÃO DAS CIDADES PERTENCENTES A CONCELHOS COM MAIS DE UM NÚCLEO URBANO

Devido à limitação do nível de agregação dos dados de energia, foram excluídas todas as cidades pertencentes a concelhos que contivessem mais do que um núcleo urbano, se separados fisicamente. O motivo pelo qual se tomou esta opção foi o facto de os dados de energia a analisar estarem agregados ao nível do concelho, não permitindo por isso a identificação da parte da energia respectivamente consumida por cada aglomerado. As cidades nesta situação são apresentadas na Tabela 5.4, assim como as respectivas áreas e populações das mesmas.

5.4 EXCLUSÃO DAS CIDADES COM CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS PARTICULARES

As características de consumo de combustíveis constituem outra particularidade tida em conta na selecção das cidades a estudar. Nesta situação encontra-se a cidade de Sines. Esta cidade foi excluída do estudo por apresentar um valor particularmente elevado de consumo de energia, quando comparado com outras cidades com a mesma dimensão. Este facto deve-se provavelmente a Sines ser uma importante zona portuária e industrial, pelo que o elevado consumo de combustível pode ser derivado de outras actividades e não necessariamente do transporte.

Tabela 5.4 - Cidades excluídas por constituírem aglomerados fisicamente separados dentro do mesmo concelho.

| CIDADE | CONCELHO | ÁREA DA CIDADE (KM ²) | POPULAÇÃO DA CIDADE EM 2001 (HABITANTES) |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Póvoa de Santa Iria | | 4,8 | 24 277 |
| Alverca do Ribatejo | V. Franca de Xira | 6,8 | 28 356 |
| Vila Franca de Xira | | 3,5 | 16 554 |
| Fiães | | 6,4 | 8 754 |
| Lourosa | St ^a Maria da Feira | 5,8 | 9 204 |
| Santa Maria da Feira | | 10,2 | 11 040 |
| Esmoriz | Ovar | 9,1 | 11 020 |
| Ovar | | 12,2 | 16 849 |
| Fátima | Ourém | 14,8 | 7 756 |
| Ourém | | 6,5 | 4 991 |
| Loures | Loures | 5,8 | 15 967 |
| Sacavém | | 3,8 | 17 659 |
| Loulé | Loulé | 4,5 | 12 103 |
| Quarteira | | 3,2 | 12 290 |

5.5 CONJUNTO DAS CIDADES ANALISADAS

Finalmente, conforme consta da Tabela 5.5, chegou-se à lista final de cidades que se entendeu serem as mais adequadas a incluir na análise pelos motivos descritos acima.

Tabela 5.5 – Lista total das 74 cidades seleccionadas para o estudo.

| | CIDADE | REGIÃO | | CIDADE | REGIÃO |
|----------------------------|----------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|------------------------------|
| 11 idades | Alcácer do Sal | Alentejo | 12 idades | Abrantes | Lisboa e Vale do Tejo |
| | Beja | | | Alcobaça | |
| | Elvas | | | Almeirim | |
| | Estremoz | | | Caldas da Rainha | |
| | Évora | | | Cartaxo | |
| | Montemor-o-Novo | | | Entroncamento | |
| | Moura | | | Peniche | |
| | Ponte de Sôr | | | Rio Maior | |
| | Portalegre | | | Santarém | |
| | Santiago do Cacém | | | Tomar | |
| | Vendas Novas | | | Torres Novas | |
| 9 idades | Albufeira | Algarve | 22 idades | Torres Vedras | Norte |
| | Faro | | | Amarante | |
| | Lagoa | | | Barcelos | |
| | Lagos | | | Braga | |
| | Olhão | | | Bragança | |
| | Portimão | | | Chaves | |
| | Silves | | | Esposende | |
| | Tavira | | | Fafe | |
| | Vila Real S. António | | | Guimarães | |
| 20 idades | Águeda | Centro | Lamego | 74 cidades | |
| | Aveiro | | Macedo de Cavaleiros | | |
| | Cantanhede | | Marco de Canavezes | | |
| | Castelo Branco | | Miranda do Douro | | |
| | Coimbra | | Mirandela | | |
| | Covilhã | | Oliveira de Azeméis | | |
| | Figueira da Foz | | Peso da Régua | | |
| | Fundão | | São João da Madeira | | |
| | Gouveia | | Vale de Cambra | | |
| | Guarda | | Valpaços | | |
| | Leiria | | Viana do Castelo | | |
| | Mangualde | | Vila N. de Famalicão | | |
| | Marinha Grande | | Vila Nova de Foz Côa | | |
| | Oliveira do Hospital | | Vila Real | | |
| | Pinhel | | Total | | |
| | Pombal | | | | |
| | Santa Comba Dão | | | | |
| | Seia | | | | |
| | Tondela | | | | |
| | Viseu | | | | |

As Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, e 5.5 apresentam a localização espacial destas cidades, segundo as regiões designadas NUTs II (Norte, Centro, Lisboa e Vale do Tejo, Alentejo e Algarve).

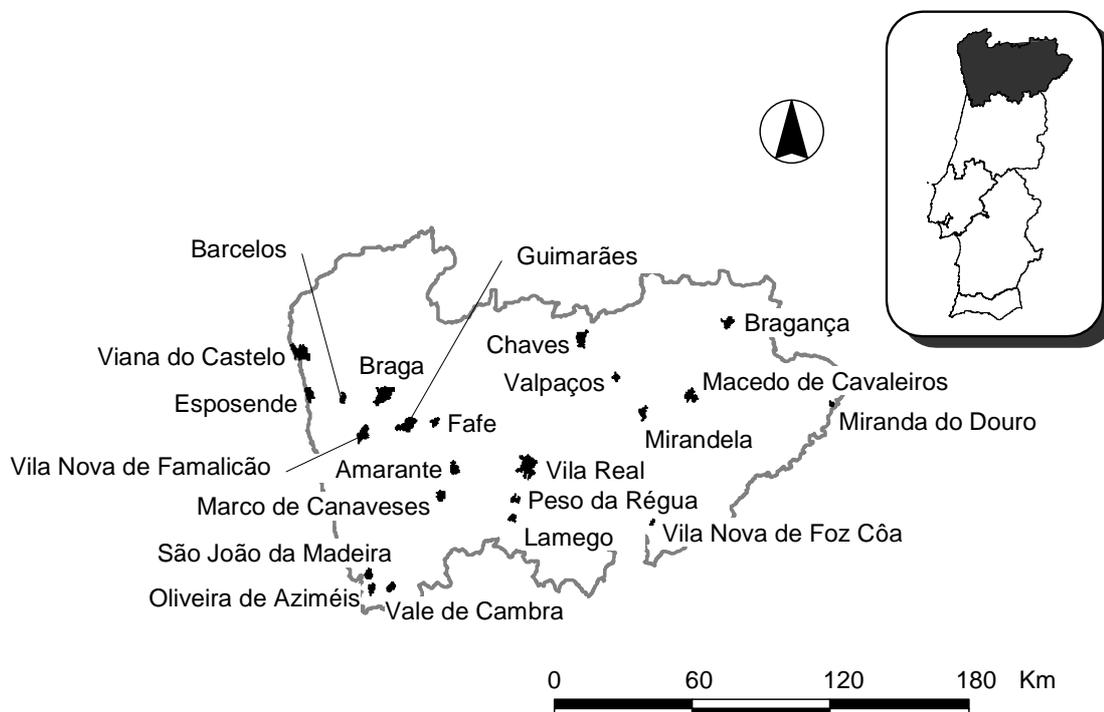


Figura 5.1 - Cidades pertencentes à região Norte seleccionadas para o estudo.

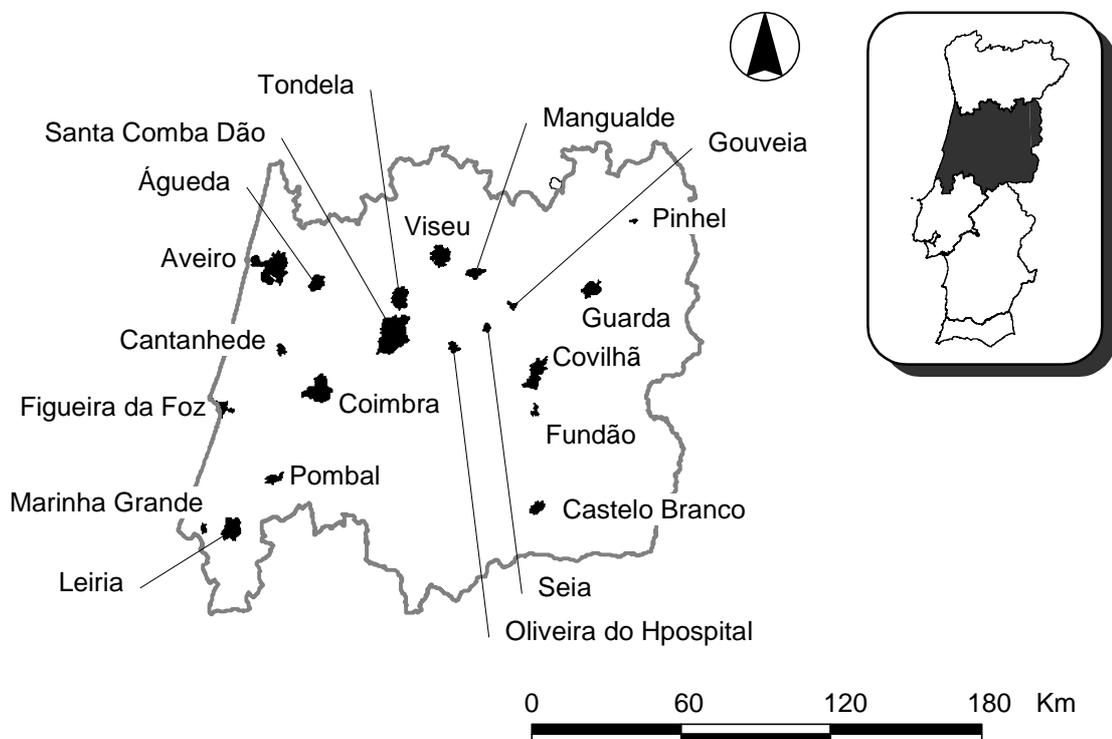


Figura 5.2 - Cidades pertencentes à região Centro seleccionadas para o estudo.

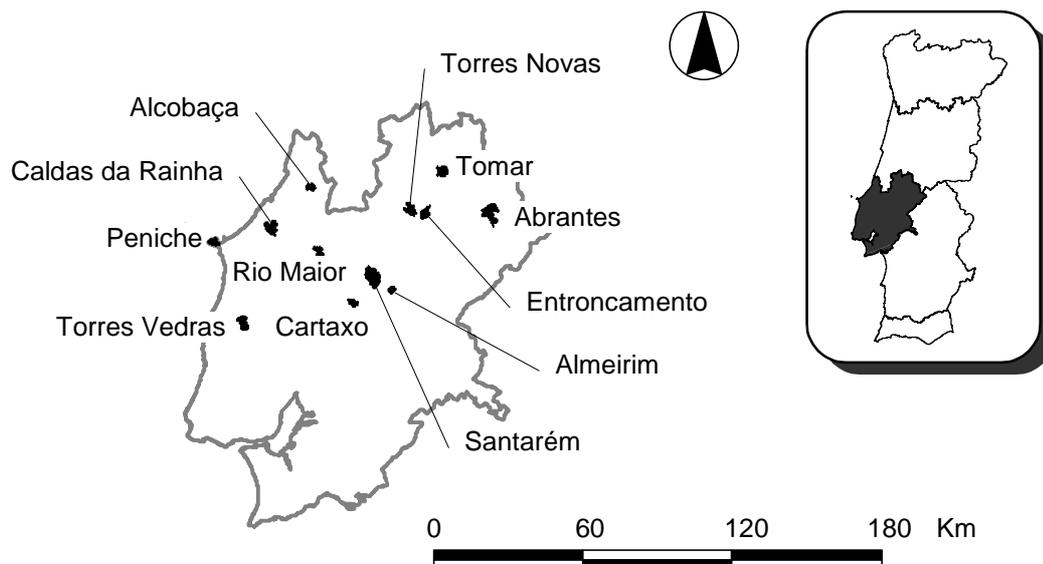


Figura 5.3 - Cidades pertencentes à região de Lisboa e Vale do Tejo seleccionadas para o estudo.

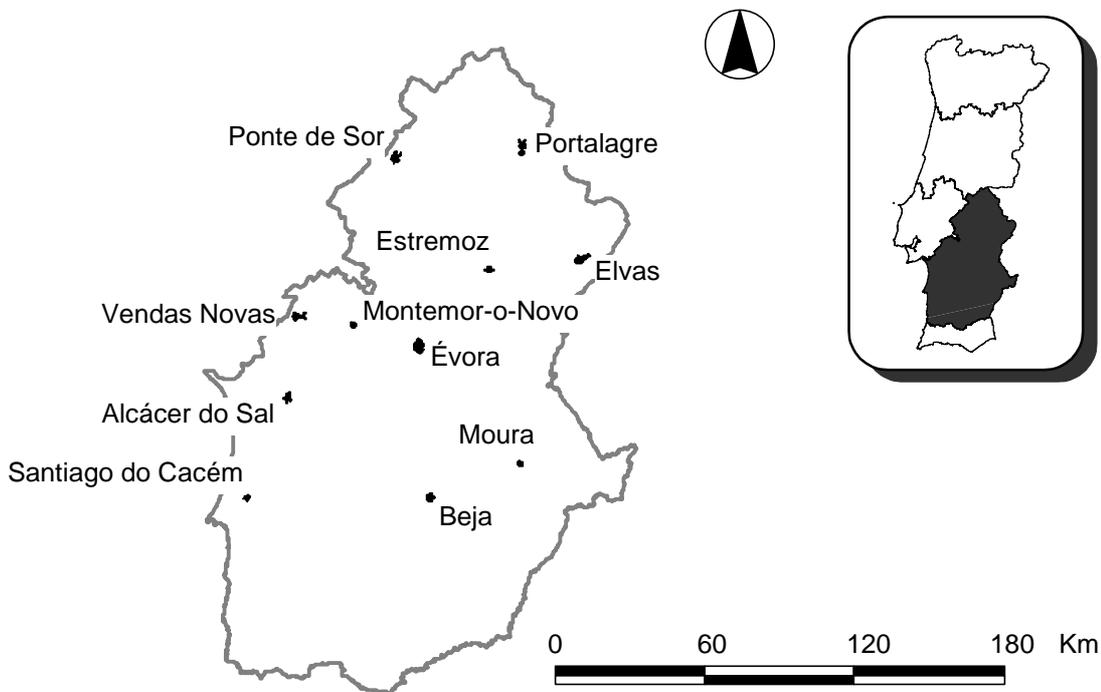


Figura 5.4 - Cidades pertencentes à região do Alentejo seleccionadas para o estudo.

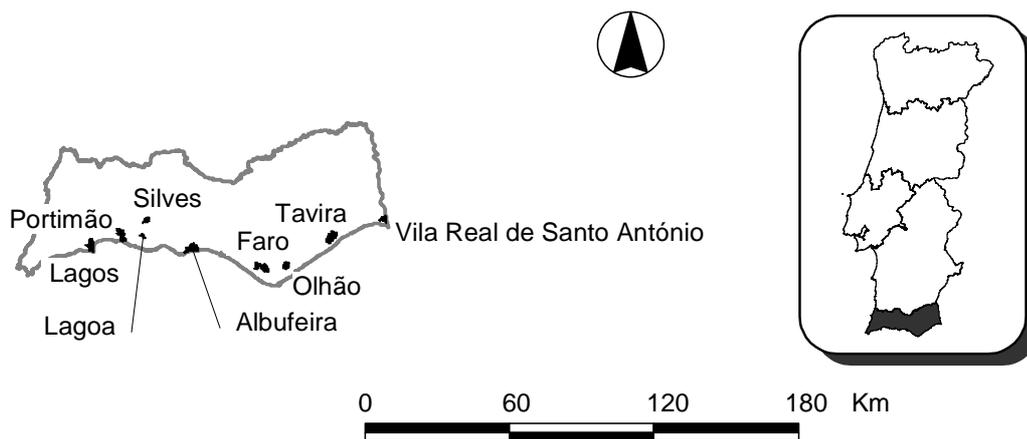


Figura 5.5 - Cidades pertencentes à região do Algarve seleccionadas para o estudo.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos para as cidades portuguesas pesquisadas. Descreve-se o processamento e a análise dos dados relativos a estas através das RNAs, apresentando-se as topologias testadas com melhores desempenhos, bem como os respectivos Erros Relativos. Após a obtenção dos modelos com melhor desempenho foi possível efectuar uma análise complementar para identificar a importância relativa das variáveis de entrada nos valores de energia total estimados, convergindo para o objectivo desta investigação.

6.1 RESULTADOS PRELIMINARES

Na primeira fase da análise os dados foram divididos em dois diferentes grupos, de acordo com a variável de saída: consumo de energia combustível anual total e consumo de energia combustível anual *per capita*. Para cada um destes grupos foram gerados três diferentes conjuntos de dados ordenados aleatoriamente. Como já foi referido na metodologia deste trabalho, este procedimento é necessário para que em cada fase do método - treinamento, validação e teste - sejam utilizados dados distintos.

O pré-processamento dos dados foi iniciado através de uma normalização, no intervalo compreendido entre 0 e 1, das variáveis de entrada e de saída do modelo. Nesta primeira fase, foram avaliadas, no total, cerca de 110 redes, sendo metade para cada grupo de dados de saída, com diferentes topologias e diferentes valores de *Momentum* e Taxa de aprendizagem.

Adoptando o menor valor de Erro Relativo Médio dos dados de validação como critério de selecção das melhores configurações de redes, calculou-se o valor médio do Erro Relativo Médio e respectivo desvio padrão para os valores obtidos nos três conjuntos. A rede seleccionada foi aquela que apresentou menores valores de média e desvio padrão

do Erro Relativo Médio dos três conjuntos. Os resultados obtidos, assim como a rede seleccionada para o caso da energia total, são apresentados na Tabela 6.1, onde “L” é a taxa de aprendizagem e “M” é o *Momentum*.

No caso dos modelos com variável de saída energia total, a melhor rede apresentou 17 neurónios na camada de entrada, 20 na camada intermédia e 1 neurónio na camada de saída, com $L = 1,0$ e $M = 0,8$. A Figura 6.1 e a Tabela 6.2 apresentam os valores de Erro Relativo Médio obtidos para o melhor dos três conjuntos. Como se pode observar, neste conjunto, em particular, o erro obtido para a RNA seleccionada é dos valores mais baixos apresentados.

Tabela 6.1 - Selecção da RNA com melhor desempenho para a energia total.

| L | M | TOPOLOGIA | ERRO RELATIVO MÉDIO | DESVIO PADRÃO |
|------------|------------|----------------|---------------------------|------------------|
| 1,0 | 0,8 | 17-20-1 | 0,444 | 0,081 |
| 1,0 | 0,6 | 17-20-10-1 | 0,478 | 0,144 |
| 0,8 | 0,8 | 17-20-1 | 0,484 | 0,122 |
| 0,8 | 0,6 | 17-20-10-1 | 0,485 | 0,136 |
| 1,0 | 0,6 | 17-10-16-1 | 0,490 | 0,101 |
| 0,6 | 0,8 | 17-20-1 | 0,490 | 0,107 |
| 0,8 | 0,6 | 17-10-16-1 | 0,492 | 0,095 |
| 0,6 | 0,8 | 17-10-16-1 | 0,493 | 0,138 |
| 0,6 | 0,6 | 17-10-16-1 | 0,494 | 0,086 |
| 1,0 | 0,6 | 17-20-1 | 0,496 | 0,141 |
| 0,6 | 0,8 | 17-20-10-1 | 0,500 | 0,152 |
| 0,8 | 0,8 | 17-10-16-1 | 0,503 | 0,141 |
| 0,8 | 0,8 | 17-20-10-1 | 0,509 | 0,161 |
| 0,8 | 0,6 | 17-20-1 | 0,517 | 0,144 |
| 1,0 | 0,8 | 17-10-16-1 | 0,519 | 0,199 |
| 0,6 | 0,6 | 17-20-10-1 | 0,522 | 0,079 |
| 0,6 | 0,6 | 17-20-1 | 0,536 | 0,140 |
| 1,0 | 0,8 | 17-20-10-1 | 0,549 | 0,152 |

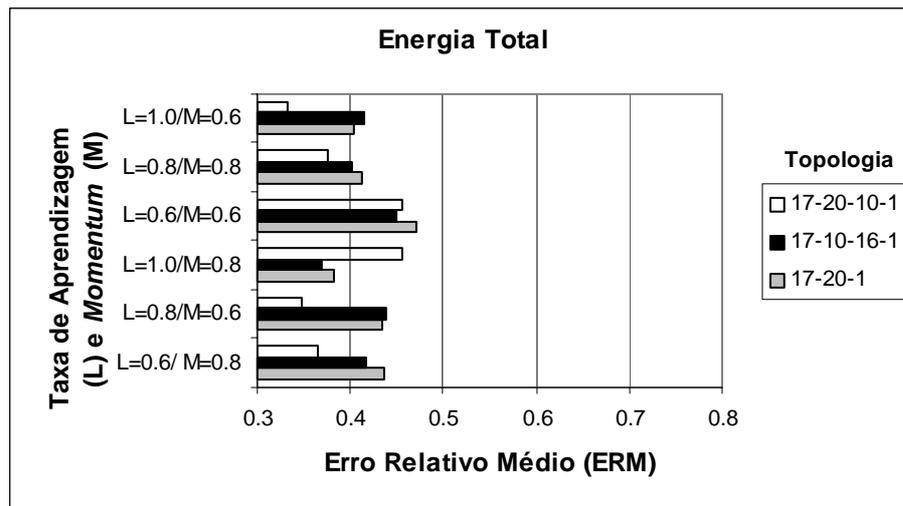


Figura 6.1 - Erro Relativo Médio da variável de saída energia total, para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho.

Tabela 6.2 - Valores do Erro Relativo da variável de saída energia total, para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho.

| | L = 0,6 M = 0,8 | L = 0,8 M = 0,6 | L = 1,0 M = 0,8 | L = 0,6 M = 0,6 | L = 0,8 M = 0,8 | L = 1,0 M = 0,6 |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 17-20-1 | 0,435 | 0,435 | 0,382 | 0,470 | 0,413 | 0,403 |
| 17-10-16-1 | 0,418 | 0,438 | 0,368 | 0,448 | 0,401 | 0,415 |
| 17-20-10-1 | 0,366 | 0,348 | 0,456 | 0,456 | 0,375 | 0,333 |

Já no caso dos modelos com variável de saída energia *per capita*, duas redes apresentaram praticamente o mesmo desempenho. A primeira apresenta 8 neurónios na camada de entrada, 10 na primeira camada, 16 na segunda camada e 1 neurónio na camada de saída, com $L = 1,0$ e $M = 0,6$; e a segunda apresenta 8 neurónios na camada de entrada, 20 na camada intermédia e 1 neurónio de saída, e com $L = 0,8$ e $M = 0,6$. Embora a média dos erros não seja exactamente igual, é muito próxima e, nos dois casos, a análise das médias em conjunto com os respectivos desvios padrões (ver Tabela 6.3), levaria à selecção de qualquer um dos dois modelos. No entanto, uma vez que o método utilizado para o cálculo da importância das variáveis (Garson, 1991) permite determinar a importância das variáveis para redes com apenas uma camada escondida, no caso da energia per capita a rede seleccionada foi aquela que possuía 8 neurónios de entrada, 20 neurónios na camada interna e 1 neurónio de saída.

Embora, o desempenho obtido não se possa classificar de bom, foi, no entanto, o melhor obtido para aquela variável de saída. Na Figura 6.2 e na Tabela 6.4 são apresentados os valores de Erro Relativo Médio obtidos para o melhor dos três conjuntos neste caso.

Tabela 6.3 - Seleção da RNA com melhor desempenho para a energia *per capita*.

| L | M | TOPOLOGIA | ERRO RELATIVO MÉDIO | DESVIO PADRÃO |
|------------|------------|------------------|---------------------------|------------------|
| 0,6 | 0,8 | 8-10-16-1 | 0,840 | 0,147 |
| 1,0 | 0,6 | 8-10-16-1 | 0,892 | 0,126 |
| 0,8 | 0,6 | 8-20-1 | 0,893 | 0,140 |
| 1,0 | 0,8 | 8-10-16-1 | 0,915 | 0,264 |
| 0,6 | 0,6 | 8-30-1 | 1,009 | 0,141 |
| 0,8 | 0,6 | 8-30-1 | 1,011 | 0,121 |
| 1,0 | 0,6 | 8-30-1 | 1,022 | 0,151 |
| 1,0 | 0,6 | 8-20-1 | 1,027 | 0,070 |
| 0,6 | 0,8 | 8-20-1 | 1,037 | 0,121 |
| 0,8 | 0,8 | 8-10-16-1 | 1,037 | 0,380 |
| 0,6 | 0,6 | 8-20-1 | 1,058 | 0,142 |
| 0,8 | 0,6 | 8-10-16-1 | 1,070 | 0,304 |
| 1,0 | 0,8 | 8-20-1 | 1,114 | 0,247 |
| 0,8 | 0,8 | 8-30-1 | 1,115 | 0,352 |
| 1,0 | 0,8 | 8-30-1 | 1,129 | 0,411 |
| 0,6 | 0,6 | 8-10-16-1 | 1,137 | 0,249 |
| 0,6 | 0,8 | 8-30-1 | 1,149 | 0,252 |
| 0,8 | 0,8 | 8-20-1 | 1,287 | 0,329 |

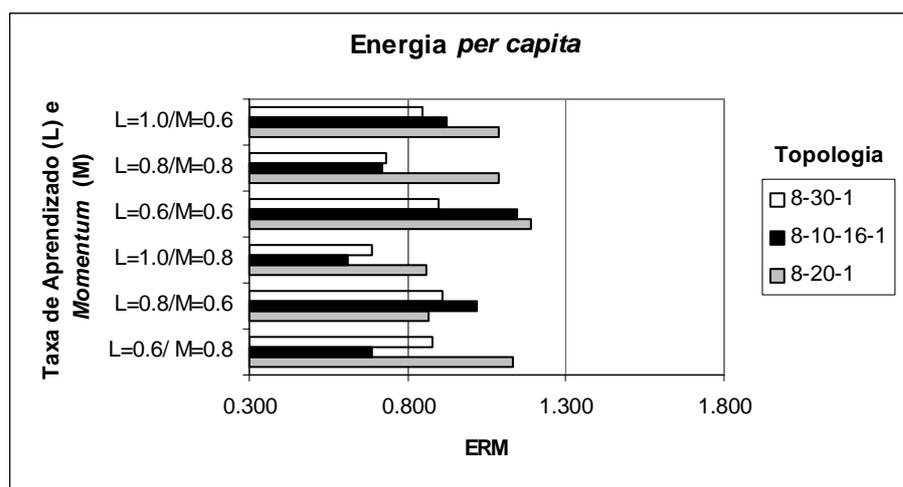


Figura 6.2 - Erro Relativo Médio da variável de saída energia *per capita*, para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho.

Tabela 6.4 - Valores do Erro Relativo da variável de saída energia *per capita*, para os dados de validação do conjunto com melhor desempenho.

| | L = 0,6 M = 0,8 | L = 0,8 M = 0,6 | L = 1,0 M = 0,8 | L = 0,6 M = 0,6 | L = 0,8 M = 0,8 | L = 1,0 M = 0,6 |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 8-20-1 | 1,132 | 0,865 | 0,857 | 1,190 | 1,090 | 1,090 |
| 8-10-16-1 | 0,689 | 1,019 | 0,610 | 1,146 | 0,718 | 0,924 |
| 8-30-1 | 0,880 | 0,908 | 0,686 | 0,898 | 0,732 | 0,849 |

O passo seguinte consistiu em determinar a importância das variáveis de entrada para cada modelo gerado, relativo às variáveis de saída energia total e energia *per capita*, para as topologias seleccionadas. As importâncias relativas das variáveis, obtidas através do método de Garson, já descrito no capítulo 4 são apresentadas nas Figuras 6.3 e 6.4.

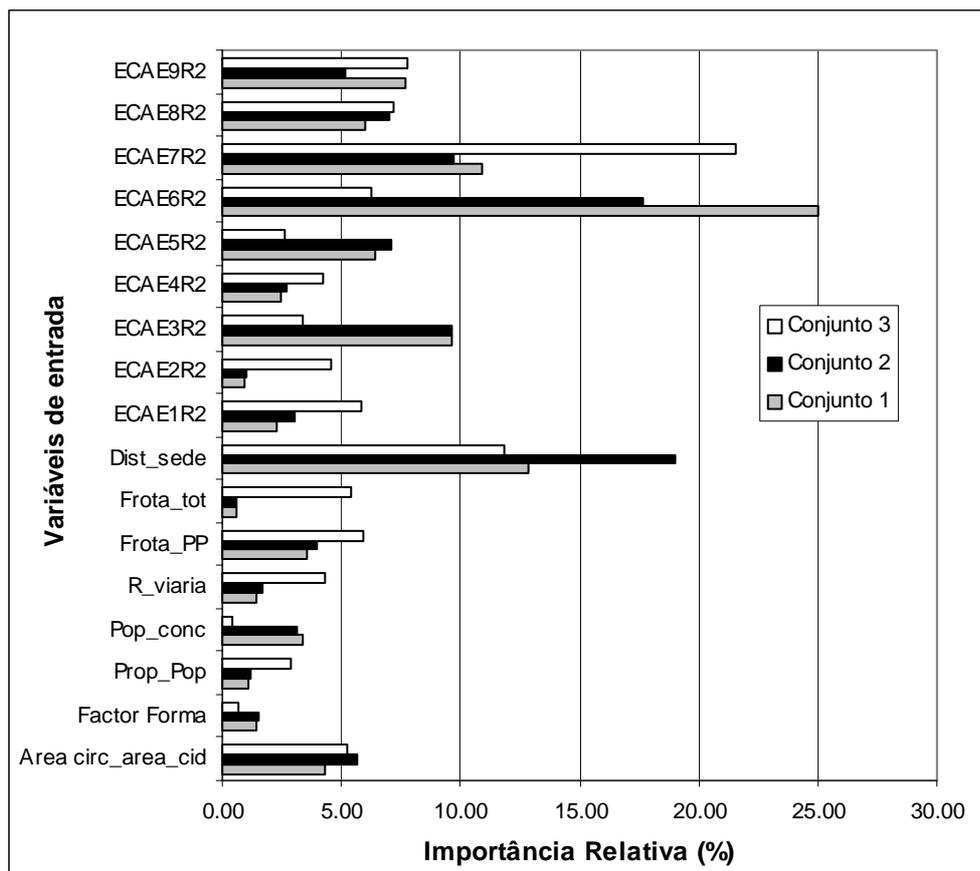


Figura 6.3 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia total.

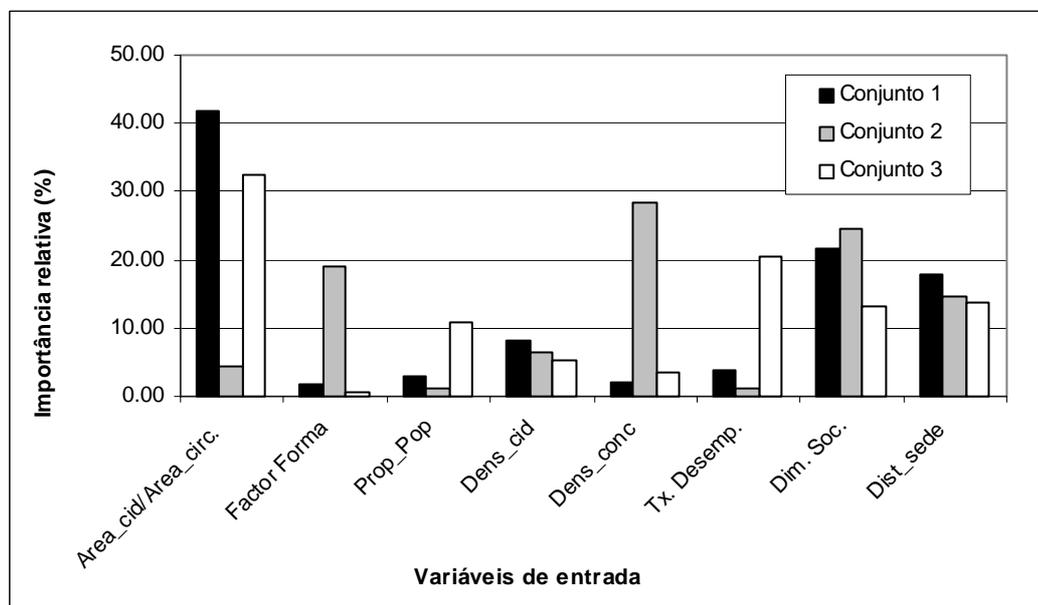


Figura 6.4 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia *per capita*.

Após esta primeira fase em que foram obtidos os primeiros modelos e que o desempenho dos mesmos não se mostrou plenamente satisfatório, procurou-se

melhorar os modelos obtidos para as duas situações (energia total e energia *per capita*), como descrito nas próximas duas secções deste capítulo.

6.2 EXCLUSÃO DE VARIÁVEIS DE BAIXA RELEVÂNCIA

Dado o desempenho dos modelos não ter sido o esperado, algumas alterações foram efectuadas com o intuito de os aprimorar. A primeira alternativa estudada foi efectuada a partir da análise dos resultados apresentados nas Figuras 6.3 e 6.4 e consistiu na eliminação das variáveis de entrada de menor importância relativa nos modelos. Novos modelos foram gerados, para as RNAs já seleccionadas com melhor desempenho.

No caso do modelo de energia total apenas foi excluída a variável *Factor Forma*. Quanto ao modelo de energia *per capita* foram excluídas as variáveis *Factor Forma*, *Prop_Pop* e *Dens_conc*. Com os modelos obtidos para as duas situações determinou-se novamente o respectivo desempenho destes, para os três conjuntos, para os dados de validação. Além das relações entre os valores reais e os estimados pelo modelo já apresentadas, outras medidas de desempenho foram utilizadas nas avaliações, como é o caso da análise visual do gráfico de valores reais *versus* valores estimados, apresentado na Figura 6.5. Neste, a situação ideal é a localização dos pontos sobre uma linha de 45° partindo da origem dos eixos. Esta figura apresenta graficamente os três conjuntos avaliados para o modelo de energia total. A estes resultados pode associar-se ainda uma outra medida de desempenho, bastante comum em análises de regressão, que é o coeficiente R^2 assim como as médias e desvios padrão dos Erros Relativos Médios (ERM), obtidos para os três conjuntos. Estas medidas foram calculadas para os valores de validação dos três conjuntos como mostram as Tabelas 6.5 e 6.6.

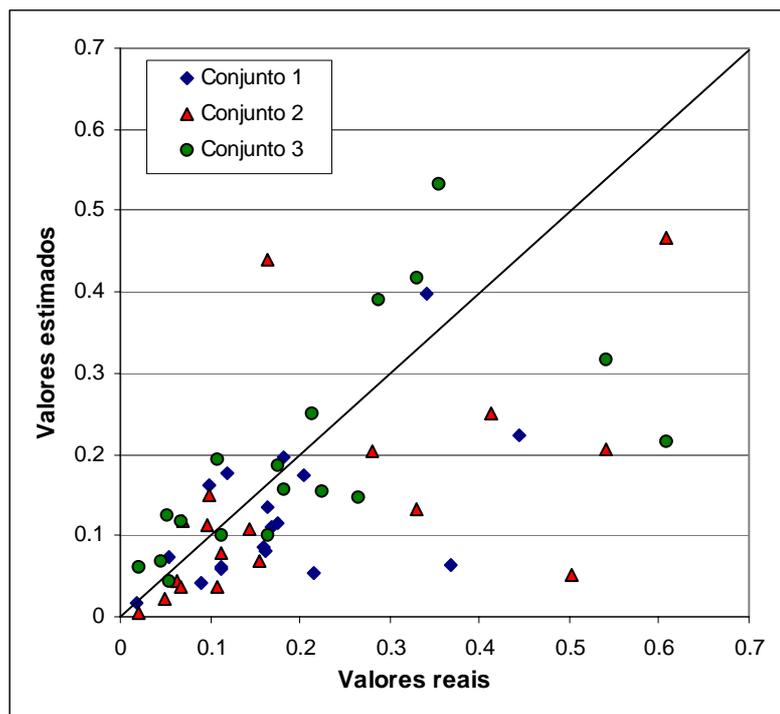


Figura 6.5 - Relação entre valores normalizados (reais e estimados) de energia total, para os valores de validação, após a exclusão do *Factor Forma*.

Tabela 6.5 - Valores de desempenho dos modelos de energia total para os valores de validação, obtidos para os três conjuntos após a exclusão da variável *Factor Forma*.

| CONJUNTO | R ² | ERRO RELATIVO | |
|----------|----------------|---------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão |
| 1 | 0,31 | 0,41 | 0,22 |
| 2 | 0,32 | 0,55 | 0,35 |
| 3 | 0,41 | 0,53 | 0,51 |

Tabela 6.6 - Valores de desempenho dos modelos de energia *per capita* para os valores de validação, obtidos para os três conjuntos após a exclusão das variáveis *Factor Forma*, *Prop_Pop* e *Dens_conc*.

| CONJUNTO | R ² | ERRO RELATIVO | |
|----------|----------------|---------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão |
| 1 | 0,03 | 1,08 | 1,22 |
| 2 | 0,01 | 0,68 | 0,50 |
| 3 | 0,00 | 2,06 | 2,41 |

Através da avaliação das medidas de desempenho para as duas situações, energia total e energia *per capita*, pôde-se comprovar que o modelo gerado no caso da energia total apresenta valores melhores do que aqueles encontrados no caso da energia *per capita*. Além disso, no caso deste último, como se pode observar pelos valores da Tabela 6.6, o desempenho obtido encontra-se muito aquém daquilo que se poderia assumir como aceitável. Em seguida, foram calculadas as importâncias relativas das variáveis de entrada nas duas situações, como mostram as Figuras 6.6 e 6.7. No entanto, no caso da energia *per capita* os valores encontrados são pouco confiáveis, uma vez que o modelo obtido tem um fraco desempenho. Isto pode, também, constatar-se da observação da Figura 6.7, já que as importâncias relativas das variáveis são pouco coerentes nos três conjuntos. Assim sendo, optou-se por dar continuidade à análise das duas situações, na tentativa de melhorar os modelos obtidos.

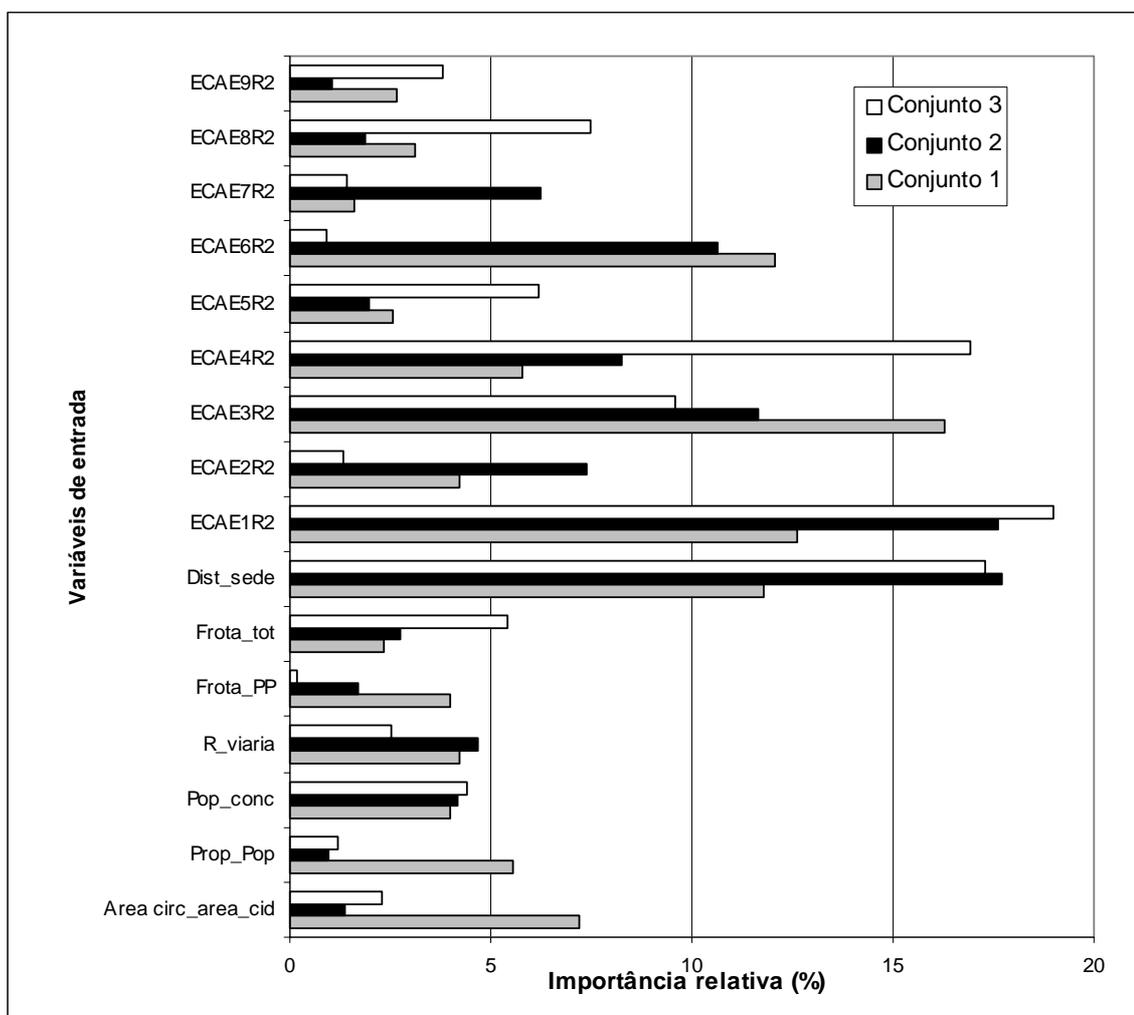


Figura 6.6 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia total depois de excluída a variável *Factor Forma*.

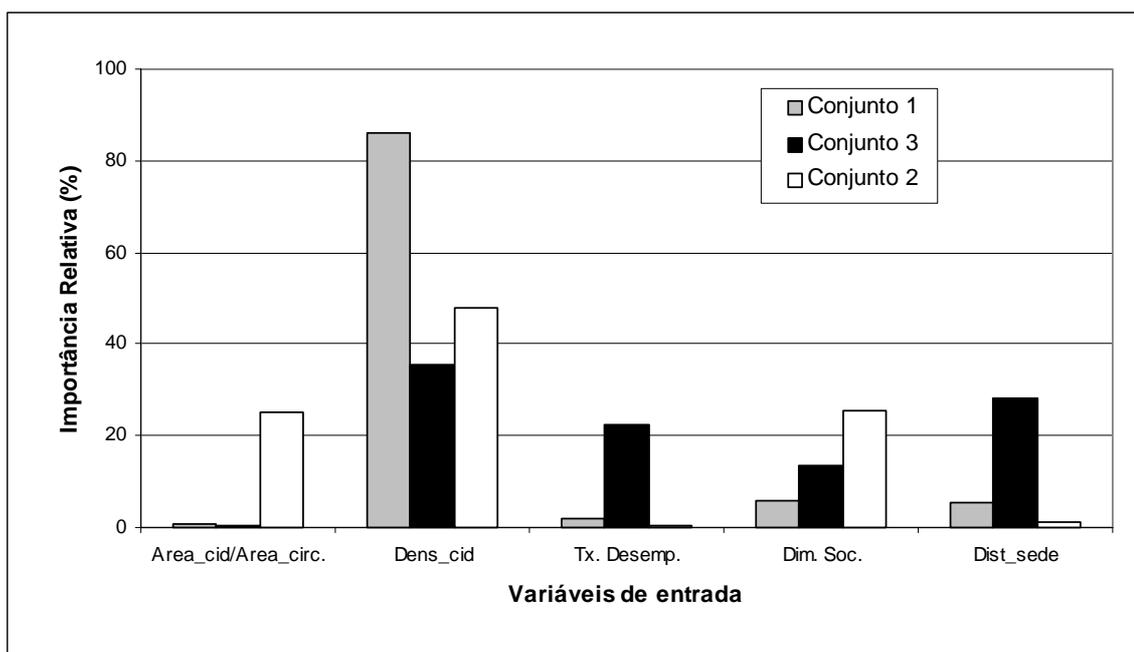


Figura 6.7 - Importância relativa das variáveis de entrada para o modelo de energia *per capita* depois de excluídas as variáveis *Factor Forma*, *Prop_Pop* e *Dens_conc*.

6.3 TRANSFORMAÇÃO DE VARIÁVEIS

A alternativa seguinte, com vista a melhorar os modelos obtidos para as duas situações (energia total e energia *per capita*), consistiu em gerar novos modelos com todas as variáveis de entrada originalmente consideradas, em que os dados de entrada e de saída sofreram uma transformação matemática (neste caso com o emprego de logaritmos, de forma a reduzir a elevada dispersão observada nos dados originais). Uma vez os dados transformados, foi gerada uma nova RNA (com parâmetros definidos pelo próprio *software*) para aqueles dados. Para a energia total a topologia gerada possuía 17 neurónios de entrada, 10 neurónios na camada escondida e 1 neurónio de saída, sendo a taxa de aprendizagem e o *Momentum* dados por 0,6 e 0,8, respectivamente. No caso da energia *per capita* a topologia gerada possuía 8 neurónios de entrada, 6 na camada intermédia e 1 neurónio de saída, sendo a taxa de aprendizagem e *Momentum* dados por 0,6 e 0,8, respectivamente.

A transformação adoptada permitiu que os modelos se aperfeiçoassem, ou seja, o erro relativo entre os valores reais e estimados diminuiu. A representação gráfica dos valores reais e estimados para o modelo de energia total é mostrada na Figura 6.8 e os valores

de ERM e R^2 para esta situação, para os grupos de validação e teste, podem ser observados na Tabela 6.7. No entanto, para o caso da energia *per capita*, mesmo utilizando este recurso, o modelo mostrou-se pouco promissor, como se pode comprovar pelos valores das medidas de desempenho apresentadas na Tabela 6.8, para os grupos de validação e de teste.

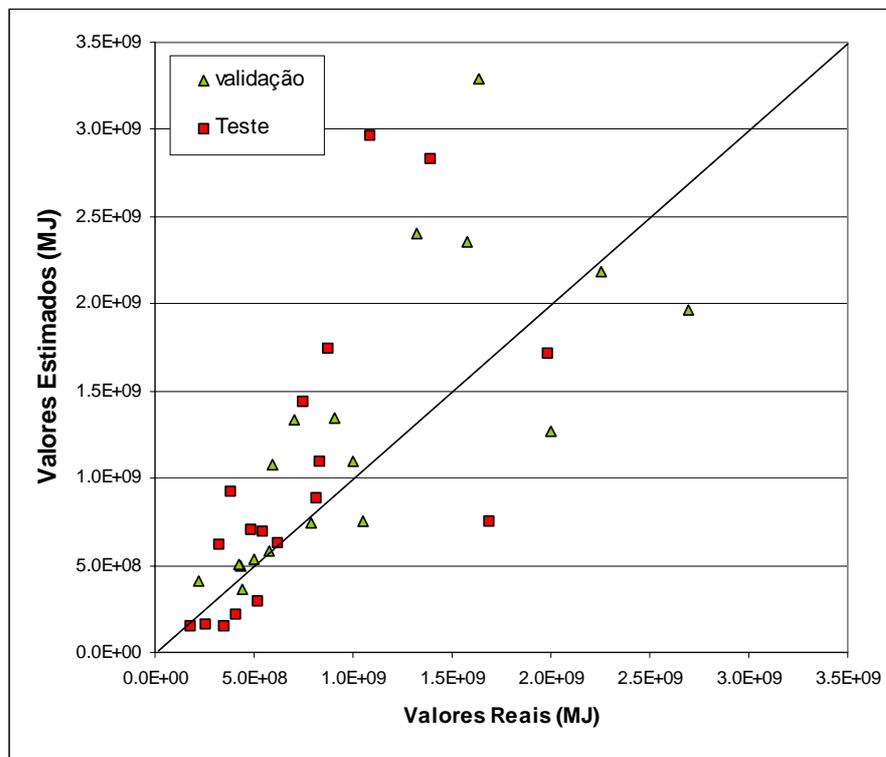


Figura 6.8 - Valores reais e estimados para os grupos de validação e teste dos modelos de energia total, obtidos após transformação logarítmica das variáveis.

Dados os resultados da análise relativos aos valores de energia *per capita* serem pouco promitentes optou-se por deixar cair aqui esta hipótese e concentrar a análise, a partir deste ponto, no estudo mais aprofundado nos modelos de energia total. A partir desta determinação, os dados de energia total foram analisados segundo duas opções distintas:

- Análise de sensibilidade de três variáveis, sendo duas relativas à forma urbana e a terceira à percentagem de população habitante na cidade; e
- Elaboração de mapas contendo a localização espacial dos erros de estimativa do modelo original, com o propósito de identificar eventuais agrupamentos espaciais de erros de mesmo sinal e magnitude aproximada que pudessem de alguma forma indicar variáveis adicionais (espaciais) a serem incorporadas ao modelo.

Tabela 6.7 - Valores de desempenho para os grupos de validação e teste dos modelos de energia total, obtidos após transformação logarítmica das variáveis.

| GRUPO | R ² | ERRO RELATIVO | |
|-----------|----------------|---------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão |
| validação | 0,53 | 0,39 | 0,34 |
| teste | 0,40 | 0,60 | 0,48 |

Tabela 6.8 - Valores de desempenho para os grupos de validação e teste dos modelos de energia *per capita*, obtidos após transformação logarítmica das variáveis.

| GRUPO | R ² | ERRO RELATIVO | |
|-----------|----------------|---------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão |
| validação | 0,02 | 0,50 | 0,29 |
| teste | 0,12 | 0,57 | 0,53 |

6.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIÁVEIS

O primeiro estudo, relativo à análise de sensibilidade, consistiu em determinar a variação do consumo de energia total com a variação das variáveis como o *Factor Forma*, *Area_cid/Area_circ* e *Prop_pop*. Para isso, foi necessário adoptar o procedimento que a seguir se descreve.

Utilizando o modelo com transformação logarítmica, fixou-se o valor de cada uma das variáveis no seu valor médio e variou-se o valor do *Factor Forma* (foram adoptados 10 valores, a intervalos constantes, compreendidos entre o valor máximo e o mínimo). Desta forma foi possível analisar a variação do consumo de energia quando todas as variáveis se mantinham constantes no seu valor médio e só o valor daquela variável era alterado. O mesmo foi efectuado para as variáveis *Area_cid/Area_circ* e *Prop_pop*. A variação da energia total foi também analisada de forma análoga, mantendo constantes os valores máximos e mínimos de todas as variáveis, excepto os da variável em análise.

Todas estas situações foram inseridas na RNA já treinada (17-20-1; L = 1,0; M = 0,8), obtendo-se assim os valores de energia total previstos pelo modelo. Os resultados obtidos estão resumidos nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11, as quais apresentam, para cada

uma das variáveis referidas acima, os valores obtidos nos três casos (valores máximos, médios e mínimos).

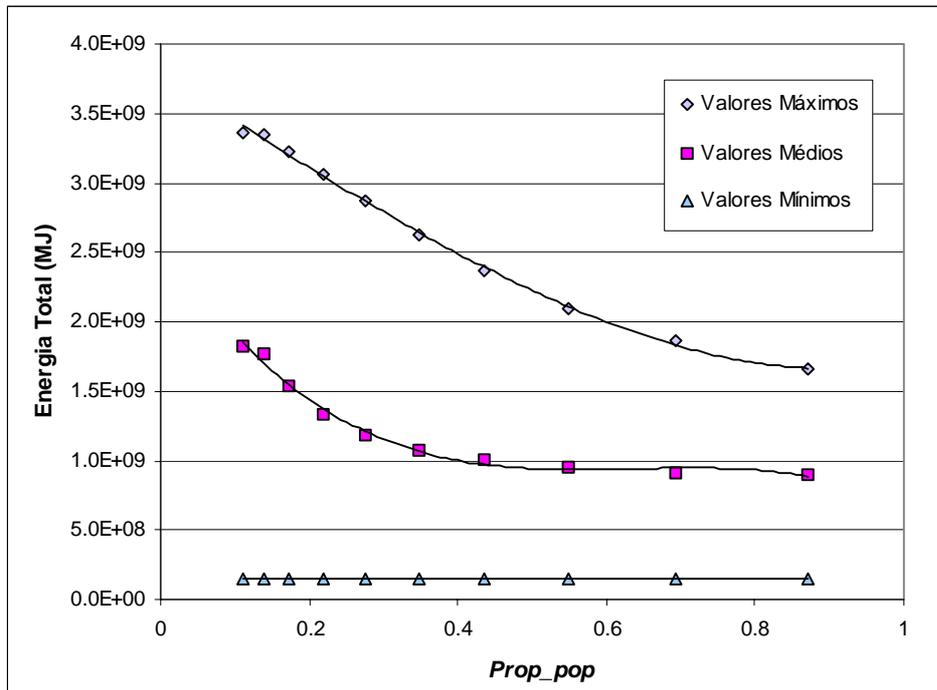


Figura 6.9 - Variação da energia total com a variação de *Prop_pop*, mantendo as restantes variáveis com valores constantes (máximos, médios e mínimos).

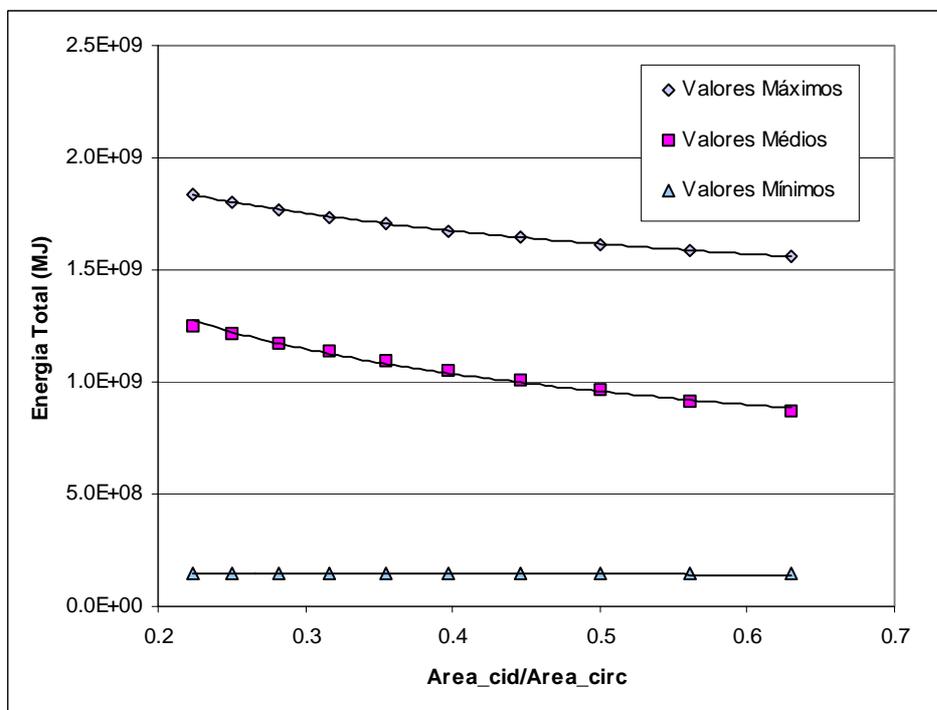


Figura 6.10 - Variação da energia total com a variação de *Area_cid/Area_circ*, mantendo as restantes variáveis com valores constantes (máximos, médios e mínimos).

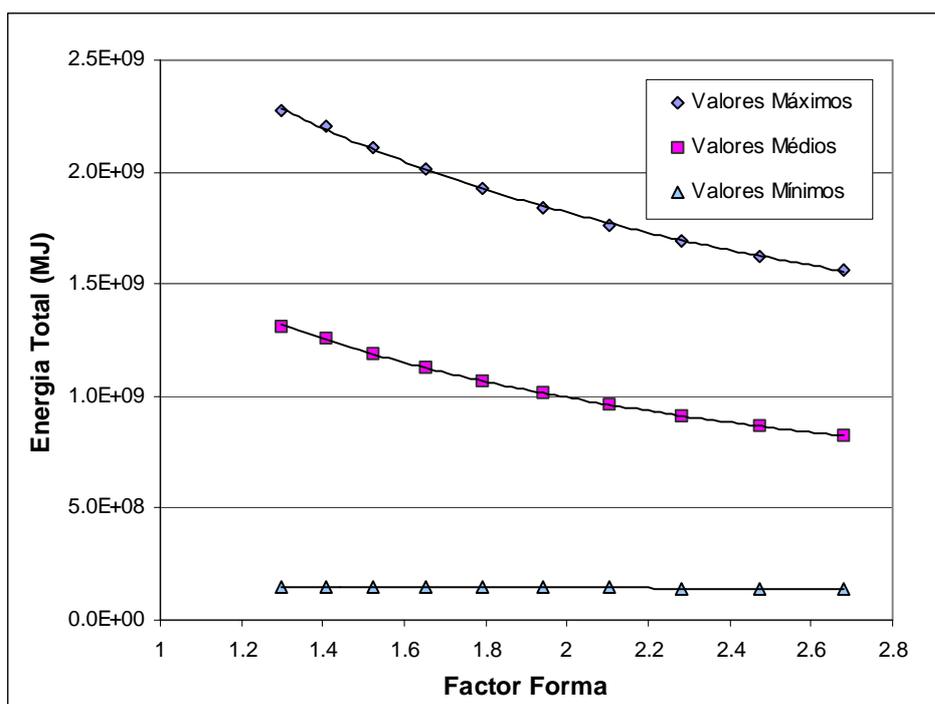


Figura 6.11 - Variação da energia total com a variação do *Factor Forma*, mantendo as restantes variáveis com valores constantes (máximos, médios e mínimos).

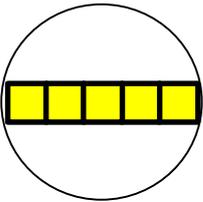
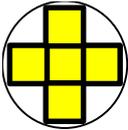
Da análise destes gráficos podem ser extraídas algumas conclusões prévias quanto à influência das variáveis seleccionadas no valor de energia total estimado. No caso da variável *Area_cid/Area_circ* verifica-se que o seu comportamento era o esperado, ou seja, à medida que esta aumenta (área da cidade mais próxima da área do círculo envolvente), o consumo de energia diminui (Figura 6.10). Também para a *Prop_pop*, o comportamento era o esperado. Ou seja, quando as restantes variáveis tomam valores máximos ou médios de população do concelho, rede viária, frota e actividades económicas, o consumo de energia total decresce com o aumento da população que vive no centro. Este comportamento talvez possa ser atribuído ao facto de que uma maior população a viver no centro induz a uma menor quantidade de viagens a este. Ainda no gráfico da Figura 6.9 pode-se observar que, quando as restantes variáveis tomam valores mínimos, a variação do consumo de energia total com a variação da população que vive no centro torna-se insignificante.

Já o *Factor Forma* tem, nas três situações observadas (valores máximos, médios e mínimos das restantes variáveis), um comportamento contrário ao que seria esperado, diminuindo a energia à medida que este aumenta. Constatada esta situação, e tendo já como experiência da primeira fase do estudo, o facto de o *Factor Forma* apresentar

valores de importância relativa inferiores aos esperados, analisou-se melhor este factor para situações distintas. Inicialmente assumiu-se que este índice representava, de facto, a compactação geométrica. No entanto, após uma análise mais cuidadosa chegou-se à conclusão que isso não ocorre necessariamente em todos os casos. Isto pode ser comprovado pela análise de duas situações hipotéticas distintas, como aquelas mostradas na Tabela 6.9, construídas especificamente para esclarecer o que pode estar a gerar um comportamento diferente do esperado para a variável.

No exemplo da Tabela 6.9, embora ambas as ‘cidades’ (construídas a partir de cinco quadrados idênticos, de lado igual a “L”) apresentem o mesmo *Factor Forma* (pois possuem igual valor de área e perímetro), os valores da relação *Area_cid/Area_circ* são diferentes. Ou seja, neste caso em específico, o *Factor Forma* dá um mesmo valor para duas situações distintas. Assim, mesmo que se aceite que o *Factor Forma* de certa maneira caracteriza a forma geométrica da mancha urbana, e por esse motivo não deixe de ser importante para o estudo em questão, para caracterizar o grau de compactação da forma, o factor *Area_cid/Area_circ* mostra-se mais indicado.

Tabela 6.9 - Comparação de duas situações distintas em que o *Factor Forma* toma o mesmo valor para graus de compactação geométrica diferentes.

| SITUAÇÃO 1 | SITUAÇÃO 2 |
|---|--|
|  |  |
| $FF_1 = FF_2$ | |
| $FF_1 \cong \frac{12L}{\sqrt{5L^2}}$ | $FF_2 \cong \frac{12L}{\sqrt{5L^2}}$ |
| $Raio \cong \frac{5L}{2}$ | $Raio \cong \frac{3L}{2}$ |
| $\frac{Acid}{Acirc} \cong \frac{5L^2}{\pi \frac{5L^2}{4}} = 0.8\pi$ | $\frac{Acid}{Acirc} \cong \frac{5L^2}{\pi \frac{9L^2}{4}} = 2.2\pi$ |

6.5 INSERÇÃO DE UMA VARIÁVEL CLASSIFICATÓRIA

Outra opção tomada para análise dos dados consistiu em elaborar mapas do país apresentando os erros relativos entre os valores reais e estimados de energia total para cada cidade, tendo em conta todas as variáveis de entrada sem qualquer transformação matemática. O erro relativo é referente à rede treinada na primeira fase do estudo, de topologia 17-20-1, com valores de taxa de aprendizagem e *Momentum* iguais a 1,0 e 0,8, respectivamente. Foram elaborados mapas com os valores de validação e teste para os três conjuntos, resumidos em dois mapas diferentes para cada caso, como mostram as Figuras 6.12 e 6.13. Os mapas relativos a cada conjunto em separado são também apresentados, embora em anexo a este documento.

Como seria de esperar, os erros relativos dos dados de teste são mais elevados que os de validação, uma vez que os valores de teste são totalmente desconhecidos pela rede, ou seja, servem para demonstrar a capacidade de generalização do modelo. Da observação do mapa de erro com os valores de teste, verificou-se que os erros mais elevados ocorriam principalmente nas regiões do Alentejo e Algarve. Por esse motivo propôs-se efectuar uma nova análise dos dados, introduzindo na rede uma variável que caracterizasse cada cidade por região NUTs II (mostradas nas Figuras 5.1 a 5.5, do capítulo 5, aquando da apresentação das cidades seleccionadas para o estudo), a qual se denominou de “Regiões”. Foi, então, gerada uma nova rede, com parâmetros propostos pelo próprio *software* (17-10-1; $L = 0,6$; $M = 0,8$), introduzindo a nova variável. Após o cálculo dos erros relativos de validação e teste para todas as cidades, observou-se que a média do erro tinha descido consideravelmente nos dois casos, conforme se pode constatar nas Tabelas 6.10 e 6.11.

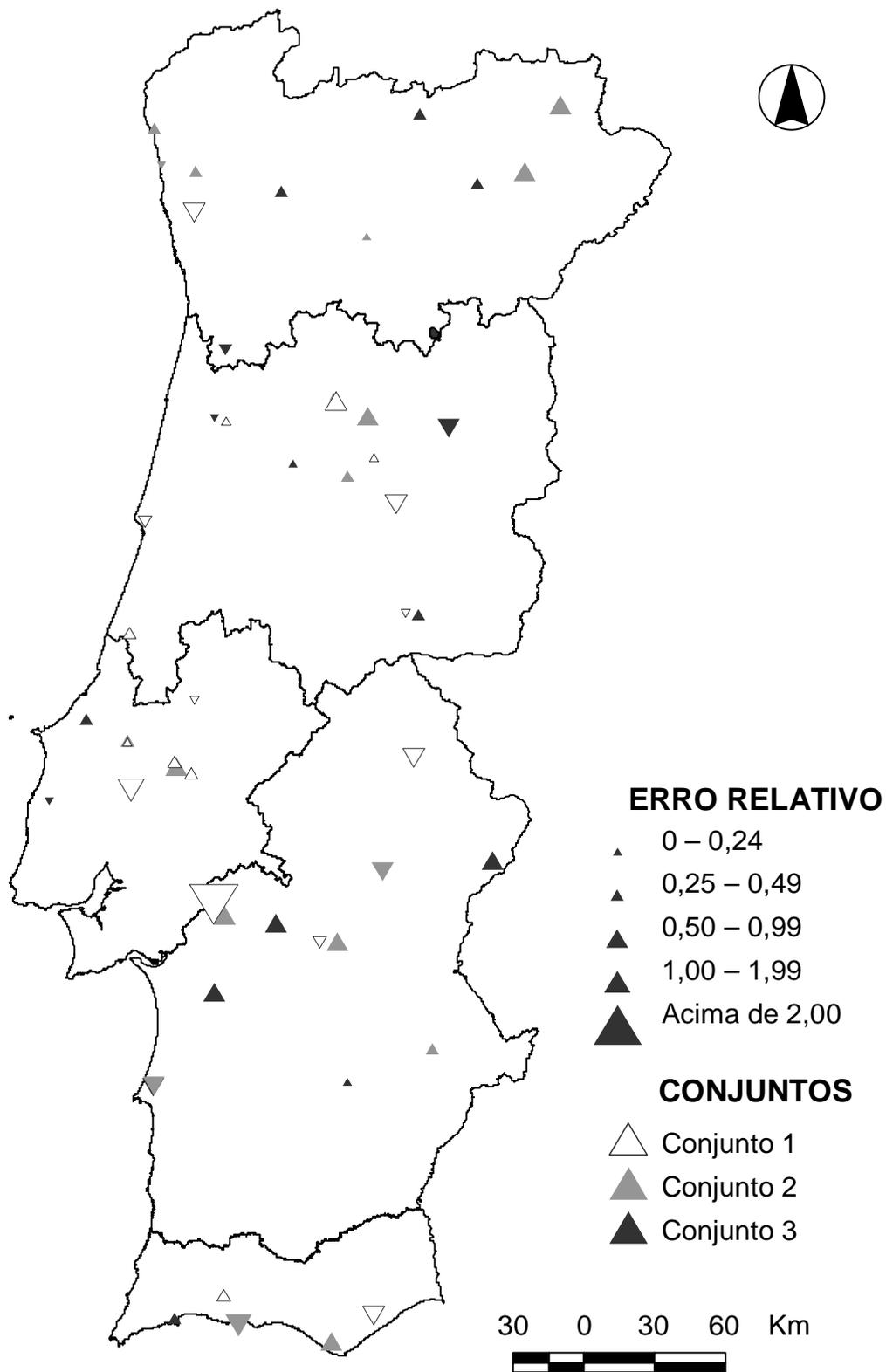


Figura 6.12 - Erros relativos do modelo de energia total, para os dados de validação (conjuntos 1, 2 e 3).

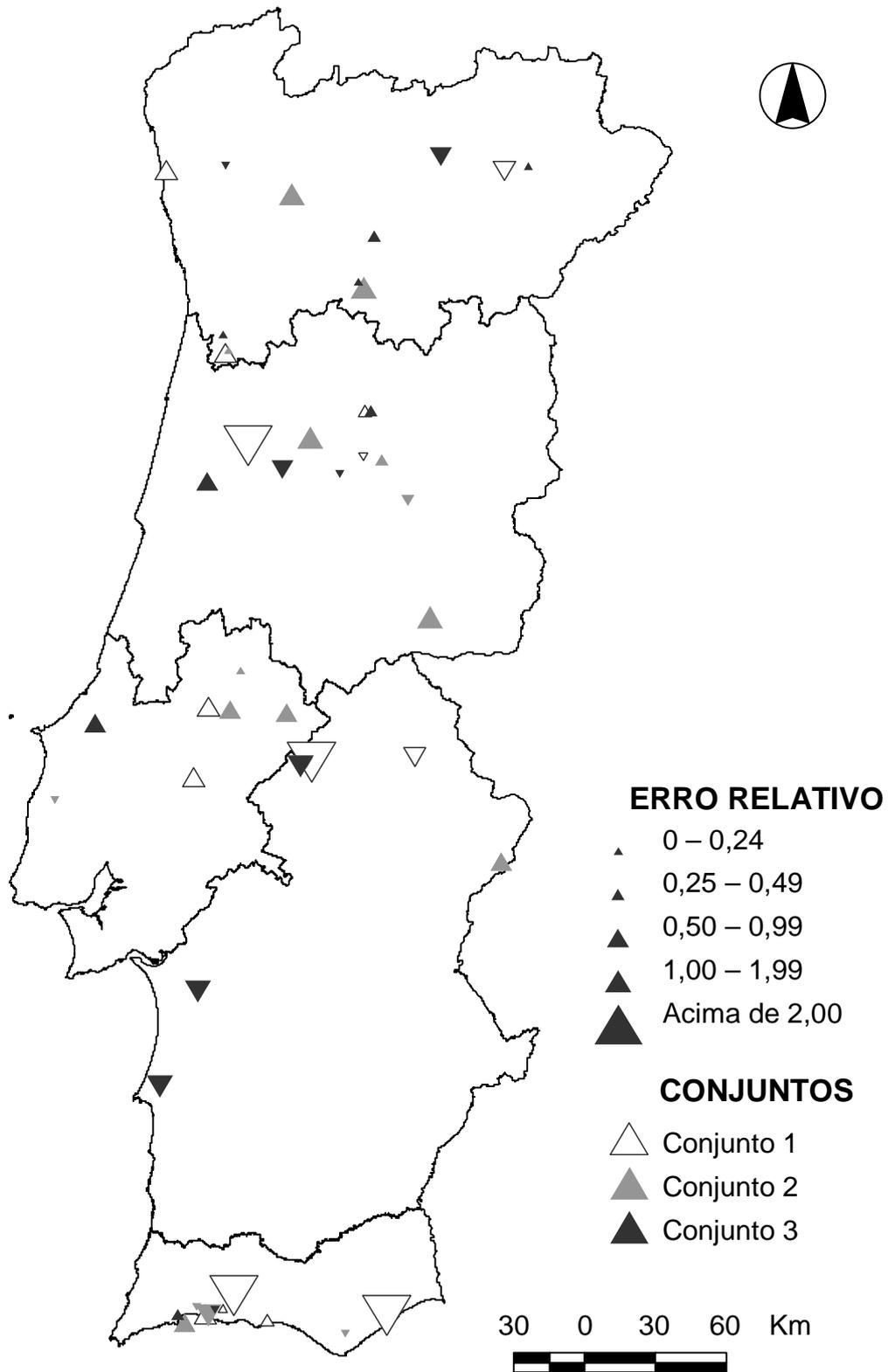


Figura 6.13 - Erros relativos do modelo de energia total, para os dados de teste (conjuntos 1, 2 e 3).

Tabela 6.10 - Valores de desempenho do modelo de energia total, obtidos para os dados de validação após a inserção da variável classificatória.

| CONJUNTO | R ² | ERRO RELATIVO | |
|----------|----------------|---------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão |
| 1 | 0,77 | 0,24 | 0,18 |
| 2 | 0,78 | 0,41 | 0,32 |
| 3 | 0,44 | 0,40 | 0,50 |

Tabela 6.11 - Valores de desempenho do modelo de energia total, obtidos para os dados de teste após a inserção da variável classificatória.

| CONJUNTO | R ² | ERRO RELATIVO | |
|----------|----------------|---------------|---------------|
| | | Média | Desvio padrão |
| 1 | 0,57 | 0,82 | 0,96 |
| 2 | 0,45 | 0,68 | 0,82 |
| 3 | 0,50 | 0,55 | 0,50 |

Convém observar que o desempenho da rede com os dados de teste ainda não se mostra muito bom, ou seja, apesar da visível melhoria, a capacidade de generalização do modelo ainda não pode ser considerada plenamente satisfatória. A relação entre os dados reais e estimados pode ser visualizada nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16, que apresentam graficamente estes valores para os três conjuntos experimentados.

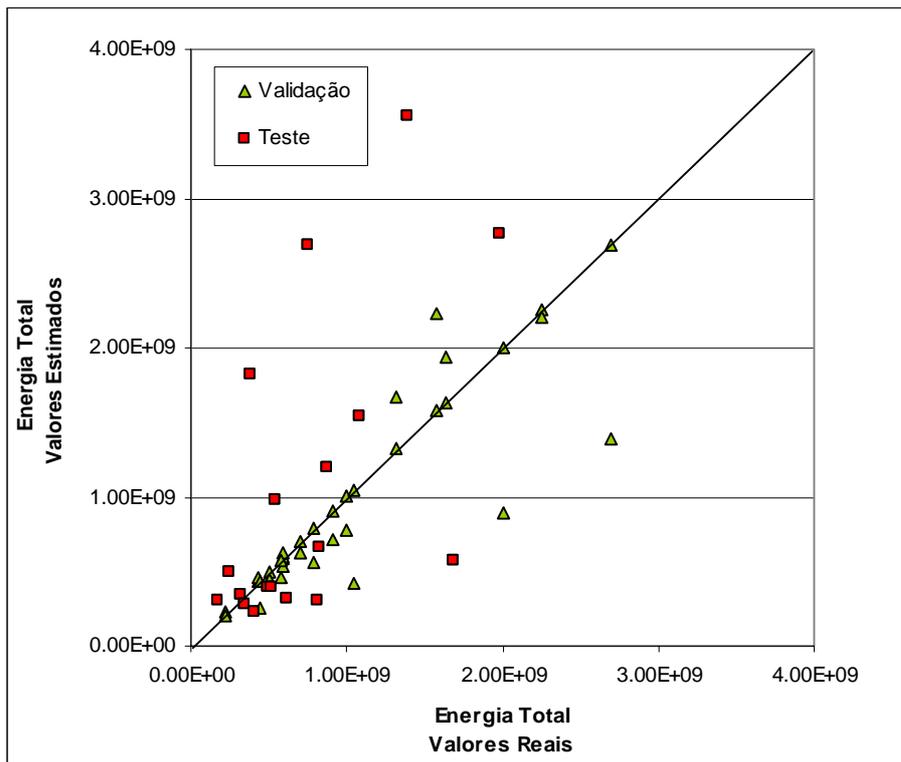


Figura 6.14 - Relação entre valores reais e estimados de energia total (em MJ), para os valores de validação e teste, após ter sido introduzida a variável classificatória (Conjunto 1).

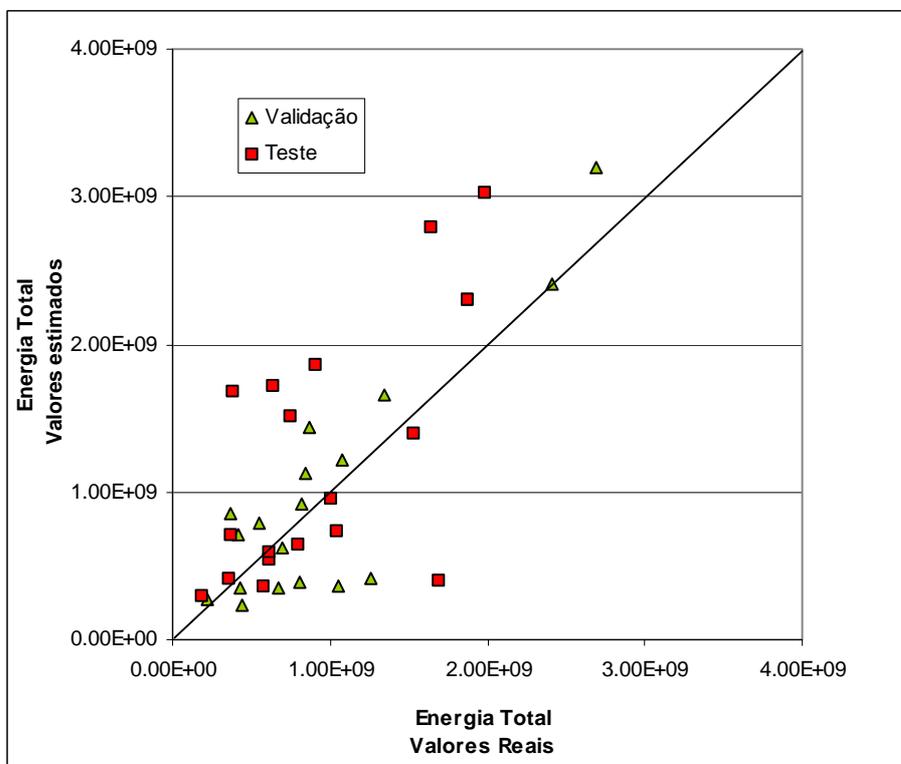


Figura 6.15 - Relação entre valores reais e estimados de energia total (em MJ), para os valores de validação e teste, após ter sido introduzida a variável classificatória (Conjunto 2).

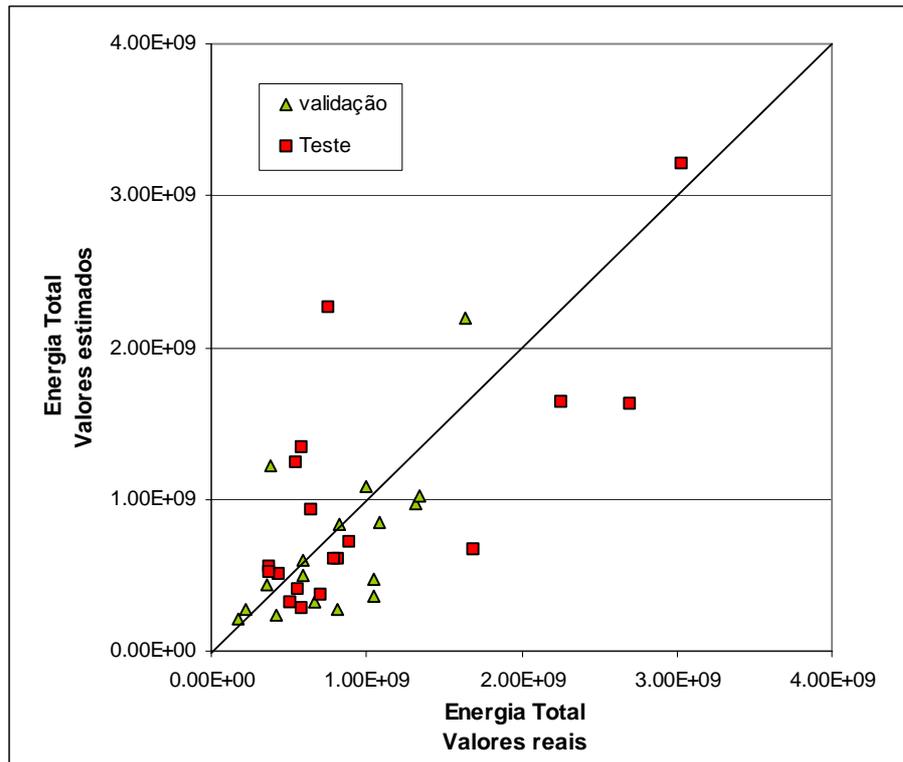


Figura 6.16 - Relação entre valores reais e estimados de energia total (em MJ), para os valores de validação e teste, após ter sido introduzida a variável classificatória (Conjunto 3).

Os pontos estariam posicionados ao longo da recta de 45 graus que passa pelo ponto de coordenadas (0, 0) nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 se os valores previstos fossem idênticos aos valores observados, ou seja, se a rede fosse perfeitamente precisa nas suas estimativas. Da observação dos gráfico dessas figuras (em particular, da Figura 6.14) e da análise dos valores de ERM e R^2 , verifica-se que, em boa parte, os valores de validação localizam-se sobre aquela recta, o que significa que os valores gerados pelo modelo e os reais se encontram muito próximos.

Os valores de R^2 , dos dados de validação e teste, comprovam o melhor desempenho do modelo após a inserção da variável classificatória. Assim, para o objectivo almejado neste trabalho pode concluir-se que o modelo caracteriza satisfatoriamente o problema e que é possível obter a importância das variáveis de entrada com aceitável rigor. As importâncias relativas das variáveis, calculadas através do método de Garson, são apresentadas na Figura 6.17.

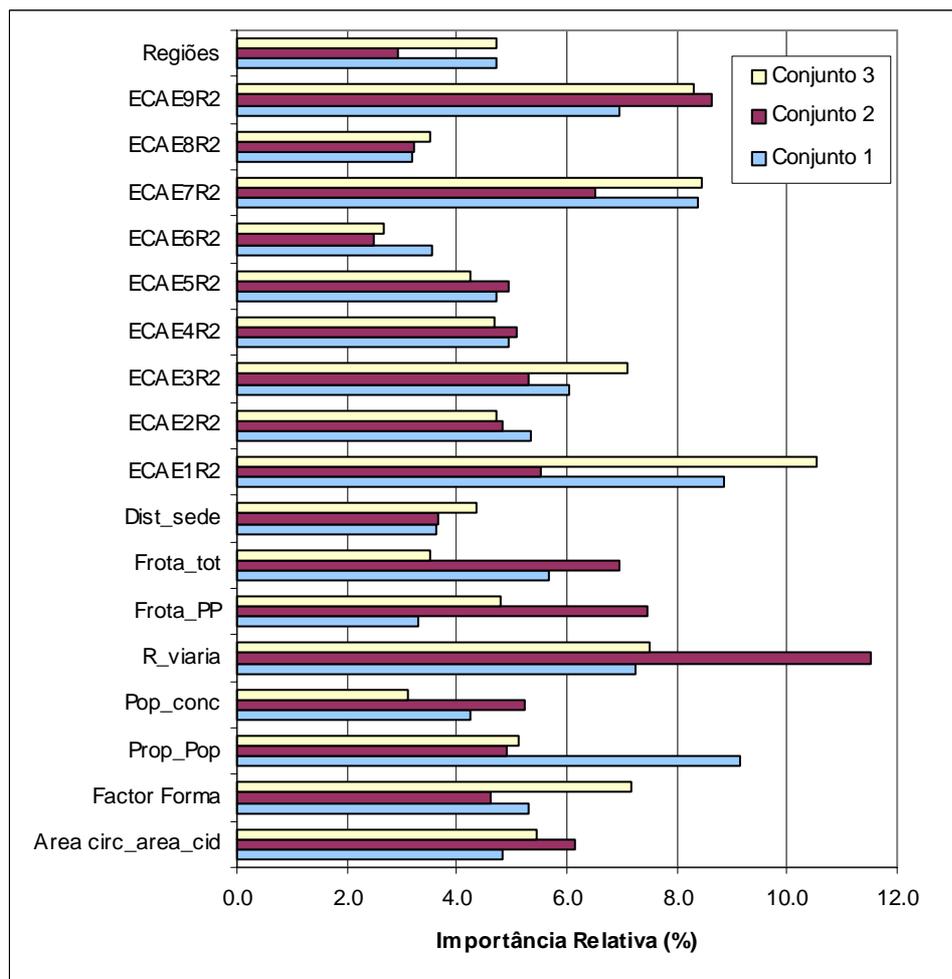


Figura 6.17 - Importância relativa das variáveis de entrada obtidas no modelo após a introdução da variável classificatória.

Com o intuito de obter uma melhor interpretação dos resultados e organização da informação obtida, associaram-se as variáveis de entrada do modelo, classificando-as nos quatro grupos listados a seguir, de acordo com suas características comuns:

- Caracterização da forma urbana e distribuição da população
- Rede viária e acessibilidade
- Frota automóvel
- Actividades económicas

A Tabela 6.12 apresenta as variáveis de entrada e os grupos em que estas foram classificadas, assim como os valores das importâncias relativas obtidas pelo método de Garson para os três conjuntos experimentados. Ainda na mesma tabela são apresentados os valores de importância relativa por grupo classificatório, para cada conjunto. Estes mesmos resultados podem ser visualizados graficamente na Figura 6.18.

Tabela 6.12 - Valores da importância relativa de cada variável e respectivos grupos classificatórios.

| | Variável | Conjunto 1 | Conjunto 2 | Conjunto 3 | Média |
|--|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Características da forma urbana e distribuição da população | Area circ_area_cid | 4.84 | 6.15 | 5.43 | 25.88 |
| | Factor Forma | 5.31 | 4.59 | 7.18 | |
| | Prop_Pop | 9.13 | 4.91 | 5.11 | |
| | Pop_conc | 4.26 | 5.23 | 3.12 | |
| | Regiões | 4.73 | 2.91 | 4.73 | |
| | | 28.26 | 23.80 | 25.58 | |
| Rede vária e acessibilidade | R_viaria | 7.24 | 11.51 | 7.51 | 12.63 |
| | Dist_sede | 3.62 | 3.67 | 4.34 | |
| | | 10.86 | 15.18 | 11.85 | |
| Frota automóvel | Frota_PP | 3.30 | 7.48 | 4.79 | 10.58 |
| | Frota_tot | 5.69 | 6.95 | 3.53 | |
| | | 8.98 | 14.43 | 8.31 | |
| Actividades económicas | ECAE1R2 | 8.84 | 5.54 | 10.54 | 50.91 |
| | ECAE2R2 | 5.34 | 4.83 | 4.72 | |
| | ECAE3R2 | 6.03 | 5.30 | 7.11 | |
| | ECAE4R2 | 4.95 | 5.09 | 4.67 | |
| | ECAE5R2 | 4.72 | 4.95 | 4.23 | |
| | ECAE6R2 | 3.56 | 2.48 | 2.68 | |
| | ECAE7R2 | 8.36 | 6.53 | 8.47 | |
| | ECAE8R2 | 3.17 | 3.22 | 3.53 | |
| | ECAE9R2 | 6.94 | 8.64 | 8.31 | |
| | | 51.89 | 46.59 | 54.26 | |

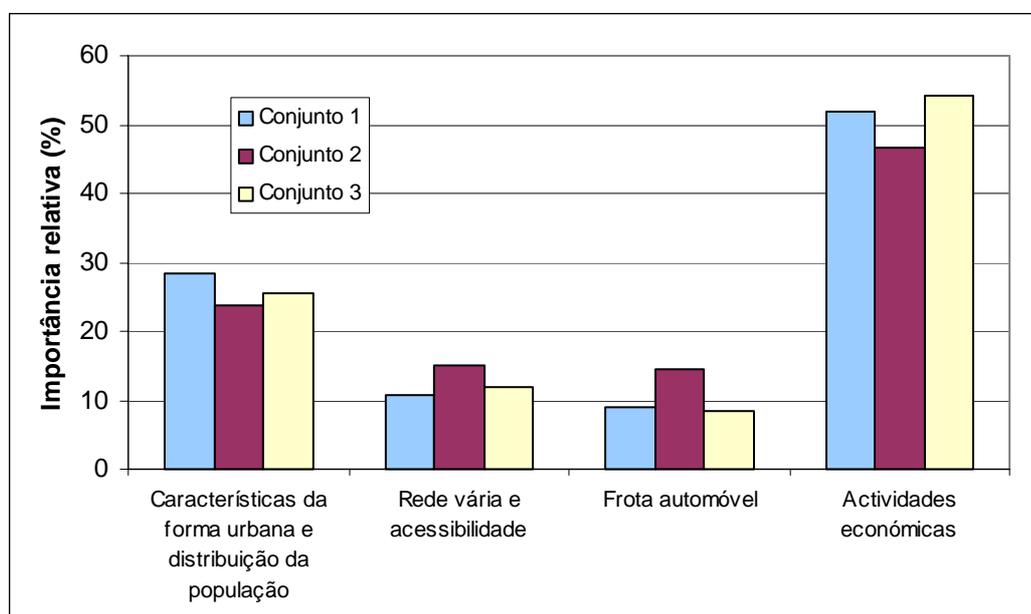


Figura 6.18 - Importância dos grupos classificatórios no consumo de energia em transportes por conjunto estudado.

Da análise da Tabela 6.12 e da Figura 6.18 pode afirmar-se que os três conjuntos de dados são coerentes quanto ao valor da importância dos grupos classificatórios, o que

não acontecia inicialmente com as primeiras redes testadas, relativamente às variáveis. Isto significa que o modelo gerado parece caracterizar bem a situação para os três conjuntos experimentados, ou seja para valores de treinamento e validação diferentes, as importâncias relativas entre os grupos classificatórios mantêm-se. Após esta constatação calcularam-se os valores médios da importância para cada grupo, como mostra a coluna da direita da Tabela 6.12, o que resultou no gráfico de sectores da Figura 6.19. Da análise desta figura pode concluir-se que o grupo de *actividades económicas* do concelho é o que maior influência tem no consumo de energia em transportes, com uma importância relativa de 50%. As *características da forma urbana e distribuição da população* constituem o grupo a seguir em termos de importância, com um valor de 26%, seguido pelos grupos *rede viária e acessibilidade*, com 13%, e *frota automóvel*, com 11%.

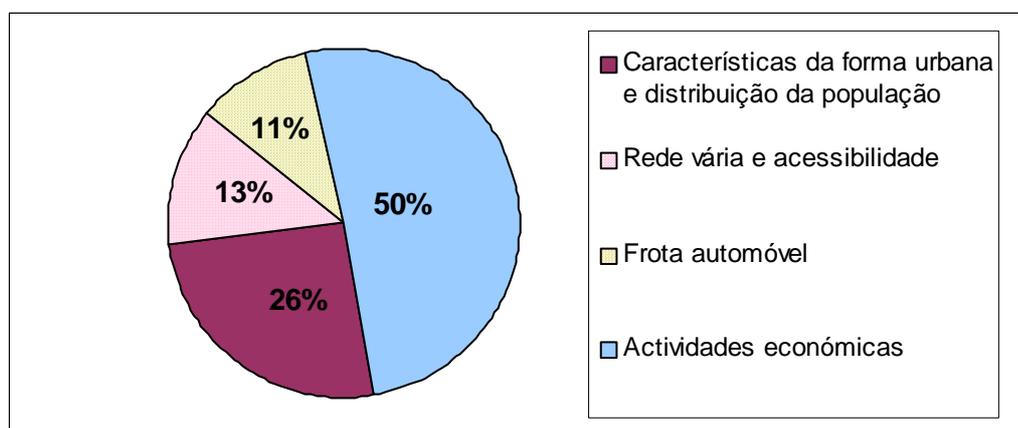


Figura 6.19 - Influência relativa dos grupos de factores urbanos e económicos no consumo de energia em transportes.

6.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Como se descreve na apresentação dos resultados desde os modelos iniciais, esta investigação e os modelos dela decorrentes sofreram uma evolução constante ao longo do tempo. À medida que o conhecimento sobre o assunto se ia aprofundando, diferentes alternativas foram consideradas e verificadas para a resolução do problema. Daí que os resultados obtidos no final do estudo representem uma visível melhoria em relação aos resultados iniciais.

Na primeira fase do estudo optou-se por estudar separadamente a variação do consumo de energia total e energia per capita, mas desde logo se verificou que os resultados obtidos neste último caso eram pouco promitentes. Mesmo o melhor modelo gerado neste caso mostrou-se de reduzido desempenho, o que levou desde logo a abandonar esta hipótese. Esta situação parece dever-se ao facto de que parte considerável das variáveis, inclusive o próprio valor da energia, encontrava-se agregada ao nível do concelho e, como foi já abordado, as variáveis que caracterizam as cidades em si não se encontravam no mesmo nível de agregação, já que nos casos estudados as suas fronteiras não coincidem com as dos concelhos a que pertencem. No entanto, mesmo a exclusão de variáveis, descrita no item 6.2, pouco resultou em termos de melhoria dos modelos com variável de saída energia per capita. Optou-se então por dar continuidade ao estudo apenas com os dados de energia total.

A primeira alternativa avaliada a partir deste ponto para a melhoria dos modelos tendo como variável de saída a energia total foi a aplicação de transformação logarítmica nas variáveis para reduzir a dispersão dos dados. A avaliação da influência das variáveis no consumo de energia deu-se então através de análises de sensibilidade. Da análise de sensibilidade efectuada para as três variáveis relativas ao Factor Forma, relação entre a Área do menor círculo envolvente e a Área da cidade e Proporção da população do concelho que vive na cidade verificou-se que:

- O *Factor Forma* fez variar a variável de saída de forma contrária ao que seria de esperar, ou seja, o consumo de energia diminuía à medida que aquele aumentava. Constatada esta situação procedeu-se a uma análise mais aprofundada do significado do *Factor Forma*. Apesar de inicialmente se julgar que este índice representava a compactação geométrica da mancha urbana, quando melhor analisado verificou-se que isso não ocorre necessariamente em todos os casos, como se mostrou no ponto 4 deste capítulo. Este índice pode representar a forma da mancha urbana, mas isto não implica que represente de forma adequada também o grau de compactação.
- Quando a relação entre a *Área do menor círculo envolvente e a Área da cidade* aumentava (área da cidade mais próxima do menor círculo envolvente), o consumo de energia diminuía, conforme era esperado.

- Também a *Proporção da população do concelho que vive na cidade* variou conforme era esperado, ou seja, quando as restantes variáveis tomavam valores máximos ou médios (valores médios a altos de população, rede viária, frota automóvel e emprego), o aumento da população que vive no centro levou a uma diminuição do consumo de energia. Atribuiu-se este comportamento ao facto de que a maioria da população se concentra na cidade e seria por isso menor a quantidade de viagens ao centro.

A última alternativa explorada para melhoria dos modelos com variável de saída energia total teve como fundamento a análise de distribuição espacial dos erros relativos encontrados com os modelos originais. Esta análise resultou numa outra abordagem para o estudo, que consistiu em introduzir uma variável classificatória no modelo que caracterizava as cidades por região (NUTs II). Desta forma foi possível melhorar o desempenho da rede, obtendo-se uma redução substancial do erro relativo entre os valores reais e os valores gerados pela RNA.

A obtenção de modelos de melhor desempenho tornou possível uma análise complementar para identificar a importância relativa das variáveis de entrada nos valores de energia total estimados, convergindo para o objectivo desta investigação. Assim, procedeu-se à organização das variáveis de entrada por grupos classificatórios. Da análise da importância de cada grupo apurou-se que as *actividades económicas* apresentaram a maior importância no consumo de energia em transportes nas cidades estudadas, com um valor de 50%. Seguem-se as *características da forma urbana e distribuição da população*, com importância relativa de 26%, *rede viária e acessibilidade*, com 13%, e *frota automóvel*, com 11%.

7 CONCLUSÃO

Através da leitura e análise de estudos internacionais já realizados sobre o tema pode constatar-se a existência de uma forte relação de variáveis relativas à forma urbana com o consumo de energia em transportes. Alguns destes estudos efectuaram comparações entre cidades de diferentes países, outros consideraram cidades de um único país e outros, ainda, debruçaram-se sobre o estudo de uma única região. O ponto em comum da maior parte destes estudos baseados em evidência empírica, no entanto, é que as cidades dispersas não seriam as mais eficientes em relação ao consumo de energia em transportes. Apesar de alguns poucos pesquisadores rejeitarem esta opinião, sustentando-se no argumento de que medidas económicas, como a variação do preço dos combustíveis, e custo de posse e de utilização do automóvel seriam suficientes e mais adequadas para economizar o consumo de energia em transportes, o que a experiência de muitas cidades demonstra é que o desconhecimento de questões relacionadas com o planeamento físico destas tem resultado em cidades cada vez mais espalhadas (com baixas densidades), desordenadas e anti-económicas no que respeita ao consumo de energia em transportes.

Este trabalho teve como principal objectivo acrescentar novos resultados à temática em estudo, analisando o impacto de variáveis que caracterizam tanto aspectos físicos, como aspectos socioeconómicos no consumo de energia em transportes, considerando as principais cidades portuguesas, à excepção das zonas de Lisboa e Porto.

O levantamento de dados centrou-se nas variáveis mais relevantes consideradas pela literatura existente sobre o tema, sendo incorporadas no modelo aquelas que se encontravam disponíveis em Portugal. É de salientar a dificuldade de aquisição de dados ao nível de agregação da cidade, devido à grande maioria das estatísticas disponíveis em Portugal serem agregadas ao nível do concelho, sendo, até há bem pouco tempo o nível de agregação mais baixo, a freguesia. Apenas a partir do último

recenseamento (2001) o Instituto Nacional de Estatística disponibilizou dados da população e habitação agregados ao nível da secção e subsecção (unidades estatísticas inferiores à freguesia). Este facto, sem dúvida, acabou por limitar a aquisição dos dados estatísticos pretendidos.

Na revisão bibliográfica teve-se a constante preocupação que esta fosse bastante abrangente, efectuando-se a pesquisa principalmente em trabalhos internacionais, em virtude da pouca quantidade de informação e estudos acerca do tema em Portugal. No estrangeiro, por outro lado, este assunto tem sido objecto de grande interesse e diversos trabalhos têm surgido no cenário internacional, o que viabilizou uma revisão de literatura muito completa, inclusive um confronto de resultados e opiniões de vários autores.

A técnica de análise através das Redes Neurais Artificiais exige conceber uma série de topologias de rede diferentes e com diferentes valores de taxa de aprendizagem e *momentum*, em busca de uma solução mais refinada. Desta forma, já na fase inicial do estudo foram testadas mais de 110 configurações diferentes, variando o número de camadas escondidas, o número de neurónios em cada camada, a taxa de aprendizado e o *momentum*. Nas diversas redes experimentadas, seleccionou-se a de melhor desempenho, ou seja a que melhor modelava a situação pretendida, por possuir o menor erro relativo médio, no entanto, por não se ter encontrado uma solução satisfatória nos primeiros modelos, novas configurações de rede foram experimentadas à medida que o estudo foi avançando.

Os resultados obtidos nas análises aqui conduzidas vieram confirmar a influência das *características da forma urbana e distribuição da população* no consumo de energia em transportes. Além do *número de pessoas empregadas nas várias actividades económicas*, que revelou ser o grupo classificatório de maior importância na variação do consumo de energia, as *características da forma urbana e distribuição da população* revelaram ter elevada influência, sobrepondo-se mesmo aos grupos classificatórios *rede viária e acessibilidades e frota automóvel*.

Daqui pode constatar-se, que analogamente a cidades de outros países, também nas cidades portuguesas as características físicas da cidade e a organização espacial da população, parecem influenciar de forma expressiva o consumo de energia ao nível dos transportes. Os resultados obtidos reforçam a tese que para melhorar a eficiência

energética das cidades é necessário apostar em políticas adequadas de planeamento físico. Neste sentido, tornam-se necessários estudos complementares que melhor caracterizem a influência do grau de dispersão das cidades portuguesas no consumo de energia em transportes. Apesar de incluídas no presente estudo, as características relativa à definição dos limites das cidades ainda podem ser refinadas. Este estudo demonstra que o Atlas das Cidades de Portugal teve um importante contributo para esta definição, no entanto constata-se que a falta de homogeneidade dos critérios utilizados pelas autarquias para a delimitação das cidades parece ter comprometido os valores das variáveis espaciais (área e perímetro) dele derivadas.

Um melhor planeamento físico das cidades (que pode passar por medidas de controle do seu excessivo espalhamento) e outras medidas de médio e curto prazo que possam contribuir para a redução do elevado nível de consumo de energia em transportes são relevantes e oportunas em Portugal. Isto certamente passa por definir estratégias para reduzir o excessivo uso automóvel com a consequente (re)valorização dos transportes públicos, contribuindo assim para a melhoria de importantes factores de qualidade de vida urbana (redução de congestionamentos de trânsito e poluição ambiental, uso mais adequado dos espaços urbanos, entre outros).

Em forma conclusiva, o presente estudo poderia ser aprofundado através da obtenção de dados mais refinados das variáveis socioeconómicas e, concretamente dos dados de consumo de energia em transportes, se possível agregados ao nível da cidade. Nesse sentido, a contribuição do Instituto Nacional de Estatística, é fundamental, dando sequência à excelente iniciativa em que se constituiu o *Atlas das cidades de Portugal*.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albergaria, H. (1999), *A dinâmica populacional das cidades portuguesas do continente*, Revista de Estatística, INE, Lisboa, Portugal.
- Banister, D.; Watson, S.; Wood, C. (1997), *Sustainable cities: transport, energy, and urban form*, Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 24, p. 125-143.
- Bibby, P.; Shepherd, J. (1990), *Rates of urbanisation in England 1981 – 200*, a report for the Department of the Environment, now Department of Transport, Local Government and the Regions, Eland House, Bressenden Place, London SW1E 5DU.
- Bocanegra, C. W. R. (2001), *Procedimentos para tornar mais efetivo o uso das redes neurais artificiais em planejamento de transportes*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 97 p..
- Braga, A. P. (1998), *Proceedings of the 5th Brazilian Symposium on Neural Networks – Volume 1*. Minas Gerais, Brasil.
- Braga, A. P.; Ludermir, T. B.; Carvalho, A. C. P. L. F. (2000), *Redes neurais artificiais, teoria e aplicações*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 262 p.
- Brega, J. R. F. (1996), *A utilização de redes neurais artificiais em um sistema de gerência de pavimentos*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 234 p.
- Breheny, M.; Rookwood, R. (1993), *Planning the sustainable city region*, In: Blowers, A. (Ed.), *Planning for a sustainable environment*. Earthscan Publications, London, p. 150-189.
- Brío, B. M.; Molina, A. S. (2001), *Redes neuronales y sistemas borrosos*, 2ª edição, Ra-Ma Editorial, Madrid.
- Brondino, N. C. M. (1999), *Estudo da influência da acessibilidade no valor de lotes urbanos através do uso de redes neurais*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 146 p.
- Burton, E., (2002), *Measuring urban compactness in U.K. towns and cities*, Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 29, p. 219-250.

- Calthorpe P. (1993), *The next American metropolis: ecology, community and the american dream*, (Princeton Architectural Press, New York).
- CONPET (2000), Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e gás natural (<http://www.conpet.gov.br/>).
- Costa, G. C. F. (2001), *Uma avaliação do consumo de energia com transportes em cidades do estado de São Paulo*; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 103 p.
- Costa, G. C. F.; Silva, A. N. R.; Carvalho, A. C. P. L. F. (2001), *Uma análise do consumo de energia com transportes em zonas urbanas utilizando redes neurais artificiais*, Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas, v. 2, p. 183-190.
- Costa, P. T.; Mendes, J. F. G.; Silva, A. N. R. (2002), *Uma análise do consumo de energia em transportes nos municípios portugueses*, Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, v. 1, p. 297-308.
- Coutinho Neto, B. (2000) *Redes neurais artificiais como procedimento para retroanálise de pavimentos flexíveis*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 119 p.
- Coutinho Neto, B.; Rodgher, S. F.; Fabbri, G. T. P. (1999), *Retroanálise de pavimentos flexíveis através de redes neurais artificiais*, Anais do XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, São Carlos, v. 1, p. 395-405.
- Cybenko, G. (1988), *Continuous valued neural networks with two hidden layers are sufficient*, Technical report, Department of Computer Science, Tufts University.
- Cybenko, G. (1989), *Approximation by superposition of a sigmoid function*, Mathematics of Control, Signals and Systems, vol. 2, p. 303-314.
- DETEFP (2002), Departamento de Estatística do Trabalho, Emprego e Formação Profissional; Ministério da Segurança Social e do Trabalho.
- DoE (1995), *Our future homes: opportunity, choice, responsibility*, Department of the Environment, now Department of Transport, Local Government and the Regions, Eland House, Bressenden Place, London SW1E 5DU.
- Dougherty, M. (1995), *A review of neural networks applied to transport*. Transportation Research Part C, v. 3, n. 4, p. 247-260.
- Duany, A.; Plater-Zyberk, E. (1991), *Towns and town-making principles*, Rizzoli International, New York.
- Eastman, J. R. (1997), *IDRISI for Windows: user's guide*, Version 2.0. Clark University-Graduate School of Geography, Worcester.
- Elkin, T.; McLaren, D.; Hillman, M. (1991), *Reviving the city: towards sustainable urban development*, Friends of the Earth, 16-24, Underwood Street, London.

- Fouchier, V. (1997), *Urban density and mobility: What do we know? What can we do? The case of Paris region*. Apresentado no Second Symposium on Urban Planning and Environment, Groningen, Holanda, 15 p.
- Furtado, A. N. D. (1998)., *Uma nova abordagem na avaliação de projetos de transporte: o uso das redes neurais artificiais como técnica para avaliar e ordenar alternativas*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 249 p.
- Galvão, C. O.; Valença, M. J. S. (1999), *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*, Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 246 p.
- Garson, D. G. (1991), *Interpreting neural-network connection weights*, AI Expert. April, p. 47-51.
- Goodchild, B. (1994), *Housing design, urban form and sustainable development*, Town Planning Review, v. 65, p. 143-157.
- Gordon, P.; Richardson, H. W. (1989), *Gasoline consumption and cities: A reply*, Journal of the American Planning Association, v. 55, n. 3, p. 342-346.
- Gottlieb, P. (1995), *Residential amenities, firm location and economic development*, Urban Studies, v. 32, p. 1413-1436.
- Gowdin, P. B. (1997), *Solving congestion (when we must not built roads, increase spending, lose votes, damage the economy or harm the environment, and will never find equilibrium)*, Inaugural Lecture for the Professorship of Transport Policy, University College, London, 23 October.
- Green, K. (1995), *Defending automobility: a critical examination of the environmental and social costs of auto use*, Reason Foundation, Los Angeles.
- Greene, R. P. (1997), *The farmland conversion process in a polynucleated metropolis*, Landscape and Urban Planning, v. 36, n. 4, p. 291-300.
- Hansen, M.; Huang, Y. (1997), *Road supply and traffic in California urban areas*, Transportation Research A, v. 31, n. 3, p. 205-218.
- Haughton, G.; Hunter, C. (1994), *Sustainable cities*, Jessica Kingsley, London.
- Haykin, S. (1994), *Neural Networks: a comprehensive foundation*, Prentice-Hall, New Jersey, 696 p.
- Haykin, S. (1994), *Neural Networks: a comprehensive foundation*. Prentice-Hall, New Jersey, 696 p.
- Howard, E. (1989), *Garden cities of tomorrow*, Faber and Faber, London.
- INE (2001), *Base Geográfica de Referenciação de Informação*, Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, Portugal.

- INE (2002), *Atlas das Cidades de Portugal*, Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, Portugal.
- Kenworthy, J. R. (1996), *Developing sustainable urban transport and land use policies in Asian cities: a global review of automobile dependence with a focus on the role of rail systems*. Keynote address to The Asian Urban Rail Congress 1996, September Hyatt Regency, Singapore 23-25.
- Kenworthy, J. R.; Laube, F. B. (1999a), *Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy*, Transportation Research Part A, , v. 33, p. 691-723.
- Kenworthy, J. R.; Laube, F. B. (1999b), *An international sourcebook of automobile dependence in cities, 1960-1999*, University Press of Colorado.
- Kenworthy, J. R.; Laube, F., Newman, P.; Barter, P. (1997) *Indicators of transport efficiency in 37 global cities – A report for the World Bank*, Sustainable Transport Research Group, Institute of Science and Technology Policy, Murdoch University, Perth, Australia, pp. 29
- Lave, C. (1992), *Cars and demographics*, Acces 1,4-11 University of California Transportation Center, Berkeley, California.
- Litman, T.; Laube, F. (2002), *Automobile dependency and economic development*, Victoria Transport Policy Institute, Institute for Science and Technology Policy, Murdoch University.
- Manning, I. (1978), *The journey to work*, George Allen and Unwin, Sydney.
- Markttest (2002), *Sales index base de dados 2002*.
- Newman, P. W. G.; Kenworthy, J. R. (1989a), *Gasoline consumption and cities: a comparison of U.S. cities with a global survey*. Journal of the American Planning Association, v. 55, n. 1, p. 24-37.
- Newman, P. W. G.; Kenworthy, J. R. (1989b), *Cities and automobile dependence: a source book*, Aldershot, England, Gower Technical, 388 p.
- Newman, P. W. G.; Kenworthy, J. R. (1999), *Sustainability and cities: overcoming automobile dependence*, Washington D.C., Island Press, 442 p.
- Newman, P. W. G. (1992), *The compact city: an Australian perspective*, Built Environment, v. 18, n. 4, p. 285-300.
- Newman, P. W. G.; Hogan, T. (1981), *A review of urban density models: towards a resolution of the conflict between populace and planner*, Human Ecology, p. 269-303.
- Newman, P. W. G. (1992), *The rebirth of the Perth suburban railways*, In: Hedgcok, D.; Ftachel, O. (Eds.), *Urban and regional planning in WA: Historical and critical perspectives*, Paradigm, Perth.

- Newman, P. W. G; Kenworthy, J. R.; Vintila, P. (1992), *Housing, transport and urban form. The development*, Canberra, Australia, p. 161.
- Newman, P. W. G; Kenworthy, J. R.; Vintila, P. (1995). *Can we overcome automobile dependence? Physical planning in an age of urban cynicism*. *Cities*, v. 12, n. 1, p. 53-65.
- Næss, P., (1995), *Urban form and energy use for transport. A Nordic experience*. Ph.D. Thesis. Trondheim, NTH.
- Næss, P.; Sandberg, S. L.; Røe, P. G. (1996), *Energy use for transportation in 22 Nordic towns*, *Scandinavian Housing & Planning Research*, v. 13, p. 79-97.
- Owens, S. (1986), *Energy, planning and urban form*, Pion, London.
- Owens, S. (1992), *Energy, environmental, sustainability and land use planning*, in *European Research in Regional Science 2. Sustainable development and urban form*, ED. M.J. Breheny, Pion, London, pp. 79-105.
- Newman, P. W. G. (1992), *The rebirth of the Perth suburban railways*, In: Hedgcok, D.; Ftachel, O. (Eds.), *Urban and regional planning in WA: Historical and critical perspectives*, Paradigm, Perth.
- Pampolha, V. M. P. (1999), *Espalhamento urbano e consumo de energia para transportes: o caso das capitais brasileiras*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 197 p.
- Pederson, E. O. (1980), *Transportation on cities*, Pergamon, New York.
- Queiroz, F. D. O. (1999), *Um ambiente de redes neurais para Web*, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exactas e da Natureza, Recife.
- Raia Jr., A. A. (2000), *Acessibilidade e mobilidade na estimativa de um índice de potencial de viagens utilizando redes neurais artificiais*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 202 p.
- Rosenblatt, F. (1958), *The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain*.
- Rumelhart, D. E.; Mc. Clelland, J. (1986), *Parallel distributed processing: exploration the microstructure of cognition*, 1,2,3, Cambridge, Bradford Book – MIT Press
- Rumelhart, D. E.; Hinton, G. E.; Williams, R. J. (1986), *Learning representations by backpropagation errors*, *Nature*, n. 323, p. 533-536,
- SACTRA (1994), *Trunk Roads and the generation of traffic*, Department of Transport, United Kingdom, December.
- Sherlock, H. (1991), *Cities are good for us: The case of high densities, friendly streets, local shops and public transport*, Paladim, London.

- Scoffham, E.; Vale, B. (1996), *How compact is sustainable, how sustainable is compact?* In: Jenks, M.; Burton, E.; Williams, K. (Eds.), *The compact city: A sustainable urban form?* Spon, London, pp. 66-73
- Silva, A. N. R. (1990), *Densidades urbanas econômicas: a influência do transporte público*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 103 p.
- Silva, A. N. R. (1993), *O custo do solo urbano ocioso e uma nova sistemática de tributação da propriedade*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 137 p.
- Silva, A. N. R.; Lima, R. S.; Waerden, P. V. (1999), *The Evaluation of Urban Network Patterns with a Global Accessibility Index in a GIS Environment*, Anais do 6th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Veneza, Itália, em CD-ROM.
- Smith, M. (1996), *Neural networks for statistical modeling*, International Thomson Computer Press, Londres, 235 p.
- Snellen, Danielle (2001), *Urban form and activity travel- patterns, an activity-based approach to travel in a spatial context*, Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde.
- Talukadar, D. (1997), *Economic growth and automobile dependence*, Thesis, MIT.
- Talen, E. (2001) *Traditional urbanism meets residential affluence: an analysis of the variability of suburban preference*. *Journal of the American Planning Association*, v. 67, n. 2, p. 199-216.
- Thomas, L.; Cousins W. (1996), *The compact city: a successful, desirable and achievable urban form?* In: Jenks, M.; Burton, E.; Williams, K. (Eds.), *The compact city: A sustainable urban form?* Spon, London, pp. 289-297.
- Wermersch, F. G.; Kawamoto, E. (1999), *Uso de redes neurais artificiais para caracterização do comportamento de escolha do modo de viagem*, Anais do XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, São Carlos, v. 3, p. 31-34.
- Wolstenholme, S. (2001), *Simulador de redes neurais artificiais EasyNN-plus*. Página na Internet: <http://www.easynn.com>.
- Zahavi, Y.; Ryan, J. M. (1980), *Stability of travel components over time*, *Transportation Research Record*, n. 750, p. 19-26.

ANEXOS

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | Energia | Energia/capita | AREA_CIRC/AREA_CID |
|----|----------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|
| | Unidades | MJ | MJ/hab | - |
| | Ano | 1998 | 1998 | 2001 |
| 1 | Abrantes | 889254634 | 21055 | 0.45 |
| 2 | Águeda | 905637283 | 18467 | 0.50 |
| 3 | Albufeira | 824432610 | 26137 | 0.37 |
| 4 | Alcácer do Sal | 520597825 | 36439 | 0.41 |
| 5 | Alcobaça | 1391667208 | 24504 | 0.60 |
| 6 | Almeirim | 1254175287 | 57120 | 0.58 |
| 7 | Amarante | 700219559 | 11743 | 0.38 |
| 8 | Aveiro | 1982799687 | 17937 | 0.45 |
| 9 | Barcelos | 1875076443 | 15357 | 0.39 |
| 10 | Beja | 1000050189 | 27964 | 0.63 |
| 11 | Braga | 2653220093 | 16159 | 0.40 |
| 12 | Bragança | 590072015 | 16980 | 0.40 |
| 13 | Caldas da Rainha | 2003947229 | 41028 | 0.49 |
| 14 | Cantanhede | 1868368699 | 49283 | 0.46 |
| 15 | Cartaxo | 360232772 | 15402 | 0.48 |
| 16 | Castelo Branco | 872408386 | 15660 | 0.40 |
| 17 | Chaves | 815859774 | 18683 | 0.33 |
| 18 | Coimbra | 3028126368 | 20395 | 0.53 |
| 19 | Covilhã | 595736976 | 10930 | 0.27 |
| 20 | Elvas | 1048593494 | 44886 | 0.31 |
| 21 | Entroncamento | 578583301 | 31838 | 0.37 |
| 22 | Esposende | 543576450 | 16311 | 0.40 |
| 23 | Estremoz | 430990983 | 27605 | 0.46 |
| 24 | Évora | 1530449365 | 27076 | 0.47 |
| 25 | Fafe | 849800860 | 16108 | 0.43 |
| 26 | Faro | 2252473549 | 38802 | 0.33 |
| 27 | Figueira da Foz | 1345515454 | 21494 | 0.24 |
| 28 | Fundão | 791059382 | 25127 | 0.22 |
| 29 | Gouveia | 140512115 | 8716 | 0.32 |
| 30 | Guarda | 636652486 | 14442 | 0.45 |
| 31 | Guimarães | 2702120507 | 16933 | 0.34 |
| 32 | Lagoa | 368750263 | 17852 | 0.38 |
| 33 | Lagos | 809410019 | 31870 | 0.35 |
| 34 | Lamego | 575623875 | 20499 | 0.39 |
| 35 | Leiria | 4343867178 | 36238 | 0.55 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 350641007 | 20095 | 0.40 |
| 37 | Mangualde | 789019763 | 37590 | 0.31 |
| 38 | Marco de Canavezes | 748723414 | 14283 | 0.55 |
| 39 | Marinha Grande | 828633504 | 24262 | 0.37 |
| 40 | Miranda do Douro | 188229290 | 23388 | 0.37 |
| 41 | Mirandela | 613063492 | 23816 | 0.26 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 1683160619 | 90600 | 0.56 |
| 43 | Moura | 405493122 | 24442 | 0.61 |
| 44 | Olhão | 545254594 | 13361 | 0.64 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 1081177080 | 15288 | 0.41 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 424576232 | 19201 | 0.49 |
| 47 | Peniche | 670554304 | 24548 | 0.43 |
| 48 | Peso da Régua | 501238879 | 26616 | 0.34 |
| 49 | Pinhel | 147383664 | 13455 | 0.30 |
| 50 | Pombal | 2635335654 | 46809 | 0.23 |
| 51 | Ponte de Sôr | 438943159 | 24198 | 0.38 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | | Energia | Energia/capita | AREA_CIRC/AREA_CID |
|----------|----------------------------|------------|----------------|--------------------|
| Unidades | | MJ | MJ/hab | - |
| Ano | | 1998 | 1998 | 2001 |
| 52 | Portalegre | 420136494 | 16172 | 0.27 |
| 53 | Portimão | 1021022755 | 22782 | 0.35 |
| 54 | Rio Maior | 610489336 | 28919 | 0.33 |
| 55 | Santa Comba Dão | 220402878 | 17670 | 0.42 |
| 56 | Santarém | 2415102528 | 37995 | 0.46 |
| 57 | Santiago do Cacém | 555938050 | 17873 | 0.46 |
| 58 | São João da Madeira | 487136804 | 23085 | 0.56 |
| 59 | Seia | 365596274 | 12990 | 0.63 |
| 60 | Silves | 1082944535 | 32011 | 0.38 |
| 61 | Tavira | 326101569 | 13047 | 0.46 |
| 62 | Tomar | 797999757 | 18555 | 0.63 |
| 63 | Tondela | 377805867 | 12128 | 0.52 |
| 64 | Torres Novas | 1040216519 | 28184 | 0.44 |
| 65 | Torres Vedras | 1574899485 | 21798 | 0.46 |
| 66 | Vale de Cambra | 367361254 | 14814 | 0.48 |
| 67 | Valpaços | 250150582 | 12820 | 0.36 |
| 68 | Vendas Novas | 223046815 | 19197 | 0.35 |
| 69 | Viana do Castelo | 1319157456 | 14884 | 0.35 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 1633887440 | 12808 | 0.34 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 175743334 | 20690 | 0.30 |
| 72 | Vila Real | 742565880 | 14864 | 0.46 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 617410707 | 34385 | 0.41 |
| 74 | Viseu | 2692878687 | 28800 | 0.58 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | FF | PROP_POP | DENS_CID | DENS_CONC |
|----|----------------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Unidades | - | (%) | hab/km2 | hab/km2 |
| | Ano | 2001 | 2001 | 2001 | 2001 |
| 1 | Abrantes | 1.85 | 0.42 | 710.80 | 59.05 |
| 2 | Águeda | 2.16 | 0.30 | 710.88 | 146.26 |
| 3 | Albufeira | 1.82 | 0.43 | 1276.08 | 224.19 |
| 4 | Alcácer do Sal | 1.72 | 0.46 | 1001.91 | 9.51 |
| 5 | Alcobaça | 1.56 | 0.11 | 985.06 | 136.72 |
| 6 | Almeirim | 1.34 | 0.48 | 2136.96 | 98.77 |
| 7 | Amarante | 2.69 | 0.20 | 1249.57 | 197.77 |
| 8 | Aveiro | 2.40 | 0.73 | 975.98 | 182.97 |
| 9 | Barcelos | 1.53 | 0.17 | 3432.45 | 322.92 |
| 10 | Beja | 1.43 | 0.61 | 2931.75 | 31.19 |
| 11 | Braga | 1.97 | 0.67 | 3386.58 | 895.27 |
| 12 | Bragança | 2.14 | 0.58 | 1924.02 | 29.61 |
| 13 | Caldas da Rainha | 1.62 | 0.52 | 1485.68 | 190.80 |
| 14 | Cantanhede | 1.69 | 0.13 | 634.37 | 96.93 |
| 15 | Cartaxo | 1.75 | 0.41 | 1546.03 | 149.36 |
| 16 | Castelo Branco | 1.89 | 0.55 | 2214.87 | 38.70 |
| 17 | Chaves | 2.10 | 0.40 | 1133.86 | 73.85 |
| 18 | Coimbra | 1.62 | 0.68 | 1721.32 | 465.73 |
| 19 | Covilhã | 2.55 | 0.64 | 837.27 | 98.10 |
| 20 | Elvas | 1.75 | 0.65 | 1251.60 | 37.00 |
| 21 | Entroncamento | 1.32 | 0.99 | 1680.08 | 1316.88 |
| 22 | Esposende | 1.39 | 0.28 | 704.06 | 349.32 |
| 23 | Estremoz | 1.54 | 0.49 | 1600.94 | 30.39 |
| 24 | Évora | 2.37 | 0.73 | 3047.16 | 43.27 |
| 25 | Fafe | 1.74 | 0.27 | 2530.43 | 241.01 |
| 26 | Faro | 1.90 | 0.72 | 3657.68 | 288.52 |
| 27 | Figueira da Foz | 2.70 | 0.44 | 1620.58 | 165.13 |
| 28 | Fundão | 2.61 | 0.27 | 2191.53 | 44.95 |
| 29 | Gouveia | 2.25 | 0.23 | 933.20 | 53.63 |
| 30 | Guarda | 1.96 | 0.59 | 1059.47 | 60.48 |
| 31 | Guimarães | 1.86 | 0.33 | 2223.92 | 659.68 |
| 32 | Lagoa | 1.69 | 0.23 | 2688.00 | 232.61 |
| 33 | Lagos | 2.04 | 0.58 | 1812.03 | 119.23 |
| 34 | Lamego | 2.14 | 0.32 | 2035.17 | 169.67 |
| 35 | Leiria | 1.59 | 0.36 | 1085.74 | 211.04 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 2.52 | 0.39 | 541.43 | 24.96 |
| 37 | Mangualde | 2.40 | 0.32 | 516.54 | 95.54 |
| 38 | Marco de Canavezes | 1.81 | 0.17 | 939.04 | 259.63 |
| 39 | Marinha Grande | 1.64 | 0.27 | 2164.24 | 193.39 |
| 40 | Miranda do Douro | 1.99 | 0.24 | 871.20 | 16.49 |
| 41 | Mirandela | 2.34 | 0.42 | 1209.45 | 39.06 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 1.35 | 0.45 | 2372.84 | 15.08 |
| 43 | Moura | 1.33 | 0.51 | 2319.39 | 17.30 |
| 44 | Olhão | 1.61 | 0.61 | 4970.10 | 312.23 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 1.65 | 0.17 | 1671.95 | 433.35 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 1.86 | 0.24 | 573.98 | 94.29 |
| 47 | Peniche | 1.65 | 0.57 | 2255.42 | 351.56 |
| 48 | Peso da Régua | 2.45 | 0.50 | 1906.09 | 194.55 |
| 49 | Pinhel | 2.22 | 0.24 | 1527.96 | 22.61 |
| 50 | Pombal | 2.71 | 0.18 | 941.23 | 89.98 |
| 51 | Ponte de Sôr | 2.52 | 0.40 | 837.71 | 21.61 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | FF | PROP_POP | DENS_CID | DENS_CONC |
|----|----------------------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Unidades | - | (%) | hab/km2 | hab/km2 |
| | Ano | 2001 | 2001 | 2001 | 2001 |
| 52 | Portalegre | 2.33 | 0.59 | 1537.54 | 57.98 |
| 53 | Portimão | 1.70 | 0.74 | 3163.63 | 246.93 |
| 54 | Rio Maior | 2.24 | 0.35 | 843.74 | 77.87 |
| 55 | Santa Comba Dão | 1.59 | 1.00 | 111.41 | 111.37 |
| 56 | Santarém | 1.38 | 0.45 | 991.96 | 113.12 |
| 57 | Santiago do Cacém | 1.73 | 0.17 | 1695.31 | 29.37 |
| 58 | São João da Madeira | 1.30 | 1.00 | 2646.87 | 2637.75 |
| 59 | Seia | 1.34 | 0.20 | 1031.36 | 64.60 |
| 60 | Silves | 1.40 | 0.17 | 1681.50 | 49.80 |
| 61 | Tavira | 1.90 | 0.42 | 999.97 | 41.07 |
| 62 | Tomar | 1.49 | 0.37 | 1308.35 | 122.18 |
| 63 | Tondela | 1.72 | 0.28 | 271.21 | 83.92 |
| 64 | Torres Novas | 1.89 | 0.33 | 1023.45 | 137.05 |
| 65 | Torres Vedras | 1.89 | 0.23 | 1264.43 | 177.47 |
| 66 | Vale de Cambra | 1.69 | 0.31 | 1153.24 | 169.62 |
| 67 | Valpaços | 1.75 | 0.19 | 830.84 | 35.55 |
| 68 | Vendas Novas | 1.99 | 0.82 | 1023.99 | 51.62 |
| 69 | Viana do Castelo | 2.57 | 0.41 | 1353.08 | 278.18 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 1.58 | 0.22 | 1595.21 | 632.77 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 2.29 | 0.33 | 1481.72 | 21.33 |
| 72 | Vila Real | 2.56 | 0.49 | 676.88 | 132.27 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 1.56 | 0.58 | 2821.49 | 290.08 |
| 74 | Viseu | 2.45 | 0.51 | 1399.54 | 184.31 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | AREA_CID | PERIM_CID | Pop_conc | Area_conc |
|----|----------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | Unidades | Km2 | Km | n.º hab. | Km2 |
| | Ano | 2001 | 2001 | 2001 | 2001 |
| 1 | Abrantes | 25.08 | 32.84 | 42235 | 715.30 |
| 2 | Águeda | 20.40 | 34.63 | 49041 | 335.30 |
| 3 | Albufeira | 10.69 | 21.04 | 31543 | 140.70 |
| 4 | Alcácer do Sal | 6.59 | 15.65 | 14287 | 1502.30 |
| 5 | Alcobaça | 6.33 | 13.94 | 56794 | 415.40 |
| 6 | Almeirim | 4.92 | 10.51 | 21957 | 222.30 |
| 7 | Amarante | 9.35 | 29.17 | 59627 | 301.50 |
| 8 | Aveiro | 82.40 | 77.19 | 110544 | 604.15 |
| 9 | Barcelos | 6.01 | 13.33 | 122096 | 378.10 |
| 10 | Beja | 7.39 | 13.78 | 35762 | 1146.50 |
| 11 | Braga | 32.32 | 39.62 | 164193 | 183.40 |
| 12 | Bragança | 10.56 | 24.62 | 34752 | 1173.60 |
| 13 | Caldas da Rainha | 17.04 | 23.67 | 48844 | 256.00 |
| 14 | Cantanhede | 7.89 | 16.86 | 37911 | 391.10 |
| 15 | Cartaxo | 6.15 | 15.40 | 23389 | 156.60 |
| 16 | Castelo Branco | 13.79 | 24.82 | 55709 | 1439.40 |
| 17 | Chaves | 15.46 | 29.31 | 43668 | 591.30 |
| 18 | Coimbra | 58.74 | 44.03 | 148474 | 318.80 |
| 19 | Covilhã | 41.91 | 58.53 | 54506 | 555.60 |
| 20 | Elvas | 12.08 | 21.59 | 23361 | 631.30 |
| 21 | Entroncamento | 10.73 | 15.38 | 18173 | 13.80 |
| 22 | Esposende | 13.06 | 17.85 | 33325 | 95.40 |
| 23 | Estremoz | 4.80 | 11.95 | 15613 | 513.70 |
| 24 | Évora | 13.51 | 30.83 | 56525 | 1306.30 |
| 25 | Fafe | 5.59 | 14.56 | 52757 | 218.90 |
| 26 | Faro | 11.46 | 22.83 | 58051 | 201.20 |
| 27 | Figueira da Foz | 17.12 | 39.66 | 62601 | 379.10 |
| 28 | Fundão | 3.82 | 18.10 | 31482 | 700.40 |
| 29 | Gouveia | 4.03 | 15.98 | 16122 | 300.60 |
| 30 | Guarda | 24.60 | 34.39 | 44084 | 728.90 |
| 31 | Guimarães | 23.46 | 32.02 | 159577 | 241.90 |
| 32 | Lagoa | 1.79 | 8.03 | 20656 | 88.80 |
| 33 | Lagos | 8.10 | 20.57 | 25397 | 213.00 |
| 34 | Lamego | 4.35 | 15.85 | 28081 | 165.50 |
| 35 | Leiria | 39.37 | 35.33 | 119870 | 568.00 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 12.64 | 31.70 | 17449 | 699.20 |
| 37 | Mangualde | 12.96 | 30.67 | 20990 | 219.70 |
| 38 | Marco de Canavezes | 9.63 | 19.94 | 52419 | 201.90 |
| 39 | Marinha Grande | 4.22 | 11.95 | 34153 | 176.60 |
| 40 | Miranda do Douro | 2.25 | 10.61 | 8048 | 488.00 |
| 41 | Mirandela | 8.85 | 24.70 | 25742 | 659.00 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 3.50 | 8.93 | 18578 | 1232.30 |
| 43 | Moura | 3.65 | 9.03 | 16590 | 958.70 |
| 44 | Olhão | 5.01 | 12.75 | 40808 | 130.70 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 7.21 | 15.73 | 70722 | 163.20 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 9.10 | 19.84 | 22112 | 234.50 |
| 47 | Peniche | 6.91 | 15.36 | 27316 | 77.70 |
| 48 | Peso da Régua | 4.91 | 19.25 | 18832 | 96.80 |
| 49 | Pinhel | 1.69 | 10.22 | 10954 | 484.50 |
| 50 | Pombal | 10.66 | 31.31 | 56300 | 625.70 |
| 51 | Ponte de Sôr | 8.75 | 26.44 | 18140 | 839.50 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | Unidades | AREA_CID | PERIM_CID | Pop_conc | Area_conc |
|----------|----------------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| | | Km2 | Km | n.º hab. | Km2 |
| Ano | | 2001 | 2001 | 2001 | 2001 |
| 52 | Portalegre | 9.91 | 25.97 | 25980 | 448.10 |
| 53 | Portimão | 10.41 | 19.43 | 44818 | 181.50 |
| 54 | Rio Maior | 8.78 | 23.49 | 21110 | 271.10 |
| 55 | Santa Comba Dão | 111.95 | 59.78 | 12473 | 112.00 |
| 56 | Santarém | 28.99 | 26.40 | 63563 | 561.90 |
| 57 | Santiago do Cacém | 3.09 | 10.78 | 31105 | 1059.10 |
| 58 | São João da Madeira | 7.97 | 12.99 | 21102 | 8.00 |
| 59 | Seia | 5.53 | 11.20 | 28145 | 435.70 |
| 60 | Silves | 3.49 | 9.24 | 33830 | 679.30 |
| 61 | Tavira | 10.61 | 21.90 | 24995 | 608.60 |
| 62 | Tomar | 12.05 | 18.27 | 43007 | 352.00 |
| 63 | Tondela | 32.34 | 34.64 | 31152 | 371.20 |
| 64 | Torres Novas | 11.88 | 23.11 | 36908 | 269.30 |
| 65 | Torres Vedras | 13.02 | 24.14 | 72250 | 407.10 |
| 66 | Vale de Cambra | 6.56 | 15.37 | 24798 | 146.20 |
| 67 | Valpaços | 4.51 | 13.15 | 19512 | 548.80 |
| 68 | Vendas Novas | 9.26 | 21.51 | 11619 | 225.10 |
| 69 | Viana do Castelo | 26.72 | 47.08 | 88628 | 318.60 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 17.49 | 23.41 | 127567 | 201.60 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 1.91 | 11.23 | 8494 | 398.20 |
| 72 | Vila Real | 36.17 | 54.48 | 49957 | 377.70 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 3.72 | 10.66 | 17956 | 61.90 |
| 74 | Viseu | 33.77 | 50.37 | 93502 | 507.30 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | Pop_cid | Tax_desemp | Dim_soc | R_VIARIA |
|----|----------------------|----------|------------|---------------------------|----------|
| | Unidades | n.º hab. | (%) | nº. de pessoas ao serviço | Km |
| | Ano | 2001 | 2001 | 1999 | 1996 |
| 1 | Abrantes | 17830 | 4.30 | 8.30 | 536 |
| 2 | Águeda | 14504 | 2.70 | 12.00 | 926 |
| 3 | Albufeira | 13646 | 5.00 | 7.30 | 310 |
| 4 | Alcácer do Sal | 6602 | 5.50 | 5.80 | 108 |
| 5 | Alcobaça | 6232 | 3.20 | 9.80 | 541 |
| 6 | Almeirim | 10520 | 5.10 | 8.30 | 189 |
| 7 | Amarante | 11681 | 4.60 | 12.50 | 515 |
| 8 | Aveiro | 80420 | 3.90 | 8.57 | 738 |
| 9 | Barcelos | 20625 | 3.60 | 10.80 | 565 |
| 10 | Beja | 21658 | 5.30 | 5.40 | 223 |
| 11 | Braga | 109460 | 4.60 | 10.60 | 224 |
| 12 | Bragança | 20310 | 4.00 | 5.10 | 361 |
| 13 | Caldas da Rainha | 25314 | 4.80 | 9.40 | 504 |
| 14 | Cantanhede | 5004 | 4.20 | 7.00 | 461 |
| 15 | Cartaxo | 9507 | 4.20 | 6.80 | 204 |
| 16 | Castelo Branco | 30537 | 3.60 | 7.60 | 549 |
| 17 | Chaves | 17535 | 5.30 | 6.90 | 529 |
| 18 | Coimbra | 101108 | 3.90 | 7.40 | 715 |
| 19 | Covilhã | 35089 | 4.70 | 9.20 | 171 |
| 20 | Elvas | 15115 | 4.60 | 5.10 | 175 |
| 21 | Entroncamento | 18035 | 4.80 | 5.40 | 69 |
| 22 | Esposende | 9198 | 3.00 | 14.20 | 275 |
| 23 | Estremoz | 7682 | 3.60 | 6.90 | 180 |
| 24 | Évora | 41164 | 3.70 | 7.70 | 196 |
| 25 | Fafe | 14144 | 3.50 | 9.50 | 507 |
| 26 | Faro | 41934 | 3.70 | 6.30 | 155 |
| 27 | Figueira da Foz | 27742 | 4.90 | 7.80 | 676 |
| 28 | Fundão | 8369 | 3.10 | 9.50 | 238 |
| 29 | Gouveia | 3759 | 3.60 | 8.80 | 125 |
| 30 | Guarda | 26062 | 3.60 | 6.10 | 678 |
| 31 | Guimarães | 52182 | 3.80 | 13.00 | 598 |
| 32 | Lagoa | 4806 | 4.00 | 6.10 | 305 |
| 33 | Lagos | 14675 | 4.50 | 4.40 | 171 |
| 34 | Lamego | 8848 | 4.90 | 7.20 | 165 |
| 35 | Leiria | 42747 | 3.00 | 7.40 | 1636 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 6844 | 3.40 | 4.20 | 205 |
| 37 | Mangualde | 6695 | 2.40 | 15.50 | 337 |
| 38 | Marco de Canavezes | 9042 | 5.30 | 10.10 | 857 |
| 39 | Marinha Grande | 9130 | 3.80 | 10.40 | 287 |
| 40 | Miranda do Douro | 1960 | 2.50 | 2.90 | 218 |
| 41 | Mirandela | 10703 | 4.50 | 4.60 | 394 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 8298 | 3.20 | 7.60 | 219 |
| 43 | Moura | 8459 | 7.70 | 7.30 | 178 |
| 44 | Olhão | 24880 | 5.50 | 6.10 | 133 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 12047 | 2.90 | 12.30 | 193 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 5222 | 2.10 | 10.70 | 207 |
| 47 | Peniche | 15595 | 6.80 | 7.30 | 127 |
| 48 | Peso da Régua | 9353 | 4.50 | 5.70 | 92 |
| 49 | Pinhel | 2578 | 2.00 | 4.80 | 225 |
| 50 | Pombal | 10031 | 2.30 | 7.00 | 568 |
| 51 | Ponte de Sôr | 7331 | 3.80 | 9.10 | 97 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | Pop_cid | Tax_desemp | Dim_soc | R_VIARIA |
|----|----------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|-----------------|
| | Unidades | n.º hab. | (%) | nº. de pessoas ao serviço | Km |
| | Ano | 2001 | 2001 | 1999 | 1996 |
| 52 | Portalegre | 15238 | 4.00 | 9.30 | 307 |
| 53 | Portimão | 32948 | 5.40 | 5.30 | 116 |
| 54 | Rio Maior | 7412 | 4.90 | 8.20 | 259 |
| 55 | Santa Comba Dão | 12473 | 4.30 | 5.70 | 198 |
| 56 | Santarém | 28760 | 4.70 | 5.80 | 371 |
| 57 | Santiago do Cacém | 5240 | 4.90 | 4.60 | 442 |
| 58 | São João da Madeira | 21102 | 3.20 | 13.40 | 77 |
| 59 | Seia | 5702 | 3.50 | 7.50 | 314 |
| 60 | Silves | 5869 | 4.00 | 7.20 | 533 |
| 61 | Tavira | 10607 | 5.00 | 3.90 | 461 |
| 62 | Tomar | 15764 | 4.70 | 6.30 | 448 |
| 63 | Tondela | 8772 | 4.20 | 10.30 | 1094 |
| 64 | Torres Novas | 12156 | 3.60 | 9.00 | 263 |
| 65 | Torres Vedras | 16461 | 4.40 | 6.70 | 380 |
| 66 | Vale de Cambra | 7565 | 2.60 | 11.40 | 547 |
| 67 | Valpaços | 3751 | 6.10 | 5.30 | 258 |
| 68 | Vendas Novas | 9485 | 3.90 | 11.30 | 91 |
| 69 | Viana do Castelo | 36148 | 4.90 | 8.80 | 661 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 27900 | 3.80 | 10.40 | 384 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 2823 | 4.40 | 3.90 | 120 |
| 72 | Vila Real | 24481 | 3.90 | 5.70 | 294 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 10489 | 5.90 | 5.40 | 73 |
| 74 | Viseu | 47261 | 3.90 | 7.30 | 1022 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | Frota_PP | Frota_Total | DIST_SEDE | ECAE1R2 | |
|----------|----------------------|---------------|-----------|----------------|------|
| Unidades | Unidade (n.º) | Unidade (n.º) | Tempo | nº. de pessoas | |
| Ano | 1998 | 1998 | 1998 | 1998 | |
| 1 | Abrantes | 10 | 19122 | 0.85 | 274 |
| 2 | Águeda | 15 | 24567 | 0.38 | 70 |
| 3 | Albufeira | 35 | 22964 | 0.65 | 161 |
| 4 | Alcácer do Sal | 7 | 6647 | 0.65 | 734 |
| 5 | Alcobaça | 27 | 32982 | 0.39 | 342 |
| 6 | Almeirim | 13 | 11456 | 0.10 | 611 |
| 7 | Amarante | 21 | 21189 | 1.10 | 91 |
| 8 | Aveiro | 64 | 54547 | 0.08 | 1515 |
| 9 | Barcelos | 30 | 44818 | 0.33 | 331 |
| 10 | Beja | 14 | 18206 | 0.00 | 801 |
| 11 | Braga | 238 | 66904 | 0.00 | 234 |
| 12 | Bragança | 25 | 15066 | 0.00 | 35 |
| 13 | Caldas da Rainha | 41 | 26106 | 0.70 | 172 |
| 14 | Cantanhede | 15 | 18314 | 0.48 | 80 |
| 15 | Cartaxo | 10 | 13074 | 0.20 | 412 |
| 16 | Castelo Branco | 167 | 28188 | 0.00 | 383 |
| 17 | Chaves | 84 | 18337 | 1.07 | 141 |
| 18 | Coimbra | 397 | 79799 | 0.00 | 192 |
| 19 | Covilhã | 13 | 22770 | 0.98 | 189 |
| 20 | Elvas | 5 | 11542 | 1.12 | 532 |
| 21 | Entroncamento | 10 | 8101 | 0.66 | 12 |
| 22 | Esposende | 18 | 12905 | 0.58 | 14 |
| 23 | Estremoz | 9 | 8100 | 0.56 | 565 |
| 24 | Évora | 25 | 29580 | 0.00 | 1398 |
| 25 | Fafe | 14 | 19139 | 0.65 | 44 |
| 26 | Faro | 261 | 34440 | 0.00 | 600 |
| 27 | Figueira da Foz | 24 | 30674 | 0.60 | 449 |
| 28 | Fundão | 46 | 13082 | 0.67 | 242 |
| 29 | Gouveia | 9 | 7046 | 0.87 | 65 |
| 30 | Guarda | 64 | 20375 | 0.00 | 165 |
| 31 | Guimarães | 131 | 64512 | 0.37 | 240 |
| 32 | Lagoa | 17 | 10336 | 0.90 | 86 |
| 33 | Lagos | 15 | 12284 | 1.33 | 137 |
| 34 | Lamego | 31 | 11264 | 1.17 | 149 |
| 35 | Leiria | 50 | 68534 | 0.00 | 630 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 7 | 6995 | 0.72 | 30 |
| 37 | Mangualde | 5 | 9781 | 0.32 | 99 |
| 38 | Marco de Canaveses | 49 | 16339 | 1.21 | 76 |
| 39 | Marinha Grande | 8 | 18422 | 0.17 | 11 |
| 40 | Miranda do Douro | 1 | 3451 | 1.66 | 11 |
| 41 | Mirandela | 7 | 10101 | 1.10 | 81 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 9 | 8818 | 0.40 | 788 |
| 43 | Moura | 8 | 6796 | 1.03 | 348 |
| 44 | Olhão | 13 | 17523 | 0.13 | 637 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 92 | 30949 | 0.46 | 229 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 26 | 10799 | 1.33 | 87 |
| 47 | Peniche | 8 | 11772 | 1.09 | 313 |
| 48 | Peso da Régua | 6 | 7229 | 0.45 | 281 |
| 49 | Pinhel | 17 | 5368 | 0.51 | 54 |
| 50 | Pombal | 32 | 28378 | 0.30 | 94 |
| 51 | Ponte de Sôr | 4 | 7970 | 0.87 | 594 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| | Variável | Frota_PP | Frota_Total | DIST_SEDE | ECAE1R2 |
|----|----------------------------|-----------------|--------------------|------------------|----------------|
| | Unidades | Unidade (n.º) | Unidade (n.º) | Tempo | nº. de pessoas |
| | Ano | 1998 | 1998 | 1998 | 1998 |
| 52 | Portalegre | 8 | 13010 | 0.00 | 215 |
| 53 | Portimão | 105 | 24393 | 1.03 | 183 |
| 54 | Rio Maior | 9 | 12088 | 0.55 | 204 |
| 55 | Santa Comba Dão | 8 | 5411 | 0.49 | 64 |
| 56 | Santarém | 27 | 35384 | 0.00 | 546 |
| 57 | Santiago do Cacém | 13 | 16724 | 0.93 | 445 |
| 58 | São João da Madeira | 24 | 18597 | 0.60 | 2 |
| 59 | Seia | 18 | 12163 | 1.13 | 32 |
| 60 | Silves | 15 | 16269 | 0.93 | 279 |
| 61 | Tavira | 9 | 11048 | 0.48 | 202 |
| 62 | Tomar | 22 | 23708 | 0.96 | 355 |
| 63 | Tondela | 24 | 13042 | 0.30 | 349 |
| 64 | Torres Novas | 183 | 19773 | 0.78 | 470 |
| 65 | Torres Vedras | 40 | 39212 | 0.97 | 635 |
| 66 | Vale de Cambra | 5 | 11574 | 0.72 | 18 |
| 67 | Valpaços | 7 | 6262 | 1.37 | 20 |
| 68 | Vendas Novas | 5 | 5678 | 0.69 | 212 |
| 69 | Viana do Castelo | 102 | 38381 | 0.00 | 470 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 72 | 55280 | 0.38 | 185 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 4 | 3242 | 1.58 | 131 |
| 72 | Vila Real | 71 | 21242 | 0.00 | 114 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 5 | 7423 | 0.87 | 148 |
| 74 | Viseu | 139 | 43871 | 0.00 | 106 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | Unidades | ECAE2R2 | ECAE3R2 | ECAE4R2 | ECAE5R2 |
|----------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 |
| 1 | Abrantes | 24 | 2313 | 216 | 1076 |
| 2 | Águeda | 33 | 15022 | 39 | 1148 |
| 3 | Albufeira | 19 | 351 | 33 | 648 |
| 4 | Alcácer do Sal | 5 | 532 | 24 | 233 |
| 5 | Alcobaça | 300 | 10591 | 62 | 854 |
| 6 | Almeirim | 12 | 1000 | 36 | 911 |
| 7 | Amarante | 20 | 2824 | 68 | 3012 |
| 8 | Aveiro | 202 | 14600 | 226 | 2025 |
| 9 | Barcelos | 23 | 24958 | 97 | 3208 |
| 10 | Beja | 30 | 648 | 136 | 403 |
| 11 | Braga | 236 | 20002 | 231 | 6615 |
| 12 | Bragança | 34 | 462 | 80 | 1130 |
| 13 | Caldas da Rainha | 102 | 3525 | 148 | 558 |
| 14 | Cantanhede | 80 | 2351 | 40 | 579 |
| 15 | Cartaxo | 8 | 1511 | 24 | 224 |
| 16 | Castelo Branco | 12 | 3964 | 87 | 1415 |
| 17 | Chaves | 102 | 1091 | 40 | 838 |
| 18 | Coimbra | 140 | 8936 | 441 | 3216 |
| 19 | Covilhã | 229 | 6385 | 73 | 1089 |
| 20 | Elvas | 75 | 478 | 20 | 355 |
| 21 | Entroncamento | 0 | 1236 | 73 | 317 |
| 22 | Esposende | 73 | 2705 | 15 | 1272 |
| 23 | Estremoz | 154 | 499 | 28 | 550 |
| 24 | Évora | 126 | 2328 | 134 | 1018 |
| 25 | Fafe | 7 | 6804 | 35 | 900 |
| 26 | Faro | 53 | 1171 | 156 | 1198 |
| 27 | Figueira da Foz | 73 | 5406 | 86 | 1576 |
| 28 | Fundão | 47 | 2278 | 17 | 627 |
| 29 | Gouveia | 2 | 957 | 8 | 360 |
| 30 | Guarda | 16 | 2554 | 82 | 871 |
| 31 | Guimarães | 236 | 45156 | 225 | 2878 |
| 32 | Lagoa | 64 | 343 | 4 | 530 |
| 33 | Lagos | 0 | 273 | 41 | 803 |
| 34 | Lamego | 11 | 311 | 68 | 851 |
| 35 | Leiria | 217 | 11945 | 183 | 3877 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 23 | 129 | 15 | 238 |
| 37 | Mangualde | 113 | 2755 | 17 | 518 |
| 38 | Marco de Canavezes | 988 | 4119 | 60 | 2757 |
| 39 | Marinha Grande | 24 | 8644 | 20 | 191 |
| 40 | Miranda do Douro | 9 | 144 | 64 | 100 |
| 41 | Mirandela | 0 | 635 | 24 | 197 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 0 | 275 | 17 | 376 |
| 43 | Moura | 12 | 268 | 21 | 182 |
| 44 | Olhão | 111 | 1405 | 37 | 490 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 39 | 18288 | 52 | 1402 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 13 | 2681 | 12 | 1076 |
| 47 | Peniche | 0 | 884 | 27 | 201 |
| 48 | Peso da Régua | 4 | 268 | 136 | 424 |
| 49 | Pinhel | 45 | 939 | 15 | 252 |
| 50 | Pombal | 302 | 3516 | 20 | 2144 |
| 51 | Ponte de Sôr | 5 | 890 | 19 | 499 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | Unidades | ECAE2R2 | ECAE3R2 | ECAE4R2 | ECAE5R2 |
|----------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 |
| 52 | Portalegre | 26 | 1988 | 92 | 369 |
| 53 | Portimão | 16 | 580 | 66 | 1103 |
| 54 | Rio Maior | 218 | 1948 | 17 | 295 |
| 55 | Santa Comba Dão | 3 | 584 | 14 | 342 |
| 56 | Santarém | 200 | 3565 | 215 | 944 |
| 57 | Santiago do Cacém | 43 | 492 | 28 | 295 |
| 58 | São João da Madeira | 0 | 8276 | 29 | 360 |
| 59 | Seia | 19 | 1797 | 187 | 735 |
| 60 | Silves | 0 | 651 | 54 | 598 |
| 61 | Tavira | 20 | 216 | 54 | 468 |
| 62 | Tomar | 31 | 2507 | 190 | 862 |
| 63 | Tondela | 22 | 1816 | 41 | 964 |
| 64 | Torres Novas | 7 | 3395 | 34 | 451 |
| 65 | Torres Vedras | 50 | 4706 | 111 | 1380 |
| 66 | Vale de Cambra | 0 | 4493 | 10 | 457 |
| 67 | Valpaços | 9 | 89 | 5 | 218 |
| 68 | Vendas Novas | 0 | 1157 | 9 | 264 |
| 69 | Viana do Castelo | 60 | 9287 | 138 | 2548 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 11 | 32363 | 139 | 3416 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 23 | 171 | 9 | 95 |
| 72 | Vila Real | 154 | 1317 | 122 | 1341 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 0 | 580 | 22 | 282 |
| 74 | Viseu | 80 | 3531 | 154 | 3443 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | Unidades | ECAE6R2 | ECAE7R2 | ECAE8R2 | ECAE9R2 |
|----------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | nº. de pessoas | nº. de pessoas | nº. de pessoas | nº. de pessoas |
| | | 1998 | 1998 | 1998 | 1998 |
| 1 | Abrantes | 2111 | 315 | 418 | 589 |
| 2 | Águeda | 2757 | 218 | 463 | 598 |
| 3 | Albufeira | 8892 | 478 | 1160 | 534 |
| 4 | Alcácer do Sal | 538 | 41 | 334 | 185 |
| 5 | Alcobaça | 2980 | 333 | 559 | 801 |
| 6 | Almeirim | 1106 | 236 | 336 | 293 |
| 7 | Amarante | 2091 | 193 | 322 | 465 |
| 8 | Aveiro | 8658 | 1393 | 2345 | 1877 |
| 9 | Barcelos | 4131 | 386 | 569 | 904 |
| 10 | Beja | 3037 | 356 | 636 | 996 |
| 11 | Braga | 11859 | 1518 | 3100 | 3702 |
| 12 | Bragança | 1905 | 206 | 424 | 663 |
| 13 | Caldas da Rainha | 3565 | 429 | 1169 | 887 |
| 14 | Cantanhede | 1876 | 253 | 318 | 555 |
| 15 | Cartaxo | 1191 | 127 | 188 | 236 |
| 16 | Castelo Branco | 2985 | 550 | 619 | 968 |
| 17 | Chaves | 2079 | 317 | 368 | 314 |
| 18 | Coimbra | 12349 | 3465 | 4274 | 4042 |
| 19 | Covilhã | 2395 | 300 | 481 | 796 |
| 20 | Elvas | 1691 | 144 | 232 | 393 |
| 21 | Entroncamento | 1005 | 1147 | 169 | 387 |
| 22 | Esposende | 896 | 72 | 729 | 424 |
| 23 | Estremoz | 947 | 88 | 160 | 305 |
| 24 | Évora | 4640 | 602 | 1344 | 1706 |
| 25 | Fafe | 1390 | 67 | 269 | 408 |
| 26 | Faro | 6437 | 2379 | 2550 | 1760 |
| 27 | Figueira da Foz | 2979 | 715 | 1292 | 1135 |
| 28 | Fundão | 1711 | 225 | 217 | 561 |
| 29 | Gouveia | 439 | 74 | 106 | 221 |
| 30 | Guarda | 2700 | 405 | 598 | 999 |
| 31 | Guimarães | 7759 | 709 | 1683 | 1970 |
| 32 | Lagoa | 2058 | 93 | 639 | 428 |
| 33 | Lagos | 2570 | 223 | 606 | 450 |
| 34 | Lamego | 842 | 141 | 198 | 332 |
| 35 | Leiria | 9748 | 1111 | 2374 | 2257 |
| 36 | Macedo de Cavaleiros | 535 | 36 | 95 | 208 |
| 37 | Mangualde | 802 | 556 | 181 | 218 |
| 38 | Marco de Canavezes | 1330 | 155 | 277 | 274 |
| 39 | Marinha Grande | 1821 | 234 | 497 | 267 |
| 40 | Miranda do Douro | 257 | 17 | 44 | 12 |
| 41 | Mirandela | 984 | 169 | 219 | 352 |
| 42 | Montemor-o-Novo | 715 | 153 | 142 | 366 |
| 43 | Moura | 559 | 27 | 238 | 151 |
| 44 | Olhão | 1609 | 173 | 266 | 399 |
| 45 | Oliveira de Azeméis | 3172 | 548 | 665 | 750 |
| 46 | Oliveira do Hospital | 983 | 118 | 216 | 264 |
| 47 | Peniche | 1418 | 176 | 195 | 286 |
| 48 | Peso da Régua | 904 | 274 | 142 | 312 |
| 49 | Pinhel | 308 | 44 | 50 | 109 |
| 50 | Pombal | 2368 | 763 | 513 | 843 |
| 51 | Ponte de Sôr | 796 | 108 | 159 | 275 |

Dados das 74 cidades incluídas na análise.

| Variável | Unidades | ECAE6R2 | ECAE7R2 | ECAE8R2 | ECAE9R2 |
|----------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 | nº. de pessoas 1998 |
| 52 | Portalegre | 1719 | 236 | 503 | 646 |
| 53 | Portimão | 6667 | 731 | 1241 | 1065 |
| 54 | Rio Maior | 996 | 263 | 235 | 171 |
| 55 | Santa Comba Dão | 460 | 39 | 73 | 91 |
| 56 | Santarém | 4545 | 729 | 1660 | 1194 |
| 57 | Santiago do Cacém | 1158 | 148 | 872 | 368 |
| 58 | São João da Madeira | 1902 | 357 | 881 | 549 |
| 59 | Seia | 909 | 90 | 171 | 392 |
| 60 | Silves | 2429 | 156 | 556 | 380 |
| 61 | Tavira | 1248 | 118 | 197 | 209 |
| 62 | Tomar | 2652 | 299 | 461 | 584 |
| 63 | Tondela | 1158 | 114 | 189 | 266 |
| 64 | Torres Novas | 2076 | 708 | 522 | 633 |
| 65 | Torres Vedras | 5264 | 600 | 968 | 1463 |
| 66 | Vale de Cambra | 785 | 92 | 194 | 138 |
| 67 | Valpaços | 328 | 39 | 78 | 85 |
| 68 | Vendas Novas | 741 | 91 | 81 | 204 |
| 69 | Viana do Castelo | 3961 | 752 | 849 | 1133 |
| 70 | Vila Nova de Famalicão | 5305 | 700 | 1420 | 1762 |
| 71 | Vila Nova de Foz Côa | 185 | 37 | 44 | 43 |
| 72 | Vila Real | 2837 | 417 | 749 | 543 |
| 73 | Vila Real de Santo António | 1589 | 162 | 228 | 352 |
| 74 | Viseu | 6828 | 629 | 1391 | 1782 |

